

ZIENTZIA ETA TEKNOLOGIA FAKULTATEA

INGENIARITZA KIMIKOA SAILA

**PARTIKULA FINEN TRATAMENDURAKO
ITURRI BILGAILUDUN OHANTZE KONIKOEN
HIDRODINAMIKA**

DOKTOREGO TESIA

Egilea

MIKEL TELLABIDE VECINA

2020ko Urtarrila

ESKER ONAK

Lan hau lagun askoren parte hartzearen emaitza da eta bidegabea izango litzateke hauek guztiak ez aipatzea eta eskertzea. Hortaz, hurrengo lerroetan aipamen berezia egin nahi nuke euren laguntza eskertzeko.

Hasteko, tesiaren zuzendari diren Martin Olazar eta Haritz Altzibar doktoreak eskertu nahi nituzke. Hasieratik (ikasketak bukatu aurretik) nigan izan zenuten eta gaur egun duzuen konfiantza eskertu nahi nizueke. Gainera, urte hauetan guztietan niretzat izan duzuen denbora guztia eta emandako tratua ezin hobea bereziki dut gogoan. Zinez, mila esker.

Tesi honen ia bilakaera guztia 07 laborategian izan da eta bertako kideen laguntza ezin utzi aipatu gabe. Eskerrik beroenak Idoia, Iris, Aitor Atxutegi, Enara, Juan Fernando, Ronaldo eta Maria Eugenia, egunerokotasunean izan ditudan arazo ezberdinen aurrean emandako aholku eta laguntzatik.

Bestalde, Novattia-ko taldea ere ezin ahantzi: Koke, Aitor Pablos, Javi eta Xabi. Tesia garaiz bukatu ahal izateko izan duzuen prestasuna paregabea izan baita.

Laborategian gradu amaierako lana egin duten ikasleei ere aipamen txiki bat ere egin nahi nieke: Alvaro, Aitor Cortina eta Asier.

Azkenik, etxeakoak eta lagunak eskertu nahiko nituzke. Zuen laguntzari esker, lau urteetan zeharreko egunerokotasunean tesia laborategitik kanpo ahaztu eta bizitzan aurrera egin ahal izan dut.

Tesi hau Espainiako Hezkuntza, Kultura eta Kirola Saileko (FPU14/05814) bekari esker egin ahal izan da.

AURKIBIDEA

Helburuak	v
1. SARRERA	1
1.1 ITURRI OHANTZEAK	3
1.1.1 Iturri ohantzearen hastapena	3
1.1.2 Iturri ohantzearen ezaugarri orokorrak	4
1.1.3 Iturri ohantzearen abantailak eta mugak	7
1.1.4 Iturri ohantzearen aplikazioak	10
1.1.5 Iturri ohantze konikoa	12
1.2 ITURRI OHANTZEAREN ALDAERAK	19
1.2.1 Erdiko hodedun iturri ohantzea	19
1.2.2 Iturri bilgailudun iturri ohantzea	24
1.3 PARTIKULEN JARRAIPENERAKO TEKNIKAK	29
1.3.1 Teknika ez intrusiboak	29
1.3.2 Teknika intrusiboak	34
1.4 ITURRI OHANTZEAREN ESKALA HANDITZEA	37
2. ATAL ESPERIMENTALA	41
2.1 PILOTU ESKALAKO EKIPOAREN DESKRIBAPENA	43
2.1.1 Kontaktoreak	47
2.1.2 Erdiko hodiak	48
2.1.3 Iturri bilgailua	51
2.1.4 Ekipoko neurgailuen kalibraketa	53
2.1.5 Kontaktore hutsaren karga galera	55
2.2 PARTIKULEN JARRAIPENERAKO SISTEMA OPTIKOA	58
2.2.1 Sistema optikoa	58
2.2.2 Desplazamendu sistema	62
2.3 MATERIALAK	64
2.3.1 Harea	64
2.3.2 Pinu zerrautsa	67

3. ITURRI BILGAILUA ETA ERDIKO HODIA DUTEN ITURRI OHANTZE KONIKOEN AZTERKETA HIDRODINAMIkoa	69
3.1 ESPERIMENTUEN DISEINUA	73
3.2 PROZEDURA ESPERIMENTALA	78
3.3 EMAITZAK	81
3.3.1 Iturri bilgailudun iturri ohantzeen kurba karakteristikoak	81
3.3.2 Iturri bilgailuaren posizio optimoaren azterketa	95
3.3.3 Faktoreen eragina kurba karakteristikoetan	101
3.3.4 Faktoreen eraginaren analisi estatistikoa	106
3.3.5 Faktore esanguratsuenen eraginaren adierazpen grafikoa	130
3.3.6 Faktore esanguratsu komunen eragina parametro hidrodinamikoetan	152
3.3.7 Konfigurazio motaren eragina hidrodinamikan	157
3.4 KORRELAZIO HIDRODINAMIkoAK	160
3.4.1 Iturkuntzarako abiadura minimoa	161
3.5 OPERAZIO EGONKORREKO MUGAK	195
3.5.1 Hodirik gabeko sistemak	199
3.5.2 Irekiduradun hodia	200
4. IRUDIEN BIDEZKO PARTIKULEN JARRAIPENA	203
4.1 SISTEMA OPTIKOAK ETA BERAIEEN OINARRIA	207
4.2 ESPERIMENTUEN DISEINUA	212
4.3 PROZEDURA ESPERIMENTALA	219
4.4 PARTIKULEN JARRAIPENERAKO METODOAK	222
4.4.1 Gune dentsorako kodea (Farneback-en metodoa)	225
4.4.2 Gune diluiturako kodea	234
4.5 SISTEMA OPTIKOAREN KALIBRAKETA	245
4.5.1 Distantzia optikoaren kalibraketa	245
4.5.2 Espaziagailuaren posizioaren kalibraketa	247
4.5.3 Gune dentsoko kodearen kalibraketa	249
4.5.4 Gune diluituko kodearen kalibraketa	255
4.6 IRUDIEN BIDEZKO PARTIKULEN JARRAIPENAREN EMAITZAK	257
4.6.1 Abiadura oszilazioak	257
4.6.2 Profil erradialak	261
4.6.3 Profil Axialak	265
4.6.4 Iturgune/iturriaren forma	266
4.6.5 Irekiduradun hodian irekidura portzentaiaren eragina	270

4.6.6	Airearen abiaduraren eragina	274
4.6.7	Iturri ohandze konikoaren abiadura mapak	281
4.6.8	Solidoaren eragina abiaduran	286
5.	LABURPENA	293
6.	ONDORIOAK	299
	NOMENKLATURA	311
	BIBLIOGRAFIA	317

Helburuak

Iturri ohandze erregimena gas-solido kontaktu mota bat da, eta ohandze finko zein fluidizatuen aldean oso erakargarriak diren abantailak ditu. Hala ere, gas-solido tekniken artean berriena da eta gaur egun ikerketa fasean dago. Izan ere, orain arte ikerketa asko burutu diren arren, teknika honen hidrodinamikaren ezagutzan hutsune garrantzitsuak daude oraindik. Hori dela eta, eskala handitzea da teknologia honen muga garrantzitsua.

Eskala handitzearen arazoari aurre egiteko hainbat proposamen ezberdin daude bibliografian, hala nola, iturri ohandzearen aldaerak (irekiduradun iturri ohandze laukizuzena), iturri anitzeko ohandzeak edo erdiko hodiak. Hala ere, oraindik ez dago argi zein den jarraitu beharreko metodologia iturri ohandzearen eskala handitzeko. CFD (Computational Fluid Dynamics) teknika ere oso lagungarria da helburu honetarako, baina aldagai askoren menpekota da eta datu esperimentalak beharrezkoak dira proposaturiko modeloak balioztatzeko.

Gure ikerketa taldeak hogeita hamar urte baino gehiago daramatza iturri ohandze teknologiaren azterketan. Ohiko iturri ohandzeetan eta batez ere iturri ohandze konikoetan oinarritu da orain arte buruturiko ikerkuntza. Teknologia honen hidrodinamika aztertzeaz gain, material ezberdinak erabiliz lehorketa, errektuntza, pirolisia eta erreformatua bezalako aplikazioen ikerketa ere egin da. Modu honetan, frogatua geratu da iturri ohandzeen bideragarritasuna operazio fisiko zein kimikoetan.

Iturri ohandze erregimena partikula handiekin lan egiteko da bereziki aproposa, baita partikula itsaskor eta irregularrekin ere. Hala ere, zailtasunak ditu partikula finekin operatzeko eta kasu hauetan beharrezkoa da erdiko hodiak erabiltzea. Erdiko gailu hauek diseinua erraztu egiten dute eta malgutasun handia ematen diete iturri ohandzeei, baina gas-solido kontaktua murriztu egiten dute.

Zentzu honetan, gure ikerketa taldeak aurrerapen garrantzitsuak egin ditu irekiduradun hodia eta iturri bilgailua bezalako barne gailuetan oinarrituta. Bi barne gailu hauek gure ikerketa taldean proposatu eta garaturikoak dira eta maila handi

batean partikula finen operazioa hobetzen dute. Ikerketa ugari burutu dira irekiduradun hodia duten ohantzeen geometria aldatuz eta hainbat solido erabiliz. Iturri bilgailuaren kasuan ostera, egin diren ekarpenen artean garrantzitsuenak finen arrastean, lehorketan eta biomasaren gasifikazioa izan dira. Hala ere, Iturri bilgailuaren abantaila garrantzitsuena partikula finen operazio egonkorra ahalbidetzea da, eta sistema hauen hidrodinamikari buruz eginiko azterketak banaka batzuk eta azalekoak izan dira. Ezaguna da hidrodinamikari buruzko jakintza ezinbestekoa dena iturri ohantze konikoaren eskala handitzean aurrera egiteko. Hori dela eta, tesi honen xede garrantzitsuena bibliografiako hutsune hau betetzea izan da eta, horretarako, hurrengo helburu partzialak ezarri dira:

- Iturri bilgailudun iturri ohantze konikoen hidrodinamika aztertzea konfigurazio eta partikula ezberdinak dituzten ohantzeak erabiliz, hots, hoderik gabekoak eta irekiduradun hodia eta hodi ez-porotsua dutenak. Horretarako, presio galera vs. gasaren abiadura kurba karakteristikoetan oinarritu da.
- Kurba karakteristikoaren bidez, erregimen ezberdinen arteko mugak identifikatzea eta ezartzea konfigurazio bakoitzean.
- Analisi estatistikoaren bidez, kontaktorearen, erdiko hodien zein iturri bilgailuaren geometriak (γ , D_0 , L_H , IP , D_T , H_F , D_F) eta operazio baldintza ezberdinek (H_0 , ρ_s , d_p) puntu karakteristikoetan duten eragina aztertzea, hala nola, iturkuntzarako abiadura minimoan, erabateko iturkuntzarako abiaduran, burbuilazko iturkuntzarako abiaduran eta iturri-jariorako abiadura minimoan.
- Iturkuntzarako abiadura minimoaren kalkulurako bibliografiako korrelazio enpirikoen aplikagarritasuna frogatzea. Desegokiak diren kasuetan, modulu adimentionalen bidezko korrelazio berriak eraiki eta euren egokitasuna balioztatzea.
- Partikula finen funtzionamendu egonkor eta eraginkorrerako baldintzen mugak ezartzea.
- Endoskopioz eta argi jarraituz hornituriko sistema optikoa diseinatzea, eraikitzea eta abiaraztea. Gainera, aipaturiko sistema optikoaren desplazamendu sistema diseinatzea eta eraikitzea.
- Gune dentsoan eta diluituetan lorturiko irudien tratamendurako kodeen eraikuntza.
- Sistema optikoaren eta sorturiko kode ezberdinen kalibraketa eta balidazioa egitea.

- Sistema optikoaren bidez, iturri ohantzearen gune guztietan solidoaren abiaduraren profil erradiala eta axiala neurtzea, iturgunearen forma eta tamaina mugatzea eta iturriaren nukleo/periferia interfasea defenitzea.
- Irekiduradun hodiaren irekidura portzentaiak eta airearen abiadurak solidoaren abiaduraren profil erradialean, axialean eta iturgunearen geometrian duen eragina aztertzea.
- Solidoaren propietate ezberdinek (dentsitateak eta tamainak) abiaduraren profil erradialean eta axialean duten eragina aztertzea.

1. KAPITULUA

SARRERA

1.1	ITURRI OHANTZEAK	3
1.1.1	Iturri ohantzearen hastapena	3
1.1.2	Iturri ohantzearen ezaugarri orokorrak	4
1.1.3	Iturri ohantzearen abantailak eta mugak	7
1.1.4	Iturri ohantzearen aplikazioak	10
1.1.5	Iturri ohantze konikoa	12
1.2	ITURRI OHANTZEAREN ALDAERAK	19
1.2.1	Erdiko hodedun iturri ohantzea	19
1.2.2	Iturri bilgailudun iturri ohantzea	24
1.3	PARTIKULEN JARRAIPENERAKO TEKNIKAK	29
1.3.1	Teknika ez intrusiboak	29
1.3.2	Teknika intrusiboak	34
1.4	ITURRI OHANTZEAREN ESKALA HANDITZEA	37

1.1. ITURRI OHANTZEAK

1.1.1. Iturri ohantzearen hastapena

Iturri ohantzearen teknika, nazioartean “Spouted Bed” bezala ezagutua, solidoaren eta jariakinaren arteko kontaktu mota da. Hasiera batean ohantze fluidizatuaren aldaera gisa kontsideratu zen, baina gaur egun kontaktu mota ezberdin bezala onartzen da.

Historian zehar gertatu diren aurkikuntza asko bezala, iturri ohantzearen asmakizuna zorizkoa edo ustekabekoa izan zen. Mathur eta Gishler zientzialariak ohantze fluidizatuan gari aleen lehorketan ari zirela, banatzailearen erdiko zuloak izan ezik gainerakoak aleekin oztopatuak geratu ziren eta airea banatzailearen erdiko gunetik baino ez zen sartzen ohantzera. Era honetan, gari aleak mugimendu kaotikoa eta zorizkoak izan beharrean mugimendu ziklikoak eta egonkorrak deskribatzen zituzten. Nahiz eta hasiera batean gari aleen fluidizazioa okertzat kontsideratu, lehorketa eraginkorragoa lortzen zela ohartu ziren Mathur eta Gishler zientzialariak [233]. Gertakizun hau 50. hamarkadan gertatu zen Kanadan, Ottawako National Research Council-en.

Teknika berriaren arrakastaren aurrean, iturri ohantzearen lehenengo aplikazioa gariaren lehorketa izan zela esan daiteke, ohantze fluidizatuarekin alderatuz eraginkorragoa baitzen. Izan ere, ohantze fluidizatueta ez bezala, iturri ohantzeek alea hondatu gabe airearen tenperatura altuagoetan lan egitea baimentzen dute operazioaren etekina handia dela [232, 233]. Hori dela eta, gariaren lehorketarako pilotu ereduak eraiki zuten Kanadan [232, 233].

Ondoren, jariakin bezala airea edo ura erabiliz, iturri ohantzeak beste material ezberdinen tratamendurako hasi ziren erabiltzen. Hala, 1962. urtean ezarri ziren Kanadan iturri ohantze teknologiaren lehenengo unitate komertzialak ale eta landareak (dilistak, ilar haziak, liho eta abar) lehorkzeko.

Nahiz eta iturri ohantzearen lehenengo pausuak Kanadan eman ziren, iturkuntza hitza duela mende bat baino gehiagoko Estatu Batuetako patente batean agertu zen lehenengo aldiz. Patente hau Robinson-ek [313] garatu zuen 1879. urtean eta fase diluituko mineralen kiskalketan oinarritzen da. Hala ere, dokumentu honetan ez da ohantzearen hidrodinamikaren inolako erreferentziarik egiten, baina nolabaiteko antzekotasuna du Mathur eta Gishler-ek [232] urte batzuk geroago iturkuntza bezala izendatu zuten fenomenoarekin.

Bestalde, Leva-ren [203] “Fluidization” izeneko liburuan aurki daiteke iturri ohantzei buruzko lehenengo erreferentzia bibliografikoa, bertan aurkeztu baitzen iturri

ohantze teknika. Hala ere, 1966. urtean Zabrodsky-k [404] “Hydrodynamics and heat transfer in fluidized beds” liburuan aipatzen duenez, Sobietar Batasuneko ikerlariak aire-iturri ekipamenduak kanadiarrek baino 20 urte lehenago ezagutu zituzten. Sobietar ikerlariak deskribatu zuten operazioak nolabaiteko antzekotasuna du Mathur eta Gishler-ek ongi definituriko fase trinkoan dagoen iturkuntza hitzarekin. Hala ere, iturkuntza hitza beste zentzu batean erabiltzen zuten. Beraz, bi urte geroago Romankov eta Rashkovskaya-k [314] argitaraturiko liburuan (Drying in suspended state) argitu zen semantika arazoa eta Sobietarren aire-iturkuntza eta kanadiarren iturkuntza terminoa berdina zela frogatu zen.

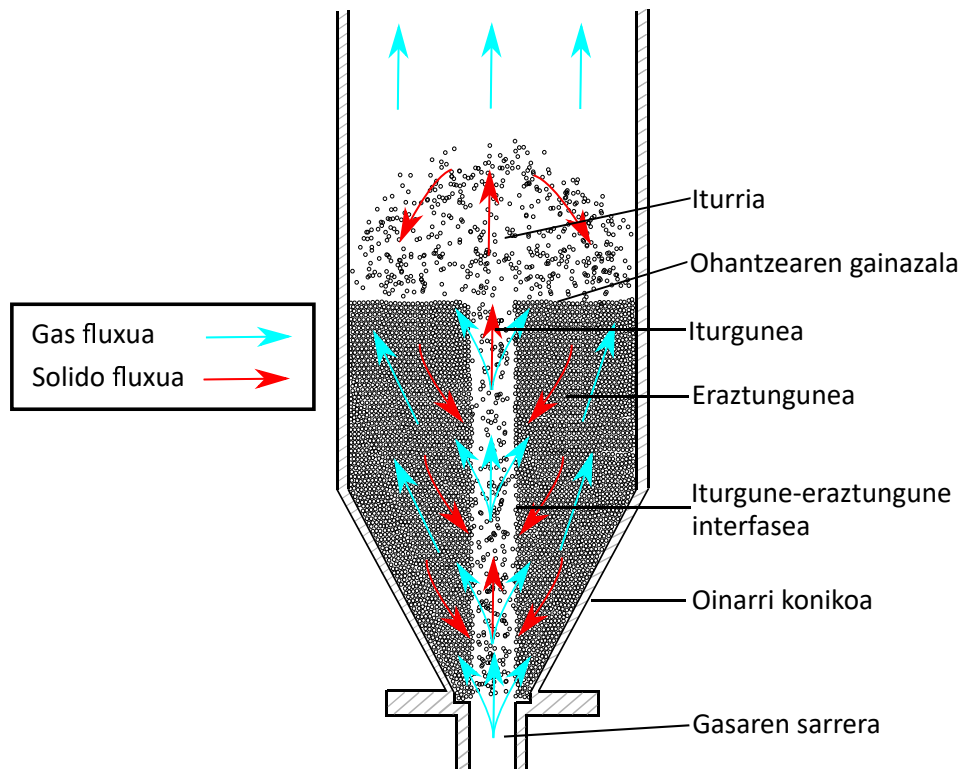
Nahiz eta lehenengo unitateak aleen lehorketan oinarritu ziren, urte gutxitara teknika honen arrakasta ongarrien aleketara [64, 65] ere zabaldu zen. Urteak aurrera joan ahala, iturri ohantze teknika aplikazio ezberdinetara zabaldu da eta gaur egun iturri ohantze geometria ezberdinak aztertzen dira, baita barne gailu ezberdinez horniturikoak ere.

1.1.2. Iturri ohantzearen ezaugarri orokorrak

Iturri ohantze erregimena, ohantze finko eta fluidizatuak bezala, solido eta jariakinaren arteko ukipen metodoa da. Solidoaren ezaugarri fisikoekin eta airearen egoitza denborarekin erlazionaturiko zenbait mugak dituzte ohantze finkoak eta fluidizatuak eta horiek gainditzea da iturri ohantzeen helburua [234].

Iturri ohantzearen ezaugarri nabarmenena eta bereizgarriena solidoek kontaktore barnean duten birzirkulazioa eta mugimendu ziklikoa da. Izan ere, iturri ohantzearen gunearen arabera, solidoaren eta airearen fluxuak kontrakorrontean zirkulatzen dute. Ezaugarri honek ahalbidetzen du material sentikorren lehorketa eraginkorragoa izatea eta tenperatura baxuetan lan egitea. Leva [203] eta Zabrodsky-ren [404] arabera, ohantze hauetan solidoaren eta gasaren fluxuak duen mekanismoa fluidizazioaren desberdina da. Era berean, iturri ohantzearen teknikak partikula handiekin operatzeko duen ahalmena nabarmena da baita partikula txikien iturkuntzarako abantailak ere.

1.1. Irudian erakusten da ohiko iturri ohantzearen geometria eta oinarritzko ezaugarriak.



1.1. Irudia. Iturri ohantze erregimenaren guneak eta ezaugarriak.

1.1. Irudian erakusten den bezala, jariakina (normalean airea) kontaktorearen oinarriaren erdiko gunetik sartzen da eta ohantzeko solidoekin jartzen da kontaktuan. Iturri ohantze erregimena lortu dadin, sarrerako airearen presioak ohantzeak sortzen duena gainditu behar du eta erdiko bidea ireki ohantzean. Bide honi iturgunea deritzo (nazioartean “spout” izenarekin ezagutzen da). Iturgunea kontaktorearen oinarritik ohantzearen gainazalera arte luzatzen da eta bide horretan zehar doa kontaktorerara sartzen den airearen frakzio handiena. Iturgunea iturri ohantzearen gune diluitua da eta aireak solidoak arrastatzen ditu gorantz. Patrose eta Caram-ek [294] bi zonalde ezberdindu zituzten iturgunean: lehenengoa gasa sartzen den gunea, bertan arraste indarrak grabitate indar garbiak baino handiagoak dira; eta bigarrena gasa sartzen den tokitik zentimetro gutxira, bertan arraste indarrak grabitate indarrekin parekatzen dira eta solidoen dezelerazioa gertatzen da. Orain arte argitaratutako lanetan [73, 157, 270, 271, 332] solidoaren dezelerazioa iturgunearen altuera txikietan hasten dela aipatzen da, baina solidoaren propietateen eta airearen sarrerako abiaduraren menpekoa da. Izan ere, tesi honen 4. Kapituluaz azalduko den bezala, partikula finen tratamenduan iturgune osoan zehar azeleratzen dira.

Bestalde, nahiz eta kontaktorerara sartzen den aire gehiena iturgunean zehar doan, frakzio bat eratzungunean zehar barneratzen da eta gune hau laxatzen du. Gainera, iturgunean gertatzen den momentuaren elkartrukatzea dela eta, gasaren deze-

lerazioa gertatzen da gune honetan. Bestalde, nahiz eta gasak ohandzearen altuera guztian eraztungunean barneratzeko aukera izan, frakzio handiena sarreratik zentimetro gutxira barneratzen da. Hori dela eta, aireak presio aldaketa edo galera izaten du kontaktorea zeharkatzean, izan ere, solido partikulekin izandako kontaktuan energia trukea gertatzen da, baina eraztunguneko solidozdo horma eusten jasaten du presio galera handiena [161]. Beraz, iturgunearen forma geometrikoa kontaktorearen faktore geometriko, lan baldintza eta solidoaren ezaugarrien menpekkoa da [333].

Aipatu bezala, iturri ohandzeetan solidoak mugimendu ziklikoak deskribatzen ditu. Eraztungunean zehar partikulak gasarekin kontrakorrantean jaisten dira iturgunera sartu arte, gehienbat kontaktorearen oinarrian sartzen direlarik (posizio honetako sekzio konikoak errazten baitu), baina ohandzearen edozein altueratan sar daitezke iturgunean. Aireak iturgunean gora arrastatzen dituen partikulak eta ohandzearen gainetik ateratzen dituen iturria edo iturburua deritzon gunea sortzen da. Bertan, partikulak dezeleratu egiten dira arraste indarrak grabitate indarren berdinak izan arte. Ondoren, norabidea aldatu egiten dute eta ibilbide parabolikoa deskribatu ohandzearen (edo eraztungunearen) gainazalera iritsi arte. Era honetan, airea kontaktorearen goiko aldetik ateratzen da eta eroritako partikulek beheranzko ohandze mugikorra osatzen dute.

Hala, partikulak hasierarako puntura edo kontaktorearen oinarria heltzen dira eta ziklo berriari ekiten die. Aipaturikoaren arabera, iturri ohandzean hiru gune bereiz daitezke: eraztungunea, iturgunea eta iturria. Lehenengoa, iturri ohandzearen gune dentsuari deritzo eta solidoak abiadura txikian jaisten dira. Patrose eta Caramen [294] arabera, gune honetako solidoaren fluxua solidoaren propietateen araberkoa da, hau da, partikulen formaren, neurriaren eta zimurtasunaren menpekkoa. Hala ere, tesi honen 4. Kapituluaren erakutsiko denez, gasaren sarrerako abiadurak eraztunguneko solidoen abiadura netoan zuzenean eragina du. Bestalde, iturguneko eta iturriak gune diluitua osatzen dute. Iturgunearen hasieran, solidoak abiadura maximora heltzen dira eta dezeleratuz doaz gero iturgunean zein iturrian, norabidea aldatu eta eraztunguneko gainazalean erori arte.

Iturri ohandzeak era jarraituan edo ez-jarraituan opera dezake. Era jarraituan operatzeko nahikoa da jarraikako elikadura sartzea eta altuera jakinean solidoen irteera ezartzea. Hala ere, beharrezkoa da elikagailuaren diseinu egokia egitea sistemaren barnean solidoen pilaketak ekiditeko [283].

1.1. Irudian erakusten den bezala, ohiko iturri ohandzea oinarri konikoa eta sekzio zilindrikoa duen kontaktorea da. Nahiz eta iturri ohandzeak ohandze fluidizatuetatik eratorriak diren, ohikoa da kontaktoreak oinarri konikoa izatea gune hilak ekiditeko. Bestalde, komenigarria da oinarri konikoaren angelua 60° ingurukoa izatea,

aldakortasun handieneko lan baldintza egonkorrak lortzen baitira. Oinarriaren angelu handiagoak erabiliz, bolumen gehikuntza mespretxagarria da ohanzearen bolumen totalarekiko eta gune hilak sor daitezke.

1.1.3. Iturri ohanzearen abantailak eta mugak

Nahiz eta iturri ohanzeak ohanze fluidizatu eta finkoen muga garrantzitsuenak gainditzen dituen, zenbait egoeratan gas-solido kontaktua ez da egokiena. Jarraian, iturri ohanzeak ohanze finko eta fluidizatuekin alderatuz dituen zenbait abantaila azalduko dira [75, 212, 297, 325]:

- Eraikuntza eta eskala handitzea: iturri ohanzearen eraikuntza ohanze fluidizatuena baino sinpleagoa da, ez baitauka plaka banatzailearen beharrik. Era honetan, iturri ohanzearen aldakortasun handia lortzen da eta honek eskala handitzearen prozesua errazten du.
- Presio galera txikia: ohanze fluidizatueta plaka banatzailetik sartzen den aireak ohanze guztia zeharkatu behar du. Iturri ohanzeetan oster, aire gehiena erdiko gunetik sartzen da eta ohanzearen erdian bide nagusia sortzen du. Hori dela eta, presio galera nagusiena iturgunearen pareten sostenguan gertatzen da.
- Operazio jarraitua: aurretik aipatu bezala, iturri ohanzeek solidoaren elikadura jarraitua baimentzen dute bai eraztungunera baita gasarekin batera kontaktorearen oinarri ere. Ohantze fluidizatuekin, aldiz, elikatzeko azken aukera hau ez da bideragarria.
- Partikula tamainen banaketa duten ohanzeen tratamendua: ohanze fluidizatueta partikula tamaina ezberdineko ohanzeak erabiltzean segregazio handia sortzen da. Iturri ohanzeetan oster, partikula handien abiadura terminala baino airearen abiadura handiagoa erabiltzen denez iturgunean, partikula guztien iturgune-iturri-eraztungune zikloa bermatzen da. Gainera, kontaktorearen oinarriaren diseinuak (geometria konikoak) solidoaren gune hilak galarazten ditu. Beraz, iturri ohanzeak tamaina ezberdineko partikulen prozesamendurako ere egokiak dira, bereziki banaketa diskretua dutenentarako.
- Partikula itsaskorren operazioa: iturri ohanzeetan lortzen den mugimendu indartsuagatik, batez ere iturgune eta eraztungunearen arteko kontaktuagatik baita iturgunean gertatzen den atrizioagatik, partikula itsaskorren artean sortzen

diren aglomeratuak hautsi egiten dira. Beraz, iturri ohandze erregimena itsaste-ko joera duten materialen prozesamendurako edo partikulen gainazaleko geruza garbitzeko egokia da.

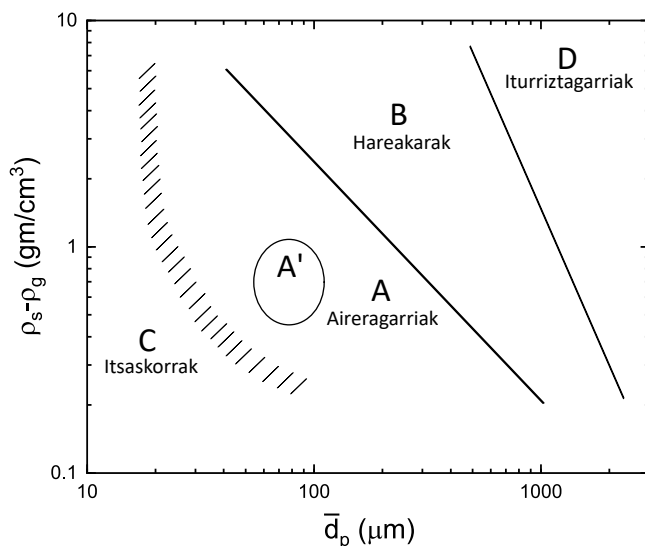
- Solido sentikorren operazioa: eraztungunean gertatzen den airearen eta solidoaren arteko kontrakorroneko mugimenduak solidoaren tenperaturaren bat-bateko aldaketa ekiditen du. Era honetan, iturri ohandzea solido sentikorren (elikagai, farmazia-produktu, polimero etabarren) tratamendu termikorako egokia izateaz gain, airearen tenperatura altuagoa erabiltzeko egokia da.
- Partikula handien operazioa: iturri ohandze erregimena ohandze fluidizatua baino egokiagoa da partikula handiekin operatzeko ($d_p > 0.5\text{ mm}$). Alde batetik, kontaktorerara sartzen den aire emariaren frakzio bat iturgunetik eraztungunera barneratzen dalako; eta bestetik, iturgunean gora abiadura handian doan gainerako aireak partikulak arrastatzen dituelako iturgunean zehar eta materia zein bero transferentzia hobetzen duelako. Ostera, partikula finekin operatzean ($d_p < 0.5\text{ mm}$) iturri ohandze erregimena ez da lortzen eta ohandze fluidizatuetan bereizgarria den mugimendu kaotiko eta nahaskorra [316] nagusi da. Hala ere, gasaren sarreraren diseinu egokiarekin iturri ohandze erregimena lortu daiteke partikula txiki samarrekin [270].

Aipatu bezala, iturri ohandze erregimenak hainbat muga eta zailtasun ere baditu [75, 291]:

- Ohantze finkotik abiatuz iturri ohandze erregimena lortzeko presio galera handia gainditu behar da, eta ohandzearen masa totala zein solidoaren dentsitatearen menpekoa da.
- Aurreko mugarekin erlazionaturik dagoen eskala handitzearen zailtasuna.
- Kontaktorearen geometria eta edukiaren mugapenak.
- Solidoaren propietateen mugapenak.

Solido ezberdinen arabera iturri ohandze erregimena edo partikulen mugimendu nahasia lortzen da. Iturri ohandzeetan lortzen den erregimena auresateko beharrezkoa da solidoen banaketa edo sailkapena kontuan izatea. Airearen giro tenperaturan eta presio atmosferikoan dagoen ohandze fluidizatuan partikulek duten portaeran oinarrituz, Geldart-ek [135] partikula solidoak lau taldetan banatu zituen. Geldart-ek solidoaren dentsitatea eta batezbesteko partikula tamaina erlazionatzen dituen grafikoan

lau eremu sinple eta bereizgarri ezberdinu zituen. Modu honetan, solidoaren ezaugarriak ezagunak badira, hauek fluidizazioan izango duten portaera aurrean daiteke, 1.2. Irudian erakusten den bezala.



1.2. Irudia. Geldart-en partikulen sailkapena.

Gaur egun gehien erabiltzen den solidoen sailkapena Geldart-ena da eta erreferentzia egiteko Geldart A, B, C edo D bezala izendatuz erabiltzen da. Hurrengoak dira Geldart-en lau taldeak:

- Itsaskorrak (C taldea): partikula itsaskorrak eta hauts finek osatzen dute (irina, almidoia etabar). Oso zaila da talde honetako solidoen fluidizazio normala lortzea, indar elektrostatiakoak handiak baitira.
- Aireragarriak (A taldea): batezbesteko partikula tamaina txikia edota dentsitate baxuko ($\rho_s < 1400, kg/m^3$) solidoek osatzen dute. FCC katalizatzaileak mota honetako solidoen adierazgarri dira. Talde honetako solidoek fluidizazio egokia dute, izan ere, fluidizazio leuna eta egonkorra baitute abiadura txikietan. Abiadura handietan ere fluidizazio egokia dute, burbuila txikiak eta kontrolatuak eratzen baitira.
- Hareakarak (B taldea): talde honetako solidoak harearen antzekoak dira, hau da, 40 eta 500 μm arteko diametroa eta 1400 eta 4000 kg/m^3 arteko dentsitatea dute. Fluidizazio egokia dute, nahiz eta burbuilak eratu eta hauen tamaina handituz joan.
- Iturritzagarriak (D taldea): partikula tamaina eta dentsitate handiko materialak osatzen dute talde hau, hots, aleak, haziak etabar. Talde honetako solidoak

iturkuntza erregimenean edo sakonera txikiko ohantze fluidizatueta trata daitezke. Sakonera handiko ohantze fluidizatuak erabiliz, lehertu egiten diren burbuila handiak eratzen dira.

Hortaz, iturri ohantzeetan lan egiteko solido aproposenak D taldekoak dira, iturgune egonkorak eta iturri indartsuak sortzen baitira. Hala ere, kontaktorearen diseinu egokiaren bidez partikula tamainen banaketa duten ohantzeak iturri daitezke. Bestalde, partikula finen operazioak zailtasun handiak sortzen ditu [316], izan ere, kontaktorerara sartzen den aireak ez du iturgune definiturik sortzen eta burbuila forman zeharkatzen du ohantzea. Solido finen operazio zailak galarazten du iturri ohantzeen eskala handitzea, eta tesi honen helburu nagusia partikula horiekin operazio egonkorra lortzea da.

1.1.4. Iturri ohantzearen aplikazioak

Iturri ohantzearen aurkikuntzatik gaur arte, teknologia honek erabilera asko eta ezberdinak izan ditu. Hala ere, oraindik fase esperimentalean dago eta industria mailan ia ez da erabili.

Jarraian, iturri ohantzearen aplikazio industrialak operazio fisiko eta kimikoe-tan sailkaturik azalduko dira.

Operazio fisikoak

- Solidoen nahasketa [62, 99, 143, 202].
- Materialen estaldura [37, 83, 97, 179, 187, 213, 231, 296, 305, 352].
- Aerosolen berreskuratzea eta adsorbenteen birsortzea [53, 127].
- Birrinketa [190].
- Partikula ezberdinen aglomerazioa [174, 384].
- Itxura esferikoa eta tamaina uniforme lortzeko aleketa [72, 144].
- Bero transferentzia [306, 322, 364, 365].
- Lehorketa izan da iturri ohantze teknologian aplikazio garatuena eta solido ezberdinei aplikatu zaie. Besteak beste, honako hauek lehertu dira: aleak, solido eranskorak eta partikulazko aglomeratuak [18, 20, 86, 90, 119, 178, 180, 197, 228, 229, 230, 285, 293, 371], pastak, esekidurak eta disoluzioak [16, 59, 74, 129, 287, 298],

zerrautsa [61, 62, 281], kortxozko tapoiak [222], biopolimeroak [95], lokatzak [342], guaiaba [98], jambolao hondakina (azala eta haziak) [253] eta laranja azalezko hondakinak [128].

Prozesu kimikoak

- Klinker zementuaren produkzioa [168, 383].
- Erreakzio-aleketa (unitate berean) [302, 382].
- Burdin mineralen erredukzioa [234].
- Gas faseko erreakzio azkarrak [301, 317, 358].
- Ikatzen aktibazioa [391].
- Krakeaketa termikoa eta katalitikoa [48, 49, 50, 54, 108, 109].
- Banadioaren berreskurapena mineralen kiskalketaren bidez [251].
- Polimerizazio katalitikoa [70].
- Errekuntza [175, 312, 343].
- Gasifikazioa [2, 3, 11, 31, 58, 91, 92, 93, 97, 111, 112, 218, 237].
- Pirolisia [5, 35, 39, 40, 41, 51, 103, 125, 214, 215, 216, 217, 223, 224, 259, 273, 274, 278, 279, 395].
- Erregai nuklearrezko partikulen estaldura [211, 242, 244, 288, 412].
- Hainbat produktu ezberdinen produkzioa: biogasa [63], bio olio [29, 32, 225], silize amorfoa eta kalitate handiko ikatz aktibatua [30] eta hidrogenoa [28, 45, 46, 55, 113, 185, 186].

Azken urteetan, iturri ohantze teknologiak aurrerakuntza handiak izan ditu eta gero eta erabiliagoa da. Hala ere, ohantze fluidizatuarekin alderatuta teknologia berriagoa da eta hidrodinamikaren ezagutza askoz murriztagoa da. Hurrengoak dira iturri ohantzeen hidrodinamikan dauden hutsunerik nagusienak [403]:

- Gas fluxuaren informazio murrizta. Iturri ohantzerantz sartzen den gasa banatu egiten da iturgune eta eraztungunearen artean. Honek eragin zuzena du gasaren egoitza denboran eta parametro honen ezagutza ezinbestekoa da erreaktorearen diseinu egokia egiteko. Bibliografian gas fluxua karakterizatzeko aurki daitezkeen ereduak urriak eta enpirismo handikoak dira [205, 297].

- Iturgunearen definizioaren sinplifikazioa. Jakina da gaur egun ohantzearen erdian sortzen den iturgunea ez dela zilindro itxurako hutsunea [325], baizik eta ohantzean gora hedatuz doan hutsunea. Gainera, iturgunearen hedapena solidoen propietateen eta airearen abiaduraren menpekkoa da [328]. Hala ere, iturgunearen diametroa kontaktorearen sarrerako diametroa edo enpirikoki lortutako batezbesteko diametroaren antzekoa dela kontsideratzen da diseinurako [238].
- Solido fluxuaren informazio murrizta. Solidoek ibilbide ezberdinak burutzen dituzte iturri ohantzeetan eta, beraz, ziklo denbora ezberdinak izaten dituzte. Gainera, solido motaren arabera ohantzearen gainazalean krater handia sortzen da eta gainazalera erortzen diren solidoek ziklo motzak burutzen dituzte [321]. Bestalde, iturriak solidoa uniformeki banatzen duela (ohantzearen gainazaleko posizio erradialetan) eta eraztunguneko solidoak abiadura uniformearekin jaisten direla onartzen da.

Aipaturiko sinplifikazioak aplikagarriak dira oinarri konikodun iturri ohantze zilindrikoetan (ohiko iturri ohantzeetan), baina baldintza hauetatik kanpo desbideratze nabarmenak lortzen dira. Izan ere, ohantze ez oso sakonak erabiltzen direnean, kontaktorearen oinarri konikoaren geometriak zuzeneko eragina du sistemaren hidrodinamikan [329] eta iturgunearen diametroa nabarmen aldatzen da kontaktorearen posizio longitudinalanean gora eginez [329].

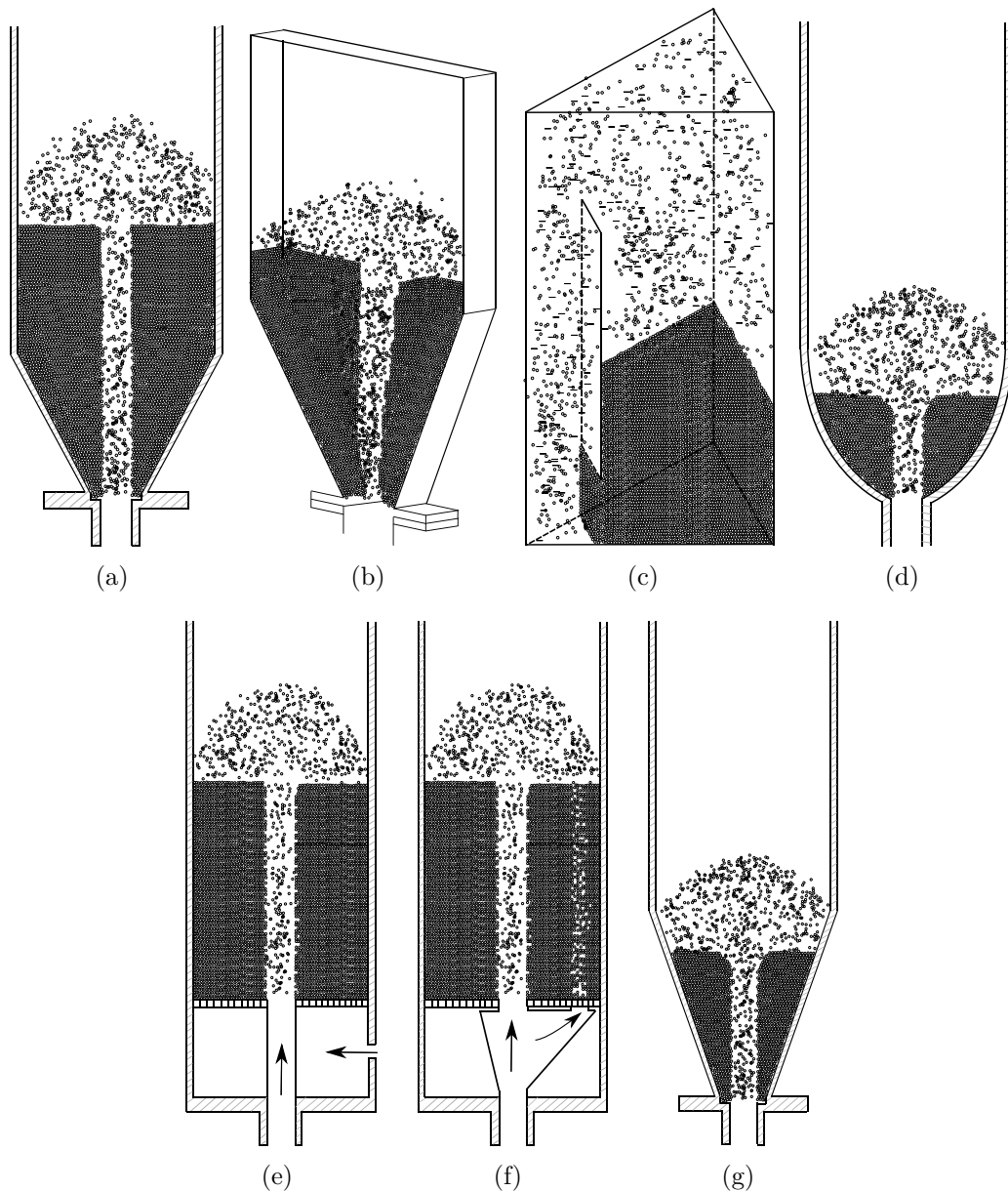
1.1.5. Iturri ohantze konikoa

Ohiko iturri ohantzean, zati bat oinarri konikoan eta bestea gorputz zilindrikoan dago. Kontaktore hauetan, gune konikoaren bolumena zati zilindrikoarena baino txikiagoa da. Izan ere, oinarri konikoaren helburua gune hilak ekiditea baino ez da. Hala ere, ohiko iturri ohantzeak hainbat muga dute: prozesatzeko ahalmen mugatua; iturritu daitekeen ohantzearen altuera mugatua; kontaktorearen zati zilindrikoaren diametroa (D_C) ezin da 1 m baino handiagoa izan; kontaktorearen sarrerako diametroaren (D_i) eta zati zilindrikoaren diametroaren arteko zatidura partikulen propietateen araberakoa da eta tarte estuan dago [291].

Hala, ohiko iturri ohantzea abiapuntutzat hartuz, teknologia honen bilakaerari hainbat aldaketa egin dira geometrian [260, 290]: oinarri laua duen sekzio konikoa, erdiko hodiak erabiltzea iturguneko fluxua definitzeko, jariakinaren sarrera eraztungunetik ere egitea (iturri ohantze fluidizatuak), geometria erabat konikoa, edo sekzio konikoaren eta zilindrikoaren antzeko bolumenak ohantze ez oso sakonak erabiltzeko.

Epstein eta Grace-k [110] egindako iturri ohandze teknologiaren berrikuspean, beste zenbait aldaera ere aipatzen dira, hala nola, ohiko iturri ohandzea, bi dimentsiodun iturri ohandzea, iturri ohandze triangeluarra, iturri ohandze parabolikoa, iturri ohandze fluidizatua, iturri ohandze birakor diluitua eta iturri ohandze erabat konikoa.

1.3. Irudian erakusten dira aipaturiko geometriak.



1.3. Irudia. Iturri ohandzearen geometria ezberdinak: (a) ohikoa, (b) bi dimentsiokoa, (c) triangeluarra, (d) parabolikoa, (e) fluidizatua, (f) birakor diluitua eta (g) konikoa.

Teknologia honen eskala handitzea errazteko asmoz, Mujumdar-ek [248] bi dimentsioko iturri ohandzea proposatu zuen. 1.3.b Irudian erakusten den bezala, oinarri konikoa duen eta bi aurpegi berdin paralelo dituen ohandzea da. Kontaktore mota honen operazioan pareta efektua handiegia izan ez dadin [408], zutabearen zabalera partiku-

laren diametroa baino 5 aldiz handiagoa izan behar da. Hala ere, erlazio hau partikula banaketa estua duten solidoekin eta partikula esferikoekin baino ez da aplikagarria. Iturri ohandze mota honen eskala handitzea [130] zutabearen zabalera handituz lortzen da, eta irekiduradun iturri ohandze laukizuzena deritzo (ingelesez *slot-rectangular*). Kontaktore honetan, emari handiekin ere opera daiteke baina iturkuntzarako abiadura minimoan lan eginez presio galera txikiak lortzen dira. Erdiko plakak erabiliz, iturritu daitekeen ohandzearen altuera maximoa ekiditen da eta solido fluxuaren kontrola handiagoa da. Hala ere, zenbat eta zabalera handiagoa den bi dimentsio izatearen efektua nabarmenagoa da.

Iturri ohandze triangeluarra (1.3.c Irudia) arrozaren lehorketarako erabili zen Australian [357] lehenengo aldiz. Iturri ohandze honen ezaugarri bereizgarriena produktio ahalmen handian datza, izan ere, zenbait unitate elkartzuz hexagono itxurako diseinua lortzen da. Hala ere, erdiko plakak erabili behar dira iturkuntza egonkorra lortzeko.

Iturri ohandzearen beste geometria bat parabolikoa da [121]. Bertan, eraztunguneko partikulek ibilbide parabolikoa egiten dute (1.3.d Irudia). Konfigurazio honek iturkuntza erregimena hobetzeaz gain, presio galera eta iturkuntzarako abiadura minimo txikiagoak lortzea ahalbidetzen du, baina lehorketa bezalako aplikazioetan ez da izan hain eraginkorra.

Bestalde, ohandze fluidizatu eta iturri ohandzearen arteko konbinazioari iturri ohandze fluidizatua deritzo [206] eta 1.3.e Irudian erakusten da. Iturri ohandze mota honetan, sarrerako gasa ohandzean zehar ere sartzen da (kontaktorearen paretan zehar), eta operazio baldintza zabalagoak lortzea ahalbidetzen da. Hala ere, iturri ohandze mota honen diseinua konplexuagoa da.

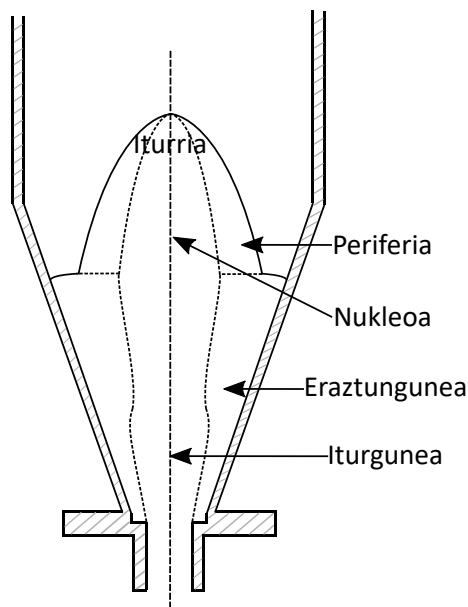
Jumah eta Mujumdar-ek [181] iturri ohandze birakor diluitua proposatu zuten (1.3.f Irudia). Kasu honetan, jariakinaren sarrera bi injektorez osatua dago: bat erdian ohiko iturgunea sortzeko eta, bigarrena lehenengoaren inguruan abiadura txikian biraka dabilena, beste iturgune bat sortzeko. Era honetan, eraztungune osoa ez da jarraian iturritzen eta honek aldizkako iturri ohandze erregimena eragiten du. Nahiz eta operazio baldintzak zabalagoak izan, beraren diseinua konplexuagoa da eta kostu ekonomikoa handiagoa da.

Azkenik, iturri ohandze erabat konikoa dago, 1.3.g Irudian erakusten den bezala. Konfigurazio honek ohiko iturri ohandzearen ezaugarriak (partikula handiekin lan egiteko ahalmena, presio galera txikia, partikulen mugimendu ziklikoa eta abar) eta bere geometriari dagozkion berezko ezaugarriak ditu, hau da, gas emari tarte zaballean operazio egonkorra mantentzeko gaitasuna [261, 272, 326]. Bestalde, ohiko iturri ohandzeak ez bezala, iturri ohandze konikoak ez du mugarik iturritu daitekeen ohan-

tzearen altuerari dagokionez [234]. Gainera, beste gas-solido ukipen erregimenek ez bezala [70, 263], iturri ohandze konikoa egokia da testura irregularreko partikulak, partikula finak, tamaina banaketa zabaleko partikulak eta partikula itsaskorrek erabiliz lan egiteko operazio baldintzen tarte zabalean.

Partikula mota hauek guztiak bi kontaktu erregimen ezberdin erabiliz opera daitezke era egonkorrean, hots, ohiko iturri ohandzean eta iturri ohandze diluituan. Azken erregimenean lan egin ahal izateko, gasaren emari handiak erabili behar dira, hortaz, solido-kontaktore sistema berarekin lotu daitezke bi erregimen ezberdinak, baina ezaugarri hidrodinamikoak ezberdinak dira.

Ohiko iturri ohandzeetan bezala, iturri ohandze konikoetan gune ezberdinak sortzen dira solidoaren mugimenduaren eta kontzentrazioaren arabera. Gune ezberdin hauek (iturgunea, iturria eta eraztungunea) 1.4. Irudian erakusten dira eta, oro har, ohiko iturri ohandzeen antzekoak dira.



1.4. Irudia. Iturri ohandze konikoaren gune ezberdinen arteko mugak.

Aipaturiko gune bakoitzaren bolumenak kontaktorearen aldagai geometrikoen menpe (oinarri konikoaren angelua eta gasaren sarrerako diametroa) eta baldintza esperimentalen menpe (partikula diametroa eta ohandze estatikoaren altuera) daude [337].

Ohiko iturri ohandzeetan bezala, iturriaren erdian (nukleoan) partikulak eta gasa batera doaz gorantz, baina iturriaren periferian kontrakorrantean doaz. Gainera, tamaina banaketa zabalagoa duten partikulen tratamendua egin daiteke egonkortasun arazorik gabe [261], segregazio arazoak txikiagoak izaten baitira.

Iturri ohandze konikoaren kontaktu zurrunbilotsuak gune hilak galarazten ditu eta solido itsaskorren eta urtzeko joera dutenen tratamendu fisikoa eta kimikoa egin

daiteke, hala nola, polimerizazio katalitiko [70, 71, 403], ikatz bitumentsuen gasifikazioa [374] eta solidoen kapsulamendua [199].

Bestalde, iturri ohandze konikoetan gasaren egoitza denbora oso laburra da, eta are laburragoa erregimen diluituetan (milisegundoak). Hori dela eta, teknologia mota hau oso aproposa da ultrapirolisia bezalako erreakzio azkarretarako [381], hautakortasuna baita kasu hauetan diseinua baldintzatzen duen faktorea.

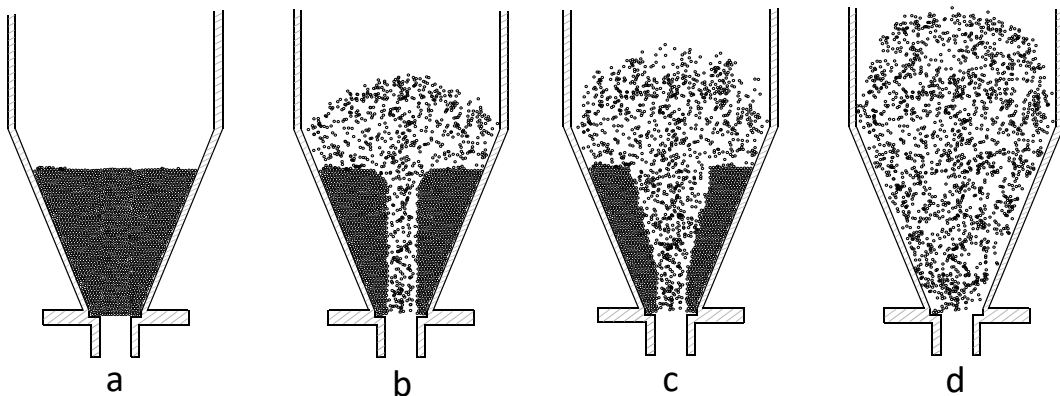
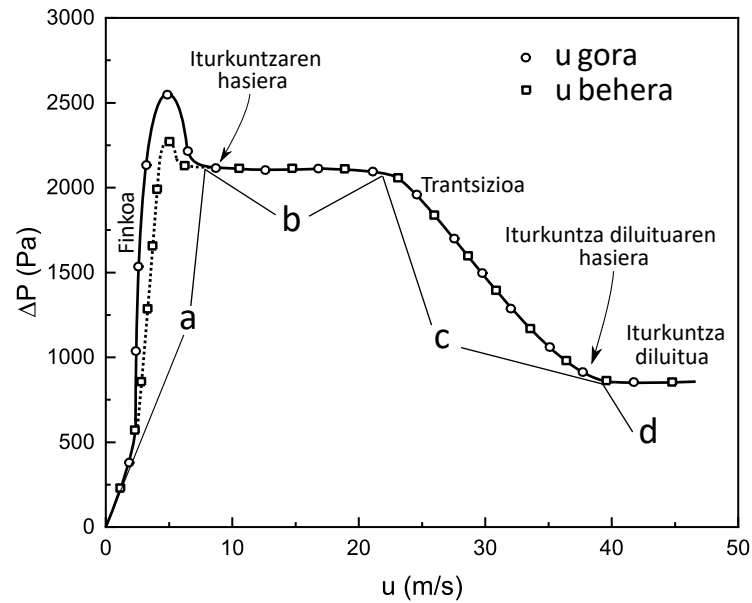
Iturri ohandzea operazio ezberdinetan aplikatu ahal izateko, gas-solido kontaktua berri izatea halabeharrezkoa da, hau da, azterketa hidrodinamiko zehatza egin behar da

1.1.5.1 Iturri ohandze konikoaren hidrodinamika

Nahiz eta gure ikerketa taldean ohiko iturri ohandzeak ikertu diren, iturri ohandze konikoen azterketa izan da helburu nagusia. Izan ere, gas jarioaren abiadura nabarmen handitzean iturri ohandze diluituaren erregimena lortzen da [261] eta erregimen honek duen berezitasunak ikertu dira. Horregatik, iturri ohandze konikoek gasaren eta solidoaren tratamendurako duten malgutasuna dela eta, gas jarioaren arabera duten aldakortasuna aztertu da.

Gas-solido kontaktu metodo guztietan bezala, erregimenaren ezagutza eta ezaugarriak kurba karakteristikoaren bidez lortzen dira, hau da, presio galeraren bilakaera gasaren abiadurarekiko aztertuta. 1.5. Irudian erakusten da iturri ohandze konikoaren kurba karakteristikoaren (airearen presio galera vs. abiaduraren) eboluzioa [325] eta lorturiko trantsizio zein erregimen ezberdinen diagramak.

1.5. Irudiaren arabera, sistema ohandze finkean dagoela geroago eta gasaren emaria handiagoa elikatzen denean, presio galerak gora egiten du harik eta balio maximoa lortu arte. Ondoren, bat-batean jaisten da operazio egonkorreko baliora (a gunea). Gas abiaduraren tarte honetan, jariakina ohandzearen poroetan zehar barneratzen da ohandzearen presioa gaintu eta iturgunea sortu arte. Gasaren abiadura handiagoa elikatuz, presio galerak konstante dirau tarte jakinean (b gunea) eta egoera honetan argi bereizten dira iturgunea eta eraztungunea. Operazio tarte honi iturri ohandze erregimena deritzo.



1.5. Irudia. Presio galeraren eta partikulen mugimenduaren eboluzioa gasaren abiadura iturri ohandze konikoan handitzean [325].

Jariakinaren abiadura handiago egin ahala, iturgunea zabaldu eta eraztungu-nearekin nahastuz doa. Modu honetan, sistemaren porositatea geroago eta handiagoa da eta presio galerak behera egiten du astiro-astiro. Egoera honi “trantsizio erregimena” deritzen (c gunea), eta eraztungunea eta iturgunak bereizten ez diren arte gertatzen da. Une honetan, iturri ohandze diluitua hasten da eta erregimen honi dagokion presio galera lortzen da. Gainera, konstante mantentzen da jariakinaren abiadura handiago egiten denean (d gunea) [261].

1.5. Irudiaren arabera, gasaren abiadura behera egitean presio galeraren bilakaera berbera da maximora hurbildu arte. Une horretan abiadura jaitsiz, iturria desagertu eta histeresi fenomeno gertatzen da (ohantze fluidizatueta bezala). Beraz, iturkuntzarako abiadura minimoa zehatz neurtu daiteke abiadura jaitsiz lorturiko bilakaerarekin [199, 235, 325].

Azken urteetan izan ezik, gure ikerketa taldeak partikulak handiak azter-

tu ditu batez ere (beirazko esferak, aleak, lekak, zeramikak, poliestirenoa, zura), hau da, Arquimedes-en moduluaren balioak $7.8 \cdot 10^4$ eta $5.8 \cdot 10^7$ artekoak izan dira (iturri ohantzeen ohiko operazio tartekak). Beraz, buruturiko ikerketetan oinarrituta, hurrengo kontaktore-partikula sistemaren eta kontaktorearen faktore geometrikoen operazio tartekak ezarri dira iturri ohantze konikoen eta iturri ohantze diluituen erregimenetarako):

- Sarrerako eta konoaren oinarriko diametroen arteko erlazioa (D_0/D_i): erlazio honen balioak $1/2$ eta $5/6$ artekoak izan behar dira iturri ohantze zein iturri ohantze diluituen erregimenetan. Behe-muga presio galerak eta oinarrian sortzen diren gune hilek ezarria da (solidoarekin jarraian lan egiteko arazo nabarmena). Goi-muga ostera, iturkuntzan sorturiko ezegonkortasunak ezarria da, iturgunearen indefinizioak eta errotazio mugimenduak hain zuzen.
- Oinarri konikoaren angelua (γ): nahiz eta iturri ohantzeetan goi-mugarik ez egon, praktikan 28° eta 60° arteko balioak izatea komeni da. Izan ere, 60° baino balio txikiagoak ez dira egokiak solidoak hormetan gelditzen baitira eta, ostera, 28° baino balio txikiagoek sistema ezegonkor egiten dute.

Iturri ohantze diluituetan, angeluak 25° eta 45° arteko balioa izan behar du. Angeluaren balio txikietarako, partikula txikiak erabiltzean erregimen ezegonkorra lortzen da, hots, iturri ohantzeen berezko mugimendu ziklikoa ez da agertzen eta gasaren abiadura partikulen arraste abiadurak mugatua da. Gainera, partikula tamainaren banaketa duten solidoen tratamenduan, eraginkortasun txikiak lortzen dira. Angeluaren balio handietarako aldiz, gasaren egoitza denboraren banaketa nabarmena gertatzen da (gasaren zirkulazioan gertatzen den errotazio fenomenoarekin batera) eta ohantzea ezegonkor egiten da, batez ere partikula tamaina txikiak erabiltzean.

- Sarrerako diametroaren eta partikula diametroaren arteko erlazioa (D_0/d_p): ohiko iturri ohantzeetan, erregimen egonkorra lortzeko D_0/d_p erlazioaren balioa 20 ingurukoa izan behar den bitartean [232, 290], iturri ohantze konikoetan erlazioaren balioa 20 – 30 balioetara zabaltzen da [261]. Iturri ohantze diluituetan, D_0/d_p erlazioa 1 eta 80 balioen artean alda daiteke. Hala ere, balio hauek eraginkortasunari lotuak dira, behe-muga 0.70 inguruko porotasunari dagokiolarik eta goi-muga 0.99tik gorakoari.

1.2. ITURRI OHANTZEAREN ALDAERAK

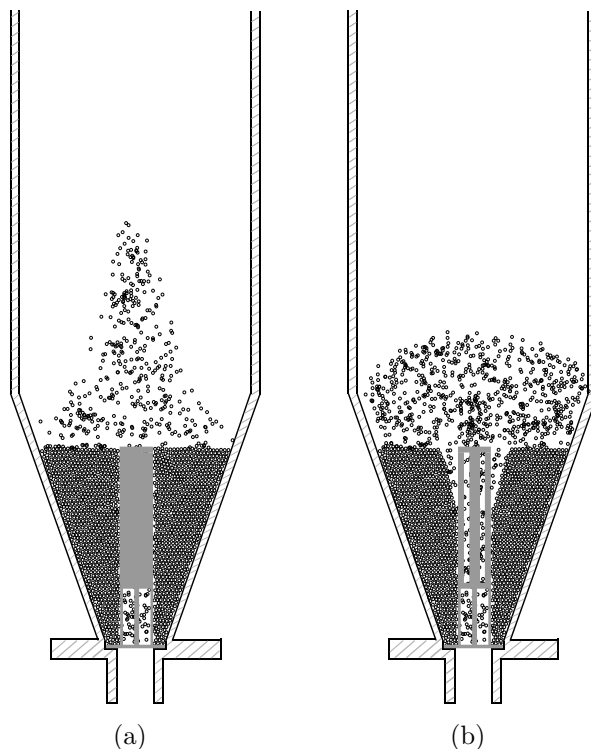
Iturri ohantzearen hastapenetik hona, teknologia hau aplikazio eta operazio baldintza ezberdinetara zabalduz joan da. Hala ere, egoera guztietan funtzionamendu optimoa lortzeko zenbait aldaketa egin behar izan dira ohiko iturri ohantzean. Jarraian, tesi honekin erlazionaturik dauden aldaera garrantzitsuenak azalduko dira, hots, erdiko hodidun iturri ohantze konikoa eta iturri bilgailudun iturri ohantze konikoa.

1.2.1. Erdiko hodidun iturri ohantzea

Gaur egun, iturri ohantzearen aldaera guztien artean erdiko hodiak dira aukera sinple eta aplikagarrienak [78, 198, 286, 348]. Izan ere, erdiko hodiak sistemaren egonkortasuna hobetu eta iturritu daitekeen altuera maximoaren muga ekiditen du. Bestalde, ohiko iturri ohantzeetan partikulak eraztungunetik ohantzearen edozein altueratan sartzen dira iturgunera eta, beraz, zorizko ibilbideak burutzen dituzte eta lorturiko ziklo denborak banaketa zabala dute. Zorizko ibilbideak saihestu eta operazio baldintza hobek lortzeko asmoz, erdiko hodiak erabiltzen dira.

1.6. Irudian erdiko hodidun iturri ohantze konikoa erakusten da. Erdiko hodia ohantzearen erdian kokatzen da (ardatz axialean) sarrerako gasaren norantza berean, baina distantzia jakin batera.

Ohiko erdiko hodia ez-porotsua da (1.6.a Irudia). Honek geometria zilindrikoa eta gorputz solidoa du eta bere gorputzaren altuera ohantzearen antzekoa da. Gasaren sarreraren eta erdiko hodiaren beheko aldearen arteko distantziari erdiko hodiaren hanken luzera (L_H) deritzo, nahiz eta bibliografian sarrerako gunearen altuera ere deitua den. Eraztungunetik jaisten diren solidoak gune honetan sartzen dira iturgunera, izan ere, erdiko hodiak iturgune-eraztungune interfasea erdiko hodiaren hormaz banatzen baitu (sarrerako gunean izan ezik). Hortaz, eraztungunetik iturgunera igarotzen den solido kopurua erdiko hodiaren hanken luzeraren arabera da eta ia eraztungune osoa zeharkatzen dute solidoak. Modu honetan, hanken luzera handitzean eraztungunetik iturgunera igarotzen den partikula kopurua handiagoa da baita solidoaren abiadura ere. Gainera, eraztungunera barneratzen den aire emaria handiagoa da [94, 96, 351, 379, 406]. Hortaz, hodi mota honen faktore garrantzitsuena hanken luzera da.



1.6. Irudia. (a) Hodi ez-porotsu eta (b) irekiduradun hodia hornituriko iturri ohandte konikoa.

Hodi ez-porotsuen helburu nagusia operaezinak edo ezegonkorak diren sistemetan operazio egonkorra lortzea da. Hodi mota hau erabiliz, iturgune diluituak sortzen dira eta honek sistemaren presio galera txikitzea dakar. Hori dela eta, erdiko hodidun iturri ohandteetan partikulen zirkulazio emaria eta iturkuntzarako abiadura minimoa ohiko iturri ohandteetan baino txikiagoak dira [141].

Bestalde, partikulek eraztungunearen luzera guztia zeharkatu behar dute iturgunera sartu aurretik eta, beraz, partikulen mugimendua askoz kontrolagarriagoa eta erregularragoa da. Horrela, solido guztiek burutzen dituzten ibilbideak eta ziklo denborak antzekoak dira [78, 198]. Beraz, solidoaren zirkulazioa, partikularen ziklo denborak eta gasaren sakabanaketa erdiko hodiaren beheko alderaino dagoen gunearen arabera koak dira [18].

Erdiko hodirik gabeko sistemetan, iturgunea eraztungunearekin kontaktuan dago ohandtearen altuera guztian zehar eta, beraz, iturgunea inguratzen duen eraztungune guztia eusten du aireak. Hori dela eta, ohandte sakonak erabiltzen direnean iturgunak ezin du eraztungunea eutsi eta iturri ohandte erregimena gelditu egiten da. Honek zuzeneko eragina dauka eskala handitzearen mugan. Bestalde, iturgunea gelditu aurreko ohandtearen altuerari iturritu daitekeen ohandtearen altuera maximoa deritzo [232]. Erdiko hodia erabiltzean oster, hodiak berak eusten du eraztungunea eta ai-

paturiko altueraren mugarik ez dago. Hodi hauek kostu txikiko gailuak dira eta iturri ohandzeen funtzionamendu hidrodinamikoa optimizatu dezaketenez, oro har, industria mailan Erdiko hodidun iturri ohandzeak erabiltzen dira.

Beraz, ohiko iturri ohandzean Erdiko hodia erabiltzeak hurrengo abantailak ditu [78, 172, 196, 220, 247, 363, 364, 379, 408]:

- Jariakinaren emari eta presio galera baxuagoak.
- Edozein tamaina eta izaerako solidoekin lan egitea ahalbidetzen du, hots, partikula tamaina oso txikiekin eta tamaina banaketa duen materialekin.
- Partikulen egoitza denboraren distribuzio mugatuagoa.
- Solidoaren zirkulazioaren kontrol hobea.
- Operaziorako malgutasun handiagoa, erabili daitekeen ohandzearen altuera askoz ere handiagoa baita, hau da, iturritu daitekeen ohandzearen altuera maximoa ekiditen da.
- Operazioko presio galera eta iturkuntzarako abiadura minimoaren murrizketa. Era honetan, solidoaren zirkulazioa kontrola daiteke zutabearen diametroa, ohandzearen altuera edo partikula diametroa aldatuta.
- Burbuilen arazoa ekiditen da [207].

Erdiko hodiekin abantaila garrantzitsuak izateaz gain, hurrengo desabantailak ere badituzte:

- Gas-solido kontaktu txikiagoa eta, hortaz, bero eta masaren transferentzia murrizketa.
- Nahaste maila txikiagoa.
- Erreaktoeren diseinu konplexuagoa.
- Erdiko hodiaren buxadura arriskua.
- Birzirkulazio denbora luzeagoa.

Aipaturiko abantaila guztiei esker, Erdiko hodidun iturri ohandzeak aplikazio ugari eta ezberdinetan erabili dira, hala nola, nahaste prozesuetan [198], olio astunen ultrapirolisian [381], hidrokarburoen pirolisian [358], lehorketan [18, 20, 38, 47, 119,

121, 153, 189, 209, 230, 285, 299, 354, 365], ikatzaren gasifikazioan [145, 376], garraio pneumatikoan [126, 169, 240, 307], errekontzan [195], partikulen estalduran [170] eta bero transmisioan [131, 132], besteak beste.

Buchanan eta Wilson [78] izan ziren erdiko hodiak aztertu zituzten lehenengo ikertzaileak eta iturri ohantzeen hidrodinamikan aldaketa nabariak gertatzen zirela azaldu zuten. Honetaz gain, gailu mota honek iturri ohantzeek partikula finekin lan egiteko dituzten mugak gainditzea ahalbidetzen duela adierazi zuten. Hatate et al.ek [146] erdiko hodi ez-porotsuak emarian eragiten dituen gora beherak eta aplikazioak ikertu zituzten. Matthew et al.ek [236] erdiko hodidun iturri ohantzearen hidrodinamika aztertu zuten beirazko esferak erabiliz. Ostean, bi tamaina ezberdinetako beirazko bolen nahaste bitarra erabiliz, Nagashima et al.ek [254] ikerketa berbera egin zuten. Harez gero, hainbat ikerlarik partikula ezberdinen zirkulazioa aztertu zuten [141, 154, 176, 177, 247]. Partikula handiak ikertu diren bezala, Ijichi et al.ek [169] partikula finen iturkuntza aztertu zuten. Bestalde, Zhao et al.ek [406] hodiрик gabe eta erdiko hodiak erabiliz iturri ohantzeetako partikulen zirkulazio profilak ikertu zituzten. Azkenik, Nagashima et al.ek [255] ohiko iturri ohantzeetan beirazko bolak erabiliz, erdiko hodiaren formak gasaren eta solidoaren portaeran duen eragina ikertu zuten.

Era berean, nahiz eta gure ikerketa taldean erdiko hodie buruzko lehenengo artikulua 2007. urtean argitaratu zen [340], lehendabiziko ikerketak 2004. urtean hasi ziren [17], harearen lehorketan hain zuten. Izan ere, hodi ez-porotsudun iturri ohantzeak erabiltzean, solido aglomerazioak sortzen zirela ohartu ziren eta aglomeratu horiek ez ziren iturgunera heltzen.

Aurretik aipatu bezala, ohiko erdiko hodia ez-porotsua da, baina bibliografian erdiko hodi mota ezberdinak aztertu dituzte. Gure ikerketa taldean hodi ez-porotsua, porotsua eta irekiduradun hodiak erabili dira. Erdiko hodi motak bereizten dituzten faktoreak zilindroaren irekiduren distribuzioa eta proportzioa dira.

Hodi ez-porotsuek operaziorako behar den gas emaria eta presio galera txikitzeaz gain, ohantzearen egonkortasunean laguntzen dute nabarmen. Hala ere, hodi mota hau erabiltzean gas-solido ukipen eskasa lortzen da, eraztungunetik aire emari oso txikia igotzen baita.

Hodi porotsuek pareta solidoa izan beharrean sare metalikoa dute eta iturgunetik eraztungunera aire emari handiagoa igaro nahi den kasuetan erabiltzen dira, eraztungunean gertatzen den bero transferentzia hobetzen dutelarik [387]. Ostera, eraztunguneko solidoek ezin dute eraztungunetik iturgunera ohantzearen edozein altueratan igaro (sarearen trama solidoaren partikula tamaina baino txikiagoa da) eta ohantzearen oinarriraino jaitsi behar dira. Erdiko hodi porotsuak hodi ez-porotsuekin alderatzen badira, gas-solido ukipen hobe dute eta zirkulazio emari altuagoak dituz-

te [172, 255, 351, 389]. Bibliografiari dagokionez, Pallai eta Nemeth [286] izan ziren erdiko hodi porotsua ikertu zuten lehenengoak. Clafin eta Fane-k [88, 89] hodiaren barnetik gasak eraztungunera pasatzeko ahalmena ikertu zuten erdiko hodi porotsu moduan irekidura erlazio handia duen bahe zilindrikoa erabiliz. Hattori eta Nagai-k [151] eta geroago Hattori et al.ek [152] erdiko hodiak iturri ohandzearen ezaugarriak aztertu zituzten gas emari uniforme eta sarrerako zulo aldatua erabiliz. Ikerketa honetan, eraztungunean zehar doan gasaren emaria nabarmen handitzen dela ikusi zuten. Erdiko hodi porotsua eta material moduan partikula handi eta finen nahaste bitarrak erabiliz, Ishikura et al.ek [171, 172] iturri ohandzearen ezaugarriak aztertu zituzten. Azken azterketa horretatik iturgunetik eraztungunera igarotzen den gas emaria ohiko iturri ohandzeetan igarotzen denaren %50 – 80 txikiagoa dela ondorioztatu zuten.

Irekiduradun hodiak dira diseinatu diren erdiko hodi berrienak. Izan ere, harearen lehorketa hodi ez-porotsuekin burutzerakoan [18] solido pilaketak sortzen dira hodia eta kontaktorearen artean. Arazo hau ekiditeko erdiko hodian irekidurak egitea proposatu zen harea iturgunera eta airea eraztungunera igaro ahal zitzan [18, 19]. Harearen lehorketarako egin ziren saiakuntzetan, irekidura handiagoko hodiekin funtzionamendu egokiagoa zutela ondorioztatu zen. Izan ere, irekiduradun hodian abantailen artean, gas emari txikiagoa behar izatea, solidoaren zirkulazioa azkartzea eta iturria egonkortzea daude. Gainera, gas-solido ukipena hodi ez-porotsuekin lorturikoa baino hobea da eta sortzen diren iturriak baxuagoak eta dentsuagoak dira [19].

Erdiko hodian parametro geometriko garrantzitsuenetariko bat hodiaren altuera da. Gure ikerketa taldean hainbat altuera ezberdin erabili dira [34], hau da, ohandzearen altuera baino laburragoak zein luzeagoak. Hodiaren altuera ohandzearena baino handiagoa bada solidoaren zirkulazioa eskasagoa da eta iturkuntzarako abiadura handiagoak behar dira (solidoek ibilbide luzeagoa egin behar dute iturgunean). Oso, hodiaren altuera ohandzearena baino txikiagoa bada, iturriaren joera ezegonkor samarra da. Hortaz, tesi honetan erabili diren hodi guztiek ohandzearen altuera berdintsua izan dute. Hala ere, gasa garrantzitsua den prozesuetan, bero transmisioan edo erreazio kimiko ezberdinetan bezala, gas-solido ukipena murriztagoa da [88].

Aipaturiko erdiko hodiez gain, bibliografian beste erdiko hodi batzuk ikertu dira eta hauen adibide Nagashima et al.ek [255, 256] beraien ikerketan erabili zituzten erdiko hodiak dira. Oinarri konikoa eta gorputz zilindrikoa duten hodi ezberdinak erabili zituzten. Behealde konikoa eta goialde zilindrikoa duen erdiko hodi porotsuaren abantaila nagusia gasaren eta solidoaren arteko kontaktua hobetzeaz gain, solidoaren zirkulazio abiadura nabarmen handitzean datza. Beste hodiekin alderatuz gero, erdiko hodi porotsu honen desabantaila iturkuntzarako abiadura minimoa eta presio galera handiagoetan datza.

Aipatu bezala, erdiko hodian erabilerak hainbat abantaila eta desabantaila ditu, baina zenbait kasutan beharrezkoak dira erregimen egonkorra lortzeko. Horren adibide argia partikula finen operazioa da. Olazar et al.ek [261] erdiko hodirik gabeko iturri ohandze konikoetan era egonkorrean lan egiteko baldintza proposatu zuten, zehazki gasaren sarrerako diametroa eta partikula diametroaren arteko erlazioak 20 – 30 balioen tartekoa izatea gehienez. Gasaren sarrerako diametroa erlazio horri dagokiona baino handiagoa bada, ohandzean zehar burbuila handiak sortzen dira eta ez da iturgune egonkorrik sortzen. Kasu hauetan, erdiko hodia erabili behar da iturri ohandze erregimenean operatzeko.

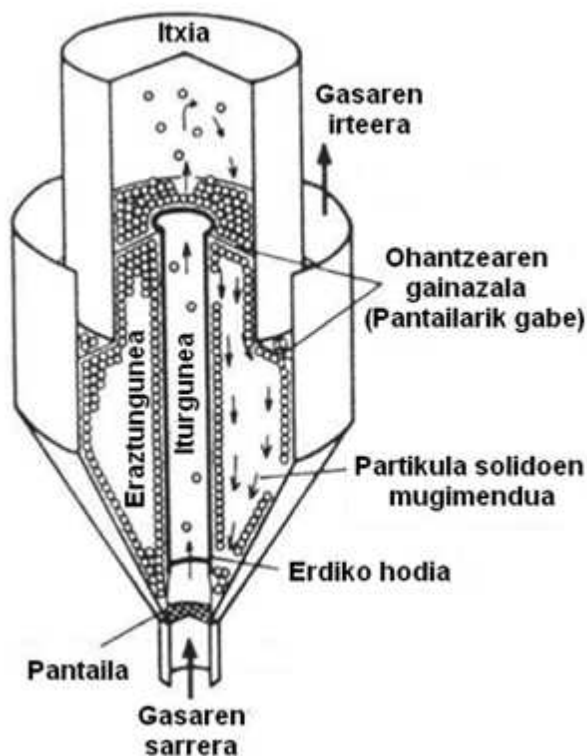
1.2.2. Iturri bilgailudun iturri ohandzea

Aurretik aipatu bezala, iturri ohandzeak hainbat muga ditu operazio baldintzaren arabera, garrantzitsuena partikula finen operazioa delarik. Izan ere, Olazar et al.ek [261] iturkuntza erregimena lortzeko sarrerako diametroaren eta partikula tamainaren arteko erlazioa (D_0/d_p) 20 – 30 artekoa izan behar dela proposatu zuten. Hori dela eta, partikula finak tratatzeko eskala txikiko kontaktoreak baino ezin dira erabili. Arazo hau gainditzeko, erdiko hodiak proposatu ziren, baina hauek gas-solido kontaktua eta eraginkortasuna murriztu egiten dute. Gainera, erdiko hodiak erabiltzen direnean, iturkuntzarako abiadura minimotik gertu lan egin behar da, gasaren abiadura handietan iturri altuak lortzen baitira eta ohandzeko partikulen arrastea gertatzen baita.

Arazo guzti hauen aurrean, gure ikerketa taldeak iturri bilgailua proposatu zuen. Gailu hau beheko alde irekia eta goiko alde itxita duen zilindro hutsa da eta ohandzearen gainean kokatzen da. Hala ere, gailu honen jatorria Hattori eta Takeda-k [147, 148] proposaturiko alboko irteera eta erdiko hodia duen iturri ohandzean dago (*Side-outlet spouted bed with inner draft tube*). Ikerlari hauen arabera, iturri ohandzearen aldaera honek gas-solido kontaktua hobetzeaz gain, solidoen prozesamendurako eraginkortasun handiagoa ahalbidetzen du. 1.7. Irudian azaltzen da iturri ohandze honen eskema.

1.7. Irudian erakusten den bezala, aldaera hau bi zutabez osatua dago, bat goian eta bestea behean kokatuta. Goiko zutabearen diametroa behekoarena baino txikiagoa da eta biak gainezarrita daude. Zutabeen arteko kokapen honen ondorioz, ohandzearen zati bat goiko zutabearen beheko aldean dago, eta beste guztia beheko zutabearen. Era honetan, gasa kontaktoretik atera aurretik bi zutabeetan zehar pasarazten da eta, ondorioz, ohandze osoan zeharreko kontaktua hobeagoa da. Bestalde, erdiko hodian zehar igotako partikulak goiko zutabearen barnean sorturiko iturriaren bidez

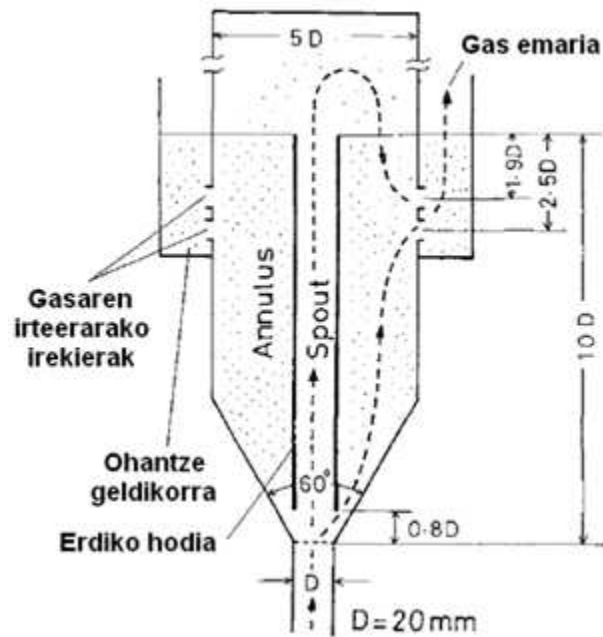
ohantzearen gainazalean sakabanatzen dira eta eraztungunean zehar behera egiten dute. Beraz, beheko zutabeko eraztungune osoa zeharkatzen dute.



1.7. Irudia. Alboko irteera eta erdiko hodia duen iturri ohantzearen eskema [150].

Hortaz, aldaera honen abantaila garrantzitsuenetako bat gas-solido kontaktu handia da [149]. Izan ere, alboko irteera ohantzearen gainazala baino beherago dagoenez, eraztunguneko solidoen artetik igaro behar da gasa kontaktoretik atera aurretik. Ohiko iturri ohantzean oster, sarrerako gasaren zati bat soilik barneratzen da eraztungunean zehar. Honen guztiaren ondorioz, aldaera honen beste abantaila bat erreakzio katalitikoetan gasaren konbertsio maila altuak lortzea da [369]. Gainera, aldaera honen beste abantaila bat partikula finekin lan egiteko ahalmena da [148]. Partikula tamaina txikiko katalizatzaile solidoekin operatzean, erreakzio heterogeneoetan lortzen den gasaren konbertsio maila beste edozein iturri ohantzearekin lortzen dena baino handiagoa da [148].

Hala ere, iturri ohantzearen aldaera honen lehenengo diseinuan, gasaren alboko irteeran sarea kokatu zutenez pantaila gisa [149, 368, 369], partikula fin eta hauskorrak erabiltzean arazoak sortu ziren. Izan ere, partikula hauek sarea buxatu egiten zuten eta berehala sortzen ziren presio galera handiak. Arazo hau konpontzeko, solido geldoz osatutako ohantze finkoa kokatu zuten alboko irteeraren kanpoaldean [148], 1.8. Irudian azaltzen den bezala.



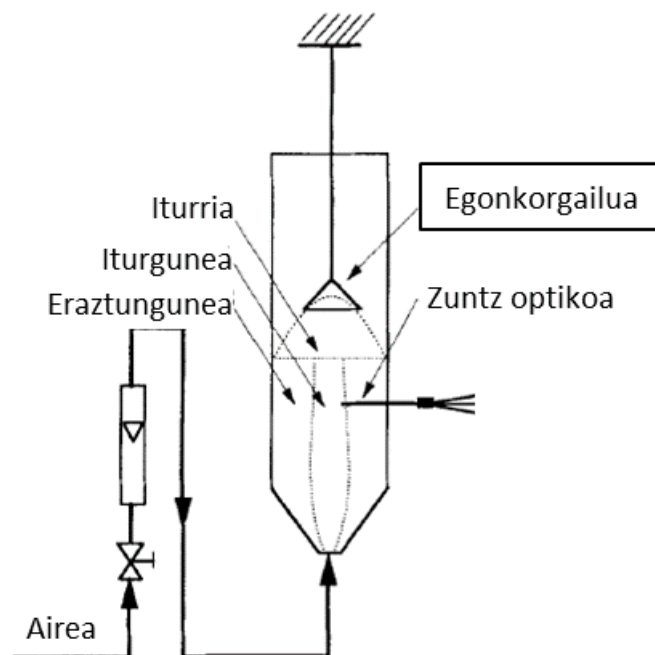
1.8. Irudia. Ohantze finkoz osaturiko alboko irteera duen iturri ohandzearen eskema.

1.8. Irudian ikus daitekeenez, alboko irteeran kokaturiko solidoak geldirik daude eta iturri ohandzearen ezaugarri garrantzitsuenetako bat partikula guztiak kontaktorearen barnean uneoro mugitzea da.

Bibliografian aurki daitekeen beste gailu bat txano konikoa da, eta He et al.ek [157] 1994. urtean argitaratu zuten lehenengo aldiz. Gailua plastikoz egina da eta iturriaren gainean kokatu zuten, 1.9. Irudian erakusten den bezala. Ikertzaile hauen arabera, gailu honen helburua iturriaren egonkortasuna lortzea eta iturriaren zein iturgunearen oszilazioak ekiditea da. Hala ere, gailu honek ez du inolako eraginik sistemaren hidrodinamikan, ez baitu iturriaren forma eta altuera aldatzen. Nahiz eta lan askotan erabili zuten, egonkortzeko ahalmena apenas aipatzen dute [156, 157, 159, 160].

Aurretik aipatu den bezala, erdiko hodiekin partikula finen operazio egonkorra (iturri ohandze erregimenean) ahalbidetzen dute, baina iturkuntzarako abiadura handietan solidoen arrastea gertatzen da. Arrazoi honengatik, gure ikerketa taldean iturri bilgailua proposatu zen eta partikula lodien eta finen arteko nahaste bitarraren arrastea aztertzen [20, 27]. Ikertzaile hauen arabera, sistemaren egonkortasuna hobetzeaz gain, arrastea %80tik gora murriztu daiteke. Izan ere, gasa iturgunetik ateratzean bilgailuaren barnean sartzen da partikulekin batera, eta berriz ere behera egiten du bilgailutik ateratzeko. Hori dela eta, gailu honek gasaren denbora egoitza eta ibilbidea luzatu egiten du. Efektu honek solidoen arrastea murrizten du eta partikula finenak baino ez dira arrastatzen. Era berean, Altzibar et al. en [27] arabera, iturri ohandzeak sistemaren egonkortasuna hobetzen du baita sistemaren presio galera eta iturriaren altuera

txikiagoak bideratu ere. Hala ere, iturri bilgailuak ia ez du iturkuntzarako abiadura minimoan eragiten.



1.9. Irudia. Egonkorgailu eta ekipoaren diagrama eskematikoa.

Iturri bilgailuaren parametro geometrikoak bilgailuaren luzera (L_F), diametroa (D_F) eta ohandzearen gainazalaren eta bilgailuaren beheko zatiaren arteko distantzia (H_F) dira. Azkeneko bi parametroak izan dira gehien aztertu direnak. Altzibar et al.ek [27] bilgailuaren bi diametro eta hiru distantzia ezberdin erabili zituen saiakuntzetan. Geroago, konfigurazio ezberdinak erabiliz, Estiati et al.ek [120] arrastearen azterketa sakondu zuten H_F -ren balio handiagoetarako ($0 - 0.1 m$). Ikerlari hauen arabera, hodirik gabeko sistemetan gertatzen da arraste handienak eta hodi ez-porotsudun sistemetan oster, txikiak. Irekiduradun sistemak erabiltzean tarteko balioak lortzen dira. Bestalde, arraste minimoa sortzen den distantzia $H_F = 0.08 m$ zela ondorioztatu zuten.

Arrasteaz gain, finen lehorketan duen eragina ere aztertu zuten Estiati et al.ek [119], eta horretarako, hiru konfigurazio ezberdin erabili zituzten: irekiduradun hodia, hodi ez-porotsua eta porotsua. Konfigurazio guztietan bilgailurik gabe eta bilgailua erabilia operatuz, partikula finen lehorketa aztertu zuten. Ikusi ahal izan zuten, lehorketa denbora, presio galera eta airearen emaria murriztu egiten dira bilgailua erabiltzen denean.

Bestalde, Pablos et al.ek [284] partikula fin eta ultrafinen lehorketarako azterketa hidrodinamiko orokorra egin zuten hiru konfigurazio ezberdin erabiliz: erdiko

hodirik gabe, eta irekiduradun hodia eta hodi ez-porotsua dituzten sistemak. Hauen arabera, hodirik gabeko sistemak dira presio galera eta iturkuntzarako abiadura minimo handienekoak, eta hodi ez-porotsudunak oster, txikienekoak (irekiduradun sistemak tartekoak dira). Horretaz gain, partikula tamaina txikitzean presio galera eta iturkuntzarako abiadura minimoa murriztu egiten dira. Azkenik, ohantzearen altuera handitzean, aipaturiko bi parametroen balioak gora egiten dute, baina hodirik gabeko sistemetan ez da erregimen egonkorrik lortzen ohantzearen altuera oso handietarako.

Behin partikula hauen hidrodinamika aztertuta, Pablos et al.ek [285] irekiduradun hodia hornituriko partikula fin zein ultrafinen lehorketa saiakuntzak egin zituzten. Izan ere, aurreko lan batean [284] ondorioztatu zuten, irekiduradun hodia duten sistemak dira gas-solido kontaktu hoberenekoak. Lehorketarako, ohantzearen gainazalaren eta bilgailuaren arteko distantzia optimoa $0.10 - 0.15 m$ dela eta bilgailuaren luzera optimoak $0.5 - 0.9 m$ dela ondorioztatu zuten.

Saldarriaga et al.ek [324] iturri bilgailuak biomasaren ziklo denboran duen eragina aztertu zuten hiru konfigurazio ezberdinetan: erdiko hodirik gabe, irekiduradun hodiak eta hodi ez-porotsuak. Beraien arabera, iturri bilgailua eta erdiko hodia biak erabiliz lortzen dira barne gailurik gabe baino operazio erregimen egokiagoak. Oster, iturri bilgailua erabiliz lorturiko ziklo denborak erdiko hodi eta bilgailuaren konbinazioarekin lorturikoak baino uniformeagoak dira.

Cortazar et al.ek [91, 92, 93] eta Lopez et al.ek [219] iturri bilgailuaren eragina aztertu zuten biomasaren gasifikazioa erdiko hodi ez-porotsudun sistemetan eginez. Ikertzaile hauen arabera, iturri bilgailua erabiliz lorturiko tenperatura profilak ohiko iturri ohantze konikoetan lortzen direnak baino uniformeagoak dira, eta gas eta solidoaren egoitza denboren distribuzioak estuagoak dira. Gainera, iturri bilgailua tenperatura altuetan erabiliz, mundrunaren (ingelesez “tar” deritzonaren) eta egur-ikatzaren (ingelesez “char” deritzonaren) ekoizpen minimoa lortzen da, hau da, prozesuaren eraginkortasuna hobetzen da.

Beraz, gure taldean buruturiko ikerketen arabera, bilgailuak iturri ohantzearen operazioa nabarmen hobetzen du. Hala ere, gaur egun ezjakintasun handia dago partikula finen iturkuntzan eta, beraz, tesi honen helburu nagusia hutsune hori betetzea da.

1.3. PARTIKULEN JARRAIPENERAKO TEKNIKAK

Gaur egun, fase anitzeko fluxuaren teknologiak oso garrantzitsuak dira industria kimikoan. Bi edo fase gehiagoko sistemak oso erabiliak dira arlo ezberdinetan, hala nola, erregaien prozesamenduan edota produktu kimiko, farmazeutiko eta material berezien ekoizpenean. Nahiz eta fase anitzeko sistemak oso erabiliak diren, bertan gertatzen diren fenomenoak konplexuak dira eta oraindik ez dira guztiz ezagunak. Ezagutza hauek beharrezkoak dira eskala ezberdinen artean erlazioak sortu eta eskala aldaketak modu errazean egiteko.

Fase anitzeko sistemetan, fluxuaren portaeraren ulermen egokia izateko datu esperimentalak erdietsi behar dira. Lorturiko datuak fidagarriak izan daitezzen, kome-nigarria da erabilitako teknikak fluxuan perturbaziorik ez sortzea, hau da, teknika ez intrusiboa izatea. Izan ere, teknika hauen fidagarritasuna ezinbestekoa da proposatu-riko modeloen ebaluazioa egin eta baliozkotzat jotzeko, eta hortaz, eskala aldaketa arrakastatsua lortzeko.

Bibliografiari erreparatzen bazaio, azken urteetan partikulen jarraipena bu-
rutzeko hainbat teknika ezberdin aurki daitezke, baita teknika hauek sailkatzeko eriz-
pideak ere. Hala ere, gehien erabili den tekniken sailkapena teknikak fluxuarekin duen
interakzioaren arabera da, hau da, intrusiboa den ala ez. Teknika intrusiboetan,
neurgailua erreaktorearen edo neurtu nahi den fluxu edo partikularen eremuan koka-
tzen da, eta ez intrusiboetan ostera, erreaktoretik edo neurketa eremutik kanpo ko-
katzten da. Ikertzaile gehienek teknika ez intrusiboak erabiltzea gomendatzen dute,
neurgailuak sortzen duen perturbazioa nulua baita. Hala ere, hainbat kasutan ez da
posible teknika ez intrusiboak erabiltzea eta, hortaz, erabilitako teknika intrusiboaren
perturbazioa minimoa izatea saiatzen da. Bestalde, gerta liteke teknika bera intrusiboa
eta ez intrusiboa izatea, PIV (Particle Image Velocimetry) metodoarekin gertatzen den
bezala. Jarraian, sailkapenaren arabera bibliografian aurki daitezkeen teknika garran-
tzitsuenak azalduko dira.

1.3.1. Teknika ez intrusiboak

Teknika erabilienak ez intrusiboak dira eta ugari aurki daitezke bibliogra-
fian. Ohantze fluidizatuaren teknologia iturri ohantze teknologia baino zaharragoa de-
nez, bibliografian ohantze fluidizatuaren erregimena karakterizatzeko teknika ezberdin
gehiago erabili dira. Hala ere, tesi honetan iturri ohantze erregimena aztertzeko erabili
diren teknikak azalduko dira soilik, horien artean garrantzitsuenak hurrengoak direla-
rik: gamma izpien bidezko jarraipena, erresonantzia magnetikoa, positroi-igorpene, X

izpien tomografia, kapazitantzia elektrikoaren tomografia eta irudien bidezko partikulen jarraipena (Particle Image Velocimetry, PIV).

Gamma izpien bidezko jarraipena

Gamma izpien bidezko jarraipen metodoa gehien erabiltzen den tekniketako bat da. Izan ere, gamma izpien erabileraren arabera teknika ezberdinak sailkatzen dira: tomografia, dentsitatearen neurketa eta partikula erradioaktiboen jarraipena. Teknika ezberdin guztietan gamma izpiak erabiltzen dira, baina hauen iturria edo erregistratzeko era ezberdina da.

Ordenagailu bidezko tomografian (Gamma ray computed tomography, CT) teknezio-99, kobalto-60 edo zesio 137 isotopo erradioaktiboak sortzen duen gamma izpi iturria erabiltzen da. Neurtu nahi den fasea gamma izpien bidez bonbardatzen da eta neurgailu batek jasotzen ditu, sodio iodurozko (NaI) detektagailuak hain zuzen ere. Horretarako, izpiak angelu ezberdinetan neurtzen dira, hau da, detektagailua laginaren inguruan mugitzen da, edo eta hainbat detektagailu kokatzen dira ardatz axialean zehar. Era honetan, hainbat detekzio edo irudi lortzen dira, eta hauek elkartuz hiru dimentsioko irudia eraikitzen da.

Metodo honen bidez, iturri ohantzean solido zein gasaren kontzentrazio banaketa eta abiadura [6, 8, 12, 15] neurtu dira. Emaizta hauek lortzeko, detektagailutik lorturiko datuak Beer-Lambert legearen bidez interpretatzen dira eta pixel eremura igaroz berreraikitzen dira. Ikertzaile hauek [8, 12, 15] dimentsio ezberdineko bi iturri ohantze ezberdinetan aplikatu zuten teknika hau, eta He et al.ek [158] eskala handitzeko proposaturiko korrelazioa aplikatzean doiketa ezegokia lortu zuten.

Bestalde, Aradhya et al.ek [43] iturri ohantzean alde batetik bestera gurutzatzen duten isotopo kopurua edo dentsitatea neurtu zuten. Izan ere, ikertzaile hauek diotenez [6, 43], iturri ohantzearen erregimenaren arabera (ohantze finkoa, iturkuntza eta erregimen ezegonkorra) gurutzaturiko isotopo kopurua ezberdina da eta erregimen ezberdinen karakterizazio zehatza egin daiteke. Teknika honi gamma izpien dentsitatearen neurketa deritzo eta kasu honetan gamma izpi iturri bat eta detektagailu bat nahikoa dira datu fidagarriak lortzeko.

Azkenik, gamma izpiekin erlazionaturiko beste teknika bat partikula trazatzaileena da. Kasu honetan, isotopoen iturria partikula bat edo multzoa da eta hainbat detektagailu kokatzen dira kontaktorearen inguruan altuera ezberdinetan. Partikula trazatzaileak erreaktore nuklear batean aktibatzen dira neutroi termikoen bonbardaketaren bidez, eta orokorrean, 80 – 100 eguneko bizitza aktiboa dute. Partikula erradioaktiboa detektagailu bakoitzetik hurbil igarotzean, detektagailuak tentsioa sortzen

du. Hala ere, teknika honen desabantaila partikularen jarraipen diskretua da. Hortaz, partikularen monitorizazioa jarraitua izan dadin triangulazio prozesua [14], korrelazio gurutzatua [80] edo sare neuronalak [137] erabili behar dira.

Partikula trazatzaileak erabiliz, ohandzeko solidoen abiadura zuzenean neurtzen da [13, 14, 80, 101, 318], baina beste hainbat ezaugarri hidrodinamiko ere lor daitezke, hala nola, solidoen nahasketa [9, 202], partikulen ibilbideak [79, 80, 202], masa transferentzia iturgunean zehar [202, 318], partikulen ziklo denboraren banaketa [318], iturgunearen forma [318] edota partikula solidoen fluxua [355]. Partikula trazatzaileez gain, Spreutels et al.ek [356] gasaren egoitza denboraren banaketa neurtu zuten gas trazatzaile erradioaktiboa erabilita. Horretarako, trazatzaile gisa erreaktore erradioaktiboan irradiazio bidez aktibaturiko argona erabili zuten.

Erresonantzia magnetikoa

Partikula solidoen jarraipena burutzeko beste metodo bat eremu edo indar magnetikoen erabilera da, eta iragazkortasun magnetiko handia duten solido trazatzaileak erabiltzen dira. Teknika honen funtsa, partikula trazatzaileak haril batetik pasatzean honek sortzen duen induktantzia efektiboan gertatzen den aldaketa neurtzean datza, hau da, harilak sortzen duen eremu magnetikoan partikulak eragiten duen aldaketaren neurketa.

Teknika honen bidez, iturri ohandzeen aldaera ezberdinetan neurtu da partikulen abiadura [184, 241, 250, 295, 385], baita ziklo denborak ere [226, 385]. Hauetaz gain, partikulek iturri ohandzean jarraituriko ibilbideak [241, 385] eta egoitza denbora neurtu dira [303].

Positroi igorpena (PEPT)

Positroien igorpen bidezko partikulen jarraipen metodoa erradioaktibitate neurketako tekniken taldeari dagokio. PEPT teknikak erradioisotopo mota berezi bat erabiltzen du, positroi igorpenen bidez deskonposatzen dena (100.000 aldiz baino sarrago segundoko). Positroiak elektroiekin bat egiterakoan suntsitu egiten dira eta suntsipen bakoitzean materia bi gamma izpitan banatzen da. Izpi hauek detektatu eta talkan emandako zuzena definitzen da. Partikularen posizioa hiru dimentsiotan jakiteko, triangulazio metodoaren bidezko ondoz ondoko hainbat gamma izpi bikoterren intersekzio puntua kalkulatzen da.

Teknika honek 20 m/s -rainoko batezbesteko abiadurak bereizmen handian neurtu ditzake. Aldiz, beraren desabantaila handiena partikula trazatzailearen aktibazioa da, izan ere, erradiazioz aktibatzen dira eta partikula hauek duten bitzta aktiboa

75 minutu ingurukoa da. Gainera, erradiazioa dela eta segurtasun neurri handiak hartu behar dira.

Seiler et al.ek [349] partikulen aleketa modelo proposatzeko positroien igorpen bidezko teknika erabili zuten. Hortaz, teknika hau erabiliz, partikulen ibilbidea, ziklo denboraren banaketa eta iturgunearen porositate eta tamaina neurtu zituzten ikertzaile hauek.

X izpien tomografia

Teknika hau gamma izpien antzekoa da, baina ezberdintasuna izpien eraketan dago. Izan ere, X izpiak fenomeno estranuklearretan sortzen dira (orbita elektronikoa-ren mailan), batez ere elektroien dezelerazioagatik. Gamma izpien teknikan bezala, X izpien iturritik sorturiko ioiak neurtzea eremua gurutzatu eta detektagailuan jasotzen dira. Modu honetan, X izpiek sorturiko irudiak lortzen dira.

Teknika hau erabiliz, Wu et al. [393] eta Yang et al. [398] ikerlariek iturgunearen forma, iturgunearen tamaina, iturriaren forma eta iturriaren altuera neurtu zituzten. Bestalde, Bieberle et al.ek [69] X izpien bidez lorturiko irudietatik abiatuz, ohantzeko partikulen abiadura neurtu zuten. Horretarako, lorturiko irudietan korrelazio gurutzatuaren metodoa erabili zuten.

Kapazitantzia elektrikoaren tomografia (ECVT)

Teknika honen oinarria materialen permitibitatearen neurtzea da. Hau da, neurturiko kapazitantziaren balioen bidez materialen permitibitatea kalkulatu da, eta hau jakinik zutabearen barneko solidoen banaketa kalkulatu da. Izan ere, zutabearen barneko eremu elektrikoaren banaketa permitibitatearen banaketaren arabera da. ECVT teknika erabiliz, Park eta Choi [289] ikertzaileek iturri ohantze erregimen ezberdinen karakterizazioa eta solido frakzio ezberdinen profil erradial eta axialak neurtu zituzten.

Irudien bidezko partikulen jarraipena (PIV)

Teknika ez intrusiboen artean, partikulen jarraipena egiteko teknikarik erabiliena da. Izan ere, teknikaren aldetik metodo sinplea da, une ezberdinetan lorturiko irudien bidezko partikulen jarraipenean oinarritzen baita. Hala ere, teknika honen konplexutasuna abiadura handiko kamerak erabiltzean tratatu beharreko irudi kopuru

handian dago. Kasu honetan, partikulen jarraipena prozesu automatikoen bidez burutzen da eta operazio matematiko zein kode konplexuak behar dira. Bestalde, teknika honen bidez ezinezkoa da hiru dimentsioko sistemaren partikula guztien jarraipena egitea, pareta gardenetik hurbil edota iturrian daudenak baino ezin dira erregistratu [134]. Hau dela eta, egoera honek bi dimentsioko sistemetan [209] eta sistema erdizirkularretan [360] baino ezin da erabili.

Teknika honen bidez partikulen jarraipena egiteko, abiadura handiko kamera edo jarraikako bi kamera erabili behar dira [360]. Era honetan, denbora tarte txikian lorturiko bi irudi jarrai lortzen dira eta bertako partikulen desplazamendua neurtuz abiadura kalkulatzeko da. Lorturiko abiaduren fidagarritasuna handia izan dadin partikulen azelerazioa nulua izan behar da, hau da, irudi batetik besterako denbora tarte oso txikia izan behar da. Bestalde, teknika ez intrusiboa denez, kamera iturri ohantzetik kanpo kokatzen da eta grabaketa planoak iturri ohantze osoa edo neurtu nahi den gunea (iturria, eraztungunea edo iturgunea) hartzen du.

Lorturiko irudiak galdera leihoak deitzen diren irudi txikietan banatzen dira, eta leiho bakoitzean batezbesteko abiadura neurtzen da. Lorturiko irudietan, solidoen tamaina oso txikia denez (partikula baten tamaina 1 pixel baino handiagoa izatea komeni da), leiho bakoitzean hainbat partikula sartzen dira. Oso garrantzitsua da leihoen tamainaren aukeraketa egokia egitea, faktore honen arabera izango baita lorturiko abiadura bektorea. Oro har, bibliografian erabilitako leihoen tamainak hurrengoak dira: 8×8 , 16×16 , 16×32 eta 32×32 pixel. Tamaina ezberdinen aukeraketa irudiaren bereizmenaren (pixel kopuruaren) arabera da.

Leihoren tamaina aukeratu ondoren, korrelazio gurutzatua aplikatzen da. Metodo honetan, korrelazio koefizientea deitzen den parametro estatistikoa neurtzen da galdera leiho bikote bakoitzean eta balio maximoko posizioak aukeratzen dira. Hortaz, partikulek denbora tarte zehatzean eginiko batezbesteko desplazamendua da bi posizioen arteko distantzia.

Hortaz, teknika honen bidez, partikulen abiadura neurtzeaz gain [134, 209, 345, 360, 407, 413, 414], solido fluxuaren portaera zein partikulen egoitza denbora, gas-solido hidrodinamika [142, 361, 362, 405] eta likidoak eragindako solidoen arteko kohesioak [413, 414] neurtu dira.

Bestalde, nahiz eta PIV teknika partikulen abiadura neurtzeko metodoa izan, kamerak beste hainbat parametro edo fenomeno neurtzeko ere erabili dira. Argitalpen hauek ez dute inolako erlaziorik PIV metodoarekin, baina tesi honekin erlazioa duten irudien hainbat tratamendu egiten dituzte. Kameratik lorturiko irudi gordinari hainbat iragazki aplikatzen zaizkio kontrastea handitzeko, eta horrela irudia binarizatzen (pixel beltz eta zuriak soilik izateko). Era honetan, iturgunearen definizioa [399, 400, 401],

erregimen ezberdinen karakterizazioa [165, 256, 282, 344, 394, 409], solidoen nahasketa indizea [191, 405] eta iturriaren altuera [183, 401] neurtu da besteak beste.

1.3.2. Teknika intrusiboak

Aurretik aipatu denez, gehien erabiltzen diren metodoak teknika ez intrusiboak dira, baina azken urteetan intrusiboek indar handia hartu dute. Hauen artean garrantzitsuenak zuntz optikoa eta PIV metodoak dira.

Zuntz optikoa

Teknika intrusiboen artean gehien erabili den metodoa da. Zuntz optikoa argi iturri eta bi sentsorez osatua dago. Argi iturria sentsoreen artean kokatzen da lerrokaturik eta hirurak partikularen ibilbidearen norantzan jartzen dira. Aipaturiko hiru gailuak, oro har hodi baten barnean kokatzen dira eta iturri ohantzean barneratzen da.

Partikulak mugimendu gorakorra badu argi iturriko izpiak islatu eta beheko sensorera heltzen dira. Seinalea fotodiodoen bidez jaso eta tentsio seinale bihurtzen da. Modu berean, partikulak gora egitean goiko sentsoreak beste seinale bat igorriko du eta, beraz, bi seinaleen arteko atzerapenarekin partikulak sentsore batetik bestera desplazatzeko behar izan duen denbora neurtzen da. Hau dela eta, sentsoreen arteko distantzia efektiboa parametro oso garrantzitsua da eta abiadura angeluar ezaguneko disko birakorrez neurtzen da.

Zuntz optikoa erabiliz, gure ikerketa taldean ikerketa ugari egin dira: iturgunearen forma eta diametroa [267, 329, 333, 336, 337], ohantzearen porositatea [267, 275, 329, 331, 335], partikulen abiadura zein ibilbideak [267, 271, 329, 332, 334], gune hilen forma [329], iturriaren geometria [276, 336, 341] eta ziklo denboren banaketa [334] aztertu dira operazio baldintza eta kontaktorearen faktore geometriko ezberdinetarako.

Gure ikerketa taldeaz gain, beste hainbat ikertzailek erabili dute zuntz optikoa iturgunearen diametroa [7], partikulen abiadura [42, 56, 60, 157, 200, 210, 300, 319, 345, 347, 370, 388, 390], ohantzearen porositatea [56, 300, 319, 390] eta solidoaren zirkulazioaren portaera [177] neurtzeko. Hala ere, zenbait ikertzailek kolokan jartzen dute zuntz optikoaren erabilera, honek sisteman sortzen duen perturbazioa garrantzitsua dela baieztatzen baitute. Santos et al.en [346] arabera, zuntz optikoa erabiltzeak iturguneko solidoen abiadura murriztea dakar, eta ondorioz iturriaren altuera txikitzea. Bestalde, Wang et al.en [388] arabera, sentsoreen arteko distantzia efektiboak lorturiko emaitzetan eragin nabarmena izan dezake, eta parametro honen kalibraketan gehien

eragiten duen faktorea zuntzaren puntan jartzen den beirazko leihoa da. Gainera, ikertzaile hauen arabera, zuntz optikoaren erabilera sentsoreen antzeko diametroa duten partikuletara mugatzen da eta partikula mota ezberdinetarako zuntz optiko aproposa erabili behar da, dagozkien kalibraketak egin ostean.

Irudien bidezko partikulen jarraipena (PIV)

Aurretik aipatu denez, PIV metodoa teknika ez intrusiboa izateaz gain, intrusiboa ere izan daiteke. Gainera, intrusiboa izatean sistema optikoaren diseinua konplikatu egin dezake. Kamerak oro har dimentsio handiak ditu, eta ezinezkoa da sistema esperimentalaren barnean sartzea, sortuko lukeen perturbazioa oso garrantzitsua izango bailitzake. Horretarako, kamera optika egokigailuaz eta endoskopioz hornitu behar da. Optika egokigailuaren bidez kameraren grabaketa planoa endoskopiora egokitzen da, eta endoskopioak grabaketa planoa neurketa sistemara barneratzea ahalbidetzen du. Kasu hauetako kamera abiadura handikoa izaten denez, grabaketa planoa argizatatzeko erabiltzen den argi iturria jarraitua da.

Teknika honen bidez sistema esperimentalaren barnean gertatzen dena ikus daiteke, baina soilik gune puntualetan. PIV intrusiboaren metodoa teknika ez intrusiboa baino berriagoa da iturri ohantzeetan, izan ere, teknika intrusiboa bere orokortasunean askoz konplexuagoa da. PIV ez intrusiboaren muga garrantzitsuenetako bat, bi dimentsioko sistema erdizirkularretara edo zenbait hiru dimentsioko gunetan aplikatu daiteke (iturria edo kontaktorearen paretaren inguruan jaisten diren eraztunguneko solidoei). Teknika intrusiboaren bidez ostera, hiru dimentsioko iturri ohantzearen solido guztiak jarraitu daitezke.

Teknika hau iturri ohantzeetan Txinako ikertzaile talde batek baino ez du aplikatu [84, 309, 310, 311]. Hauek, endoskopioz hornituriko kamera erabiliz, iturri ohantzeko partikulen abiadura eta frakzio bolumetrikoa neurtu dute. Lorturiko irudi gordinek distortsio optikoa, distira desorekatua eta kontraste baxua dutenez, irudiaren kalitatea handitzeko asmoz irudien tratamendu prozesua aplikatzen dute.

Lehendabizi, irudiaren upel efektua murrizteko kalibraketa burutu zuten da, izan ere, ikertzaile hauek erabiltzen duten endoskopioaren lentea angelu handikoa da. Ondoren, iragazki digitala aplikatzen zaio hautsak edo zirkuito elektrikoek sortutako zarata murrizteko, eta hirugarren pausuan, irudiaren kontrastea handitzen da iragazki bat erabilita. Behin irudiaren kalitatea egokia delarik, solidoak hondotik ezberdintzeko binarizatu egiten da eta hauen propietateak (tamaina, partikula zenbakia eta abar) neurtzen dira. Behin irudiko partikulak bereizita, jarraikako bi iruditan dauden partikula berdinak identifikatu eta euren abiadura neurtzen dute. Hala ere, ez da zehazten

nola burutzen duten azken pausu hau eta 4. Kapituluian azalduko den bezala, partikulak bikoteka jarri behar dira emaitza egokiak lortzeko.

Tesi honetan, forma irregularreko partikulen jarraipena burutzeko kode berria proposatu da [52] PIV metodoan oinarrituta Kodearen pausu guztiak 4. Kapituluian azalduko dira zehaztasun handiagoz.

1.4. ITURRI OHANTZEAREN ESKALA HANDITZEA

Iturri ohandze teknologiaren hastapenetik gaur egunera arte burutu diren ikerketek argi frogatu dute teknologia honek abantailak dituela ohandze fluidizatuen aldean. Hala ere, nahiz eta industria mailan zenbait pausu eman diren, eskala handitzea da oraindikarren ere iturri ohandzeen erronka garrantzitsuena, honek mugatzen baitu ezarpen industriala.

Hainbat ikertzailek ekin diote eskala txikiko iturri ohandzeen datuetan oinarrituz eskala handiko ekipoa diseinatzeari. Hala ere, gaur egun ez da garatu eskala handitzeko prozedura argirik eta ziurgabetasun handia dago metodorik onenaren aukeran. Hortaz, ez dago argi zein den iturri ohandzeen tamaina erabilgarririk handiena.

Iturri ohandzeak eskala txikian erabili izan dira orain arte. Azterketa hidrodinamikoak 0.3 m diametroko kontaktoreak erabiliz egin dira gehienbat eta, aplikazioetan ostera, zutabearen diametroa gehienez 1 m -koa izan da. D_C diametroko zutabea eta D_0 diametroko gasaren sarrera duen ohiko iturri ohandzea hartuz, iturri egonkorra lortzeko D_C/D_0 erlazioaren tarte optimoa $6 - 10$ artekoa da [257], eta gehienez 12 ko balioa erabil daiteke (gune hil garrantzitsuak ekiditeko). Era berean, iturri ohandze konikoen iturkuntza egonkorra bermatzeko, Olazar et al.ek [261] D_0/d_p erlazioa 20 ingurukoa izan behar dela aurkitu zuten. Chandnani eta Epstein-ek [81] ostera, 25 inguru aholkatzen dute. Gasaren sarrera bakarreko iturri ohandzeetarako, hurrengoa proposatzen da zutabearen zeharkako azalera guztia hartzen duen iturkuntza konstantea izateko [110]:

$$\frac{D_C}{d_p} = \frac{D_C}{D_0} \times \frac{D_0}{d_p} \leq 300 \quad (1.1)$$

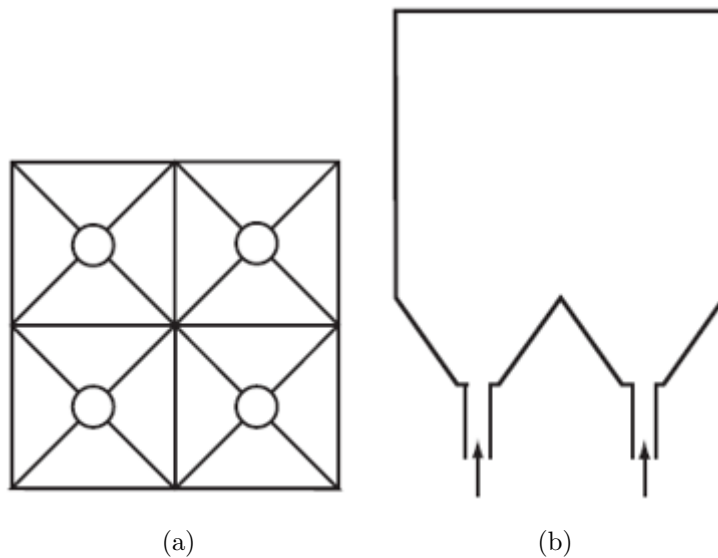
Erlazio hau Nemeth et al.ek [257] proposaturiko gehienezko 200 eko balioarekin bat dator. Izan ere, gasaren sarrera bakarreko iturri ohandzearen hidrodinamika optimoaren goi-muga 300 balioarekin lortzen da. Gainera, iturri ohandzeetan gehien erabili den solidoen partikula tamaina 4 mm ingurukoa edo txikiagoa da, eta tamaina honi dagokion zutabe diametro maximoa 1 m -koa da. Sarreraren diametro handiagoak erabiltzen badira, lortzen den iturkuntza erregimena ez da optimoa eta ezegonkortasunak sortzen dira. Beraz, dimentsio handiagoko ekipoekin lan egiteko, gasa elikatzeo zenbait sarrera edo ekipamendu gehigarriak behar dira.

Eskala handitzearen prozesua errazteko, Mujumdar et al.ek [248] bi dimentsioko iturri ohandzea edota irekiduradun iturri ohandze laukizuzena proposatu zuten. Aldaera hau pare-parean dauden bi horma bertikal eta oinarri prismatikoaz osatua

dago (1.3.d Irudia). Gasa oinarrian kokaturiko zirrikitutik sartzen da eta ohantzean gora doala eraztungunerantz hedatzen da. Bi dimentsioko ohantze hauek ohikoek baino ahalmen txikiagoa dutenez bolumen unitateko, lodiera handiagoa erabiltzea da konponbidea [248, 292]. Beraz, geometria hau erabiltzen bada, lodiera edo zabalera handiagoa erabiliz egin daiteke eskalamendua, eta hori hormak zabalduz egin daitezke.

Hala ere, Zhao et al.en [408] arabera, bi dimentsioko iturri ohantzean hormak ohantzean sortzen duen perturbazioa saihesteko zutabearen lodierak partikula tamaina baino 5 aldiz handiagoa izan behar du. Gainera, erlazio hau aplikagarria izan dadin, partikula tamainaren distribuzioak estua izan behar du eta partikulak esfera formakoak izan behar dira.

Iturri ohantzearen eskala handitzea lortzeko beste bide bat gasaren sarrera anitzen erabilera da, hau da, sistema orokorra paraleloan kokaturiko iturri ohantze modularretan banatzea. Zutabe edo kontaktore bakoitzera elikatzen den gasa puzgailu beretik edo ezberdinetatik hornitu daiteke, azken kasu hau hodi eta balbula ezberdinak erabiliz kontrolatzen dela. Iturkuntza erregimen egonkorra lortzeko erdiko platerrak edo hodiak erabili daitezke [182, 378]. Gasa sarrera nagusitik sar daiteke edota inguruko zulo txikietatik. Azken konfigurazioari iturri ohantze fluidizatua deritso [10]. 1.10. Irudian erakusten da eskematikoki gehien aztertutako iturri anitzeko geometria.



1.10. Irudia. Iturri anitzeko ohiko iturri ohantzearen geometria [252] (a) azpitik eta (b) alboetik begiratuta.

Hala ere, iturri anitzeko iturri ohantzeek zenbait desabantaila dituzte. Hala nola, iturri ohantze guztietan behar den gas emaria puzgailu beretik hornitzen bada, sortzen diren ezegonkortasunengatik zaila da gasaren fluxu uniforme bermatzea iturri

ohantze guztietan [85, 166, 201]. Hau da, zutabe batzuetan iturririk ez sortzea gerta daiteke. Izan ere, zutabe batean iturria sortzean bertako presio galera asko murrizten da, eta honek aire gehiena bertara joatea eragiten du. Banatzailean presio galera handia bermatzen bada, posiblea da ezegonkortasuna ekiditea eta zutabe guztietan iturria [122, 201]. Iturri ohantze mota honen beste arazo bat iturrien arteko interferentzia da, beraien arteko fusioa gerta baitaiteke. Kasu hauetan zutabe ezberdinen artean deflektore partzialak edo osoak erabiltzen dira. Hala ere, aipagarria da deflektore partzialek ez dutela arazoa guztiz konpontzen [85, 127]. Bestalde, plater bertikalen (ohantzearen goiko aldetik iturriaren goiko aldera luzatzen direnak) erabiltzea egokia da iturri zein iturguneak banatzeko, zutabe ezberdinen arteko partikulen transferentzia baimentzen baitute. Honetaz gain, ohiko iturri ohantzeetan garaturiko erlazio eta emaitzak (iturkuntzarako abiadura minimoa edo iturritu daitekeen ohantze altuera maximoa) aplikagarriak dira iturri anitzeko ohantzeen iturkuntza aurreratzeko [57, 127].

Aurretik aipatu bezala, sarreraren eta partikula diametroaren arteko erlazioak (D_0/d_p) mugatzen du iturri ohantze konikoen eskala handitzearen arrakasta [261]. Izan ere, laborategiko planta pilotuan egonkorak diren ohantzeak ($1 - 8\text{ mm}$ tarteko partikulak) eskala handiko iturri ohantzean era ezegonkorrean funtzionatuko lukete.

Eskala handitzea lortzeko lehenengo pausua erdiko hodiak erabiltzea izan zen. Gailu hauen bidez, iturri ohantzeen operazio baldintzak hein batean zabaldu ziren, hau da, ezaugarri ezberdineko solido ezberdinekin operatzea lortu zen, baina gas-solido kontaktua murriztagoa da. Gainera, partikula fin edo ultrafinen tratamenduan, iturkuntzarako abiadura minimoaren inguruko abiaduretan baino ezin da lan egin, bestela ohantzeko partikulen arrastea gertatzen baita.

Azkenik, eskala handiko iturri ohantzearen portaera hidrodinamikoa deskribatzeko zenbait simulazio teknika daude. Horien artean interesgarrienetako bat jarioen dinamika konputazionala da (*Computational Fluid Dynamics*, CFD). Bibliografian teknika honi buruzko zenbait lan aurki daiteke iturri ohantzeen konfigurazio ezberdinetarako. Adibidez, ohiko iturri ohantzei [411], iturri ohantze konikoei [107, 163, 315, 389, 390], bi dimentsioko iturri ohantzei [162], baita erdiko hodidun iturri ohantzei ere [164, 351, 365, 366, 387] aplikatu zaie. CFD teknika bereziki baliagarria da hidrodinamikan parte hartzen duten fenomenoaren ulermenerako eta eskala handitzeko beharrezko datuak lortzeko [66, 239]. CFD modelaketaren abantaila nagusia gasaren eta solidoaren fluxuaren ezaugarri asko aldi berean eta modu zehatzean aurreratea da fluxuan inolako oztoporik eragin gabe. Hala ere, modelakuntza honetan erabiltzen den aldagai kantitate handia eta erreaktorearen ulertze falta direla eta, hau da, konplexutasuna dela eta, CFD teknika baino erabiliago dira eredu enpirikoak. CFD modelakuntzaren abantaila nagusia gasaren eta solidoaren fluxuaren ezaugarri asko al-

di berean eta modu zehatzean aurreratu datza fluxuan inolako oztoporik eragin gabe. Hala ere, modelakuntza honetan erabiltzen den aldagai kantitate handia eta erreaktorearen ezagutza falta direla eta, hau da, konplexutasuna dela eta, CFD teknika baino eredu enpirikoak erabiliago izan dira.

Irekiduradun iturri ohandze laukizuzenak duten geometria sinplea dela eta, oso egokiak dira CFD bidezko simulazioa egiteko, CFDak behar duen sarea modu errazean eraiki baitaiteke. Hortaz, iturri ohandzeen aldaera honetan, CFDa erabiliz lortzen diren emaitzak oro har bat datoz esperimentalki lortutakoekin [66, 104, 105, 130, 167, 350, 386, 397]. Hala ere, aipatu diren CFDaren zailtasunak direla eta, simulazio prozesu hau eskala handitzearen aurreneko pausu bezala erabiltzea gomendatzen da.

2. KAPITULUA

ATAL ESPERIMENTALA

2.1	PILOTU ESKALAKO EKIPOAREN DESKRIBAPENA	43
2.1.1	Kontaktoreak	47
2.1.2	Erdiko hodiak	48
2.1.3	Iturri bilgailua	51
2.1.4	Ekipoko neurgailuen kalibraketa	53
2.1.5	Kontaktore hutsaren karga galera	55
2.2	PARTIKULEN JARRAIPENERAKO SISTEMA OPTIKOA	58
2.2.1	Sistema optikoa	58
2.2.2	Desplazamendu sistema	62
2.3	MATERIALAK	64
2.3.1	Harea	64
2.3.2	Pinu zerrautsa	67

Atal honetan, tesi guztian zehar esperimentuak egin ahal izateko beharrezkoak diren ekipo, material zein gailuen deskribapena egin da. Burutu diren esperimentu guztiak giro tenperaturan egin dira eta ondorioz, soilik ekipo bat erabili da, pilotu eskalako ekipoa hain zuzen. Honetaz gain, tesi honetan garrantzia handia duen solidoen jarraipenerako sistema optikoaren deskribapena ere egin da, nahiz eta solidoen detekzio eta jarraipenerako sortu den kodea 4. Kapituluaz azalduko den.

Bestalde, saiakuntzetarako erabili diren baldintza esperimentalak, operatzeko erabili diren solido motak eta datuak jasotzeko erabili diren gailuak azalduko dira xehetasunez.

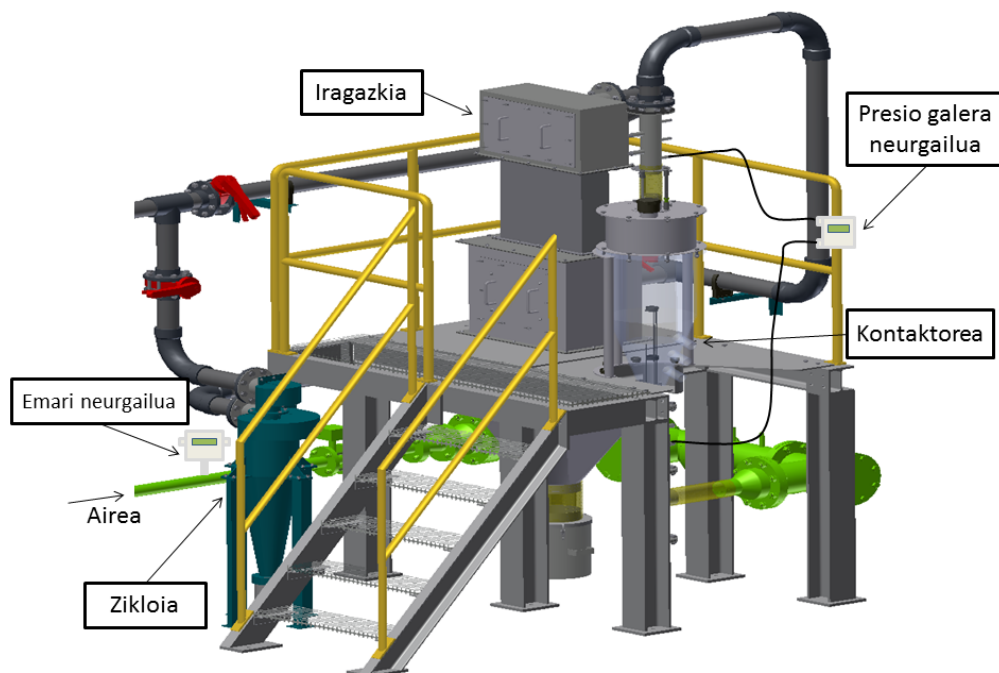
2.1. PILOTU ESKALAKO EKIPOAREN DESKRIBAPENA

Lehen aipatu bezala, tesi osoan zehar ekipo bakarra erabili da esperimentu guztiak egiteko. Izan ere, tesi honen helburuak eta beharrak betetzeko eraiki da ekipo hau eta Estiati doktoreak [117] bere tesiko azken zatirako erabili du finen arrastearen azterketarako hain zuzen. Mota honetako operazioetan gasaren emari handiak erabili behar dira eta, beraz, ekipoa hermetikoa izatea nahitaezko baldintza da. Hortaz, tesian zehar hainbat hobekuntza burutu dira ekipoan, modu egokian funtzionatzeko eta datu fidagarriak lortzeko.

Ekipo honen diseinua aurreko pilotu eskalako beste batean oinarritua da eta hogeita hamar urte baino luzaroagoan lorturiko ezagutzaren ondorioa da [20, 33, 100, 117, 173, 245, 320, 325]. Lan honen helburua iturri ohantzeen eskala handitzea da eta horretarako partikula finekin egin dira saiakuntzak. 2.1. Irudian erakusten da tesian zehar erabili den ekipoa eta ezaugarri nagusiak. Ekipo honen eta aurrekoen arteko desberdintasun nabarmenena hermetikotasunean datza, partikula finekin lan egiteko aurrekoak ez baitzuen irteerako airea garbitzeko sistema egokirik. Hori dela eta, partikula fin guztiak airetik banantzeko iragazki bat ezarri da planta berriaren irteerako aire korrontean.

Ekipo honen abantaila nagusien artean aldakortasuna da garrantzitsuenetakoa bat. Izan ere, ekipo honetan geometria ezberdineko kontaktoreekin lan egin daiteke, baina, aurreko ekipoa ez bezala, ezin dira erabili ohantze finko, fluidizatu edo iturri ohantze koniko-zilindrikoak. Hortaz, ekipo hau iturri ohantze konikoak espresuki erabiltzeko egina dago eta erraz alda daiteke kontaktorea beste edozein angelutako kontaktorea erabiltzeko. Bestalde, gasaren sarrera ezberdinekin lan egiteko diseinatuak daude kontaktoreak eta jarraian operatzea ahalbidetzen dute. Horretarako, kontaktoreek albo irteerak dituzte, baina tesi honetan operazio guztiak ez jarraian burutu dira

eta albo irteera gabeko kontaktoreak erabili dira kontaktore barruko interakzioak begi bistaz hobeto ikusteko.

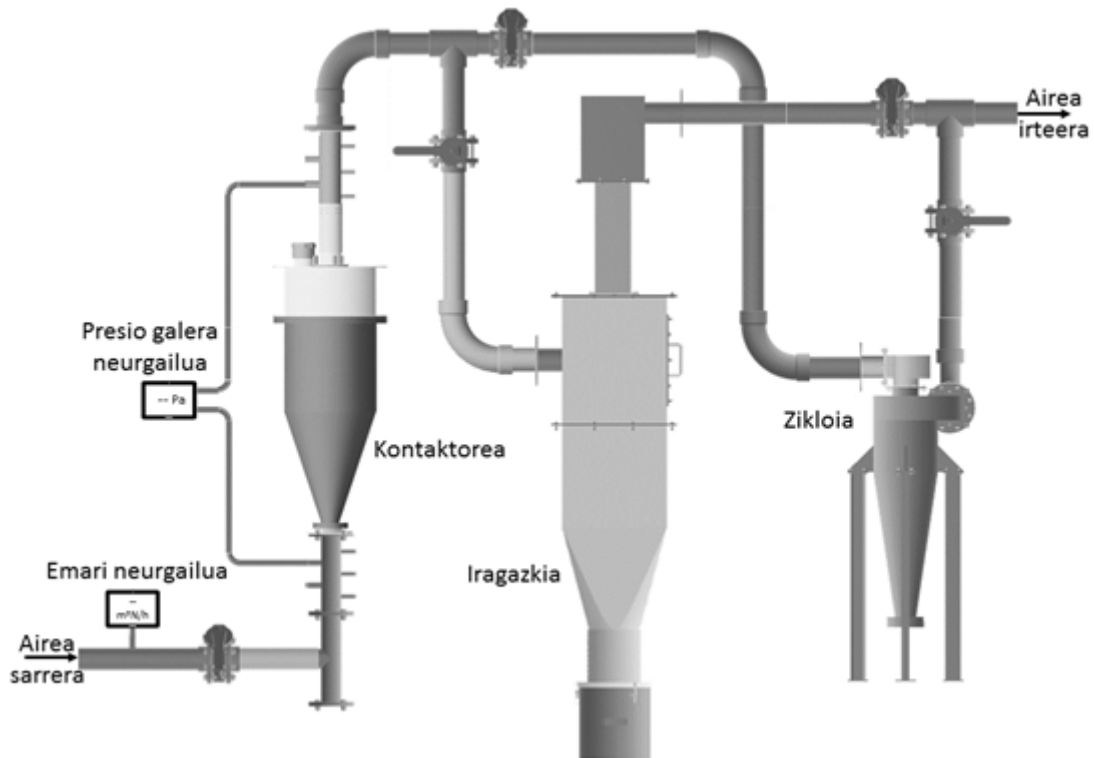


2.1. Irudia. Pilotu eskalako ekipoen eskema orokorra.

Ekipoaren xehetasunak argiago ikusteko, 2.2. Irudian erakusten da ekipoaren diagrama eta beraren osagai nagusiak. Ikus daitekeen bezala, ekipoa hainbat osagai ezberdinez osatua dago eta honen funtzionamendua ulertarazteko asmoz osagai bakoitzaren funtzioa azalduko da. Ekipoaren osagai nagusienak puzgailua, emari neurgailua, presio galera neurgailua, kontaktorea, iragazkia eta zikloia dira. Ekipo osoa kontrol panelez manipulatu eta kontrolatzen da.

Beheko solairuan dagoen puzgailua konektatu zaio ekipoi. Puzgailuak 10.5 kW-ko potentzia du 3000rpm-tan eta iragazkiz hornituta dago partikula finak airetik banantzeko, izan ere, ekipoa hondatu dezaketen partikula solidoen sarrera ekidin behar baita. Puzgailuak aire emari konstantez hornitzen du kontaktorea eta eman dezakeen emari maximoa $400\text{m}^3\text{N/h}$ da 300mbar-eko karga galera maximoarekin.

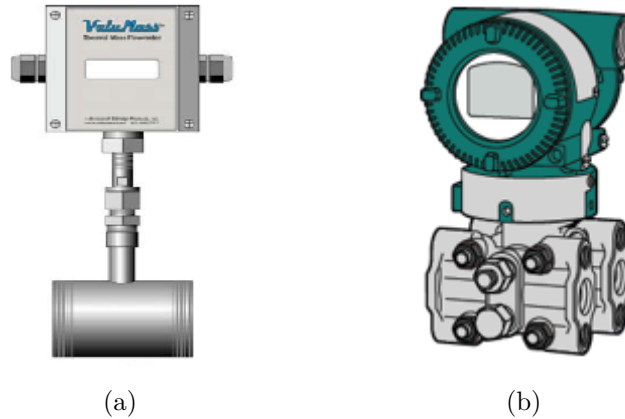
Airearen emaria hainbat gailuren bidez kontrola daiteke. Hasteko, puzgailuaren ostean bypass balbula bat dago eta honen ixte portzentaiarekin kontrolatzen da ekipora elikatu nahi den aire emaria. Hala ere, balbularen posizio batetik besterako aldaketa oso handia da eta emariaren kontrol finagoa nahi izan ezker puzgailuaren motorren maiztasuna alda daiteke maiztasun bariadorez. Azkenik, lortu nahi den emaria guztiz zehaztu nahi bada kontaktorearen sarreran dagoen eskuzko balbulan eragin daiteke.



2.2. Irudia. Pilotu eskalako ekipoen diagrama.

Kontrol panelak programaturiko hainbat ukipen-pantaila ditu eta hauen bidez ekipoa piztu eta itzali egin daiteke. Gainera, balbulan eta puzgailuaren motoreak duen maiztasun bariadorean ihardunez, lan egiteko modua ere hauta daiteke. Operatzeko moduak eskuzko begizta itxia, eskuzko begizta irekia eta era automatikoa dira. Pantaila hauek ekipoa neurtzen diren parametroen balioak erakusten dituzte, hala nola, kontaktorearen sarrera eta irteeraren arteko presio galera, sarrerako airearen emaria eta abiadura, eta sarrerako zein irteerako airearen temperatura eta hezetasuna.

Lan honen helburua partikula finak modu egonkorrean operatzea denez eta hauek tratatzeko behar den emaria txikia denez, oso garrantzitsua da emari txikiak neurtzen dituen neurgailua izatea. Hala ere, lehen aipatu den bezala, hasieran ekipoi jarri zitzaion emari neurgailuak $15\text{ m}^3\text{N/h}$ baino emari baxuagoak ez zituen neurtzen eta, hortaz, beste emari neurgailu bat ezarri da (2.3.a Irudia). Emari neurgailu hau termikoa da eta erresistentziaz eta termometroz horniturik dago. Emari neurgailua, 2.2. Irudian ageri den bezala, sarrerako hodian kokaturik dago eta aireak disipatzen duen erresistentziaren beroa eta aireak duen temperatura jakinda neurtzen du aire emaria. Neurgailuak pantaila bat du eta hainbat balio ematen ditu aldiberean (airearen emaria, temperatura, elikatutako aire emari totala eta abar), baina hau kontrol panelera dago konektatua eta bertan azaltzen da uneoro ekipora elikatzen den aire emaria.



2.3. Irudia. Ekipoko (a) emari eta (b) presio galeraren neurgailuak.

Bestalde, ekipoa bi puntu ezberdinen artean sortzen den presio galera neurtzen duen gailuz horniturik dago (2.3.b Irudia). Kasu honetan ohantzean sortzen den presio galera neurtu nahi da eta horretarako kontaktorearen sarrerako eta irteerako hodiak konektatuta dago gailua. Gailu hau $0 - 5 \text{ bar}$ artean neurtzeko gai da, baina $0 - 2 \text{ bar}$ artean neurtzeko ($4 - 20 \text{ mA}$ irteerako seinalea) konfiguraturik dago lorturiko datuak zehatzagoak izan daitezzen. Gailu hau material piezoelektrikoz horniturik dago eta barne diafragmaren deformazioa korrante elektriko bihurtzen du. Emari neurgailuak bezala, presio galeraren neurgailuak ere pantaila du eta bertan presio diferentziaren balioa ematen du uneoro, baina hau kontrol panelera dago konektatuta eta bertan erakusten da balio hau Pascaletan.

Airea solidoarekin kontaktuan jarri ostean kontaktoretik ateratzen da eta arrastatutako partikulak kanpora joan ez daitezzen airetik banandu egin behar dira. Horretarako, 2.2. Irudian antzeman daitekeen bezala, ekipoak bi bereizketa sistema ditu paraleloan ezarrita, alde batetik, zikloia eta bestetik, iragazpen sistema. Bata edo bestea aukeratzeko parametro kritikoa kontaktoretik ateratzen den emaria da. Zikloia emari altuetan operatzeko diseinaturik dago, izan ere, funtzionamendurako emari tarte optimoa $300 - 450 \text{ m}^3/\text{h}$ da, $1000 \text{ mm H}_2\text{O}$ -ko presio galerarekin. Bestalde, iragazpen sistema erabiltzerako orduan ez da komenigarria $200 \text{ m}^3/\text{h}$ baino emari handiagoekin lan egitea. Banatu behar den solidoaren tamainak ez du garrantzi handirik bata edo bestea aukeratzeko orduan, izan ere zikloiaren eraginkortasuna $50 \mu\text{m}$ -tik behera hasten da jaisten, eta iragazpen sistemak aldiz, $5 \mu\text{m}$ -ko partikulak banantzeko gai da. Banandutako solidoak ontzi hermetikoetan biltzen dira eta airea purga lerrora bidaltzen da. Hortaz, tesi honetan buruturiko esperimentu guztiak harea finarekin egin direnez, iragazpen sistema baino ez da erabili.

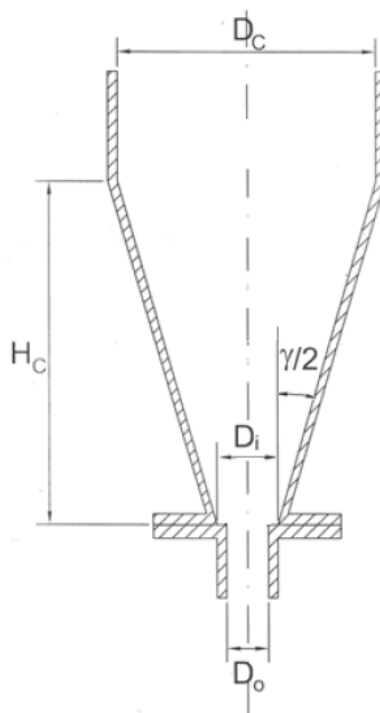
Lehen esan bezala, ekipo berri honen abantaila nagusietako bat bere alda-

kortasuna da; kontaktore, iturri bilgailu, erdiko hodi eta gasaren sarrerako diametro ezberdinekin lan egitea ahalbidetzen baitu.

2.1.1. Kontaktoreak

Ekipo honen osagai garrantzitsua iturri ohandze kontaktorea da, bertan gertatzen baita jariakinaren eta solidoaren arteko kontaktua, erreakzioen edo prozesu fisikoen kasuan bezalaxe. Geometria ezberdineko kontaktoreak aurki daitezke bibliografian, baina lan honetan geometria konikoa duten kontaktoreak baino ez dira erabili. Tesi honetako esperimentuen aldagaiak zehaztasunez neurtzeko beharrezkoa da kontaktorearen barnealdea ikustea eta horretarako kontaktoreak metakrilatoz edo PETez (polietilen tereftalatoz) eginda daude, izan ere material hauek gardentasun handia baitute eta ohandzean sortzen duen presioa ere ondo jasaten baitute.

Ekipo honetan kontaktore koniko ezberdinekin lan egin daitekeenez, tesin honetan hiru angelu ezberdineko kontaktoreekin egin da lan; 28° , 36° eta 45° angeluko kontaktoreekin hain zuzen. 2.4. Irudian erakusten dira erabilitako kontaktoreen faktore geometrikoak.



2.4. Irudia. Kontaktore konikoen faktore geometrikoak.

2.4. Irudian azaltzen diren faktoreak hurrengoak dira: zati zilindrikoaren diametroa (D_C), kontaktorearen zati konikoaren altuera (H_C), kontaktorearen angelua

(γ), kontaktorearen oinarriaren diametroa (D_i) eta gasaren sarrerako diametroa (D_0). Faktore guzti hauen balioak aldatu egin daitezke zati zilindrikoaren diametroa eta kontaktorearen oinarriaren diametroa izan ezik. 2.1. Taulan adierazten dira Tesi honetan erabili diren faktore hauen balio guztiak.

2.1. Taula. Kontaktore konikoen dimentsioak.

Faktore geometrikoak	1. Kontaktorea	2. Kontaktorea	3. Kontaktorea
γ ($^\circ$)	28	36	45
H_C (m)	0.58	0.45	0.35
D_C (m)	0.36	0.36	0.36
D_i (m)	0.062	0.062	0.062
D_0 (m)	0.03, 0.04, 0.05	0.03, 0.04, 0.05	0.03, 0.04, 0.05

2.1. Taulan ageri den bezala, gasaren sarrerako diametroa kontaktorearen oinarriaren diamentroraino handitu daiteke. Gasaren sarrerako diametroa aldatzeko kautxuz egindako diafragmak erabiltzen dira. Hauek 4mm-ko lodiera dute eta kontaktorearen oinarrian kokatzen dira. Honekin batera sare metaliko bat ezartzen da ohantzeko solidoak kontaktoretik airearen sarrerako tutura jauzi ez daitezen. Tesi honetan hiru harea partikula tamaina ezberdin erabili direnez ohantzean, honen arabera hiru sare metaliko erabili dira: 0.5, 0.3 eta 0.11mm-ko tramako sareak.

Azkenik, aurrerago hobeto azalduko den arren, 16mm-ko diametroa duten zuloak egin zaizkie kontaktoreei paretan zehar goitik beherako lerroan, zuloen zentroen arteko distantzia 20mm-ko dela. Zulo hauen helburua abiadura handiko kameraren endoskopioa kontaktore barrura sartzea izan da, horrela partikula solidoen abiadura puntuala neurtu ahal baita.

2.1.2. Erdiko hodiak

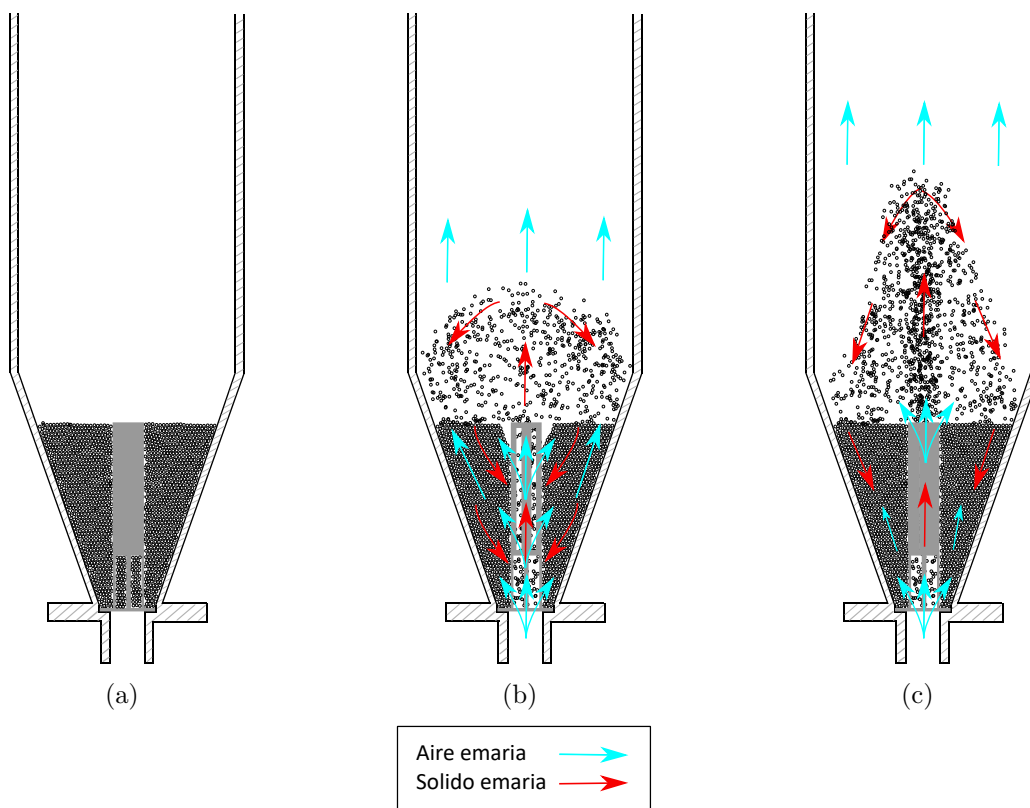
Tesi honen helburu garrantzitsuenetako bat partikula finen operazio egonkorra erdiko hodirik gabe lortzea izan da eta hori iturri bilgailua erabiliz lortu da. Hala ere, nahiz eta iturri ohantze konikoek aldakortasun handia izan, orain arte ez da lortu erdiko hodirik gabe partikula finekin erregimen egonkorrean operatzea. Iturri bilgailurik eta erdiko hodirik gabe sortzen den ezegonkortasuna dela eta, ezin da iturri ohantze erregimenean lan egin. Ondorioz, lortzen den gasaren eta solidoaren arteko kontaktua ez da nahi den bezalakoa.

Iturri ohantzetan erregimen egonkorren lorpena gasaren sarrerako diametroaren eta partikula diametroaren arteko erlazioak mugatzen du, hau da, erlazio honen iturri ohantzearen eskala handitzea mugatzen du. Horrela, gasaren sarrerako dia-

metroak partikula diametroa baino 20 – 30 aldiz handiagoa izan behar du [261] iturri ohantzeak modu egonkorrean opera dezan eta gasaren eta solidoaren arteko kontaktua behar bezalakoa izan dadin. Erlazio hau bete ezean ez da iturgune definiturik sortzen eta gasa burbuila moduan igotzen da ohantzean zehar, emari handietan slugging efektua ere lortzen dela. Nahiz eta iturri bilgailuarekin arazo hau ekidin eta erlazioaren balioa askoz handiagoak erabili ahal daitezkeen, erdiko hodia da konponbide ohikoa. Hodi hauek iturkuntza egonkorra ahalbidetzen dute eta ezegonkortasunak ekiditen dituzte.

Hala ere, erdiko hodiekin ohantzearen portaera hidrodinamikoa aldatzen dute eta erabiltzerakoan abantailak zein desabantailak izan behar dira kontuan. Abantailen artean, nagusienak emari minimoaren zein presio galeraren balioak murriztean eta operatu daitezkeen ohantzearen altuera maximoaren handitzean datza. Desabantailen artean, garrantzitsuenak solido eta gasaren arteko kontaktu murrizketan datza.

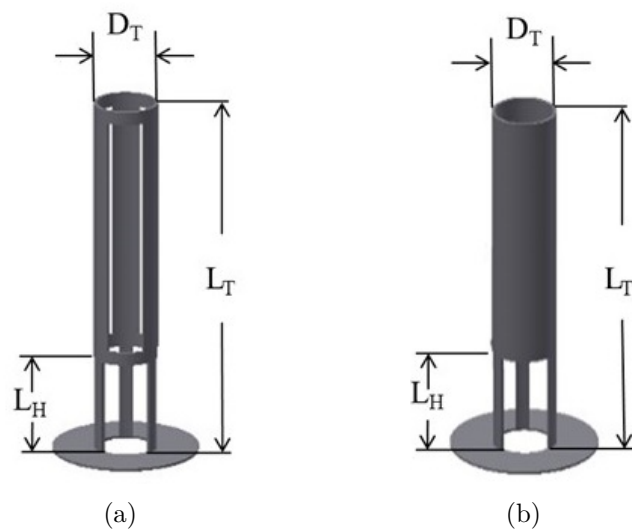
1. Kapituluak adierazi den bezala, bibliografian hainbat erdiko hodi mota ezberdin aurki daitezke, baina lan honetan bi hodi ezberdin baino ez dira erabili, hots, irekiduradun hodiak eta hodi ez-porotsuak. 2.5. Irudian erakusten da erdiko hodiaren kokapena kontaktorean eta gasa eta solidoaren zirkulazioa hodi bakoitzerako.



2.5. Irudia. (a) Erdiko hodiaren kokapena kontaktorean eta gasa zein solidoaren zirkulazioa (b) irekiduradun erdiko hodia erabiliz eta (c) erdiko hodi ez-porotsua erabiliz.

2.5. Irudiak erakusten duen bezala, erdiko hodiaren arabera bi faseen zirkulazioa ezberdina da. Irekiduradun hodiak erabiltzen direnean, eraztungunetik jaisten diren solidoak ohandzearen edozein altueratan sar daitezke iturgunera eta kontaktorera sartzen den airea ohandzearen edozein altueratan barreiatzen da iturgunetik eraztungunera. Hau, oster, hodi ez-porotsuak erabiltzen direnean ez da gertatzen, izan ere, hodiaren hanken altuerak mugatzen du solidoen eta gasaren pasabidea bi zonaldeen artean eta kontaktua eskasagoa da ondorioz.

2.6. Irudian azaltzen dira erdiko hodi mota bakoitzaren faktore geometrikoak. Kasu honetan, kontaktorearekin ez bezala, faktore guztiak aldatu dira esperimentuak burutzeko. 2.2. Taulan erakusten dira faktore geometrikoak eta beraien balioak.



2.6. Irudia. Erdiko hodi ezberdinak eta berain faktore geometrikoak.

2.2. Taulan ikus daitekeenez, tesi honetan bederatzi irekiduradun hodi eta bost hodi ez-porotsu ezberdin erabili dira. Irekiduradun hodiaren kasuan, luzera (L_T), diametroa (D_T) eta irekidura portzentaia (IP) aldatu dira. Hodi ez-porotsuen kasuan, luzera (L_T), diametroa (D_T) eta solidoa sartzeko gunearen luzera (L_H).

2.2. Taula. Erdiko hodiaren dimentsioak.

Faktore geometrikoak	Irekiduradun hodiak	Hodi ez-porotsuak
L_T (m)	0.20, 0.27	0.20, 0.27
D_T (m)	0.04, 0.05	0.04, 0.05
IP (%)	78, 57, 42	
L_H (m)	0.07	0.07, 0.15

Bi hodiaren kasuan, bi altuera (L_T) erabili dira, izan ere, faktore honen balioa ohandzearen altuerak (H_0) mugatzen baitu. Hau da, aurreko ikerketetan ondorioztatu

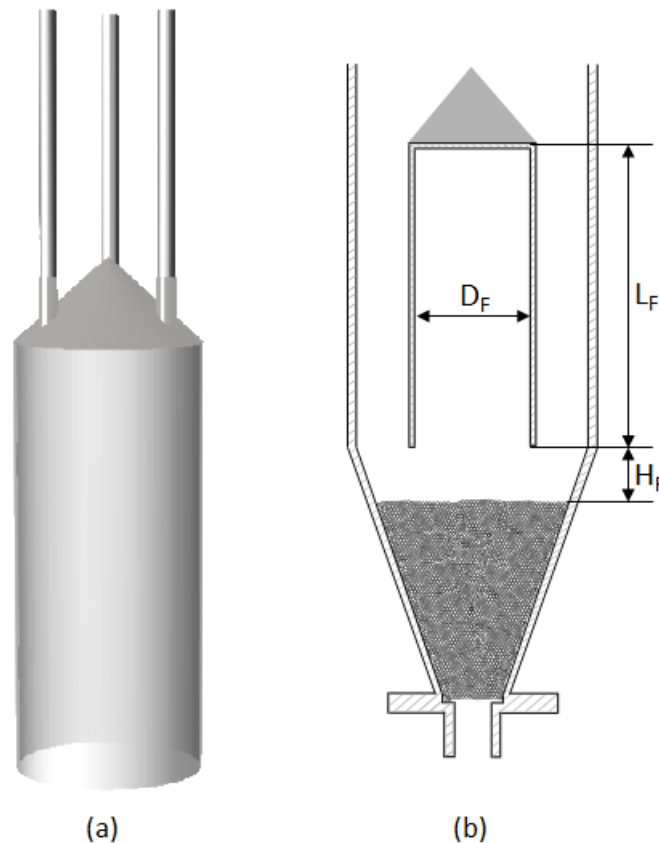
denez, erdiko hodiaren altuera ohantzearena baino handiagoa denean, iturri oso altuak eta itzelezko arrastea geratzen da. Irekiduradun hodiaren kasuan, hiru irekidura portzentaia ezberdineko hodiak erabili dira, hala nola, %78ko, %57ko eta %42ko irekidurak dituzten hodiak.

2.1.3. Iturri bilgailua

Nahiz eta finen operazio egonkorra lortzeko erdiko hodiak erabiltzea den konponbide egokiena, hauek emari baxuetan lan egitera behartzen dute, minimotik gertu hain zuzen. Gasaren emaria handitzeak iturri ohantzearen iturria altuagoa izatea dakar eta, finak erabiliz gero, hauen arrastea gertatzen da ohantzea erabat kontaktoretik aterara arte. Hortaz, partikula finen tratamenduan apenas erabili dira emari altuak. Ostera, iturri bilgailuaren bidez, minimoa baino 10 aldiz handiago izan daiteke gasaren emaria solidoaren arrastea sortu gabe eta, beraz, ohantzea kontaktorean dagoela.

Iturri bilgailudun ohantzea iturri ohantzearen aldaera bat da eta ikerketa taldean garatu da finen arrastea ekiditeko asmoz. Altzibar-en tesian [20] aztertu zen lehen aldiz partikula handien eta finen nahastea zuen ohantzearen arrastea eta, ondoren, Estiati-ren tesian [117, 120] sakondu zen gai bera, baita finen lehorketa ere [119]. Gainera, Altzibar-en tesian [20] partikula handien azterketa hidrodinamikoa egin zen iturri bilgailua erabiliz, baina iturri bilgailurik gabe ere partikula hauekin lortzen den erregimena egonkorra denez, bilgailuak apenas zuen eraginik ohantzearen funtzionamenduan. Emaria eta presio galera zertxobait baxuagoak izan ziren iturri bilgailua erabiliz, baina ezberdintasunak oso txikia dira. Ostera, iturri bilgailuz hornituriko finen lehorketaren eta azterketa hidrodinamikoaren lehen hurbilketak Pablos-en tesian [283, 284, 285] egin ziren. Bertan lorturiko ondorio nagusia ohantzeak partikula finen tratamendurako duen bideragarritasuna da. Hortaz, tesi honen zati garrantzitsuak iturri bilgailuz hornituriko finen azterketa hidrodinamikoaz dihardu, bai erdiko hodiak gabe zein erdiko hodi ezberdinak erabiliz.

Iturria kontaktorearen kanpoko aldetik ikusteko asmoz, iturri bilgailua metakrilatoz eta PETz eginiko zilindro hutsa da eta azpiko aldea irekita du bertara iturria sartu dadin. Zilindroaren gainean altzairu herdoilgaitzez eginiko konoa du beraren gainera jausten diren partikulak (bai elikatuak edo ohantzekoak) irristatu eta ohantzera jauzi daitezten. 2.7. Irudian erakusten da iturri bilgailuaren irudia eta bere faktore geometrikoak.



2.7. Irudia. (a) Iturri bilgailua eta (b) bere faktore geometrikoak.

2.7. Irudian ikus daitekeen bezala, iturri bilgailuaren faktore geometriko garrantzitsuenak diametroa (D_F), luzera (L_F) eta ohandzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren arteko distantzia (H_F) dira. Tesi honetan, luzera berdina ($L_F = 0.5\text{ m}$) duten bi iturri bilgailu erabili dira, hauen ezberdintasuna diametroa izanik ($D_F = 0.15$ eta 0.20 m). Bestalde, ohandzearen gainazalaren eta bilgailuaren arteko distantzia faktore geometriko oso garrantzitsua da, berak baldintzatzen baitu neurri handi baten sistemaren egonkortasuna. Altzibar-en tesian [20] faktore honen hiru balio erabili ziren ($H_F = 0, 0.01$ eta 0.02 m) eta erregimen egonkorragoak lortzeko balio handiagoekin lan egitea beharrezko zela ondorioztatu zen. Ondoren, bilgailuak finen lehorketan duen eragina aztertu zen Estiati-ren tesian [117, 119], baina H_F balio bakar bat erabiliz egin ziren saiakuntzak. Osteko ikerkuntzan, Estiati-k [119] finen arrasteari buruzko azterketan sakondu zuen H_F balio handiagoak erabilia, eta arraste minimoa $H_F = 0.08\text{ m}$ inguruan zela baieztatu zuen. Tesi honetan, aldagai honen hainbat balio erabili dira ($H_F = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08$ eta 0.10 m) eta aurrerago zehaztuko den bezala konfigurazio bakoitzerako balio optimoa lortu da.

Lehen aipatu bezala, iturri bilgailua erabiliz finen erregimen egonkorra lortu daiteke erdiko hodirik gabe, baina operazio tartea estu samara da eta slugging erre-

gimena lortzen da emari handietan. Hortaz, iturri bilgailuarekin batera erdiko hodia erabiltzea komedi da erregimen oso egonkorak lortzeko. Hori dela eta, partikula handiekin eta finekin lortzen diren kurba hidrodinamikoak eta, beraz, portaera hidrodinamikoak, arras desberdinak dira. Hortaz, tesi honen ikerketaren ardatza bibliografiako hutsune nabarmen hori betetzea da.

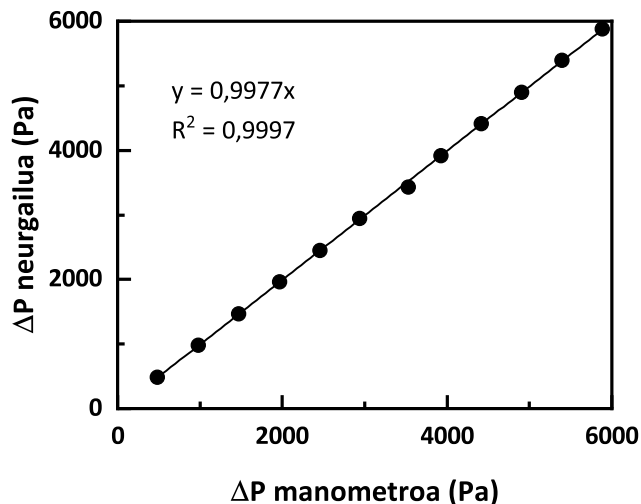
2.1.4. Ekipoko neurgailuen kalibraketa

Lehen aipatu bezala, tesi honetan erabilitako ekipoa partikula finak bereziki tratatu ahal izateko eraiki da. Probak egin ahala ekipoa hobetu egin da eta gailu berriak jarri edo aldatu egin zaizkio. Horietako bat emari neurgailua izan da, hasieran jarritakoak ezin baitzituen $15\text{ m}^3\text{N/h}$ baino emari baxuagoak neurtu eta berri bat ezarri behar izan da. Hortaz, esperimentuak egiterako orduan, parametroen lorpenetarako erabili diren gailuen funtzionamendu egokia ziurtatzea ezinbesteko urratsa izan da.

Lan honen helburu garrantzitsuenetako bat iturri bilgailudun ohantze konikoaren azterketa hidrodinamikoaren burutzea izan da eta horretarako ezinbestekoa izan da kontaktorerara sartzeko den gasaren emaria eta ohantzean sortzen den presio galera ondo neurtzea. Helburu hori kontuan izanik, bi neurgailu hauen kalibraketa egin dira.

Presio galeraren neurgailua kalibratzeko bi manometro erabili dira, bata urez betea eta bestea merkurioz (presio galera txikiak eta handiak neurtzeko). Kontaktorerara konektatuta dauden sarrera eta irteerako hodiekin hainbat sarreraz hornituta daude sentsoreak eta gailuak sartu ahal izateko, eta hauen bidez konektatu dira manometroak. Kalibraketan, emari ezberdinek sortutako presio galera neurtu da aldi berean manometroa eta presio galera neurgailua erabiliz. 2.8. Irudian erakusten da neurgailu honi dagokion kurba.

2.8. Irudian erakusten den bezala, manometroa eta neurgailuaren bidez lorturiko balioak oso antzekoak dira eta horrek argi erakusten du neurgailuaren funtzionamendu egokia. Hala ere, kalibraketa kontuan hartu da emaitza zehatzagoak lortzeko.

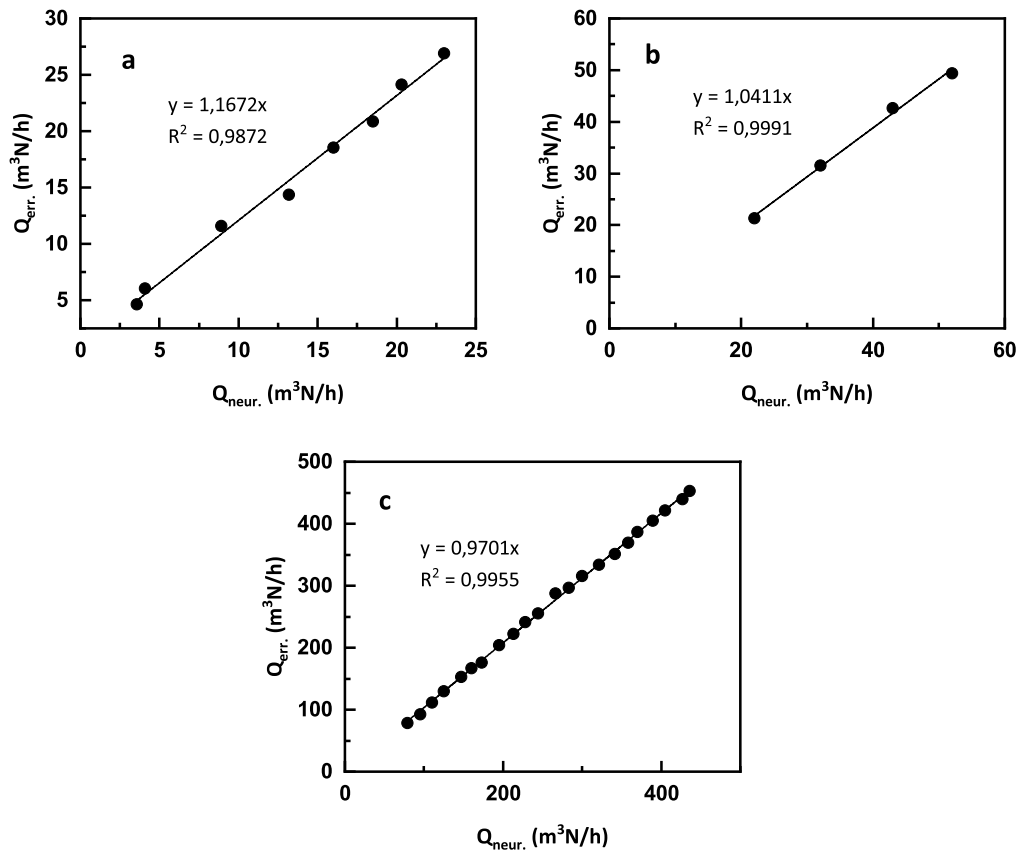


2.8. Irudia. Presio galeraren neurgailuaren kalibraketa zuzena.

Emari neurgailuaren kalibraketa ere egin da, baina kasu honetan zenbait errotametro erabili dira. Ekipoaren operaziorako emari tartea oso zabala denez, kalibraketarako hiru errotametro ezberdin erabili dira, alde batetik, emari txikiak neurtu ahal dituenak, 0tik $30\text{ m}^3/h$ -ra, bestetik, 30etik $60\text{ m}^3/h$ -rako tarteko emariak eta, azkenik, emari handietarako, 60tik $560\text{ m}^3/h$ -ra.

Neurgailuaren balioak baldintza normalei dagozkie (0°C eta 1 atm) eta errotametroak, ostera, beste baldintza batzuetan daude kalibratuta. Hortaz, errotametroek emandako balioak zuzendu egin behar izan dira giro tenperatura eta presioa kontuan izanik. 2.9. Irudian erakusten dira hiru errotametroekin lorturiko lerro zuzenak.

Presio galeraren neurgailuarekin bezala, 2.9. Irudian ikus daitekeenez, emari neurgailuak emandako balioetan ez dago desbideratze handirik, emari txikietan izan ezean. Hala ere, emariaren balio zehatza lortzeko kalibraketetatik lorturiko korrelazioak erabiliko dira, bakoitza bere emari tartean. 2.3. Taulan laburtu dira operazio emari tarte bakoitzerako emari neurgailuaren korrelazioen koefizienteak.



2.9. Irudia. Emari neurgailuaren kalibraketa tarte ezberdinetarako: (a) $0 - 30 m^3/h$, (b) $30 - 60 m^3/h$ eta (c) $60 - 560 m^3/h$.

2.3. Taula. Emari neurgailuaren korrelazioen koefizienteak.

Operazio tarte ($m^3 N/h$)	0 – 30	30 – 60	60 – 560
Korrelazio koef.	1.1672	0.9701	1.0411

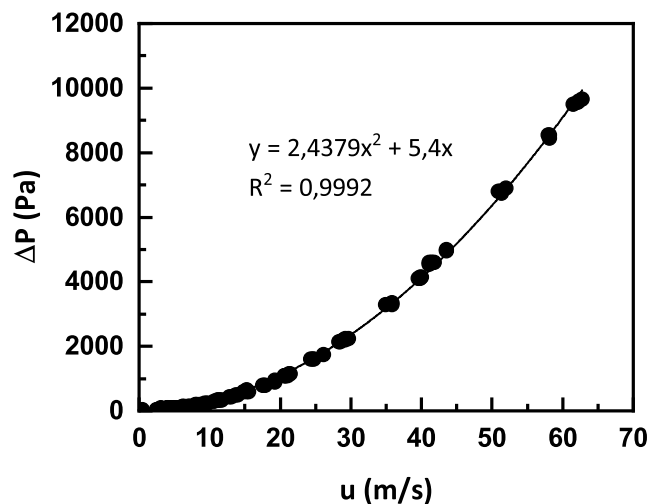
2.1.5. Kontaktore hutsaren karga galera

Lehen azaldu den bezala, lan honetan egin diren esperimentuetan, sistemaren presio galera neurtzeko gailua kontaktorearen sarrera eta irteerara konektatuta dago. Modu honetan sistemaren presio galera osoa neurtu da. Hala ere, iturri bilgailuz eta erdiko hodiz hornituriko ohanzearen presio galera jakin nahi da eta sarrerarako diseinuak sortzen duen presio galera kendu egin behar zaio neurturiko presio totalari (hartutako puntu bien arteko presio galerari). Horretarako, kontaktore hutsaren presio galera kalkulatu behar da.

Kontaktore hutsak duen presio galera neurtzeko gas emariaren eta karga galaren arteko erlazioa lortu behar da. Horretarako gas emaria handitu ahala aldagai

honen eta presio galeraren datuak hartu dira eta bi parametroak erlazionatzen dituen ekuazioa lortzen da, baina ohantze, erdiko hodi eta iturri bilgailu gabe. Prozesu hau gasaren emaria gora eta behera eginez egin da.

Modu honetan, 2.10. Irudian ikus daitekeen bezala, kontaktore hutsak abiadura desberdinetan sortzen duen presio galera lortu da.



2.10. Irudia. Kontaktore hutsaren karga galera $\gamma = 36^\circ$ eta $D_0 = 0.04\text{ m}$ sistemarako.

Behin erlazio hau jakinda, iturri bilgailua edo erdiko hodia edo biak erabiliz ohantzean sortzen den presio galera (ΔP_O) atera daiteke sarrerako presio galera kontuan duen balioari (ΔP_T) hutseko presio galera (ΔP_H) kenduz, honako ekuazio honek erakusten duen moduan.

$$\Delta P_O = \Delta P_T - \Delta P_H \quad (2.1)$$

Irudian ikus daitekeenez, kontaktore hutsari dagokion karga galeraren eta abiaduraren arteko funtzioa bigarren mailako polinomioari egokitu zaio. Beraz, erabili den sistema bakoitzerako (kontaktorearen γ , D_0 eta sare trama bakoitzerako), aireak ohantzerik gabeko kontaktorea zeharkatzean jasaten duen karga galera jakin behar da abiadura ezberdinetarako. Horretarako, kontaktore hutsari dagokion karga galeraren balioa abiaduraren funtzioan ematen duen bigarren mailako polinomioak lortu da sistema bakoitzerako.

$$\Delta P_H = k_1 u_0^2 - k_2 u_0 \quad (2.2)$$

Tesi honetan burutu diren konfigurazio guztietarako errepikatu da prozesu hau eta ondorengo 2.4. Taulan laburbildu dira konfigurazio guztietarako 2.2 Ekuazioko k_1 eta k_2 parametroen balioak.

2.4. Taula. Kalibratzea koefizienteak konfigurazio guztietarako.

Sistema esperimentalak			Ekuazioen konstanteak		
γ (°)	D_0 (m)	Sare trama (mm)	k_1 (Pa s ² /m ²)	k_2 (Pa s/m ²)	R^2
28	0.04	0.5	2.4775	0.3045	0.9991
		0.3	2.9506	4.8445	0.9996
		0.11	2.2187	9.9093	0.9988
	0.03	0.5	1.9797	0.6375	0.9981
		0.3	2.7844	9.8289	0.9921
		0.11	2.305	2.4647	0.9958
36	0.04	0.5	2.4379	5.3999	0.9992
		0.3	2.7473	4.3624	0.9998
		0.11	2.2611	10.631	0.9994
	0.05	0.5	2.4387	1.4097	0.9978
		0.3	2.4688	4.0896	0.9918
		0.11	2.7433	13.034	0.9982
45	0.03	0.5	1.7972	3.3408	0.9993
	0.04	0.5	2.2765	-1.3567	0.9992
		0.3	2.3303	2.3483	0.9986
		0.11	2.0504	8.7654	0.9995
0.05	0.5	2.6167	-0.794	0.9974	

2.2. PARTIKULEN JARRAIPENERAKO SISTEMA OPTIKOA

Tesi honen beste atal garrantzitsu bat partikula solidoen jarraipena izan da. Partikula solidoen jarraipena egiteko hainbat teknika ezberdin aurki daitezke bibliografian, eta bi talde ezberdinetan bana daitezke, hala nola, intrusiboak eta ez intrusiboak. Intrusiboak neurketa eremura sartzen dira eta kontaktuan daude neurtu nahi diren partikulekin. Ez intrusiboak ostera, ez dira neurketa eremura sartu behar eta ez daude kontaktuan jarraitu nahi diren partikulekin. Metodo intrusiboan oinarritutako teknikak nolabaiteko sistemaren perturbazioa eragiten dute, baina neurtu nahi den eremuko propietateak zehatz neurtzea ahalbidetzen dute.

Tesi honetan, sistema optikoa aukeratu da partikula solidoen jarraipenerako, PIV metodoa (*Particle Image Velocimetry*) hain zuzen ere. Teknika hau irudien bidezko partikulen jarraipenean datza, hau da, kameraren bidez solidoen jarioa grabatu eta partikulen abiadura neurtzen da. Metodo hau intrusiboa zein ez intrusiboa izan daiteke. Kontaktoretik kanpo dagoen kamera batek kontaktoreko paretatik jaisten diren partikulak grabatuz gero metodoa ez intrusiboa da, baina endoskopioaren bidez errektore barneko partikulak grabatzen badira, intrusiboa da. Kasu honetan, metodo intrusiboa erabili da, baina pilotu eskalako dimentsioak oso handiak dira endoskopioarenaren aldean eta honek sortzen duen perturbazioa arbuiagarria da.

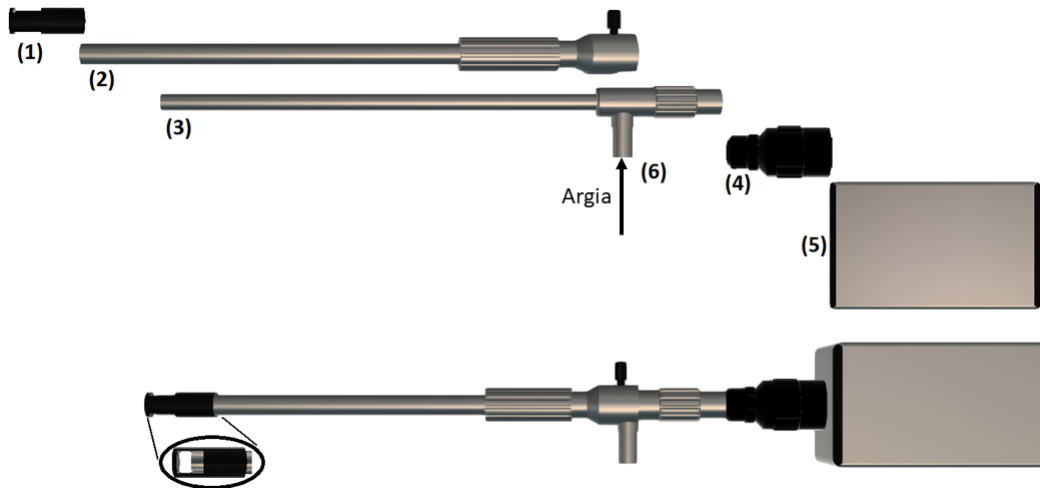
Horretarako, Insatec S.L. enpresarekin batera diseinatu dira pilotu eskalako ekipoa modu egokian solidoen jarraipena egiteko sistema optikoaren atal guztiak. Jarraian azalduko dira sistema optikoa osatzen duten osagai bakoitzaren xehetasunak.

2.2.1. Sistema optikoa

2.11. Irudian ikus daitekeen bezala, sistema optikoa hurrengo sei elementuz osatuta dago: kamera, optikaren C-armazoi egokigailua, endoskopioa, babes-hodia, espaziagailua eta argi iturri jarraitua. Ondoren, elementu guztiak azalduko da banan banan.

Sistema optikoaren elementu garrantzitsuena kamera da. Tesi honetan erabili den kamera AOS etxeko (*AOS technologies AG*) S-PRI+ modeloa da. Kamera honek 900×700 pixeleko gehienezko bereizmena du eta 16500 irudi segundoko gehienez grabatzeko abiadura (bereizmen murriztuan). Bereizmen onargarriko sakonera 8 mm -koa da eta endoskopio puntatik 5 mm -tara hasten da.

Hortaz, eraldatu ezin daitekeena argi sentsoarea da, funtsean kamera. Horretarako, optikaren C-armazoi egokigailua erabiltzen da. Hau kamerara hariztatzen da



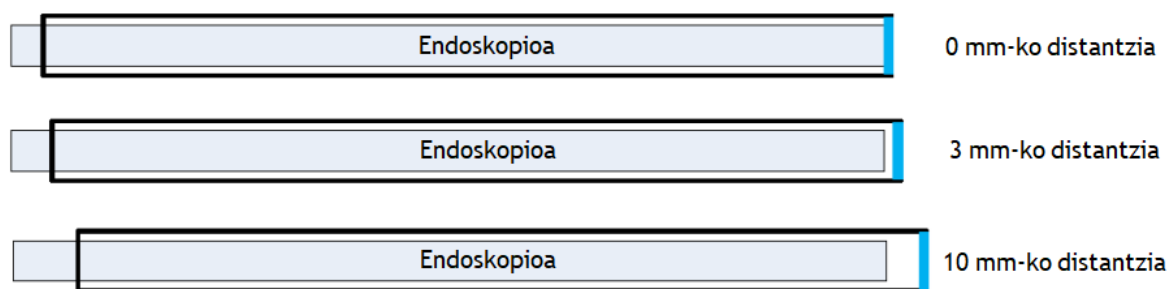
2.11. Irudia. Sistema optikoa osatzen duten elementuak: (1) espaziagailua, (2) babes hodia, (3) endoskopia, (4) optikaren C-armazoi egokigailua, (5) kamera eta (6) argi iturri jarraitua.

eta optika aldatzea baimentzen du. Honek 50° ko irekidura lentea du (lente angelu estandarra) eta honen bitartez grabaketa eremua zabaltzen da. Honetaz gain, iris erre-
guladore edo argi balbula du eta sensorera argi kantitate jakina pasatzea baimentzen
du. Hau oso erabilgarria da argi handiko guneetan, izan ere argia pasatzea mugatzen
baitu kameraren sentorea saturatu ez dadin. Bestalde, kamera fokuratzeko egokitzai-
lez horniturik dago eta honen bitartez grabaketa planoak desplazatu egin daiteke fokura
daitekeen sakonera guztian zehar. Oso garrantzitsua da grabaketa planoak ondo doitzea
partikula solidoak bereizmen egokian grabatzeko eta, horrela, irudien tratamenduan
partikulen detekzio egokia lortzeko.

Bestalde, optikaren C-armazoi egokigailua endoskopiari hariztatzen zaio. Ho-
nek 260mm -ko luzera eta 10mm -ko diametroa du eta, optikaren egokigailua bezala,
fokuratzeko egokigailuz horniturik dago sakonera handiagoa hartzeko. Gailu honen
eginkizun bakarra grabaketa planoak kontaktore barrura sartzea eta neurtu nahi den
zonaldera heltzea da. Hortaz, honek ez du optika aldatzen, zeren 0° ko lentea baitu.
Bestalde, hariztatze konektorearen bidez, gutxienez 700 lumeneko argi iturri jarrai-
tua konektatzen da zuntz optiko bidezko kablez. Endoskopia aurrean dagoen eremua
argizatzen da zuntz optikoaren zirkuitua instalatu da endoskopiaren barnean eta hau
endoskopiaren puntaraino heltzen da. Bertan, zuntz optikoa lentearen inguruan koka-
turik dago.

Hortaz, kamerak iturri ohantzearen zonalde guztietan (eraztungunean, itur-
gunean eta iturrian) solidoen abiadura puntuala neurtzea ahalbidetzen du, nahiz eta
solidoen abiaduren balioak asko aldatu zonalde batetik bestera. Izan ere, iturgunean
eta iturrian solidoak abiadura handian desplazatzen dira eta kontu handia izan behar

da solido bezala harea erabiltzen denean, endoskopia lantea beirazkoa baita eta hareak marratu egin baitezake. Hau ekiditeko, babes hodia diseinatu eta eraiki da. Honek 280 mm -ko luzera eta 10 eta 12 mm -ko barne eta kanpo diametroa ditu, hurrenez hurren. Endoskopia lantea babesteko eta hareak marratua ez izateko, babes hodiaren puntan angelu gabeko zafiro lantea ezarri da. Hala ere, lehen aipatu den bezala, bereizmen onargarriko plano endoskopia puntatik (lentetik) 5 mm -tara hasten da eta, beraz, babes hodiaren puntatik distantzia horretara egon behar da kokatua. Distantzia hau, hots, endoskopia lantearen eta zafiro lantearen arteko distantzia erlatiboa, harizta bidez eraldatu daiteke. Izan ere, babes hodia harizta bidez elkartzen diren bi zatiz osatua dago eta 19 mm luzeago egin daiteke.

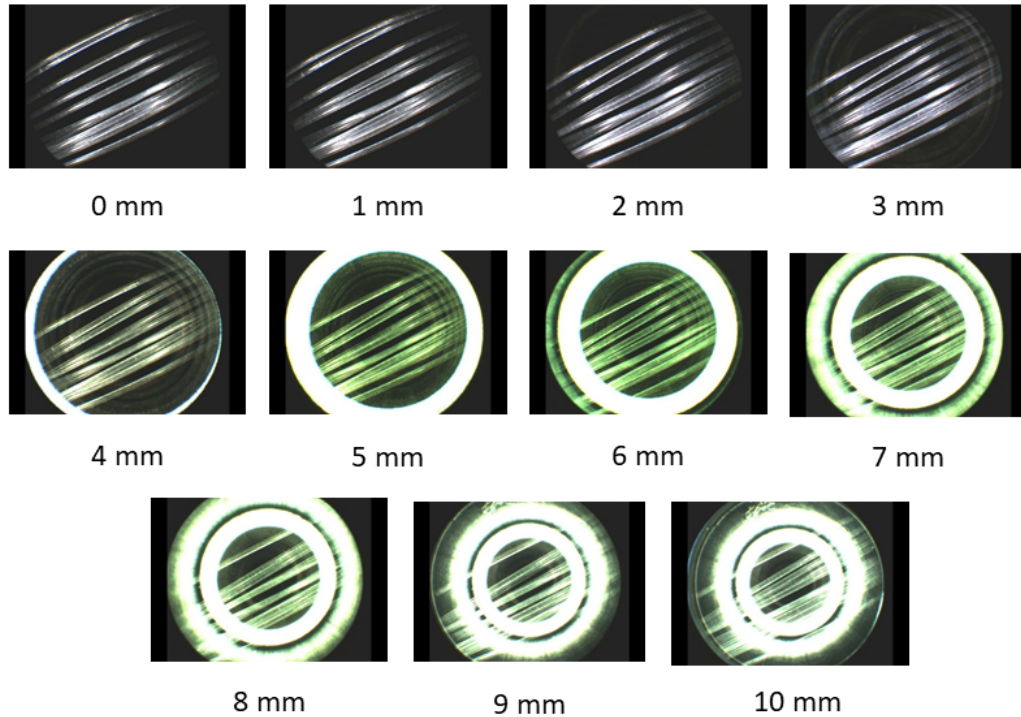


2.12. Irudia. Babes hodiaren aldakortasuna.

Bestalde, eranskin honek erreflexu arazoak sortzen ditu. Endoskopia puntatik ateratzen den argia zafiroan islatzen da eta argi sensorera heltzen da. Honek eraztun zuria sortzen du lorturiko irudietan eta zafiro lantea urrundu ahala eraztuna zentrorantz desplazatzen da. 2.13. Irudian erakusten da argiaren erreflexuaren eboluzioa bi lanteen arteko distantzia erlatiboa aldatuz. Gainera, babes hodiak tunel efektua sortzen du eta asko murrizten du grabaketa markoa. Hortaz, grabatu nahi den partikula tamainaren arabera distantzia ezberdinak erabili behar dira.

Aurrerago aipatuko den bezala, tesi honetan bi kode ezberdin sortu dira solidoak jarraitzeko. Izan ere, iturri ohantzearen zonalde ezberdinen artean ohantzearen porositatea nabarmen aldatzen da, batez ere partikula irregularrak erabiltzen direnean. Eratzungunean partikulak pilatuta edo taldean jaisten dira porositatea baxua dela. Egoera honetan, partikulak zafiro lantearen partetik jaisten dira eta jakina da zein distantziatar mugitzen diren. Iturgunean edo iturrian porositatea handiagoa da eta oro har partikulak indibidualki desplazatzen dira (nahiz eta emaitzen atalean ikusi den bi zonalde hauetan ere fase dentsoak dauden). Hori dela eta, kameraren sensorera heltzen den partikulen argi islatua zafirotik distantzia ezberdinetara pasatzen diren partikulena izan daitezke. Beraz, partikula bakoitza zein distantziatar dagoen zehatz jakitea ezinezkoa da eta, ondorioz, beraien abiadura ezin da behar den moduan kalkulatu. Arazo hau tamaina berdina duten partikula erregularrekin (esferikoak) ez da

gertatzen, izan ere, diametroa jakinda kalkulatu egin baitaiteke distantzia. Ikerketa honetan, partikulak irregularrak dira eta beraien errotazio mugimenduagatik sortzen dituzten proiektzioen tamaina ezberdina da. Gainera, 0.1 mm -ko batezbesteko partikula tamaina duen distribuzioa erabili da ohantzean, partikula bakoitzaren benetako tamaina jakitea ezinezkoa delarik.



2.13. Irudia. Argi islapenaren eboluzioa lentsen arteko distantzia erlatiboaren arabera.

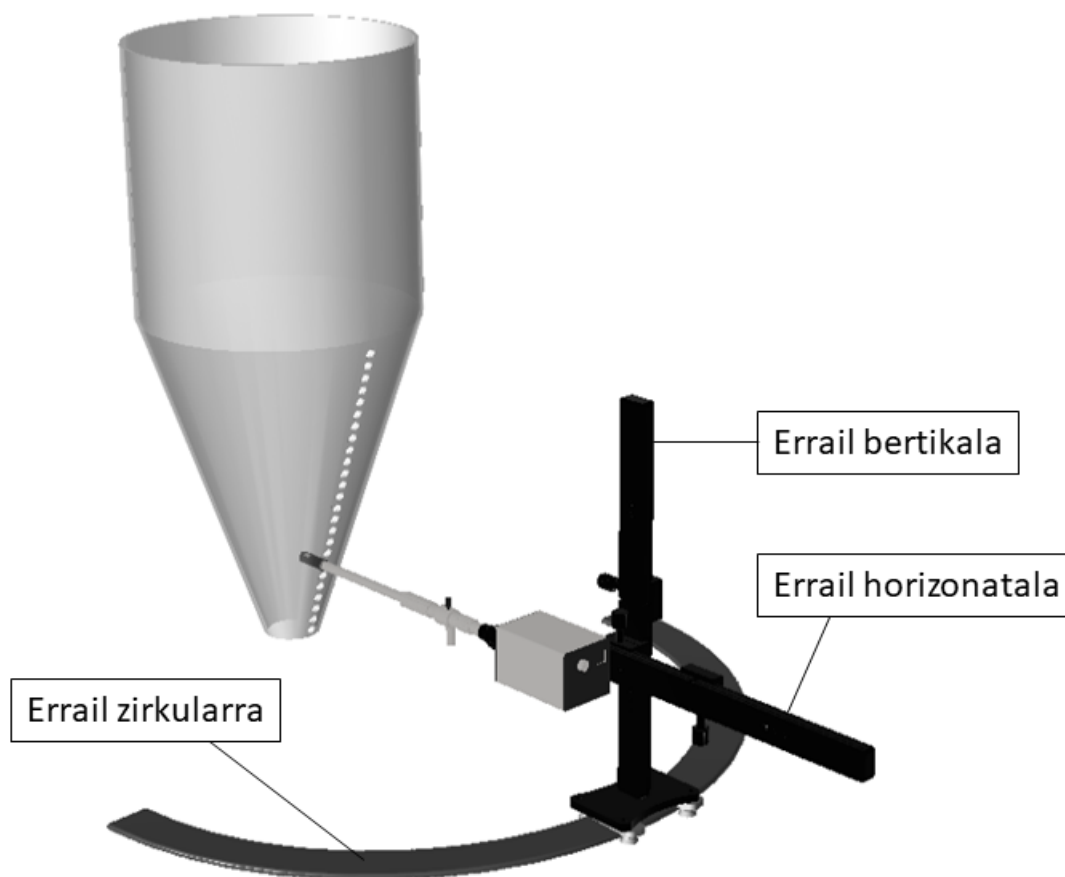
Arazo hau konpontzeko gailu berri bat diseinatu da eta 3D inprimatzailearen bidez eraiki da. Gailu hau, espaziagailua deritzona, babes hodiaren puntan ezarri da eta bere funtzioa grabaketa eremuaren sakonera mugatzea da. 2.11. Irudian ageri den bezala, zilindro itxura du (barnealdea hutsa izanik) eta puntatik gertu irekita dago. Irekiera hau partikulak bertatik pasatzeko erabiltzen da eta solido jarioaren norabidean kokatzen da.

Espaziagailuak ez du laguntzen partikulen abiadura zehatza lortzen, baina bai errorea neurri handian txikitzen. Zenbat eta laburrago zafiroaren eta espaziagailuaren puntaren arteko distantzia, txikiagoa izango da errorea, baina partikulen desplazamenduan sortutako perturbazioa handiagoa izango da (partikulen abiaduraren osagai horizontala dela eta, espaziagailuaren hormaren aurka jo dezakete eta abiadura murriztu). Hortaz, partikula tamainaren arabera aldatu egin behar da espaziagailuaren eta zafiroaren arteko distantzia.

2.2.2. Desplazamendu sistema

Lehen aipatu bezala, solidoaren abiadura iturri ohantzearen zonalde guztietan neurtu da kamera erabiliz. Horretarako beharrezkoa da kameraren desplazamendu eroso eta erreza baimentzen duen sistema erabiltzea. Tripodea izan ohi da kamera konbentzionalen euskarri ohikoena eta lan honetan erabili den kamerak ere tripode bereziak ditu. Hala ere, tripodeak ez du bermatzen kameraren kokapen zehatza neurketa desberdin guztietan.

Horretarako, 2.14. Irudian erakusten den errailez osaturiko desplazamendu sistema erabili da. Oinarri bezala 180° eta $0.85m$ diametroko errail zirkularra du eta kontaktoretik distantzia jakinera dago, modu honetan kontaktorearen perimetro erdia hartzen baitu bere gain. Errailean zehar desplazatzeko, edozein posiziotan finkatzea ahalbidetzen duen lau gurpileko plataforma du errailaren gainean. Hortaz, errail zirkular honek kamera 180° tan zehar kokatzea bideratzen du.



2.14. Irudia. Desplazamendu sistemaren diagrama.

Bestalde, errailean zehar irristatzen den plataformaren gainean bertikalki perpendikularra den beste errail bat jarri da eta honek kamera kontaktorearen altuera guz-

tian zehar mugitzea ahalbidetzen du. Azkenik, errail bertikalari beste errail horizontal bat jarri zaio perpendikularki kontaktorearen erradio guztian zehar barneratzeke kamera. Errail bertikalak zein horizontalak $0.25m$ -ko luzera eta $0.038m$ -ko zabalera dute. Kamera kontaktorearen altuera guztian zehar desplazatzeko errail bat baino gehiago jarri dira bata bestearen atzetik torlojuz lotuta. Errail hauek guztiak graduatuta daude eta kameraren kokapen egokia bermatzen dute puntu guztietan.

2.3. MATERIALAK

Tesi honetan hainbat material ezberdin erabili dira saiakuntzak egiteko. Izan ere, helburua iturri bilgailuaren eragina eta funtzionamendua aztertzea izan da, iturri ohantze teknologiaren eskala handitzeko ezinbesteko gailua baita osagai hori.

Teknologiaren eskala handitzea simulatzeko partikula finak aukeratu dira. Izan ere, orain arte ezinezkoa izan da partikula finekin egoera egonkorrean operatzea eta horregatik beharrezkoa izan da erdiko hodian erabilera. Hauek iturri ohantzeen diseinua konplikatu, gas-solidoaren arteko kontaktua murriztu eta prozesuen eraginkortasuna okertu egiten dute. Hala ere, erabiltzen den erdiko hodi motaren arabera eraginkortasun galera hau handiagoa edo txikiagoa izan daiteke.

Iturri ohantze teknologiarekin egoera egonkorrean operatzea mugatzen duen faktorea D_0/d_p erlazioa da. Gasaren sarrerako diametroaren tarteko balio bat erabiliz ($0.04m$), erlazio horren arabera $1.33mm$ -ko partikula tamainan dago egonkortasunaren muga. Hortaz, tamaina txikiagoko solidoak aukeratu dira iturri bilgailuaren azterketa burutzeko. Beraz, eraikuntzarako harea eta pinu zerrautsa erabili dira ikerketa honetan zehar. Jarraian, material hauen ezaugarriak zehaztuko dira.

2.3.1. Harea

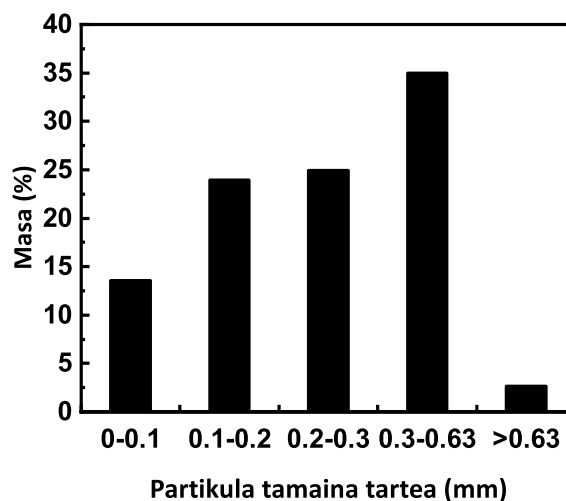
Aurretik aipatu bezala, tesi honetan erabili den harea eraikuntzarakoa izan da, eta zuzenean harrobitik ekarri da Caolines Lapiedra S.L. enpresak hornituta. Material honen hautua egiteko zenbait arrazoi izan dira kontuan, alde batetik, iturri ohantzeen eskala handitzea simulatzeko partikula finak dira egokienak eta, bestalde, teknologia hau edo antzekoak erabiltzen dituzten aplikazioetan (errekuntza, pirolisia eta abar) inerte bezala material finak erabiltzen dira, eta material hauek baldintzatzen dute sistemaren hidrodinamika (ia ohantze osoa inerte izaten baita).

Bestalde, erabilitako hareak partikula tamaina distribuzio oso zabala du, mikra gutxi batzuetatik milimetro eskas batzuetarako tartean daude harea partikulak, hau izaten delarik ohantze fluidizatuen arazo garrantzitsuenetako bat. Gainera, partikulen batezbesteko tamaina $1mm$ baino txikiagoa da eta, beraz, erdiko hodiak erabili behar dira iturri ohantzeetan. Hori dela eta, komenigarria da tamaina banaketa mugatzea eta horretarako banaketa granulometrikoa egin da. Hau lortzeko ISO arauaz estandarizaturiko bahe ezberdinak erabili dira bibrazio bidezko bahegailuan. Horrela, 2.5. Taulan eta 2.15. Irudian erakusten dira lorturiko emaitzak.

2.5. Taula. Harearen banaketa granulometrikoa.

Tamaina tarreak, <i>mm</i>	Masa, %
0 – 0.10	13.56
0.10 – 0.20	23.92
0.20 – 0.30	24.94
0.30 – 0.63	34.95
> 0.63	2.64

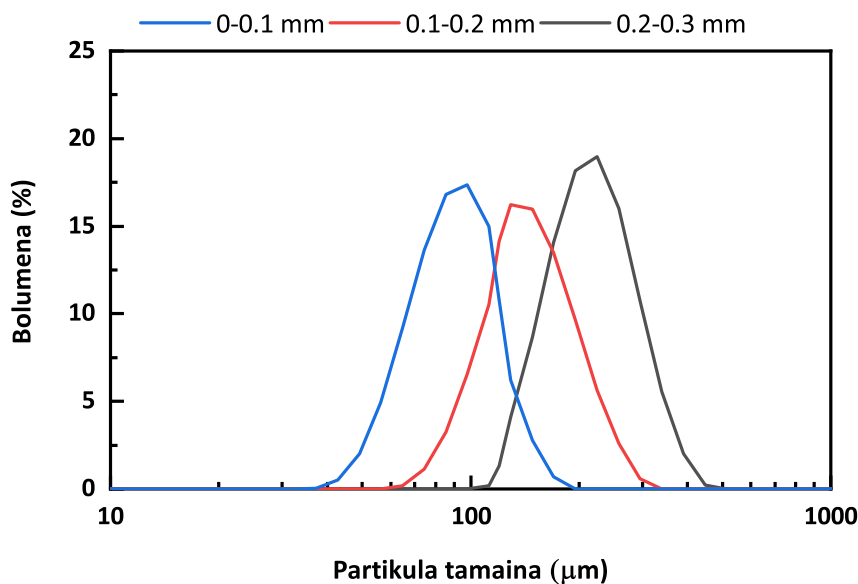
Orain arte, ikerketa taldean erabili den materialik finena 0.415 *mm*-ko partikula tamaina duen harea izan da, lehorketa prozesuan erabili delarik hain zuzen ere [18, 119]. Hala ere, aipatu behar da solido honen tratamendurako ezin bestekoa izan dela erdiko hodi mota ezberdinak erabiltzea, hauek gabe ez baitzen posible izan sistema egonkorrak lortzea.



2.15. Irudia. Harearen banaketa granulometrikoa.

Beraz, muga bezala aipatu partikula tamaina hautatu da, eta frakzio finagoak ere erabili dira. Hori dela eta, 2.5. Taula eta 2.15. Irudian erakusten den bezala, eraikuntzako harearen 0 – 0.1, 0.1 – 0.2 eta 0.2 – 0.3 *mm* tartetako partikulak aukeratu dira. Gainera, 2.5. Taulan ikus daitekeen bezala, hiru frakzio hauen artean harea kantitate osoaren erdia baino gehiago osatzen dute.

Behin harea bahetuta hiru frakzio hauen banaketa askoz estuagoa da eta batezbesteko partikula tamaina jakiteko Mastersizer 2000 ekipoa erabili da. Honek partikulak laserraren aurretik igarotzean sortzen duen erreflexua neurtzen du. 2.16. Irudian erakusten dira hiru frakzioen partikula tamaina distribuzioa.



2.16. Irudia. Mastersizer 2000 ekipoaren bidezko partikula tamainen distribuzioa, $0.2 - 0.3\text{ mm}$, $0.1 - 0.2\text{ mm}$ eta $0 - 0.1\text{ mm}$ tartetarako.

2.16. Irudiak erakusten duen bezala, hurrengoak dira frakzio bakoitzaren batezbesteko partikula tamainak: $246.02\ \mu\text{m}$ $0.2 - 0.3\text{ mm}$ frakziorako, $155.82\ \mu\text{m}$ $0.1 - 0.2\text{ mm}$ frakziorako eta $93.25\ \mu\text{m}$ $0 - 0.1\text{ mm}$ frakziorako. Tesi honetako azterketa hidrodinamikoak egiteko hiru frakzioak erabili diren arren frakzio astunenarekin burutu dira analisi gehienak baita kamera optikoaren bidezko partikulen jarraipena ere.

Aurrerago aipatuko den bezala, iturri bilgailuarekin egindako lehendabiziko saiakuntzak frakzio astunenarekin egin dira eta iturri bilgailuaren bidez erdiko hodirik gabeko sistemak egonkortzea lortu da. Hala, ondorengo saiakuntzetan harearen tamaina txikiagoak erabili dira eta hodirik gabeko sistemak egonkortzea lortu da partikula tamaina txikieneko frakzioarekin ere.

Bestalde, harearen dentsitate erreala edo kimikoa Micrometrics-en ASAP 2010 ekipo bolumetrikoa eta uraren desplazamendu metodoaren bidez neurtu da. Azken metodo hau erabili ahal izateko beharrezkoa da neurtu nahi den solidoa higroskopikoa edo disolbagarria ez izatea, eta hareak bi baldintza hauek betetzen ditu. Lorturiko emaitza 2387 kg/m^3 izan da. Honekin batera, ohantzearen dentsitatea ere neurtu da, solidoak eta poroek duten bolumena kontuan hartuz. Horretarako, harea bolumen jakina probetan jarriz masa neurtu da eta 1530 kg/m^3 -ko ohantze dentsitatea atera da. Bi datu hauek jakinez, ohantzearen porositatea atera daiteke, kasu honetan 0.36 ko balioa lortu delarik. Azkenik, partikulen esferizitatea ezin denez neurtu zuzenean, Brown eta Richards-en [76] korrelazioa erabili da hurrengo balioak lortuz: $0.2 - 0.3\text{ mm}$ frakzioak

0.98ko esferizitatea, $0.1 - 0.2\text{ mm}$ -ko frakzioak 0.94ko esferizitatea eta $0 - 0.1\text{ mm}$ -ko frakzioak 0.89ko esferizitatea. Aurrerago ikusiko den bezala, balio hauek iturkuntzarako abiadura minimoaren korrelazioak erabiltzeko behar dira.

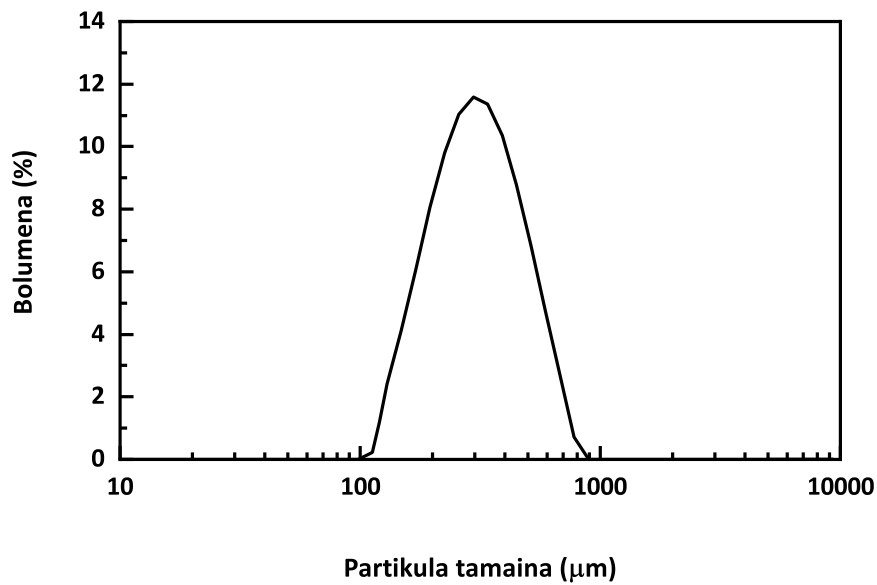
Beraz, harearen frakzio ezberdinen propietateak jakin ostean, frakzio finena Geldart-en sailkapeneko A taldeari dagokiola eta beste biak B taldeari dagokiola on-doriozta daiteke. Azkeneko talde hau harearen antzeko solidoek osatzen dute. Nahiz eta mota honetako materialak ondo fluidizatzen duten, ohantzean zehar aire burbuilak sortzen dituzte. Izan ere, material finak izatean ez da posible iturri ohantzearen funtzionamendu egokia lortzea eta ondorioz, nahitaez erabili behar dira erdiko hodiak. Bestalde, Geldart-en A taldeko partikulak aineragarriak dira eta partikula oso finek osatzen dute. FCC katalizatzaileak mota honetako solidoak dira eta abiadura txikitetan fluidizazio leuna eta egonkorra sortzen den bitartean, burbuilak sortzen dira abiadura handitzerakoan. Iturri ohantzeetan Geldart-en B taldeari dagokien solidoen antzeko portaera dute eta gainera, arraste handia jasaten dute.

2.3.2. Pinu zerrautsa

Saiakuntzetan erabili den beste material bat pinu zerrautsa izan da. Oro har, egurra izaten da gehien erabiltzen den biomasa eta gaur egun ikerketa taldean burutzen diren errekuntza zein pirolisi saiakuntzak biomasaren balorizaziorako erabiltzen dira. Egur zerrautsek dentsitate baxua izaten dute eta Geldart-en A edo B taldeetan kokatzen dira. Hortaz, iturri ohantzeetan modu egonkorrean operatzeko beharrezkoa da erdiko hodia erabiltzea. Hala ere, teknologia honen aplikazioetan solido inerteak gehitzen zaizkio ohantzeari fluidizazioa laguntzeko, eta hauen proportzioa zerrautsarena baino askoz handiagoa izaten da. Hala, mota honetako ohantzeak erabiltzean, solido inerteak (hau da, hareak) eragiten du gehien hidrodinamikan, zerrautsaren eragina arbuigarria izanik. Aurrerago azalduko den bezala, iturri bilgailua erabiltzeak egiten du posible zerrautsez osaturiko ohantzearen funtzionamendu egokia inongo erdiko hodi gabe. Hori dela eta, tesi honetan erabili diren bi solidoak banandurik aztertuta, bien nahasketak harearen portaera berdina erakutsiko bailuke.

Harearekin bezala, ikerketa taldean orain arte erabili den zerrautsa tamaina handiena 0.73 mm -koa izan da [323] eta erdiko hodiak erabiliz operatu da solido mota hau. Hortaz, harearen kasuan bezala, erabili den pinu zerrautsak tamaina distribuzio oso zabala duenez, bibrazio bidezko bahegailua erabiliz $0.2 - 0.3\text{ mm}$ -ko frakzioa aukeratu da ikerketa egiteko. Frakzio honi dagokion partikula tamainaren distribuzioa 2.17. Irudian erakusten da. Zerrautsaren partikulak oso irregularrak eta zuntz itxura-koak dira. Hori dela eta, Mastersizer 2000 ekipoarekin lorturiko distribuzioa oso zabala

da eta kalkulaturiko batezbesteko partikula tamaina $344.096 \mu\text{m}$ -koa da. Tesi honetan, azterketa hidrodinamikoan partikularen dentsitateak duen eragina aztertu da eta horretarako zerrautsaren frakzio hau harea frakzio handienarekin alderatu da, biek baitute batezbesteko partikula tamaina oso antzekoa.



2.17. Irudia. $0.2 - 0.3 \text{ mm}$ -ko zerrautsa frakzioaren partikula tamainaren distribuzioa Mastersizer 2000 ekipoaren bidez.

Bestalde, zerrautsaren dentsitatea 496 kg/m^3 da eta ohanzearen dentsitatea 331 kg/m^3 . Hortaz, lorturiko ohanzearen porositatea 0.8 koa da. Zerrautsaren partikula tamaina eta dentsitatea jakinda Geldart-en A taldeari dagokiola ondoriozta daiteke.

3. KAPITULUA

ITURRI BILGAILUA ETA ERDIKO HODIA DUTEN ITURRI OHANTZE KONIKOEN AZTERKETA HIDRODINAMIkoa

3.1	ESPERIMENTUEN DISEINUA	73
3.2	PROZEDURA ESPERIMENTALA	78
3.3	EMAITZAK	81
3.3.1	Iturri bilgailudun iturri ohantzeen kurba karakteristikoak	81
3.3.2	Iturri bilgailuaren posizio optimoaren azterketa	95
3.3.3	Faktoreen eragina kurba karakteristikoetan	101
3.3.4	Faktoreen eraginaren analisi estatistikoa	106
3.3.5	Faktore esanguratsuenen eraginaren adierazpen grafikoa	130
3.3.6	Faktore esanguratsu komuneren eragina parametro hidrodinamikoetan	152
3.3.7	Konfigurazio motaren eragina hidrodinamikan	157
3.4	KORRELAZIO HIDRODINAMIkoAK	160
3.4.1	Iturkuntzarako abiadura minimoa	161
3.5	OPERAZIO EGONKORREKO MUGAK	195
3.5.1	Hodirik gabeko sistemak	199
3.5.2	Irekiduradun hodia	200

Lan honen helburu guztien artean garrantzitsuena finen operazio egonkorra lortzea da, teknologia honen eskala handitzeko prozesuan ezinbesteko pausua baita. Finen tratamenduan operazio egonkorra lortzeko, nahikoa da erdiko hodia erabiltzea, baina hodi hauek iturri ohandzeen diseinua zaildu egiten dute. Gainera, solidoen arrastea dela eta, emari baxuetan lan egitera behartzen dute. Hortaz, arazo hauei aurre egiteko, nahitaez erabili behar da ikerketa taldean sorturiko iturri bilgailua. Izan ere, iturria biltzen duen gailu honek solidoen arrastea ekiditeaz gain, finez osaturiko ohandze egonkortzea ere lortzen du [284, 372].

Orain arte gehien aztertu den iturri ohandze mota ohiko iturri ohandzea da, hau da, oinarri konikoa duen iturri ohandze zilindrikoa. Honek konikoarekin alderatuz duen ezberdintasun bakarra ohandzearen forman datza. Izan ere, ohiko iturri ohandzeetan gune konikoa eta zilindrikoa betetzen dute solidoek eta konikoetan, ostera, gune konikoa soilik. Gure ikerketa taldea orain dela 30 urte baino gehiago hasi da ohiko iturri ohandzeak giro tenperaturan ikertzen eta aurrerapen handi eta garrantzitsuak egin ditu [70, 264, 276, 275, 329, 330, 333, 334, 337, 341].

Hala ere, iturri ohandze konikoak ohiko iturri ohandzeak beste aztertu dira eta zenbait abantaila ere badiztute eskala handitzean. Literaturan erreparatu daitekeen bezala, gure ikerketa taldeak iturri ohandze konikoei buruzko ikerketa ugari egin ditu dagoeneko, bai ohiko ohandze konikoak nahiz erdiko hodiak erabiliz [4, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 115, 116, 118, 261, 262, 263, 266, 267, 268, 271, 277, 321, 323, 326, 327, 328, 330, 331, 332, 335, 336, 338, 339, 340]. Azken hauen artean, aipagarria da gure ikerketa taldeak proposatu dituen irekiduradun erdiko hodiak, barne gailu hauek gai direlarik erdiko hodi-ez porotsuek dituzten mugatasunak gainditzeko.

Beraz, erdiko hodiak iturri ohandzeen azterketa hidrodinamiko ugari egin dira, baina apenas egin da ezer iturri bilgailudun ohandzei buruz. Izan ere, iturri bilgailua duten ohandzei buruz literaturan dauden lanak finen arrasteari [27, 120], lehorketari [119, 285], edota gasifikazioari [91, 92, 93, 219] buruzkoak dira. Hala ere, Pablos et al.ek [284] argitaratu berriko lanean, partikula finen eta ultrafinen azterketa hidrodinamiko egin da. Lan honetan, erabilitako sistemen iturkuntzarako abiadura minimoa eta presio galera landu dira gainetik, baina bertan lorturiko kurbak hidrodinamikoak sistema banaka batzuei baino ez dagozkie eta erregimen ezberdinei buruzko argibidea oso eskasa da.

Hortaz, iturri bilgailuen hidrodinamikaz literaturan dagoen hutsunea betetzeko asmoz, ikerketa zehatza egin da finen portaera ezberdina ulertzeko asmoz eta, horretarako, kontaktore, material, erdiko hodi eta bilgailu ezberdinak erabili dira. Saiakuntza ezberdinen bidez, kontaktorearen, materialaren, erdiko hodiaren eta iturri bilgailuen faktore geometriko ezberdinek parametro hidrodinamikoetan eta ohandzearen egon-

kortasunean duten eragina aztertu da iturkuntzarako abiadura minimoa kalkulatzeko baliogarriak diren korrelazio hidrodinamikoak garatu ahal izateko.

3.1. ESPERIMENTUEN DISEINUA

Aipatu bezala, literaturan iturri bilgailuei buruz aurkitu daitekeen informazioa oso murrizta da, orain arte ez baita burutu inolako finen azterketa hidrodinamiko sakonik. Hori dela eta, ikerketa honetan egin diren saiakuntzen bidez, kontaktore konikoaren, materialen, erdiko hodien eta iturri bilgailuen faktore geometriko ezberdinek iturri ohandzearen ezaugarri hidrodinamikoetan duten eragina aztertu da. Hortaz, iturri bilgailudun iturri ohandze konikoen azterketa hidrodinamiko zehatza egiteko, saiakuntza kopuru handia behar izan da.

Orain arte, iturri ohandzeetan buruturiko azterketa hidrodinamikoetan gehien aztertu diren parametroak ohandzearen presio galera maximoa (kontaktorean ohandzeak sortzen duen presio galerarik handiena, ΔP_M), operazio presio galera (iturri ohandze erregimenaren funtzionamendu egonkorrean ohandzeak sortzen duen presio galera, ΔP_S) eta iturkuntzarako abiadura minimoa (iturri ohandze erregimena lortzeko behar den airearen abiadura minimoa, u_{ms}) izan dira.

Orain arteko hidrodinamikazko ikerketetan, emariaren tarte estu samarrak erabili dira (iturkuntzarako abiadura minimotik gertu) eta, beraz, operaziorako presio galeraren balioa apenas aldatu da. Hori dela eta, iturkuntzarako abiadura minimoko presio galeraren balioa erabiltzen da operaziorako presio galera bezala. Tesi honetan, ordea, airearen abiadura tarte askoz ere zabalagoa erabili da azterketa hidrodinamikoan, hots, egoera ezegonkorra lortu arte edo iturkuntza erregimena amaitu arte, eta operazio tarte honetan presio galeraren balioa aldatuz joan doa. Hau horrela izanda, presio galeraren balio konkretua hartu beharrean kurba karakteristikoan, kurba osoak konparatu dira kualitatiboki, izan ere, presio galeraren eboluzioak iturkuntza erregimenari buruzko informazio oso baliogarria ematen baitu.

Bestalde, presio galera maximoa ohandzea gelditu egotetik iturria sortzen den unerako tarteari dagokio, hau da, iturgunea sortzen den momentuari. Une hau harrapatzea eta erregistratzea oso zaila da, momentu batetik bestera gertatzen baita eta ekipoko neurgailuak ez dira une horretako presio galera eta airearen abiaduraren balioak neurtzeko gai. Hori dela eta, nahiz eta tesi honetan presio galera maximoaren datuak hartu diren, balio hauek ez dira guztiz zehatzak eta ez dira sakontasunean aztertu.

Azkenik, prozesuen baldintzak finkatu ahal izateko oinarritzkoa da iturri ohandzearen erregimena lortzeko behar den airearen abiadura minimoa (iturkuntzarako abiadura minimoa) jakitea. Airearen abiadurak zuzeneko eragina du sistemaren egonkortasunean, izan ere, gasaren egoitza denbora eta partikulen abiadura (edota erregimenaren

zurrumbilotasuna) baldintzatzen baititu, eta operaziorako minimoa baino handiagoa izan behar baitu. Hortaz, iturkuntzarako abiadura minimoaren azterketa ezinbesteko da iturri ohantzeetan.

Aurrerago azalduko den bezala, nahiz eta hasiera batean iturkuntzarako abiadura minimoa soilik aztertu den, kurba hidrodinamikoak lortzean beste hainbat puntu karakteristiko aurkitu dira eta hauen azterketa ere egin da. Gainera, kurba hidrodinamikoaren forma eta puntu karakteristikoak desberdinak izan dira erabilitako konfigurazioaren eta sistemaren arabera. Hortaz, azterketa hidrodinamikoak modu egokian egiteko, esperimentuen diseinuari jarraitu behar izan zaio. Modu honetan, aztertu diren parametro hidrodinamikoetan aldaketa garrantzitsuenak sortzen dituzten faktore geometrikoak identifikatu ahal izan dira.

Hori dela eta, metodologia honi jarraituz egin diren saiakuntzak hiru talde ezberdinetan banatu dira erdiko hodiaren edo konfigurazioaren arabera, hots, konfigurazio mota bakoitza erabiliz lortzen den erregimena oso ezberdina da eta konfigurazio batetik bestera asko aldatzen da kurba karakteristikoa (presio galeraren abiadurarekiko bilakaera), bai balioetan zein forman. Hala ere, erdiko hodirik gabeko saiakuntzak izan dira urrienak, operazio egonkorreko tartea estuagoa baita.

Hortaz, hiru konfigurazio ezberdinak hurrengoak izan dira: erdiko hodirik gabe, irekiduradun hodiak eta hodi ez-porotsuak. Literaturan iturri ohantzei buruz aurki daitezkeen lanetan hodi ez-porotsua da erabiliena, operazio egonkorreko emari tartea asko zabaltzen baitu. Bestalde, hodi porotsuak ere erabili dira, aurreko hodiaren onurak izateaz gain, airearen frakzio bat iturgunetik eraztungunera pasatzea ahalbidetzen baitute. Hala ere, bi konfigurazio hauen artean ez da ezberdintasun handirik izan eta arrazoi honengatik erabaki da hodi porotsuak ez ikertzea. Honen ordez, irekiduradun hodiak aukeratu dira. Porotsuek bezala, gasa iturgunetik eraztungunera pasatzea ahalbidetzen dute, baina neurri handiagoan eta, gainera, eraztungunetik jaisten diren solidoak ohantzearen edozein altueratan sar daitezkeenez iturgunera, ohantzearen zurrumbilotasuna handia da. Hortaz, irekiduradun hodia duten sistemak ez-porotsuen eta hodirik gabekoen tarteko konfigurazioa dira.

Saiakuntza ezberdinetan, hodian luzera eta ohantzearen altuera balio bera da. Hodiaren altuera ohantzearena baino baxuagoa bada, sortutako iturriaren joera ezegonkorra da. Ostera, hodiaren altuera ohantzearena baino handiagoa bada solidoek bide luzeagoa egin behar dute iturguneari eta, ondorioz, iturkuntzarako abiadura handiagoak behar dira. Hortaz, ohantzearen altuera bakoitzerako, luzera berdina duen hodia erabiltzea da egokiena (Apraiz, 2006). Hori dela eta, ondoren erakutsiko den hodi ez-porotsuen eta irekiduradun hodian esperimentuen diseinuaren taulan eta aurrerago egingo den azterketa estatistikoan, ez da hodian altuera faktore bezala hartu.

Bestalde, iturri bilgailuak sistemaren egonkortasunean duen eragina aztertze-ko, diametro ezberdineko bi bilgailu erabili dira. Iturri bilgailuaren diametroa aldatzean bere barneko bolumena ere aldatzen denez, iturrian zuzeneko eragina sortzen du. Izan ere, harea fina erabiltzean sortzen den iturria, bilgailuaren bolumenera egokitzen da eta lorturiko iturriaren dentsitatearen arabera bilgailuaren eragina handiagoa edo txikiagoa da. Honetaz gain, bilgailuak ohandzearen gainazalarekiko duen posizioa kontuan hartu beharreko parametroa da, distantzia horrek baldintzatzen baitu gasaren irteerako gunea. Bilgailua ohandzearen gainazaletik urruti jartzen bada, ez du iturria biltzen eta solidoak arrastatuak dira. Bestalde, bilgailua ohandzearen gainazaletik gertu kokatzen bada, gasak bilgailutik ateratzeko duen hutsunea murriztu egiten da eta presio galera handiagoa da. Hortaz, bi efektu hauek kontuan hartu behar dira distantzia optimoa lortzeko.

Honetaz gain, bilgailuaren eraginkortasuna aztertzeko hainbat partikula fin ezberdin erabili dira. 2.2 Atalean azaldu den bezala, alde batetik, partikula tamaina ezberdineko hiru harea frakzio erabili dira eta, bestetik, pinu zerrautsaren frakzio bat. Harearen bidez partikula tamainaren eragina aztertu da eta, taimainu bereko harea eta zerrautsa alderatuz, dentsitate ezberdineko partikula finak alderatu dira. Modu honetan, iturri bilgailuak partikula finak modu egonkorrean operatzeko duen ahalmena neurtu da eta sistema bakoitzerako operazio tartea finkatu da.

Azkenik, ohandze konikoen (kontaktoreen) angelua aztertu da solidoaren zirkulazioan zuzeneko eragina baitu parametro honek. Bestalde, kontaktore hauetan gasaren sarrerako diametroa aldatu daiteke konoaren oinarriaren diametroa arte (D_i). Gainera, erdiko hodia erabiltzen den kasuan, beraren diametroa gasaren sarrerako diametroaren berdina edo handiagoa izan behar da. Bestalde, kontaktore hauetan, ohandzearen altuera ezberdinak erabiliz egin daiteke lan. 3.1., 3.2. eta 3.3. Tauletan erakusten dira erabili den konfigurazio bakoitzari dagozkion sistemak, euren faktore geometrikoak eta faktoreen mailak.

3.1. Taula. Erdiko hodirik ez duten sistemen faktore geometrikoak eta euren mailak.

ALDAGAIK	MAILAK				
γ , Konoaren angelua ($^\circ$)	28	36	45	—	—
D_0 , Sarrerako diametroa (m)	0.03	0.04	0.05	—	—
H_0 , Ohantzearen altuera (m)	0.20	0.27	—	—	—
d_p , Partikula tamaina (mm)					
Harea	0.093	0.155	0.246	—	—
Zerrautsa	0.344	—	—	—	—
D_F , Bilgailuaren diametroa (m)	0.15	0.20	—	—	—
H_F , Bilgailuaren eta ohantzearen arteko distantzia (m)	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10

3.2. Taula. Irekiduradun hodia duten sistemen faktore geometrikoak eta euren mailak.

ALDAGAIK	MAILAK				
γ , Konoaren angelua ($^\circ$)	28	36	45	—	—
D_0 , Sarrerako diametroa (m)	0.03	0.04	0.05	—	—
H_0 , Ohantzearen altuera (m)	0.20	0.27	—	—	—
d_p , Partikula tamaina (mm)					
Harea	0.093	0.155	0.246	—	—
Zerrautsa	0.344	—	—	—	—
D_F , Bilgailuaren diametroa (m)	0.15	0.20	—	—	—
H_F , Bilgailuaren eta ohantzearen arteko distantzia (m)	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
D_T , Hodiaren diametroa, (m)	0.04	0.05	—	—	—
IP , Irekidura portzentaia (%)	78	57	42	—	—

3.3. Taula. Hodi ez-porotsua duten sistemen faktore geometrikoak eta euren mailak.

ALDAGAIK	MAILAK				
γ , Konoaren angelua ($^\circ$)	28	36	45	—	—
D_0 , Sarrerako diametroa (m)	0.03	0.04	0.05	—	—
H_0 , Ohantzearen altuera (m)	0.20	0.27	—	—	—
d_p , Partikula tamaina (mm)					
Harea	0.093	0.155	0.246	—	—
Zerrautsa	0.344	—	—	—	—
D_F , Bilgailuaren diametroa (m)	0.15	0.20	—	—	—
H_F , Bilgailuaren eta ohantzearen arteko distantzia (m)	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
D_T , Hodiaren diametroa (m)	0.04	0.05	—	—	—
L_H , Hanken altuera (m)	0.07	0.15	—	—	—

3.1., 3.2. eta 3.3. Taulatan agertzen diren faktore geometriko guztien mailak

konbinatu dira azterketa hidrodinamikoan buruturiko saiakuntzetan. Hauetariko bakoitzean, gasaren abiadura eta presio galeraren datuak erregistratu dira emaria handitu ahala egoera ezegonkorra edo slugging erregimena lortu arte. Saiakuntza hauen bidez, iturkuntzarako abiadura minimoaz gain, sistemaren informazio garrantzitsua ematen duten beste hainbat puntu ere lortu dira.

Bestalde, aipagarria da hainbat sistemetan ez dela lortu erregimen edo funtzionamendu egokirik eta hauen emaitzak ez dira kontuan izan ez eraginak aztertzeko ezta analisi estatistikorako ere. Aurrerago azalduko dira konfigurazio bakoitzarekin lorturiko kurba karakteristikoak eta egonkortasuna lortu ez diren sistemak.

3.2. PROZEDURA ESPERIMENTALA

Nahiz eta konfigurazio ezberdinak erabili diren eta bakoitzean erregimen ezberdinak lortu diren, azterketa hidrodinamikoak egiteko saiakuntza guztien prozedura esperimentalak antzekoak izan da. Kasu guztietan, kontaktorea goiko aldetik kargatu da eta solidoa grabitatez jausi da kontaktorearen gune konikora. Hala ere, diferentzia txikiak badira erdiko hodiaren arabera, batez ere abiarazteko eran. Horrela, solidoa kontaktorearen eraztungunera elikatzen denean, hodi ez-porotsuaren kasuan hanketarraino baino ez da betetzen, baina elikadura kontaktorearen zeharkako azalera osora egiten denean, hodiaren barrua ere bete egiten da. Beraz, saiakuntzaren hasiera (iturgunearen sorketa) egoera hauen menpe dago. Alzibar-ek [20] ikusi zuenez, hodiaren barnealdea solidoz betetzen denean gasaren emari handiagoa behar da iturria irekitzeko eta gaintitu behar den presio galera ere handiagoa da. Beraz, aipaturiko egoera hauetan gaintitu behar den presio galera maximoa (ΔP_M) oso ezberdina da (ia 6 aldiz handiagoa hodia partikulaz beteta dagoen kasuan), gasak solidoari eman behar dion mugimendu kantitatea oso ezberdina baita. Izan ere, presio galera maximoa bi efekturen batura da: alde batetik, iturri ohandze erregimenaren operazioko presio galera egonkorra eta, bestetik, hodi barnean dagoen materiala askatzeko eta iturrira eramateko behar den presio galera. Bigarren efektu hau handiagoa da hodia beteta dagoen kasuan eta, ondorioz, gaintitu behar den presio galera maximoa ere handiagoa da.

Tesi honetan muturreko egoera erabili da, hau da, hodia solidoz bete da ohandzearen gainazalerraino. Izan ere, arazoren bat izango balitz puzgailuak gaintitu behar duen presio galerarik handiena jakitea beharrezkoa baita. Gainera, ezinbestekoa da hodi ez-porotsuarekin horrela abiaraztea, bestela ezinezkoa izango litzateke beste konfigurazioekin alderatzea, iturgunea lortu aurreko datuak ez bailiratezke konparagarriak izango.

Hortaz, aurretik aipatu den bezala, tesi honen helburu nagusia kontaktorearen, materialen, erdiko hodiaren eta, batez ere, iturri bilgailuen faktore geometriko ezberdinek parametro hidrodinamikoetan (solidoaren zirkulazio abiaduran eta ohandzearen egonkortasunean) duten eragina aztertzea izan da. Horretarako metodorik egokiena zein fidagarriena sarrerako airearen abiadura eta presio galeraren arteko erlazioa edo kurba karakteristikoa jarraitzea da [261].

Kurba hauek lortzeko, lehenengo pausua sistema esperimentalak osatzen duten osagai guztiak prestatzea da, hau da, dagokion kontaktorea, iturri bilgailua, erdiko hodia (erabili behar den kasuetan) eta gasaren sarrerako diametroa. Osagai hauek guztiek plantan kokatu ostean, sarrerako eta irteerako hodiak akoplatu behar zaizkio kontaktoreari. Plana montatuta dagoenean, sistemaren elikatze puntutik saiakuntzan erabiliko

den materiala kargatu behar da kontaktore barrura eta, erdiko hodia erabiltzen den kasuan, barnealdea beterik dagoela zihurtatu. Behin dagokion sistema prestatu ondoren, esperimientua hasteko prest dago.

Esperimientua martxan jartzeko lehendabizi puzgailua piztu behar da (bypass balbula guztiz irekita dagoela). Tesi honetan erabili diren materialak oso finak direnez, kurba osoa lortzeko behar den emaria ez da oso handia eta horregatik bypass balbula %40a arte irekitzen izan da motorearen maiztasuna jaitsiz. Hortaz, emari txikiarekin hasi eta puzgailuaren motorearen maiztasuna handituz joan da pausuz pausu iturburua sortu eta egoera ezegonkorra lortu arte. Aipagarria da hodirik gabe eta irekiduradun hodia duten zenbait sistematan egoera ezegonkorra lortu dela, baina ez hodi ez-porotsuen kasuan. Hori dela eta, emaria $200\text{ m}^3\text{N/h}$ arte igo da azken kasuan (iragaz sistemak tratatu dezakeen gehienezko emaria). Ondoren, poliki-poliki behera egin da, harik eta iturkuntzarako abiadura minimoa lortu arte. Puntu hau iturria desagertu aurreko puntuari dagokio. Partikula handiagoak erabiliz orain arteko ikerketetan ikusi denez, iturria desagertu aurreko puntuan sistema egonkorra da. Partikula finekin ostera, sistemaren arabera iturria desagertu aurreko puntuan iturriaren ezegonkortasun seinaleak antzematen dira; hala nola, burbuila handiak, iturgunearen desbideratzeak edo iturriaren etete uneak. Hortaz, kasu hauetan iturriaren desagertu abiadura baino handiagoa hartu behar da iturkuntzarako abiadura minimo bezala, operazioa egokia eta egonkorra izan dadin. Hau guztia ziurtatzeko, kontaktorea gardena izan behar du barruan gertatzen dena begi bistaz ondo antzemateko eta iturkuntzarako abiadura minimoan iturriak modu egonkorrean funtzionatzen duela ziurtatzeko. Behin balio hau jakinik, airearen abiadura jaitsi egiten da zero izan arte eta bertan bukatzen da saiakuntza.

Hortaz, atal hidrodinamikorako egindako saiakuntza guztietan, esperimentuaren eboluzioa bi etapetan osatua dago: alde batetik, aire emaria gora eginez presio galera jarraitzea; bestetik, aire emaria behera eginez presio galera jarraitzea. Bi etapa hauek beharrezkoak dira kurba hidrodinamikoaren bere osotasunean lortzeko. Izan ere, modu egonkorrean opera daitekeen gehienezko emaria lortzen da lehenengo etaparen bidez eta bigarren etaparekin iturkuntzarako abiadura minimoaren balioa ateratzen da.

Esan bezala, iturri ohantzeen kurba karakteristikoak informazio handia ematen digu aztertu nahi den sistemari buruz, baina horman zeharreko behaketa ere oso lagungarria. Laborategian erabili diren kontaktore gardenei esker, barnean gertatzen dena ikusi ahal da eta honi esker iturri ohantze erregimenaren funtzionamendua ikertu ahal izan da. Horrela, sistema esperimientu guztietan funtzionamendua aztertu da eta operazio egonkorra mugatu da kurba karakteristikoaren eta behaketaren bidez.

Jarraian, iturri bilgailua eta material finak erabiliz lortu diren kurba karaktere-

ristikoak azalduko dira eta iturri ohantzeen aldean dituzten ezberdintasunak argituko dira. Honetaz gain, hiru kurba motetan lortu diren puntu karakteristiko ezberdinak zehaztuko dira.

3.3. EMAITZAK

Behin esperimentuen diseinua eta prozedura esperimentalak azalduta, partikula finak eta iturri bilgailua erabiliz lorturiko kurba karakteristikoak azalduko dira [372]. Hala ere, kurba hauek ondo ulertzeko, lehendabizi iturri bilgailu gabe eta 4mm -ko beirazko bolak erabiliz lorturiko kurba karakteristikoak azalduko da. Horrela, orain arte bibliografian aurki daitezkeen kurba karakteristikoak adibide bat ikusiko da eta harearekin lortutakoekin alderatuko da. Kurba karakteristikoak deskribatu ostean, bakoitzaren parametro hidrodinamiko esanguratsuenak definituko dira eta faktore nagusien eragina aztertuko da gainera.

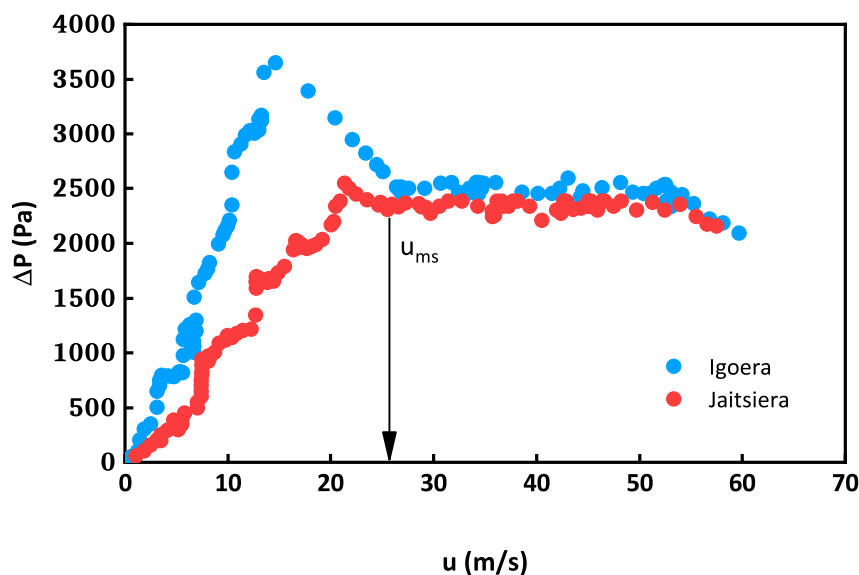
Hala ere, aldagai geometrikoek parametro hidrodinamikoetan duten eragina sakonago aztertzeko, emaitzen analisi estatistikoa egin da eta gehien eragiten duten faktoreak atera dira. Azterketa hau konfigurazio eta parametro hidrodinamiko bakoitzeko burutu da.

Azkenik, gehien eragiten duten aldagaiak jakinda, analisi dimentsioanala burutu da (Vaschy-Buckingham-en π teoreman oinarrituta) iturkuntzarako abiadura minimoaren balioa auresango duen korrelazioan erabiliko diren zenbaki adimentsionalak eraikitzeko.

3.3.1. Iturri bilgailudun iturri ohantzeen kurba karakteristikoak

Iturri bilgailua erabiliz lorturiko kurba karakteristikoetan sakondu baino lehenago, ohiko iturri ohantzeen (konikoaren zein koniko-zilindrikoaren) kurba zehaztea eta ulertzea funtsezkoa da. Horretarako, sistema egonkorra zihurtatzen duen solidoa aukeratu da, kasu honetan 4mm -ko diametroa duten beirazko bolak. Solido hauek duten dentsitate eta tamaina dela eta, portaera egonkorra dute emari tarte oso zabalean, nahiz eta erdiko hodirik ez erabili.

Hori dela eta, kasu honetan erabili den sistema hurrengoa izan da: 36° ko kontaktorea, 0.04m -ko airearen sarrerako diametroa, 0.20m -ko ohantzearen altuera eta lehen aipaturiko solidoa. Kasu honetarako ez da erdiko hodirik erabili, sistema bere kabuz egonkorra baita. 3.1. Irudian erakusten da sistema honen kurba karakteristikoak.



3.1. Irudia. Iturri bilgailurik gabeko iturri ohantzeen kurba karakteristikoa Sistema: $\gamma = 36^\circ$, $D_0 = 0.04m$, $H_0 = 0.20m$, $d_p = 4mm$.

3.1. Irudian ikus daitekeen bezala, saiakuntza bakoitza bi kurba ezberdinez osatua dago. Alde batetik, airearen emaria igoz lortzen den kurba (puntu urdinez adierazia); eta bestetik, airearen emaria jaitsiz lortzen dena (puntu laranja adierazia).

Airearen emaria gora egitean, sistemaren presio galerak ere gora egiten du era proportzionalan, harik eta presio galera maximoa lortu arte (ΔP_M). Puntu honen neurketak arazo handiak sortzen ditu, izan ere, emariaren goraldi txiki batek iturriaren lorpena eragiten du eta presio galera izugarri jaisten da aldiberean. Hortaz, oso zaila da iturria sortu aurreko presio galeraren balio zehatza neurtzea. Gainera ekipoko neurgailuak ez dira gai datuak abiadura handian jasotzeko. Hori dela eta, neurtutako presio galera maximoaren balioa benetakoa baino txikiagoa da eta arrazoi honengatik parametro hau ez da zehazki aztertuko.

Behin presio galera maximoa gaindituta, ohantzea geldi egotetik iturria agertzerara pasatzen da eta solidoak zirkulazioan hasten dira. Iturriarekin batera iturgunea sortzen da, aireak bide preferentziala sortzen baitu ohantzearen erdian. Hori dela eta, aireak solido kantitate (densitate) txikiko bidea gurutzatu behar du eta bide honetan zehar sortzen den presio galera ohantze finkoa gurutzatzeko behar dena baino txikiagoa da. Hortaz, 3.1. Irudian erakusten den bezala, behin iturria lorturik edo presio galera maximoatik aurrera, presio galeraren balioak izugarri egiten du behera.

Beira bezalako solidoak erabiltzean lortzen den iturria oso egonkorra da eta aire emaria handitu ahala presio galerak konstante irauten du tarte zabalean. Hala ere, airearen abiadura handitu ahala eraztungunearen porositatea handitzen hasten da

iturgunearekin ia bat eginez, eta hiru zonaldeen arteko ezberdintasunak ez dira hain nabariak. Aldaketa honi iturri ohandze diluiturako trantsizioa deitzen zaio eta abiaduraren eremu honetan sistemaren presio galerak behera egiten du. Behin iturri ohandzearen hiru zonaldeen porositatea berdintzen denean, presio galerak berriro konstante irautuen du tarte estuan, hots, iturri ohandze diluitura heldu den seinale. 3.1. Irudiko saiakuntzan ez da erregimen honetara heldu airearen emari oso altuak behar direlako. Azkenik, airearen emaria handitu ahala solidoen abiadura terminalera helduko litzateke eta solidoak airearekin arrastatuak izango lirateke presio galerak ere behera egiten duela.

Orain arte azaldutakoa saiakuntza hidrodinamikoaren igoerako kurbei dagokie eta honekin lortzen den parametro interesgarria iturri ohandze diluitua lortzeko behar den abiadura minimoa da. Hala ere, erregimen hau ez da gaur egun asko erabiltzen, izan ere, egoera honetara heltzeko beharrezkoa den aire emaria oso handia baita.

Beraz, jaitsiera kurba hastean, airearen emaria geroago eta txikiago da eta presio galera geroago eta handiago iturri ohandze diluituaren trantsizioa amaitu arte. Behin iturri ohandze erregimenera bueltatuta, presio galera konstante mantentzen da aire emari tarte zabalean iturri ohandze finkoa lortu arte. Egoera honetara heldu baino lehenago iturkuntzarako abiadura minimoa (u_{ms}) lortzen da. Parametro hidrodinamiko hau jaitsiera kurbaren bidez lortu ahal da soilik, izan ere, igoeran ohandzea finko izate-tik iturri ohandze garatura pasatzen da (minimoa tartean dago). Lehen aipatu bezala, iturkuntzarako abiadura minimoa ohandzeak egoera egonkorrean opera dezakeen airearen gutxieneko abiadura da eta oinarrizko parametroa da prozesuen baldintzak finkatu ahal izateko. Neurketa hau iturkuntza egoera egonkorretik ohandze finkora pasatzeko uneari dagokio, iturria desagertu aurreko uneari hain zuzen.

Parametro hau kurba karakteristikoaren bidez neurtu daiteke, baina oso lagungarria da begi bistaz ziurtatzea. Horretarako, laborategiko kontaktore gardenez baliatzen da, hauek barnean gertatzen dena ikustea ahalbidetzen baitute. Hala ere, 3.1. Irudiko kurbari erreparatzen bazaio, airearen emaria iturkuntza minimorako abiaduratik behera jaistean, presio galeraren gorakadarxo bat antzematen da, hortaz, kurba karakteristikoak iturkuntzarako abiadura minimoa zehaztasunez neurtzea ahalbidetzen du, gorakadaren hasierako puntuari baitagokio. Bukatzeko, aire emaria jaitsi ahala presio galeraren balioak txikituz doaz zero izan arte.

3.1. Irudiari erreparatuz, aipagarria da presio galeraren eboluzioa airearen abiadurarekiko ez dela berdina bi kurbetan (gas emariaren igoeran eta jaitsieran), hau da, histeresi fenomeno antzeman daiteke. Histeresia sortzearen arrazoia iturgunea irekitzeak dakarren presio galera (maximoa) eta egoera egonkorreko presio galeraren arteko ezberdintasuna da. Izan ere, iturriaren sorketak puzgailuaren potentzia handia

behar du eta behin iturgunea lortu dela, sistemaren presio galerak nabarmen egiten du behera airearen emaria handitzean. Hala ere, iturkuntzarako abiadura minimotik airearen emaria jaisterakoan iturria desagertu eta ohantze finkoa lortzen da berriz ere. Kasu honetan, ohantzea laxatua dago eta ohantzearen porositatea hasieran baino handiagoa da, honek sortzen duen presio galera txikiagoa izanik. Erdiko hodiak erabiltzen diren kasuetan lortzen den histeresia hodirik gabekoen antzekoa da [23].

3.3.1.1 Kurba karakteristiko ezberdinen bilakaera

Beraz, ohiko iturri ohantzeetan iturri ohantzearen geometria ezberdinak eta konfigurazio zein material ezberdinak erabili arren, 3.1. Irudian azaltzen den bezalako kurbak lortu dira. Hala ere, solido finak erabiltzen diren kasuetan ($d_p < 1\text{ mm}$) erdiko hodian erabilera beharrezkoa da, hauek gabe ez baita posible sistema egonkorra lortzea. Bestalde, erdiko hodiak erabiltzen diren kasuetan partikula finen operazioa iturkuntzarako abiadura minimotik gertu baino ezin da egin, emari handiagoetan solidoen arrastea gertatzen baita. Beraz, $D_0/d_p < 20 - 30$ deneko kasuetan, airearen emari handietan ez dago informaziorik bibliografian, eta are gutxiago hodirik gabeko sistemetan. Hori dela eta, iturri bilgailua erabili behar da nahitaez. Hauek erdiko hodirik gabeko kasuetan sistema egonkortu egiten dute eta solidoen arrastea ekidin konfigurazio guztietan. Beraz, emari handietan operatzea ahalbidetzen dute. Hortaz, hurrengo irudietako kurbekin bibliografiako hutsune hori bete nahi da baita sistema hauen portaera eta egonkortasuna azaldu ere.

3.2., 3.3. eta 3.4. Irudietan erakusten dira konfigurazio bakoitzerako (hodirik gabe, irekiduradun hodiak eta hodi ez-porotsuak erabiliz) lorturiko kurba karakteristikoak eta erregimen ezberdinak. Ikus daitekeenez, kurba karakteristikoaren itxura edo forma konfigurazioaren menpekoa dela, izan ere, erdiko hodia erabiltzeak edo hodirik gabe operatzeak sistemaren portaera baldintzatzen baitu erregimen ezberdinak lortzen direla. Hortaz, nahiz eta kontaktorearen aldagai geometriko edo solido ezberdinak erabili ($d_p < 1\text{ mm}$) eta presio galera eta parametro hidrodinamikoaren balioak ezberdinak izan (aurrerago azalduko dira parametro geometriko garrantzitsuenek kurban sortzen dituzten aldaketak), konfigurazio bakoitzak duen kurbaren forma berdintsua da.

Ohiko iturri ohantzetarako azaldu den bezala, iturri bilgailudun iturri ohantzeetan burutu diren hidrodinamika saiakuntzak bi kurba ezberdinez osatuta daude: aire emariaren igoerako kurba eta ondorengo jaitsierako kurba.

Lehenengoaren kasuan, airearen emaria edo abiadura handituz, iturria lortzen da eta egoera ezegonkorra edota tratatu daitekeen aire abiadura maximora arte heldu daiteke. Ondoren, abiadura jaitsi egiten da eta atzeranzko kurba lortu. Bigarren

kurbaren lorpena oso garrantzitsua da iturkuntzarako abiadura minimoa mugatzea ahalbidetzen baitu.

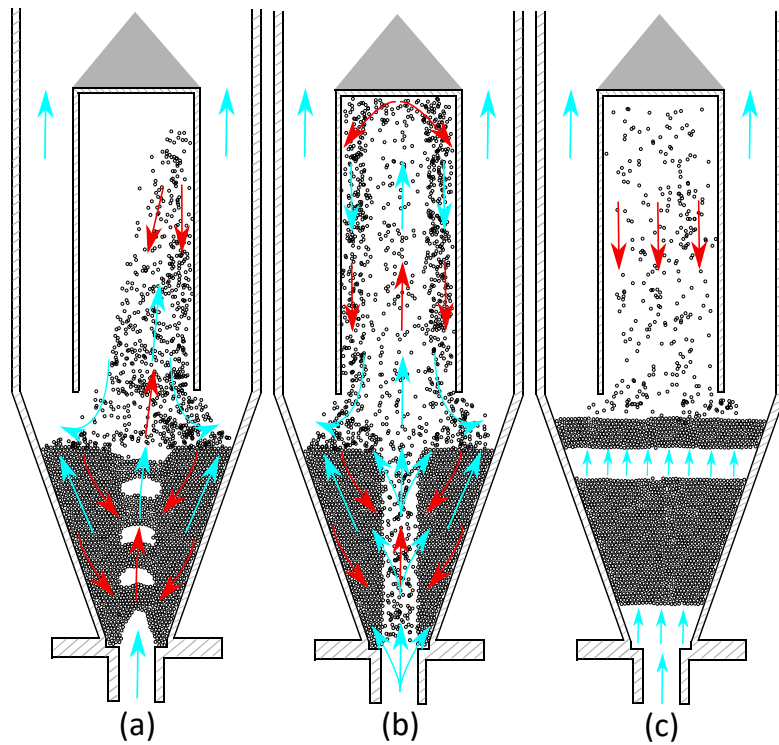
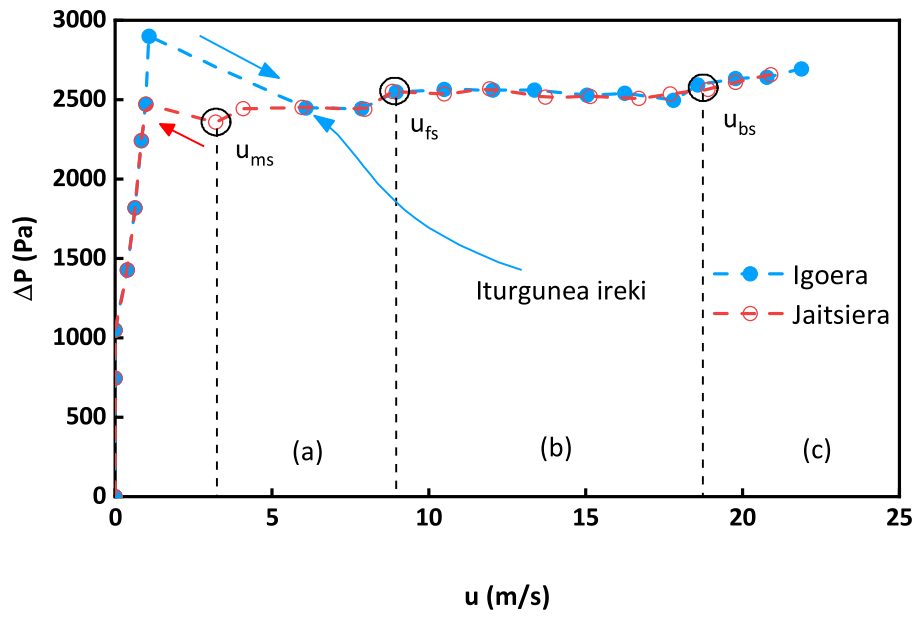
Iturri ohandzeen kurba karakteristikoak lortzeko zenbait pausu egin behar dira zehatz mehatz. Horrela, behin sistema prest dagoenean, puzgailua piztu eta airearen emaria gora egin behar da pixkanaka. Nahiz eta orain arte adierazi den konfigurazio ezberdinek kurba ezberdina izan, airearen abiadura txikiatarako (ohantze finko dagoenean) kurbaren itxura hiru konfigurazioetan berdintsua da. Hau da, kurba ezberdinetako lehengo puntuak abzisa ardatzean gora daude. Behin sarrerako aireak ohandzearen presio galera gainditzeko behar duen presioa duenean, orduan hasten da airea ohandzearen poroetan zehar barneratzen. Hemendik aurrera airearen emaria handituz gero, presio galerak ere era proportzionalean egiten du gora harik eta iturgunea ireki arte.

3.2., 3.3. eta 3.4. Irudietako kurben hasierako igoera alderatuz gero, argi ikusten da hiru kasuetan presio galeraren balio berdintsuetan hasten dela airea ohandzean zehar barneratzen. Hala ere, presio galera maximorik handiena hoderik gabeko sistemak du eta hodi ez-porotsuak txikiena.

Behin iturria sortuta, konfigurazio guztietan iturri egonkorra lortzen da eta presio galeraren balioak behera egiten du. Konfigurazio bakoitza hobeto ulertzeko, euren kurba karakteristikoak banan bana azalduko dira.

Hoderik gabe

Iturri bilgailua hoderik gabeko sistemetan erabiliz, sistema egonkorra lortzen da iturgunea irekitzean, hala ere, lortzen den iturria ez da guztiz ideala edo ohikoen antzekoa. Hau da, konfigurazio honekin lorturiko iturria altuera handikoa da, baina aldi berean aldikakoa. Gainera, iturgunetik ateratzen diren solidoak ez dira guztiz zuzen ateratzen, hau da, iturria ez da bertikalki ateratzen (3.2. Irudiko (a) erregimena). Honetaz gain, iturria aldakorra da, hots, nahiz eta ohandzearen erdian sortu, beraren posizioa ez da konstante eta pixka bat biraka ari da ardatzean inguruan. Honen arrazoia iturgunean dago, aireak ez baitu behar den beste indar ohandzearen presioari aurre egiteko eta iturgune definitua sortzeko. Beraz, airea burbuila moduan igotzen da iturgunean zehar (3.2. Irudiko (a) erregimena) eta, ondorioz, iturriaren norabide bertikala aldatuz doa. Hala eta guztiz ere, iturri bilgailuak iturria bildu eta sistema egonkortu egiten du. Hortaz, erregimen honi iturkuntza erregimena izena esleitu zaio, izan ere, iturri ohandzeen erregimena mantentzen baita nahiz eta iturgunea aire burbuilez osatua egon.



3.2. Irudia. Iturri bilgailudun iturri ohantze konikoen kurba karakteristikoa eta lorturiko erregimen ezberdinak erdiko hodirik gabe. Sistema: $\gamma = 45^\circ$, $D_0 = 0.04\text{ m}$, $H_0 = 0.20\text{ m}$, $H_F = 0.06\text{ m}$, $D_F = 0.20\text{ m}$, $d_p = 0.246\text{ mm}$.

Behin iturria lortuta, airearen abiadura handitzean presio galerak konstante dirau airearen abiadura tarte batean. Tarte honetan, iturriaren itxura ez da asko aldatzen, hasieratik baitu altuera handia eta emaria handitu ahala altuera gutxi gorabehera konstantea baita. Ostera, iturriaren egonkortasunean aldaketak nabari dira

airearen emaria handitzean, iturriaren sorkuntzari loturiko maiztasuna handiago baita (aire burbuilak maizago dira iturgunean). Gainera, sortzen den iturria bertikalagoa eta estatikoagoa da.

Bestalde, airearen abiadura zehatz batetik aurrera presio galerak pixka bat gora egiten du eta, berriz ere, airearen abiadura tarte batean konstante mantentzen da. Tarte honetan iturri oso indartsua lortzen da eta iturri bilgailuaren bolumen osoa hartzen du (3.2. Irudiko (b) erregimena). Honetaz gain, solidoaren zirkulazioa asko ere bortitzagoa da eta lortzen den sistema guztiz egonkorra da. Kasu honetan ere iturkuntza erregimena lortzen da, baina askoz indartsuagoa eta, ondorioz, erabateko iturkuntza erregimena lortzen dela esan daiteke. Hortaz, presio galera eta zurrumbilotasuna ezberdinak dituzten bi erregimen egonkor ezberdin lortzen dira.

Azkenik, airearen abiadura zehatz batetik aurrera sistemaren presio galera modu proportzionalean handitzen da abiadurarekin. Honen arrazoia sistemaren ezegonkortasunean datza. Izan ere, iturgunea zabalduz doa airearen abiadura handitu ahala eta, abiaduraren balio zehaztetik aurrera, iturgunearen sarreran airea zabaldu egiten da eta ohantze osoa hartzen duen burbuila handi moduan igotzen da (3.2. Irudiko (c) erregimena). Fenomeno hau *slugging* bezala ezagutzen da eta ez da onuragarria iturri ohantzeetan. Lorturiko presio galera handia da eta iturria zein iturgunea desagertu egiten dira. Hortaz, kurba karakteristikoaren gune honi burbuilazko iturkuntza erregimena deritzo.

Beraz, bi erregimen egonkorren ostean erregimen ezegonkorra lortzen da eta, azken honen barruan, *slugging*-aren maiztasuna handiago egiten da airearen emaria handitzean, presio galera ere handiago delarik. Kurbaren gune honetan ez dago iturri ohantze erregimenik eta ez da egokia operatzeko.

Ondoren, geroago eta gasaren emari txikiagoa elikatu behar da zero izan arte. Etapa hau oso garrantzitsua da, bertan egiten baita iturkuntzarako abiadura minimoaren neurketa. 3.2. Irudian azaltzen den bezala, behin igoerako kurba lortuta, airearen abiadura murriztu egiten denean, burbuilazko iturkuntza erregimenetik erabateko iturkuntza erregimenara pasatzen da, eta iturri indartsu eta egonkorra lortzen da. Hala ere, airearen abiadura murriztuz doan heinean, iturri ahulagoa lortzen da (iturkuntza erregimenara heldu den seinale). Behin airearen abiadura iturgunea irekitzeari zegokion abiadura baino txikiagoa denean, presio galerak konstante dirau tarte txiki batean, eta ondoren zertxobait behera egiten du. Egoera honetan iturri oso ahula lortzen da, baina konstantea eta desagertzen ez dena. Hortaz, abiadura honi dagokio iturkuntzareko abiadura minimoa, izan ere, honen azpitik iturria desagertu egiten baita eta ohantze finkoa lortu.

Iturria desagertzean, airearen presio galerak gora egiten du eta airearen ema-

ria asko txikitzen da ohandze finkoak iturrituak baino presio handiagoa sortzen baitu. Azkenik, emaria oraindikarren txikiago egitean (bypass balbula irekitzean edo motorearen maiztasuna txikitzean,) presio galerak eta emariak era proportzionalan egiten dute behera, eta behin aire emaririk ez dagoenean, presio galera zero da.

3.2. Irudian erakusten den bezala, igoeran lortu den presio galeraren balio eta erregimen berdina lortzen dira jaitsieran. Emaitza honen lorpena oso garrantzitsua da, alde batetik, igoeran lorturiko emaitzak berresten direlako; eta bestetik, erregimen ezegonkorra lortu den kasuetan iturria ezegonkor izatetik berriz ere egonkor izatera pasa daitekeelako.

Hortaz, 3.2. Irudiari erreparatuz, hiru zonalde edo erregimen bereizten dira kurban (behin sistema martxan dagoelarik): iturkuntza (3.2.a Irudia), erabateko iturkuntza (3.2.b Irudia) eta burbuilazko iturkuntza erregimena (3.2.c Irudia).

Iturkuntza erregimena deritzona iturkuntzarako abiadura minimoan (u_{ms}) hasi eta erabateko iturkuntza erregimena arte luzatzen da. Bi erregimen egonkorren artean presio galeraren aldaketa dago, beraz, erabateko iturkuntza erregimenaren hasiera puntua u_{fs} abiadurari dagokio. Hortaz, iturkuntza erregimena u_{ms} eta u_{fs} arteko tartea da.

Erabateko iturkuntza erregimenaren ostean, slugging eta burbuilazko iturkuntza erregimena agertzen da. Honen adierazle presio galeraren igoera da, beraz, presio galera igotzen hasten den lehenengo puntua (u_{bs}) burbuilazko iturkuntza erregimenaren hasiera da. Hortaz, erabateko iturkuntza erregimenak u_{fs} eta u_{bs} tartea hartzen du. Azkenik, u_{bs} -tik aurrera burbuilazko iturkuntza erregimena lortzen da.

Beraz, hodirik gabeko kurba karakteristikoan hiru erregimen eta hiru parametro hidrodinamiko ezberdin lortzen dira. Parametro hidrodinamikoak erregimen ezberdinen muga adierazgarri dira eta erabilitako sistemaren arabera, hau da, euren balioak ezberdinak dira erabilitako sistemaren arabera.

Hortaz, erdiko hodirik gabeko sistemetan neurtu eta aztertuko diren parametro hidrodinamikoak iturkuntzarako abiadura minimoa (u_{ms}), erabateko iturkuntzarako abiadura (u_{fs}) eta burbuilazko iturkuntzarako abiadura (u_{bs}) dira.

Irekiduradun hodiak

Irekiduradun hodia duten sistemetan, behin iturgunea zein iturria lortuta presio galerak behera egiten du eta iturri oso egonkorra lortzen da. Kasu honetan, iturriak altuera txikia du eta partikulak iturgunetik zuzen ateratzen dira. Hala ere, hodirik gabeko kasuetan bezala, airea iturgunean zehar burbuila forman igotzen da ohandzean

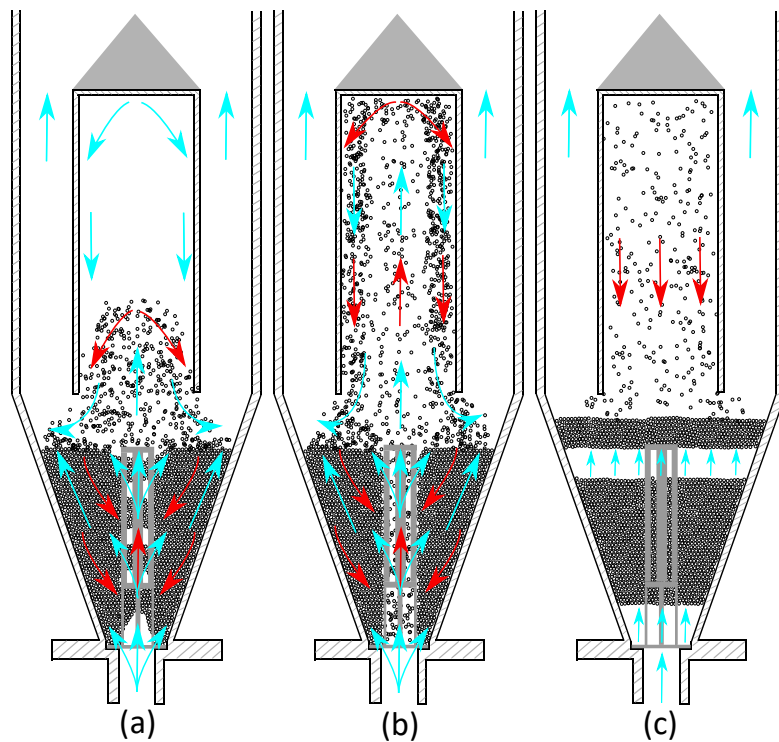
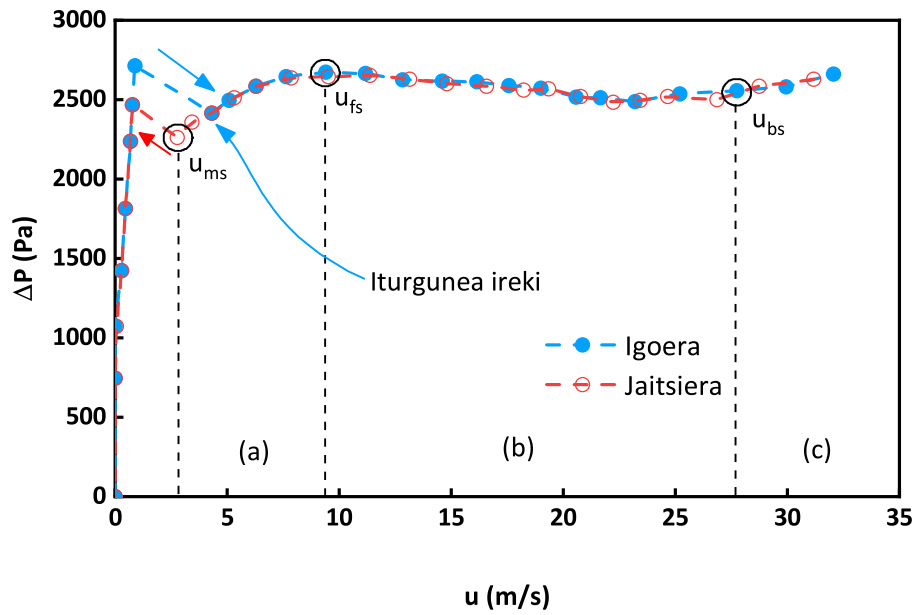
zehir eta txandakako iturria lortzen da. Hala ere, erdiko hodiaren nerbioek ohandtzea partzialki eutsi egiten dute eta, ondorioz, iturri egonkorra lortzen da hasieratik.

Iturgunea ireki ostean, presio galerak gora egiten du airearen emaria handitzean eta iturriaren altuera ere handiagoa da. Kasu honetan, aurrekoan bezala, airea burbuila eran igotzen da ohandtzean zehar (3.3. Irudiko (a) erregimena). Hala ere, kasu honetan erdiko hodiak lagundu egiten dio aireari ohandtzea eusten eta burbuilak maiztasun handiagoz igotzen dira. Beraz, hodirik gabeko sistemetan bezala, iturri ohandtze erregimena lortzen da, nahiz eta, iturri definiturik ez egon, hau da, iturkuntza erregimena lortzen da.

Airearen emari handiago elikatzean, presio galerak balio maximoa lortzen du (3.3. Irudiko u_{fs} -ri dagokiona) eta ondoren behera egiten du. Balio maximora heltzean, ohandtze egonkor eta azkarra lortzen da (3.3. Irudiko (b) erregimena). Hau da, presio galera maximotik jaisten hastean iturri oso indartsua lortzen da eta iturri bilgailuaren bolumen osoa okupatzen du, sistema oso egonkor eta indartsua lortzen dela. presio galeraren jaitsieran aurrera joan ahala ez da aldaketarik antzematen iturriaren egonkortasunean, ezta solidoen zirkulazioan ere. Hortaz, hodirik gabeko sistemetan bezala, kurba karakteristikoaren gune honetan erabateko iturkuntza erregimena lortzen da.

Airearen emaria handitu ahala, presio galera egonkortu egiten da eta konstante da airearen abiaduraren tarte batean. Tarte honetan, ez da aldaketarik somatzen sistemaren egonkortasunean, baina solidoaren zirkulazioa handiago da airearen emaria handitu ahala.

Azkenik, hodirik gabeko sistemetan bezala, airearen abiadura handiagoa elikatu ahala, ohandtzean zehar zabaldu egiten da eta presio galera handiagoa duen slugging efektua sortzen da (3.3. Irudiko (c) erregimena). Abiadura handitzearekin batera, ezegonkortasuna handiago da eta presio galerak ere gora egiten du. Beraz, aurreko kasuan bezala, kurba karakteristikoaren zonalde honetan iturri ohandtzeen erregimena ez da lortzen eta ez da komenigarria baldintza hauetan lan egitea, hau da, burbuilazko iturkuntza erregimena ez da egokia lan egiteko. Hala ere, irekiduradun hodian sistema guztietan ez da erregimen ezegonkor hau lortu, izan ere, egonkortasuna beste hainbat aldagairen menpekoa baita (ohandtzearen altuera, kontaktorearen angelua, airearen sarrerako diametroa, hodiaren irekiduradun portzentaia eta abar) eta zenbait kasutan presio galerak ez du gora egin, baizik eta konstante egon da. Ezegonkortasuna lortu ez den kasu hauetan, gure unitateak tratatu dezakeen emari maximoraino igo da airearen emaria ($200 m^3 N/h$) eta erregimen ezegonkorrik ez da lortu. Hala ere, baliteke sistema hauek emari handiagoan erregimen ezegonkorrera heltzea, baina, edozein kasutan, oso abiadura handietan izango litzateke.



3.3. Irudia. Iturri bilgailudun iturri ohantze konikoen kurba karakteristikoa eta lorturiko erregimen ezberdinak irekiduradun hodia erabiliz. Sistema: $\gamma = 45^\circ$, $D_0 = 0.04\text{ m}$, $H_0 = 0.20\text{ m}$, $H_F = 0.06\text{ m}$, $D_F = 0.20\text{ m}$, $d_p = 0.246\text{ mm}$, $D_T = 0.04\text{ m}$, $L_T = 0.20\text{ m}$, $IP = \%57$.

Aurreko kasuan bezala, airearen abiadura jaitsi ahala lorturiko presio galararen balioak igoerakoen berdinak dira, hots, behera egiten dute balio zehatz baten egonkortu arte. Kasu honetan ere, egoera ezegonkorretik egonkorrera pasatzen da, hau

da, aireak iturgunea zeharkatzen du ohantzean burbuilarik sortu gabe.

Airearen abiadura behera eginez gero, presio galera maximoa lortzen da berriz ere (igoeran lortutako abiadura berdinean) eta puntu hau pasa ostean iturriaren altuera geroago eta txikiago da airearen abiadura jaitsi ahala. Airearen abiaduraren balio zehatzean (u_{ms}) iturria desagertu egiten da eta ondoren presio galerak zertxobait gora egiten du. Hortaz, iturria desagertu den puntuari iturkuntzarako abiadura minimoa dagokio. Iturria desagertu ondorengo maximoaren ostean, airearen abiadura txikiagoa den heinean presio galera ere txikiagoa da, 3.3. Irudia.

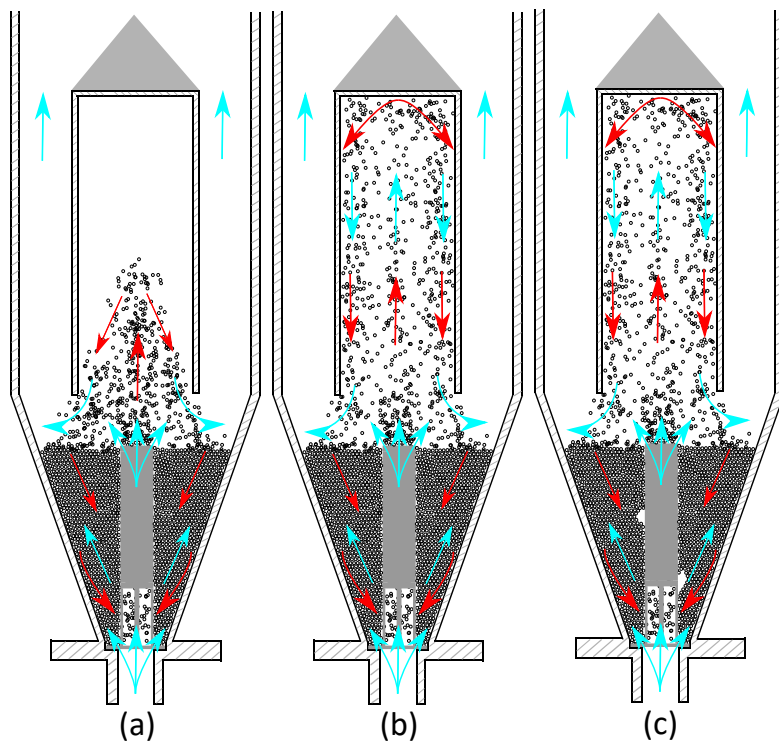
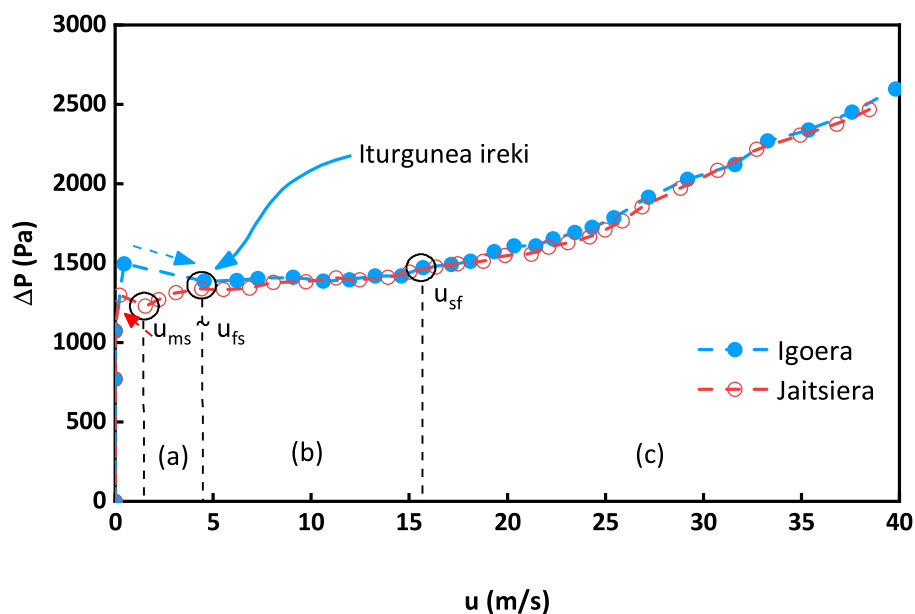
Hortaz, kasu honetan ere hiru erregimen ezberdin lortzen dira: iturkuntza (3.3. Irudiko (a) erregimena), erabateko iturkuntza (3.3. Irudiko (b) erregimena) eta burbuilazko iturkuntza erregimena (3.3. Irudiko (c) erregimena).

Beraz, irekiduradun hodia erabiltzen den sistemetan kurba karakteristikoak bi edo hiru erregimen izango ditu, hau da, sistemaren arabera ezegonkortasuna ager daiteke. Iturkuntza erregimena iturkuntzarako abiadura minimoan (u_{ms}) hasi eta erabateko iturkuntzarako abiadura (u_{fs}) lortu arte luzatzen da. Bestalde, erabateko iturkuntza erregimena erabateko iturkuntzarako abiadura bukatzean hasi eta burbuilazko iturkuntzarako abiadura (u_{bs}) lortu arte luzatzen da. Erregimen ezegonkorra lortzen den kasuan, presio igoerako lehenengo puntuan hasten da, hots, burbuilazko iturkuntzarako abiaduran (u_{bs}) hain zuzen.

Erabilitako sistemaren arabera, irekiduradun hodian kasuan bi edo hiru parametro hidrodinamiko lortzen dira: iturkuntzarako abiadura minimoa (u_{ms}), erabateko iturkuntzarako abiadura (u_{fs}) eta burbuilazko iturkuntzarako abiadura (u_{bs}).

Hodi ez-porotsuak

Iturgunea irekitzean, iturri oso altu eta diluitua lortzen da. Honek iturri bilgailuaren goiko aldea jotzen du eta bolumen osoa okupatzen du (3.4. Irudiko (b) erregimena). Kasu honetan iturgune definitua lortzen da hasierako momentutik, erdiko hodiak jasaten baitu ohantzeak eragiten duen ia presio guztia (hodien hanken alturaino dagoen ohantzeak eragiten duen presioa jasan behar du soilik aireak).



3.4. Irudia. Iturri bilgailudun iturri ohantze konikoen kurba karakteristikoak eta lorturiko erregimen ezberdinak erdiko hodi ez-porotsua erabiliz. Sistema: $\gamma = 45^\circ$, $D_0 = 0.04\text{ m}$, $H_0 = 0.20\text{ m}$, $H_F = 0.06\text{ m}$, $D_F = 0.20\text{ m}$, $d_p = 0.246\text{ mm}$, $D_T = 0.04\text{ m}$, $L_T = 0.20\text{ m}$, $L_H = 0.07\text{ m}$.

Airearen abiadura handitzean presio galera konstante mantentzen da abiaduraren tarte zabalean, baina ez da antzematen aldaketarik sisteman. Hala ere, airearen

abiaduraren balio zehatzetik aurrera presio galerak gora egiten du eta airearen abiadurarekin batera era proportzionalan handitzen da. Izan ere, airearen abiadura handitzean presioa handiagoa da kontaktorearen sarreran eta, ondorioz, airearen frakzio bat ohantzean zehar barneratzen da burbuila txikietan. Zenbat eta emaria handiagoa izan orduan eta aire frakzio handiagoa barneratzen da ohantzean zehar. Hortaz, honek airearen presio galera handitzea dakar. Hala ere, burbuila hauen tamaina oso txikia da eta erdiko hodiaren hormaren kanpotik igotzen dira (3.4. Irudiko (c) erregimena), sisteman ezegonkortasunak sortu gabe. Hodi ez-porotsuekin lan egiterako orduan, ez da inoiz erregimen ezegonkorra lortu, hala ere, aurreko kasuan bezala, emaria soilik $200m^3N/h$ -ra igo ahal izan da.

Igoerako kurba lorturik jaitsierakoari ekin zaio eta horretarako airearen abiadura geroago eta txikiago egin da zero izan arte. Airearen abiadura txikitzen hastean, presio galerak behera egiten du balio zehatzean egonkortu arte, eta hortik aurrera konstante mantentzen da. Airearen abiadura iturgunea irekitako puntutik jaitsiz gero, presio galeraren balioak txikiago dira. Aurreko bi konfigurazioetan bezala, aire emari baxu hauetan ohantzeak sortzen duen presioa dela eta, airea ez da gai iturgune definitua sortzeko eta burbuila forman igotzen da iturgunean zehar. Hortaz, presio galeraren balioak txikiago diren heinean iturria ahulduz doa desagertu arte. Azkeneko puntu honi iturkuntzarako abiadura minimoa dagokio (3.4. Irudiko (a) erregimena). Kasu haueetan, uneoro dago iturgune definitua, hau da, uneoro lortzen da erabateko iturkuntza erregimena. Beraz, iturgunea definitzen den airearen abiadura iturkuntzarako abiadura minimotik oso gertu dago. Hori dela eta, ez da puntu karakteristiko bezala hartu.

Azkenik, aurreko bi konfigurazioetan bezala, behin iturria desagertu denean, airearen abiadura murriztuz, presio galerak gora egiten du zertxobait, baina ondoren behera egiten du zero izan arte. 3.4. Irudian erakusten den bezala, igoeran lortu den presio galeraren balio eta erregimen berdinak lortzen dira.

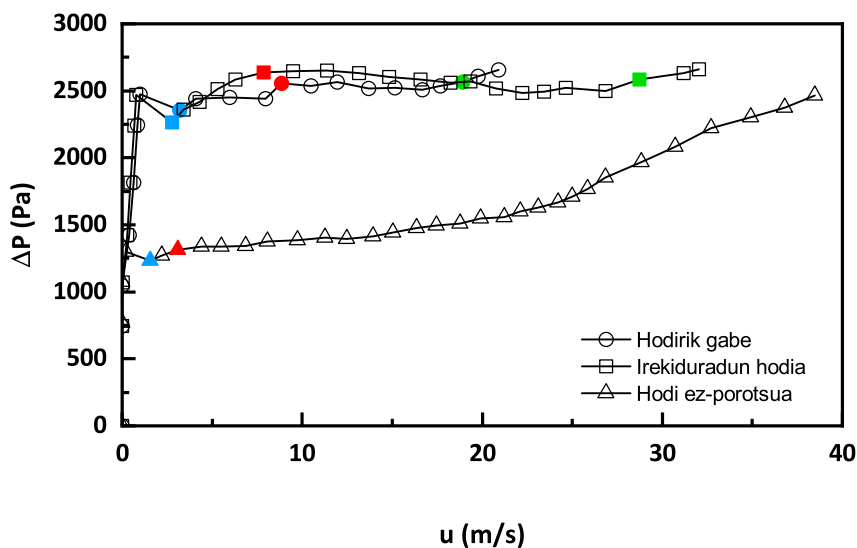
Irekiduradun hodiak erabili direnean bezala, kasu honetan ere sistemaren araberako bi kurba karakteristiko ezberdin lortu dira. Hala ere, batean zein bestean erregimen eta parametro karakteristiko kopuru bera lortzen da. Oro har, edozein solido zein sistema erabili, hodi ez-porotsuekin erabateko iturkuntza erregimena lortzen da, eta harearekin berdina gertatzen da. Hortaz, konfigurazio honetan iturkuntzarako abiadura minimotik hasi eta kurbaren bukaera arte erregimen bakarra lortzen da eta oso egonkorra da. Lehen aipatu den bezala, airearen abiadura handietan burbuilak eraztungunean zehar barneratzen dira eta presio galerak gora egiten du. Fenomeno hau sistemaren araberakoa da eta hasierako puntua ezberdina da sistemaren arabera. Hortaz, nahiz eta erregimenaren egonkortasunean eraginik ez izan, industria mailan ez da komenigarria presio galera handietan lan egitea (puzgailuaren indarra eta kostu energe-

tiko handiagoa). Beraz, puntu hau aintzat hartu da eta hurrengo analisisetan aztertuko da.

Horrela, hodi ez-porotsuak erabiliz erregimen egonkor bakarra eta bi parametro hidrodinamiko lortu dira: alde batetik, iturkuntzarako abiadura minimoa (u_{ms}); eta bestetik, iturri-jariorako abiadura minimoa (u_{sf}).

3.3.1.2 Kurba karakteristikoaren alderaketa

3.1. Irudia 3.2., 3.3. eta 3.4. Irudiekin alderatuz argi geratzen da iturri bilgailudun iturri ohantzeen kurba karakteristikoak ohiko iturri ohantzeen aldean oso ezberdinak direla. Hala ere, iturri bilgailudun iturri ohantzeen konfigurazio ezberdinen kurbak ez dira alderatu beraien artean. Orain arte banan bana aztertu eta deskribatu dira, baina beraien artean ere badira berdintasun eta ezberdintasunak. Izan ere, kurba bakoitzean lorturiko parametro hidrodinamiko gehienak berdinak dira baita iturriaren edo erregimenen eboluzioa ere. 3.5. Irudian erakusten da hiru konfigurazio ezberdinen kurba karakteristikoak batera.



3.5. Irudia. Hodirik gabe, irekiduradun hodia eta hodi ez-porotsuaren kurba karakteristikoak.

Hiru kurba ezberdinak konparagarriak izan daitezzen, kurbek osotasunean aztertu behar dira. Horretarako, abiaduraren jaitsierako kurba karakteristikoak irudikatu dira 3.5. Irudian, izan ere, kasu honetan baino ez baita neurtzen iturkuntzarako abiadura minimoa.

Hortaz, 3.5. Irudia aztertuz, oro har gehien nabari den ezberdintasuna hodi ez-porotsuetan sortzen den presio galera baxua da. Nahiz eta airearen abiadura handietan

konfigurazio hauetan sortzen den presio galera handia izan, abiadura txikietan ezberdintasun nabarmena antzematen da, beste konfigurazioek sortzen dutenaren erdia baita gutxi gorabehera. Kontuan izan behar da hodi ez-porotsuetan aireak gainditu beharreko ohantzearen presioa hodiaren hanken altuerarainokoa baino ez dela. Kasu honetan $L_H = 0.07m$ da, hau da, ohantzearen altuera gehienez ezin dira solidoak iturgunera sartu eta eraztunguneko beheko zatiko solidoak (iturgunearen azpiko $0.07m$ -tan) sar daitezke iturgunera. Hortaz, eraztungunetik iturgunera sartzen den solido kantitatea oso txikia da eta, beraz, presio galera ere baxua da.

Bestalde, 3.5. Irudian ageri den bezala, hodirik gabe eta irekiduradun hodiaren kurba karakteristikoaren artean ez dago ezberdintasun handirik, biak baitute presio galeraren balio antzekoak. Hala ere, aipatzekoa da operazio tartea askoz ere zabalagoa dela erdiko hodia duten sistemetan.

Presio galera albo batera utzita, kurba berri hauen bidez lorturiko parametro hidrodinamikoak aztertuz, ezberdintasun interesgarriak daude. Alde batetik, hiru kurba ezberdinetan nabari da iturkuntzarako abiadura minimoa (puntu urdinez irudikatuta) eta erabateko iturkuntzarako abiadura edo erabateko iturkuntzarako abiadura minimoa (puntu gorritz irudikatuta) dute; eta bestetik, hodirik gabe eta hainbat kasutan irekiduradun hodiekin burbuilazko iturkuntzarako abiadura dute. Bi parametroek joera berdina dute, hau da, hodi ez-porotsuek dute iturkuntzarako abiadura minimoaren zein erabateko iturkuntzarako abiaduraren baliorik txikienak eta hodirik gabeko sistemak handienak (irekiduradun hodiak tartekoak). Honen arrazoia orain arte azalduko da. Erdiko hodi ezberdinek ohantzea eutsi egiten dute partzialki eta hodi ez-porotsua denez gehien eusten duena, presio galerarik txikienak sortarazten ditu. Ondoren, irekiduradun hodia dago, honek era partzian eusten baitu ohantzea; eta azkenik, hodirik gabeko sistemak daude, hauetan aireak eutsi behar du ohantzea eta horrexegatik behar du abiadura handiagoa iturgunea definitzeko.

Azkenik, hodi ez-porotsuak erabiltzen diren sistemetan ez da erregimen eze-gonkor edo burbuilazko iturkuntzarako abiadurarik lortzen (puntu berdez irudikatua), baina bai beste bi konfigurazioetan. Bi azken hauek alderatuz, argi dago irekiduradun hodiekin direna abiadura handiagoetan iturri erregimena mantentzeko gai direnak, ohantzea eusteaz gain iturgunea zuzentzen ere laguntzen baitute eta airearen abiadura handiagoak behar direlako burbuila handiak edo slugging efektua sortzeko.

3.3.2. Iturri bilgailuaren posizio optimoaren azterketa

Orain arte ikusi izan den bezala, operatzeko ezinezkoak ziren solido txikiak eta mota ezberdinetakoak erabiliz lan egitea ahalbidetzen du iturri bilgailuak. Gainera,

tesi honetan erabilitako solido motaren (partikula finen) kasurako erregimen berriak lortu dira. Izan ere, hain solido tamaina txikia dela eta iturri diluitu eta altuagoak lortu dira. Orain arte partikula handiagoak edo dentsuagoak erabili dira eta lorturiko iturriak txikiagoak eta zabalagoak izan dira. Hortaz, tesi honetan erabili diren partikulak tratatu ahal izateko guztiz beharrezkoa da iturri bilgailua erabiltzea, eta ondorioz garrantzitsua da erabilera egokia izatea (optimoa).

Iturri bilgailuak bere funtzioa modu egokian egin dezan ezinbestekoa da kontaktore barruan ondo kokatua egotea, hau da, ez da komeni iturri bilgailua ohantzearen gainazaletik gora oso urrun jartzea, ezta oso gertu ere. Lehenengo kasuan iturri bilgailuak ez du iturria biltzen eta airearen emari handiagoak behar dira iturri egonkorra lortzeko. Bigarren kasuan ostera, iturri bilgailua asko presurizatzen da eta airearen emari baxuetan erregimen ezegonkorra lortzen da.

Hortaz, atal esperimentalean azaldu bezala, tesi honetan bilgailuaren kokapenerako bost posizio ezberdin aukeratu dira eta hauen azterketa burutu da posizio egokiena aurkitzeko asmoz. Posizio hauek ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren oinarriaren arteko distantzian oinarritzen dira (H_F). Erabili diren balioak hurrengoak izan dira: 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 eta 0.10 m. Altzibar-en tesian [20] azterketa bera burutu zen baina finen arrastearen azterketan eta bertan erabili ziren distantziak (H_F) 0, 0.01 eta 0.02 m izan ziren. Nahiz eta bilgailuak finen arrastea murriztu eta sistema egonkortu egin zuen, erabilitako distantziak txikiegiak zirela ondorioztatu zen. Hori dela eta, ikerketa honetan erabili den iturri bilgailuaren distantzia txikiena 0.02 m izan da. Bestalde, aipagarria da (nahiz eta tesi honetan ez adierazi emaitzak) hasierako saiakuntzetan H_F -ren 0.15 eta 0.20 m-ko balioak erabili direla, baina 0.10 m-ko emaitzen antzekoak lortu direnez, ez da beraien aipamenik egingo.

Hortaz, H_F -ren distantzia ezberdinetarako kurba karakteristikoak lortu dira konfigurazio eta aldagai geometriko ezberdinak erabiliz. 3.4. Taulan zehazten dira atal honetarako erabili diren aldagai ezberdinak eta euren mailak.

3.4. Taula. H_F optimoa neurtzeko erabili diren aldagai geometrikoak eta euren mailak.

ALDAGAIK		MAILAK	
Konfigurazioa	Hodirik gabe	Irekiduradun hodia	Hodi ez-porotsuak
Angelua (γ), °	28	36	45
Ohantzearen altuera (H_0), m	0.20	0.27	—
Iturri bilgailuaren diametroa (D_F), m	0.15	0.20	—

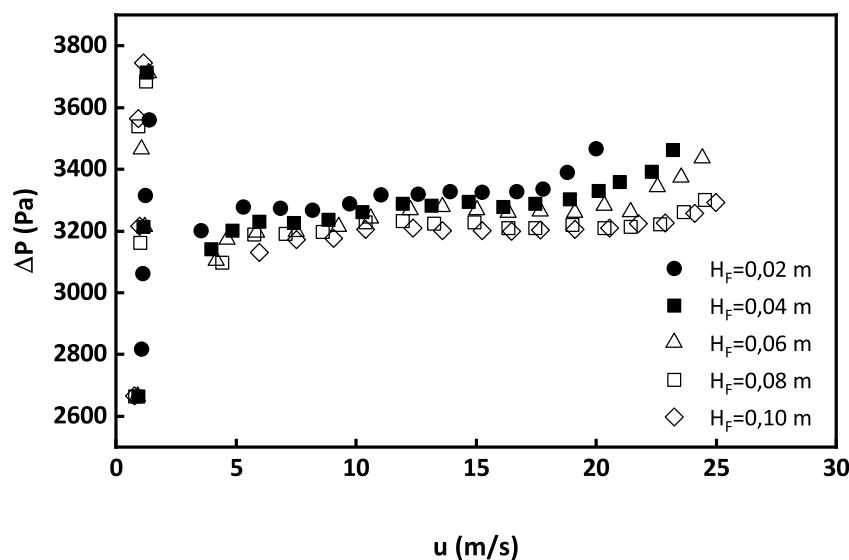
3.4. Taulan ikus daitekeen bezala, H_F optimoaren neurketarako ez dira alda-

gai geometriko guztiak aldatu, baizik eta garrantzi handiena dutenak baino ez, tartean iturri bilgailuaren diametroa. Aldatu ez diren aldagaiak konstante mantendu dira eta hurrengo balioa izan dute: $D_0 = 0.04\text{ m}$, $d_p = 0.246\text{ mm}$, $L_T = 0.20$ eta 0.27 m (ohantzearen altueraren berdina), $L_H = 0.07\text{ m}$ eta $IP = \%57$.

H_F optimoaren azterketa konfigurazio bakoitzerako burutu da, iturri bilgailuaren eragina ezberdina baita konfigurazioaren arabera. Aurrerago aipatuko den bezala, sistemaren berezko ezegonkortasuna gero eta handiagoa izan orduan eta eragin-korrage da iturri bilgailua.

Hodirik gabe

3.6. Irudian erakusten dira Erdiko hodirik gabeko sistemai dagozkien emaitzak iturri bilgailuaren oinarria eta ohandzearen gainazalaren arteko distantziaren (H_F -ren) balio ezberdinetarako.



3.6. Irudia. $\gamma = 36^\circ$, $H_0 = 0.27\text{ m}$, $D_F = 0.15\text{ m}$ sistemari dagokion kurba karakteristikoa H_F -ren balio ezberdinetarako hodirik gabeko sistemetan.

3.6. Iruditik ondoriozta daitekeenez, presio galeraren balioen portzentaia handiena gasak ohandzea zeharkatzeari dagokio. Hortaz, ohandzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren arteko hutsuneak ez du eragin nabarmenik airearen presio galeran. Hori dela eta, H_F -ren eragina argiago erakusteko ordenatu-ardatzaren eskalaren tarte estuagoa hartu da.

Airea kontaktorean sartzen hasi eta emaria handitu ahala, presio galeraren balioetan ez dago ezberdintasun handirik eta presio galera maximoa oso antzekoa da H_F -ren balio ezberdinetarako. Hortaz, iturri bilgailuak ez du eragiten ohandze finkoko

egoeran. Hala ere, behin iturgunea ireki ondoren, presio galera txikitu egiten da H_F -ren balioa handitzen den heinean. Gainera, ezberdintasun hau handiago da airearen emaria handitzen den heinean.

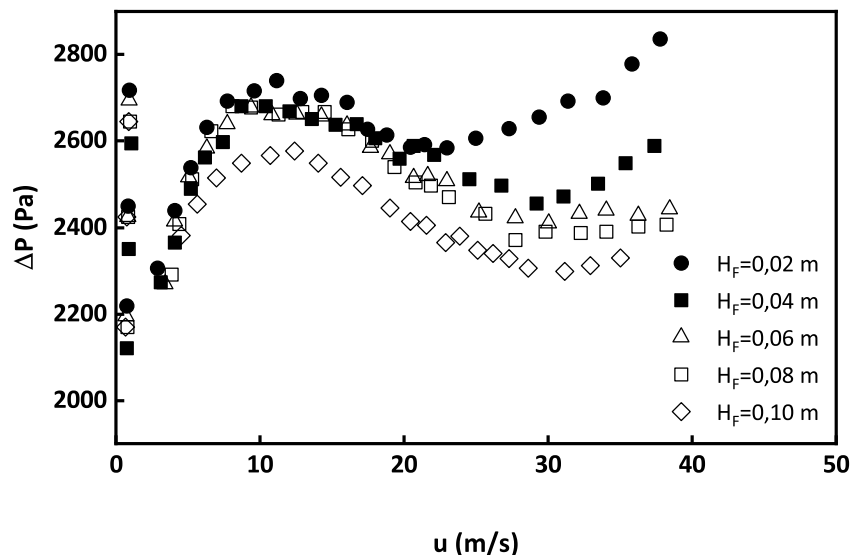
Iturri bilgailuaren distantzia txikietarako ($H_F = 0.02$ eta $0.04m$), airearen emaria handitu ahala ohantzea hedatu egiten da. Iturri bilgailua ohantzetik hurbilegi badago, presurizatu egiten da eta airea ohantzean zehar ateratzen da (bilgailura sartu gabe), ibilbide honen presio galera txikiagoa baita. Honek ezegonkortasuna eta slugging-a sorrarazten ditu, erregimen ez desiragarriak lortuz. Hortaz, gero eta txikiagoa izan bilgailuaren eta ohantzearen gainazalaren arteko distantzia orduan eta airearen abiadura txikiagoetan iritsiko da ohantze hedatau egoera honetara. Bestalde, gainontzeko H_F -ren balioetan, nahiz eta airearen abiadura handitu ohantzearen gainazala ez da iturri bilgailura heltzen, baina kasu hauetan ere presio galeraren igoera gertatzen da. Kasu hauetan, H_F -ren balioa gero eta handiagoa izan orduan eta aire emari handiagoetan hasten da presio galeraren igoera. Fenomeno hau 3.2. Irudian azaldu den berdina da, hau da, emari handietan burbuilak eta slugging eragina lortzen dira. Beraz, zenbat eta gertuago egon bilgailua ohantzetik lehenago presurizatzen da eta emari txikiagoetan lortzen da egoera ezegonkorra. Azkenik, 3.6. Irudiak erakusten duen bezala, H_F -ren balioa handitzean iturkuntzarako abiadura minimoa ere handiago da, nahiz eta antzerakoak izan. Hala ere, $H_F = 0.1m$ denean, iturkuntzarako abiadura minimo handia da besteekin alderatuz, izan ere, bilgailua oso urrun kokaturik dago eta aire emari handiagoa behar da iturria egonkortzeko.

Hortaz, H_F -ren balio txikietan egoera ezegonkorra airearen emari txikiakin lortzen den bitartean H_F -ren balio handiekin iturkuntzarako abiadura minimo handiak behar dira. Hau guztia kontuan izanik, erdiko hodi gabeko sistemetan bilgailuaren eta ohantzearen gainazalaren arteko distantzia optimoa $0.06 - 0.08m$ artean dagoela ondorioztatzen da [117, 120].

Irekiduradun hodiak

3.7. Irudian erakusten dira irekiduradun hodidun sistemei dagozkien emaitzak iturri bilgailuaren oinarria eta ohantzearen gainazalaren arteko distantziaren (H_F -ren) balio ezberdinetarako.

Aurreko kasuan aipatu bezala, 3.7. Irudian erakusten diren presio galeraren balioen portzentaia handiena gasak ohantzea zeharkatzeari dagokio, eta hau dela eta kurben artean ez dago ezberdintasun handirik. Hortaz, ezberdintasunak ondo bereizteko ordenatu-ardatzaren eskala hedatu egin da.



3.7. Irudia. $\gamma = 36^\circ$, $H_0 = 0.20\text{ m}$, $D_F = 0.15\text{ m}$ eta $D_T = 0.04\text{ m}$ sistemari dagokion kurba karakteristikoa H_F -ren balio ezberdinetarako irekiduradun hodidun sistematan.

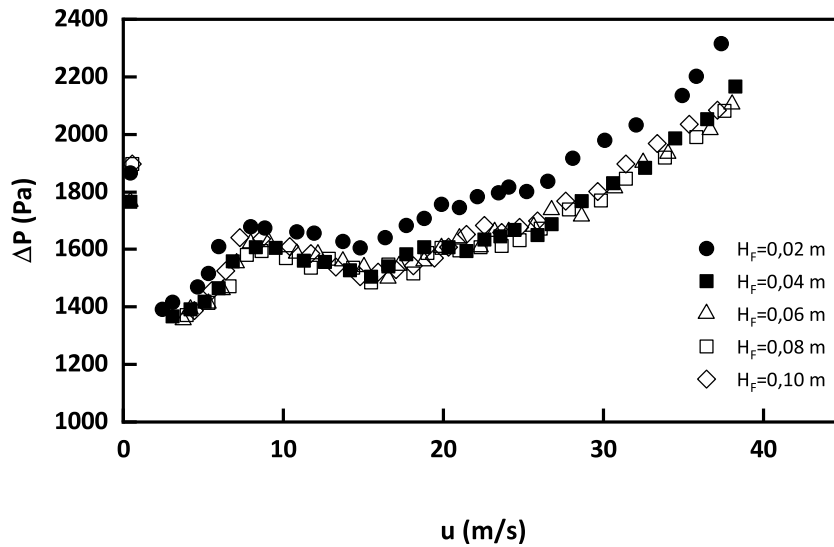
Irekiduradun hodietan ere iturri bilgailuak ez du eragiten ohandze finko egoeran eta kurba ezberdinen presio galeraren puntuak malda berdinean daude. Aurreko kasuan bezala, airearen emari txikietan kurba guztiek presio galeraren antzeko balioak dituzte, baina emaria handitu ahala $H_F = 0.10\text{ m}$ -ko kurbak balio txikiagoak ditu. Iturri bilgailua ohandzetik gertu kokatzen denean ($H_F = 0.02$ eta 0.04 m) airearen emari handietan ohandzea hedatu egiten da eta iturri bilgailuraino heltzen da. Kasu honetan, erdiko hodirik gabeko sistemetan bezala, kontaktorerara sartzen den airea eraztungunean zehar ateratzen da burbuila handiak eta ezegonkortasuna sortuz. Gainontzeko H_F -ren balioetan, gasaren emari handietan ez da presio galeraren igoera gertatzen ezta egoera ezegonkorra lortzen ere, hala ere, lehen aipatu den bezala ohandzearen egonkortasuna sistemaren menpekoa da. Bestalde, $H_F = 0.08$ eta 0.10 m -ko balioetan kontaktorearen kanpo aldetik begi bistaz ikusi ahal izan da airearen emari handietan iturgunetik ateratzen den airearen frakzio bat ez dela iturri bilgailura sartzen, eta ondorioz, bi faseen arteko kontaktua okerragoa da iturrian. Azkenik, zenbat eta iturri bilgailua ohandzearen gainazaletik gertuago kokatu orduan eta iturkuntzarako abiadura minimoa txikiagoa da. Hala ere, 3.7. Irudian erakusten den bezala, ez da ezberdintasun garrantzitsurik antzematen iturkuntzarako abiadura minimo guztien artean, $H_F = 0.10\text{ m}$ -ren kasuan dagokiona izan ezik. Kasu honetan, aurrekoan bezala, iturri bilgailuak eragina izan dezan aire emari handiak erabili behar dira.

Hortaz, H_F -ren balio txikietan egoera ezegonkorra lortzen da airearen abiadura handietan eta H_F -ren balio handietan ostera, airearen frakzio bat ez da iturri bilgailura sartzen bi faseen arteko kontaktua murriztuz. Beraz, konfigurazio hau era-

biliz, iturri bilgailuaren eta ohantzearen gainazalaren arteko distantzia optimoa 0.06 m dela ondorioztatzen da.

Hodi ez-porotsuak

3.8. Irudian erakusten dira hodi ez-porotsudun sistemei dagozkien emaitzak iturri bilgailuaren oinarria eta ohantzearen gainazalaren arteko distantziaren (H_F -ren) balio ezberdinetarako.



3.8. Irudia. $\gamma = 36^\circ$, $H_0 = 0.27\text{ m}$, $D_F = 0.20\text{ m}$ eta $D_T = 0.04\text{ m}$ sistemari dagokion kurba karakteristikoa H_F -ren balio ezberdinetarako hodi ez-porotsuak erabiliz.

Aurreko kasuetan ez bezala, hodi ez-porotsua erabiltzean sistema egonkorra lortzen da hasieratik eta hortaz, iturri bilgailuaren funtzio nagusia solidoen arrastea ekiditea da. Hala ere, H_F -ren balioa 0.02 m eta 0.10 m arteko balioak neurtu dira, naiz eta kurba gehienetan aldaketa handirik ez egon. Aurreko kasuetan bezala, $H_F = 0.02\text{ m}$ -ko balioan ohantzea hedatu egiten da eta iturri bilgailuraino heltzen da, presio galeraren balio handiak lortuz. Bestalde, 3.8. Irudian ikusten den bezala, gainerako H_F -ren balioetan ez dago ia ezberdintasunik kurba guztien artean. Hortaz, kasu honetan esan daiteke 3.8. Irudian erakusten diren presio galeraren balioak aireak ohantzea zeharkatzeari dagozkiola, hau da, iturri bilgailuaren oinarriaren eta ohantzearen gainazalaren arteko hutsuneak ez du eragiten presio galeran.

Nahiz eta lau kurbak ia berdinak izan iturkuntzarako abiadura minimoan ezberdintasunik ageri dira. Aurreko bi kasuetan bezala, zenbat eta bilgailua ohantzearen gainazaletik urrunago kokatu, orduan eta abiadura handiagoa beharko du aireak iturri

egonkor mantentzeko. Bestalde, nahiz eta 3.8. Irudian ez adierazi, H_F -ren balio handietan airearen emaria handitzean airearen bypassa gertatzen da eta airearen frakzio bat ez da bilgailuan sartzen.

Hortaz, aurreko guztia kontuan izanda iturri bilgailuaren eta ohandzearen gainazalaren arteko distantzia optimoa 0.04 eta 0.06 m artean dagoela ondorioztatu da.

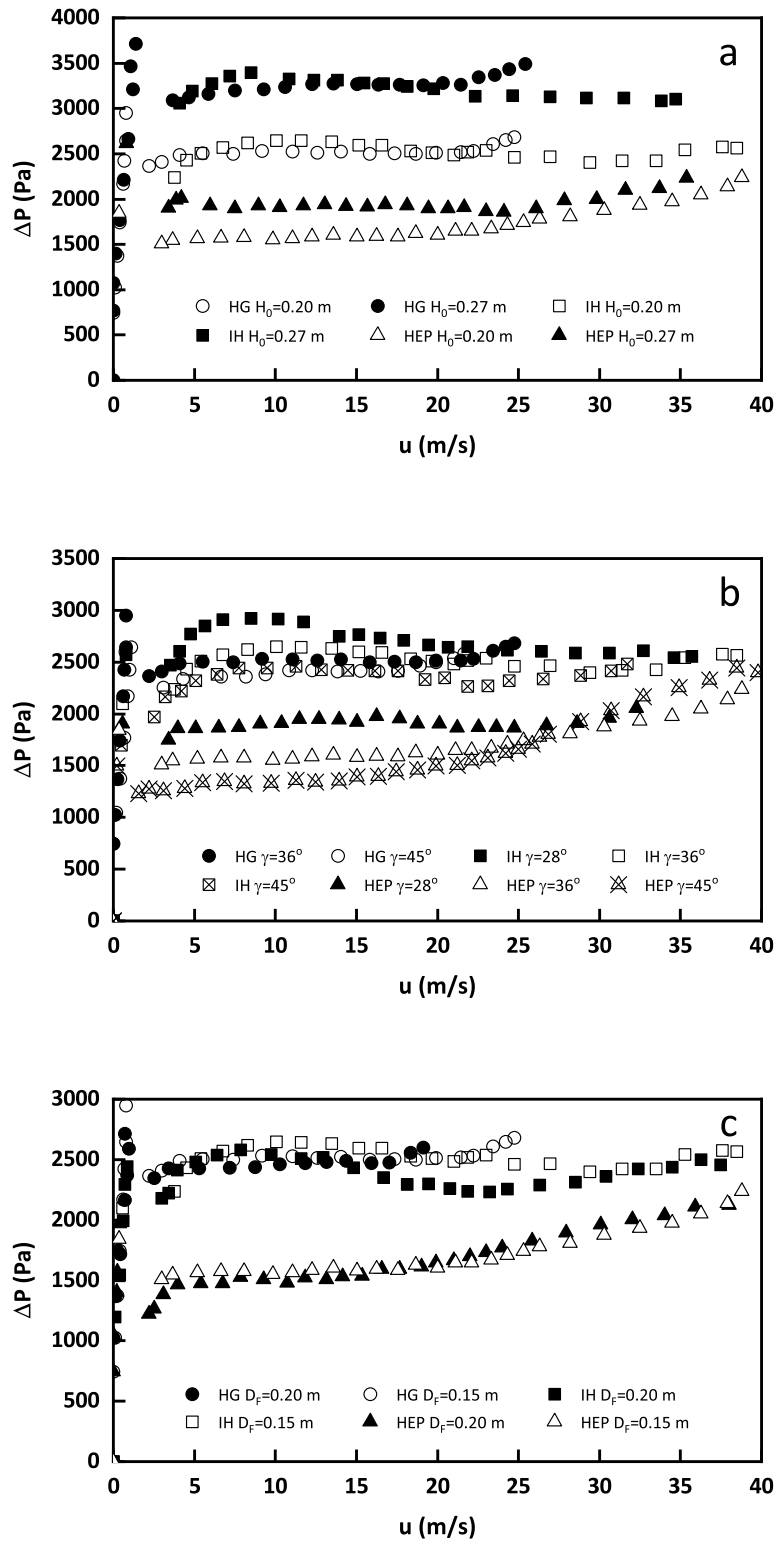
3.3.3. Faktoreen eragina kurba karakteristikoetan

Behin konfigurazio bakoitzeko kurba hidrodinamikoak eta iturri bilgailuaren posizio optimoa aztertuta, zenbait faktore geometrikoren eragina aztertzeari ekingo zaio.

Aztertu diren faktore geometriko guztien artean, ohandze estatikoaren altuera (H_0), kontaktorearen gune konikoaren angelua (γ) eta iturri bilgailuaren diametroaren (D_F) eragina zehaztuko da atal honetan (3.4. Taulan erakusten dira aldagai geometrikoak eta euren mailak). Izan ere, sistemaren egonkortasuna faktore hauen menpekoa da eta beharrezkoa da hauek sistemaren funtzionamenduan duten eragina aztertzea. Horretarako, ikertu nahi den faktorea aldatu da eta beste faktore guztiak konstante mantendu dira. Bestalde, azterketa honetarako buruturiko saiakuntzak iturri bilgailuaren eta ohandzearen arteko distantzia optimoan burutu dira.

Aurreko atalean aipatu bezala, sistema hauetan iturri bilgailua ohandzetik oso gertu ($H_F < 0.04\text{ m}$) eta oso urrun ($H_F > 0.10\text{ m}$) jartzea ekidin behar da. Lehenengo kasuan, ohandzea bilgailuraino hedatzen da eta burbuila handiak sortzen dira. Bigarren kasuan oster, iturkuntzarako abiadura minimo handiak lortzen dira eta gainera, emari handietan aireak bilgailua bypassatzen du. Hortaz, erdiko hodirik gabe eta irekiduradun hodidun sistemetan $H_F = 0.06\text{ m}$ -ko distantziarekin burutu dira saiakuntzak. Hodi ez-porotsuekin oster, $H_F = 0.04\text{ m}$ -ko distantzia erabili da airearen bypass efektua ahalik eta gehien murrizteko.

3.9. Irudian azaltzen dira ohandze estatikoaren altuera (H_0), kontaktorearen angelua (γ) eta iturri bilgailuaren diametro (D_F) ezberdinetarako kurba karakteristikoak hodirik gabe (HG), eta irekiduradun hodia (IH) eta hodi ez-porotsuak (HEP) erabiliz.



3.9. Irudia. (a) Ohantze estatikoaren altueraren, (b) kontaktorearen angeluaren eta (c) bilgailuaren diametroaren eragina konfigurazio ezberdinen kurba karakteristikoetan. Sistema: $D_0 = 0.04$ m, $D_T = 0.04$ m, $L_T = 0.20$ eta 0.27 m (H_0 -ren arabera), $L_H = 0.07$ m, $IP = \%57$, $d_p = 0.246$ mm.

3.9.a Irudia aztertuz, argi geratzen da ohandze estatikoaren altuera (H_0) dela aldagai esanguratsuen hiru konfigurazio ezberdinetan. Efektu hau gehien bat hoderik gabeko sistemetan ikus daiteke. Bestalde, irekiduradun hodia erabiltzean faktore honen eragina pixka bat txikiagoa da, eta hodi ez-porotsuak erabiltzean aldiz, eragina txiki samarra da. Aldagai honen garrantzia ohandzearen masan dago, hau da, zenbat eta ohandzea altuagoa izan orduan eta solido gehiago dago sisteman eta aireak solido gehiago zirkularazi behar du. Hori dela eta, gasak partikula gehiagorekin trukutzen du energia. Bestalde, hoderik gabeko sistemak dira eraztungunetik iturgunera solido gehien pasatzen uzten dutenak, solido hauek ohandzearen edozein altueratan sartu ahal baitira iturgunera. Irekiduradun sistemetan, nerbioen presentziagatik eraztungunetik iturgunera sartzeko azalera murriztu egiten da eta hortaz, solidoaren zirkulazio txikiagoa lortzen da sistema hauetan. Azkenik, hodi ez-porotsuen kasuan partikulek ohandze erdia baino gehiago zeharkatu behar dute iturgunera sartzeko, solido zirkulazio txikieneko sistemak izanik.

Bestalde, 3.9.b Irudian ikus daiteke kontaktorearen angeluak ere eragina duela airearen presio galeran. Kontaktorearen angelua handitzean airearen presio galera txikiagoa da konfigurazio guztietan. Izan ere, kontaktorearen angelua handitzean kontaktorearen paretek solidoa eutsi egiten dute eta partikulen zirkulazioa txikiagoa da.

Azkenik, hiru aldagai ezberdinen artean eragin txikiena duena iturri bilgailuaren diametroa da, honek soilik iturrian eragiten baitu, eta bertan sistemako solido kantitatearen portzentaia txikiena aurkitzen da. 3.9.c Irudian erakusten den bezala, iturri bilgailuaren diametroa zenbat eta handiagoa izan orduan eta presio galera txikiagoa lortzen da. Kasu honetan, iturri bilgailuaren diametroa handitzean bere barneko bolumena handiagoa da eta ondorioz presio galera txikiagoa.

Beraz, zenbat eta ohandzearen altuera eta kontaktorearen angelua handiagoak diren eta iturri bilgailuaren diametroa txikiagoa den, presio galera handiagoak lortzen dira.

Hiru aldagai hauek presio galeran ez ezik parametro hidrodinamikoetan eta egonkortasunean ere eragiten dute. Hasteko, 3.9.a Irudian ageri diren kurba guztiak 36 edo 45°ko kontaktoreei dagozkie eta ez da ageri 28°ko kontaktoreari dagokion kurbarik. Izan ere, hain angelu txikiko kontaktoreak erabiltzean ez da posible partikula finak egonkortzea inongo erdiko hoderik gabe. Aireak kontaktorean sartzerakoan, ohandzeak sortzen duen presioa dela eta, airea ez da gai iturgune egonkor bat sortzeko eta gasaren edozein abiaduratan burbuila formatan (slugging) zeharkatzen du ohandzea. Beraz, kasu hauetan ez dira kurbak erregistratu ez delako iturri ohandze erregimena lortu.

Hiru aldagai hauek presio galeran ez ezik parametro hidrodinamikoetan eta egonkortasunean ere eragiten dute. Hasteko, 3.9. Irudian ageri diren hoderik gabeko

kurba guztiak 36 edo 45°ko angelua duten kontaktoreei dagozkie eta ez da ageri 28°ko kontaktoreari dagokion kurbarik. Izan ere, hain angelu txikiko kontaktoreak erabiltzean ez da posible partikula finak egonkortzea inongo erdiko hodirik gabe. Airearen kontaktorean sartzean, ohantzeak sortzen duen presioa dela eta, airea ez da gai iturgune egonkorra sortzeko eta gasaren edozein abiaduratan burbuila eran (slugging) zeharkatzen du ohantzea. Beraz, kasu hauetan ez dira kurbak erregistratu ez delako iturri ohantze erregimena lortu.

Bestalde, hodirik gabeko sistemetan ohantze estatikoaren altuera handiak erabiltzean sistema ezegonkorragoak lortzen dira kontaktorearen angelu handiak erabiltzean. Hau da, sistema hauetan iturkuntza erregimena lortzen da, baina airearen abiadura handitzean erabateko iturkuntza lortu beharrean burbuilazko iturkuntza lortzen da. Bestalde, ohantzearen altuera estatiko txikiatarako sistema egonkorak lortzen dira, eta bilgailuaren diametro eta kontaktore angelu txikietan operazio tartea zabalagoa da.

Erdiko hodiak erabiliz, 28°ko kontaktoredun sistemak egonkor bilakatzen dira, hodiekin ohantzeak sortzen duen presioa partzialki (irekiduradun hodiak) edo ia osotasunean (hodi ez-porotsuak) eusten baitute. Hala ere, aipagarria da ohantze estatikoaren balio txikietan ezin dela diametro handiko bilgailua erabili, kontaktorearen dimentsio fisikoak direla eta bilgailua ez baita sartzen.

Aurretik aipatu bezala, irekiduradun hodiak erabiltzean sistema guztiak dira egonkorak eta ohantzearen altuera estatiko txikiak erabiltzean heltzen dira gehien bat burbuilazko iturkuntzara. Izan ere, sarrerako airearen abiadura handitzean ohantzeak sortzen duen presio galera handiagoa da iturgunearen diametroa handitu ahala. Hor-taz, iturgunearen oinarria kontaktorearen paretetaraino heltzen denean airea burbuila handietan hasten da igotzen (burbuilazko iturkuntza), ezegonkortasunak sortuz. Hor-taz, ohantzearen altuera handitzean aireak gainditu beharreko presioa handiagoa da, eta beraz, iturgunea zabaltzeko behar duen abiadura ere bai.

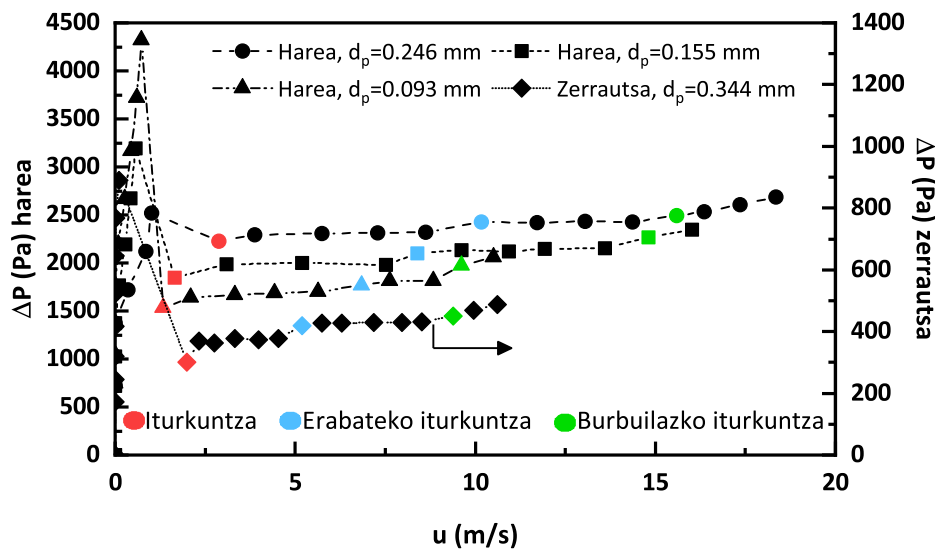
Azkenik, hodi ez-porotsua erabiltzen diren sistema guztiak oso egonkorak izan dira, eta presio galeraren balioak aztertzerakoan konfigurazio honetako kurba hidrodinamikoak dira ezberdintasun txikienak dituztenak. Hala ere, iturkuntzarako abiadura minimoa eta iturri-jariorako abiadura minimoa aldatuz doaz sistema batetik bestera.

Sarreran aipatu den bezala, iturri ohantzeen muga nagusia eskala handitzea da, eta tesi honen bidez egiaztatu denez, iturri bilgailua ezin besteko gailua da muga hau gainditzeko. Orain arte erakutsitako emaitza guztiak $d_p = 0.246\text{ mm}$ -ko partikulaz osaturiko ohantzeekin lorturikoak dira. Olazar et al.ek [261] proposaturiko D_0/d_p erlazioa erabiliz gero aipaturiko partikula tamainarekin 163ko emaitza lortzen da, hau da,

6 aldiz handitzen da operazio egonkorreko erlazioaren balioa.

Behin partikula finez osaturiko iturri bilgailudun iturri ohandtzeen egonkortasuna eta erregimenak egiaztatu eta aztertu ondoren, operazio egonkorrean D_0/d_p erlazioaren balioa handitzeko asmoz $d_p = 0.155$ eta 0.093 mm -ko partikula tamainaz (Geldart-en B eta A taldekoak) osatutako ohandtzeak erabili dira erdiko hodirik gabe. Saiakuntza esperimentaletan ikusi ahal izan denez, bi partikula hauez osaturiko sistemak egonkorak dira eta orain arte lorturiko erregimenak (eta kurbak) lortzen dira. Beraz, hau jakinda, posiblea da D_0/d_p erlazioa 430era handitzea, iturri ohandtzeen eskala handitzean pausu garrantzitsua izanik.

3.10. Irudian erakusten da partikula tamaina ezberdineko (0.246 , 0.155 eta 0.093 mm) harea eta $d_p = 0.344\text{ mm}$ -ko zerrautsa erabiliz lorturiko kurba hidrodinamikoaren artean dauden ezberdintasunak. Erabilitako sistema hurrengoa izan da: 45° ko kontaktorearen angelua, 0.20 m -ko ohandtzearen altuera, 0.04 m -ko airearen sarrerako diametroa, 0.20 m -ko iturri bilgailuaren diametroa eta 0.06 m -ko distantzia ohandtzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren oinarriaren artean.



3.10. Irudia. Partikula tamaina eta dentsitate ezberdinen kurba hidrodinamikoak erdiko hodirik erabili gabe.

3.10. Irudian ikus daitekeen bezala, partikula tamaina handitzean presio galeraren balioa handiago egiten da airearen abiadura ezberdinetarako. Honen arrazoia partikularen masan datza, hau da, nahiz eta sistema guztietan masa berdina egon partikula bakoitzaren tamaina ezberdina da, baita partikularen masa ere. Hori dela eta, aireak indar handiagoa egin behar du partikula hauek iturgunean eta iturrian gora garraiatzeko (bi eremu hauetan gertatzen da bi fase ezberdinen arteko kontaktu handiena). Beste alde batetik, partikularen tamaina txikiagoa denean, kurba karakteristi-

koa airearen emari txikiagoetara desplazatzen da, iturkuntzarako abiadura txikiagoak behar izanez eta ezegonkortasuna lehenago hasiz. Erabateko iturkuntzarako abiadura ere abiadura txikiagoetan lortzen da.

Bestalde, dentsitate txikiagoko partikulen egonkortasuna ere neurtu da iturri bilgailua erabiliz. Horretarako, 0.344 mm partikula tamaina eta 496 kg/m^3 dentsitatea duen zerrautsa erabili da. 3.10. Irudian erakusten den bezala, zerrautsa erabiliz lortzen diren presio galeraren balioak harearena ($d_p = 0.246\text{ mm}$) baino 5 aldiz txikiago dira (solidoen dentsitatearekiko proportzionalak) eta operazio tartea (egonkorra) murriztu egiten da burbuilak sortzeko erraztasuna dela eta. Izan ere, iturri ohantze erregimenean operatzeko aireak gainditu behar duen presioa oso txikia da.

3.3.4. Faktoreen eraginaren analisi estatistikoa

Aurreko atalean ikusi den bezala, faktore geometrikoek eragin handia dute sistemaren hidrodinamikan eta egonkortasunean. Orain arte bost aldagai ezberdinen eragina aztertu da: kontaktorearen angelua (γ), ohantze estatikoaren altuera (H_0), iturri bilgailuaren diametroa (D_F) eta partikula tamaina (d_p) zein dentsitatea (ρ_s). Hala ere, orain arteko azterketa hau airearen presio galeran zein operazio tartean sakondu da kualitatiboki eta ez da azterketa zehatzik burutu kurba ezberdinetan lorturiko parametro hidrodinamikoei dagokienez.

Hortaz, atal honetan faktore geometriko ezberdinek parametro hidrodinamikoetan duten eragina aztertzeko azterketa estatistikoa egin da. Honen bidez, orain arte lorturiko parametro hidrodinamiko ezberdinetan (iturkuntzarako abiadura minimoan, erabateko iturkuntzarako abiadura, burbuilazko iturkuntzarako abiadura eta iturri-jariorako abiadura minimoan) gehien eragiten duten faktoreak eta beraien esangura maila atera ahal izango da. Azterketa hau burutzeko, esperimentera lortu diren emaitzak erabili dira eta aurreko atalean erabili diren baino faktore gehiago ikertu dira.

Aztertu diren faktoreak hurrengoak izan dira: kontaktorearen gune konikoaren angelua (γ), ohantze estatikoaren altuera (H_0), iturri bilgailuaren diametroa (D_F), iturri bilgailuaren oinarria eta ohantzearen gainazalaren (H_F), airearen sarrerako diametroa (D_0), erdiko hodiaren diametroa (D_T), erdiko hodiaren hanken luzera (L_H), irekiduradun hodiaren irekidura portzentaia (IP), partikula tamaina (d_p) eta solidoaren dentsitatea (ρ_s). Hala ere, orain arte bezala, azterketa estatistikoak erdiko hodian bereizten diren sistema esperimentalen arabera banatu dira. Bestalde, tesi honetan partikula ezberdinak erabili direnez, azterketa estatistikoa materialen arabera egin da. Gainera, harearen kasuan hiru partikula tamaina ezberdin erabili dira eta analisi estatistikoa bi eratara aplikatu da: alde batetik, partikula tamaina ezberdinetarako; eta

bestetik, tamaina guztiak batuz azterketa orokorra egin da (partikula tamaina faktore bezala sartuz). Aurrerago ikusiko den bezala, faktore esanguratsuenen eraginaren jorak harearen kasurako azterketa estatistiko orokorretik hartuko dira, oro har frakzio guztien faktore esanguratsuenak antzekoak baitira. Gainera, azterketa orokorrarekin partikularen tamaina ere hartzen da faktore bezala.

Harearekin bezala, zerrautsarekin lorturiko emaitzekin ere burutu da azterketa estatistikoa, kasu honetan partikula tamaina bakarra erabili delarik. Aurreko atalean ikusi izan denez, zehazki 3.10. Irudian, zerrautsa eta harearen artean ezberdintasun handiak daude presio galera eta egonkortasunean. Hortaz, solidoaren dentsitatearen eragina aztertzeke, harearekin eta zerrautsarekin lorturiko emaitzen azterketa estatistikoko bateratua ere burutu da.

Azkenik, orain arte ikusi ahal izan denez, erdiko hodi motak edo erabilitako konfigurazioak eragin handia du sistemaren egonkortasunean eta operazio tartean. Hau horrela dela bermatzeko, azken azterketa estatistikoa burutu da konfigurazio guztiak bateratuta, hau da, erdiko hodia edo konfigurazioa faktore bezala hartuz.

Azterketa estatistikoa egiteko IBM SPSS Statistics 22 software pakete estatistikoa erabili da eta bariantzaren analisisian (ANOVA) oinarritu da. Azterketa honetan bi motako aldagaiak erabiltzen dira: alde batetik, menpeko aldagaiak eta bestetik, aldagai independenteak. Menpeko aldagaiak sistema esperimenterako bakoitzean lorturiko parametro hidrodinamikoak dira, hau da, iturkuntzarako abiadura minimoa (u_{ms}), erabateko iturkuntzarako abiadura (u_{fs}), burbuilazko iturkuntzarako abiadura (u_{bs}) eta iturri-jariorako abiadura minimoa (u_{sf}). Bestalde, aldagai independenteak orain arte aipaturiko faktore edo aldagaiak dira (γ , H_0 , D_0 , D_F , H_F , D_T , L_H , IP , d_p , ρ_s).

Beraz, azterketa estatistikoko honen helburua menpeko aldagaiek aldagai independenteetan duten eragina kuantifikatzea da. Faktoreek aldagai independenteetan duten eragina banakakoa edo interakzioena izan daiteke. Hortaz, bi eragin hauek kon-tuan izan behar dira, hau da, aldagai independente bakoitzak banaka duen eragina eta bi aldagai independenteek batera duten eragina. Faktore baten eragina beste faktore baten arabera bada, bi faktoreen arteko elkarrekintzak eraginaren magnitudean eragingo du.

Hortaz, programa informatikoan menpeko aldagai bakoitzerako aldagai independente guztiak sartu behar dira analisi estatistikoa egiteko. Prozesu hau aldagai independente bakoitzerako eta kasu guztietan errepikatu egin behar da (sólido mota, partikula tamaina eta konfigurazio bakoitzerako). Programa informatikoak itzultzen dituen emaitzak aztertu aurretik, prozedura eta programa informatikoak eraikitzen dituen emaitzen taulen esanahia azalduko da.

Analisi honen oinarria karratuen baturak bereiztean datza. Hurrengo ekuazioan erakusten da karratuen batura totala [102].

$$SS_T = SS_E + SS_F \quad (3.1)$$

non SS_T karratuen batura totala den, SS_E errorearen karratuen batura eta SS_F faktoreei dagozkien karratuen batura.

Hala ere, kasu honetan faktore bat baino gehiago daude eta beraien elkarrekintzak kontuan hartu behar dira. Adibidez, a eta b maila kopurua dituzten A eta B faktoreen kasurako, AB elkarrekintzari dagokion terminoa (SS_{IAB}) kontuan hartu behar da. Hortaz, 3.1 ekuazioa hurrengo eran geratzen da.

$$SS_T = SS_E + SS_{FA} + SS_{FB} + SS_{IAB} \quad (3.2)$$

Analisi estatistikoetan lorturiko emaitzak aurkezteko erakutsiko diren taulen lehenengo zutabean (ikus 3.6. Taula adibide gisa) analisisian kontuan hartu diren aldagai independenteak edo faktoreak eta beraien arteko elkarrekintza bitar posibleak erakusten dira.

Bigarren zutabean ostera (*Errore karratuen batura*, SSE), azterketa estatistikoan hartu den ereduaren bidez lorturiko errorearen karratuen batura da.

Hirugarren zutabean berriz, (*Askatasun graduak*) aldagaiei eta elkarrekintzei dagozkien askatasun graduak erakusten dira, hurrengo kontuan izanik:

$$gl_T = gl_E + gl_F + gl_I \quad (3.3)$$

non gl_T askatasun graduen kopuru totala den, gl_E errorearen askatasun graduak, gl_F faktoreen askatasun graduak eta gl_I interakzioen askatasun graduak diren.

Askatasun gradu totala datu guztien kopurua (N) baino bat gutxiago ($N - 1$) da. Faktore nagusiei dagozkien askatasun graduak faktore mailen kopuruari bat kenduz kalkulatu dira ($gl_{FI} = \text{maila kopurua} - 1$). Bestalde, elkarrekintza edo interakzio bitarren askatasun graduak (gl_I) lortzeko bi faktoreen askatasun graduen biderkaketa egin behar da.

$$gl_{Iij} = gl_{Fi} * gl_{Fj} \quad (3.4)$$

Bestalde, errorearen askatasun graduak kalkulatzeko, datu guztien askatasun

graduei $(N - 1)$ faktore eta interakzio bakoitzaren askatasun graduak kendu behar zaizkie.

$$gl_E = (N - 1) - \sum gl_{Fi} + \sum gl_{Iij} \quad (3.5)$$

Laugarren zutabeen (*Karratuen batezbestekoa, MSE*) karratuen batezbestekoa adierazten da. Parametro hau errore karratuen parametroaz alderatuz, faktoreen eta elkarrekintzen esangura determinatzen da. Oinarrizko efektuen (eta bigarren mailako elkarrekintzen) karratuen batezbestekoa 3.6 ekuazioaren bidez kalkulatzen da.

$$MS_F = \frac{SS_F}{gl_F} \quad (3.6)$$

Bosgarren (F) eta seigarren zutabeetan (*Esangura maila*) aldagai eta elkarrekintza bakoitzari dagokion *Fisher-Snedecor-en F* banaketaren balioa eta esangura edo probabilitatea adierazten dira. F estatistikoa faktorearen eta errorearen batezbesteko karratuen zatidura da.

$$F = \frac{MS_F}{MS_E} \quad (3.7)$$

Aldagai independente guztien artean esanguratsuen zein den edo esangura ordena jakiteko F -ren balioa aztertu behar da. Tesi honetan burutu diren azterketan estatistiko guztietan esangura maila finkatzeko %95eko konfiantza maila hartu da. Hortaz, *Esangura maila* balioaren 0.05 baino balio handiagoa duten aldagaiak edo elkarrekintzak ez dira esanguratsuak eta ez dira aintzat hartu behar. Hortaz, esanguraren balioa zerotik zenbat eta hurbilago egon, orduan eta esanguratsua izango da aldagai edo elkarrekintza hori. Bestalde, kasuren batean seigarren zutabeen (*Esangura maila*) balioaren ordezkari puntu bat soilik azaltzen bada, errorea definitu gabe dagoela esan nahi du.

Azkenik, zazpigarren zutabeen (*Frogaren potentzia*) frogaren potentzia erakusten da, hau da, aldagai eta elkarrekintza bakoitzerako II motako errorearen probabilitatea. Honek, saiakuntza bera ehun aldiz errepikatuko balitz, aldagai edo elkarrekintza hori zenbatetan izango litzatekeen esanguratsua adierazten du. Kasu honetan, probabilitatea ehunekotan eman beharren batekoetan ematen da.

Honekin batera, ANOVAren bidez lortutakoko emaitzen fidagarritasuna frogatzeko, menpeko aldagaiei dagozkien hondar diagrama edo balio erresidualen diagrama deritzona eraiki da analisi bakoitzerako. Analisi guztietan erabili den modelo lineala

izan denez, menpeko aldagaien erresidualaren balioak zorizko eran sakabanatuak eta -3 eta 3 bitartean egon behar dira hautatutako modeloa egokia dela egiaztatzeko.

Hortaz, lehen aipatu bezala, azterketa estatistikoan neurtu diren menpeko aldagai guztiei egin zaie hau, hau da, iturkuntzarako abiadura minimoari (u_{ms}), erabateko iturkuntzarako abiadurari (u_{fs}), burbuilazko iturkuntzarako abiadurari (u_{bs}) eta iturri-jariorako abiadura minimoari (u_{sf}). Datuak tratatu ostean, ?? Taula bezalakoak lortu dira eta berioetatik ateratzen dira esangura edo eragin handiena duten faktore edo aldagai independenteak. Hala ere, deskribapena luzeegi geratu ez dadin, menpeko aldagai bakoitzari dagokion azterketa estatistiko bat bakarrik erakutsiko da, eta bukaeran laburbilduko dira emaitza guztiak taula batean.

Iturkuntzarako abiadura minimoa, u_{ms}

Jarraian, erdiko hodirik gabeko sistemetan harearen frakzio guztietan (d_p aldagai independente bezala erabiliz azterketan) faktore esanguratsuenak zeintzuk diren aztertuko da. Esperimentuen diseinuen atalean aipatu den bezala, saiakuntzetan aldatu diren faktoreak kontaktorearen gune konikoaren angelua (γ), airearen sarrerako diametroa (D_0), ohantze estatikoaren altuera (H_0), partikula diametroa (d_p), iturri bilgailuaren diametroa (D_F) eta ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren oinarriaren arteko distantzia (H_F) dira.

Azterketa estatistikoetan emaitza definitiboak lortzeko hainbat saio egin behar izan dira aztertu nahi diren faktore guztietatik esanguratsuenak soilik geratu arte. Faktoreen aukeraketa baldintzatzen duen parametroa esanguratasun edo probabilitatea (*Esangura maila*) da eta, azterketa %95eko konfiantza mailarekin egin denez, lehenengo saioan 0.05 esangura maila baino handiagoa duten faktoreak eta elkarrekintzak baztertu egiten dira. Hortaz, baztertu ez diren faktore eta elkarrekintzekin errepikatuko da azterketa hurrengo saioan. Bide honi jarraitu behar zaio esangura duten faktoreekin geratu arte (behin betiko emaitzak lortu arte).

Iturkuntzarako abiadura minimorako lortu diren emaitzekin hasi aurretik, 3.5. Taulan erakusten dira azterketa estatistiko honetarako erabili diren faktoreak, euren mailak eta bakoitzaren datu kopurua.

3.5. Taula. Erdiko hodorik gabe eta harearen frakzio guztiekin erabili diren faktoreak, mailak eta datu kopurua.

Aldagaiak	Mailak	N
$\gamma(^{\circ})$	36	33
	45	20
$D_F(m)$	0.15	20
	0.20	33
$H_F(m)$	0.02	18
	0.04	22
	0.06	36
	0.08	22
	0.10	18
$H_0(m)$	0.20	35
	0.27	18
$D_0(m)$	0.03	3
	0.04	47
	0.05	3
$d_p(mm)$	0.246	36
	0.155	9
	0.094	8

3.5. Taulan ikus daitekeen bezala, kasu honetan angeluaren bi maila ezberdin erabili dira, izan ere, hodorik gabeko sistemetan ez da posible izan partikula finekin egoera egonkorra lortzea 28° ko kontaktorean. Beraz, ez da posible izan Erdiko hodorik gabeko sistemetan 28° ko kontaktoreari dagozkion emaitzak lortzea. Bestalde, bilgailuaren diametroak bi maila ditu, ohantzearen gainazala eta bilgailuaren oinarriaren arteko distantziak bost, ohantzearen altuerak bi, airearen sarrerako diametroak hiru eta partikula tamainak hiru maila ditu.

Azterketa estatistikoaren hasierako saioari dagozkion emaitzak 3.6. Taulan erakusten dira iturkuntzarako abiadura minimoan kasurako.

3.6. Taula. Erdiko hodirik gabe eta harearen frakzio guztien kasurako u_{ms} -ren azterketa estatistikoaren lehen analisia.

Jatorria	SSE	Askatasun graduak	MSE	F	Esangura maila	Frogaren Potentzia
Zuzenduriko eredua	222.286 ^a	19	11.699	18.823	.000	1.000
Ebakidura	221.474	1	221.474	356.340	.000	1.000
γ	.133	1	.133	.214	.647	.073
D_F	10.249	1	10.249	16.490	.000	.976
H_0	47.577	1	47.577	76.549	.000	1.000
D_0	7.633	2	3.817	6.141	.004	.859
d_p	5.028	2	2.514	4.045	.002	.680
H_F	.045	1	.033	.364	.587	.069
$\gamma^* D_F$	.815	1	.815	1.311	.260	.199
$\gamma^* D_0$	.000	0	.	.	.	.
$\gamma^* D_p$	.006	2	.003	.005	.995	.051
$\gamma^* H_0$	.979	1	.979	1.575	.218	.230
$\gamma^* H_F$						
$D_F^* D_0$	.000	0	.	.	.	.
$D_F^* d_p$	3.533	2	1.767	2.843	.073	.520
$D_F^* H_0$	32.259	1	32.259	51.903	.000	1.000
$D_F^* H_F$						
$D_0^* d_p$	1.484	4	.371	.597	.667	.177
$D_0^* H_F$						
$H_0^* D_0$	.000	0	.	.	.	.
$H_0^* d_p$	1.156	1	1.156	1.860	.182	.263
$H_0^* D_F$						
Errorea	20.510	33	.622			
Totala	1413.002	53				
Zuzenduriko totala	242.796	52				

3.6. Taulan erakusten den bezala, seigarren zutabeko balioei erreparatuz gero, iturri bilgailuaren diametroa (D_F), ohantze estatikoaren altuera (H_0), airearen sarre-raren diametroa (D_0), partikula tamaina (d_p), eta iturri bilgailuaren diametroa eta ohantzearen altueraren elkarrekintza ($D_F^* H_0$) ez ezik gainerako faktore eta elkarrekintza guztiek 0.05 baino balio handiagoak edo puntu bat erakusten dute. Hortaz,

aipaturiko faktore eta elkarrekintzak esanguratsuak dira eta faktore hauekin bigarren analisia egin da faktore esanguratsuen ordena argiago ateratzeko.

3.7. Taulan erakusten dira bigarren analisiaren emaitzak.

3.7. Taula. Erdiko hodirik gabe eta harearen frakzio guztien kasurako u_{ms} -ren azterketa estatistikoaren bigarren analisia.

Jatorria	SSE	Askatasun graduak	MSE	F	Esangura maila	Frogaren Potentzia
Zuzenduriko eredua	215.682 ^a	7	30.812	51.137	.000	1.000
Ebakidura	219.156	1	219.156	363.727	.000	1.000
D_F	29.467	1	29.467	48.905	.000	1.000
H_0	118.939	1	118.939	197.400	.000	1.000
D_0	7.196	2	3.598	5.971	.005	.858
d_p	23.763	2	11.882	19.719	.000	1.000
$D_F * H_0$	43.448	1	43.448	72.109	.000	1.000
Errorea	27.114	45	.603			
Totala	1413.002	53				
Zuzenduriko totala	242.796	52				

3.7. Taulan erakusten den bezala, lehenengo analisisian esanguratsuak izan diren faktore eta elkarrekintza guztiak esanguratsuak dira bigarren saiakuntzan ere. Hala ere, D_0 faktorea gutxiatik da esanguratsua, bere esangura maila 0.05 baita. Izan ere, lehenengo analisisian 0.05etik hurbil egon diren faktoreen esangura, 0.05 baino handiagoa izaten da oro har bigarren analisisian.

Beraz, behin esanguratsuak diren faktore eta elkarrekintzak jakinda esangura ordena jakiteko *Esangura maila* balioa aztertu behar da, baina balio berdina dutenen artean (denek 0 balioa dute D_0 izan ezik) F -ren balioaren arabera egiten da. Modu honetan, erdiko hodirik gabe eta harearen frakzio guztiak erabiliz iturkuntzarako abiadura minimoan eragin handiena duten faktoreak eta elkarrekintzak ondorengo ordenari jarraitzen diote (faktoreen arteko esanguren ezberdintasuna handia denean “>>” erabili da eta oso handia denean “>>>”):

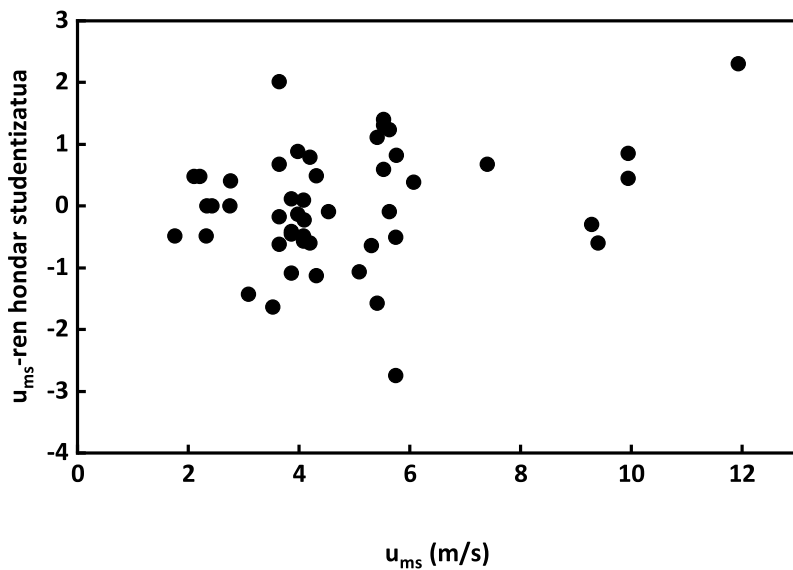
$$H_0 >> D_F * H_0 > D_F > d_p > D_0$$

Beraz, 3.7. Taulari erreparaturaz, iturkuntzarako abiadura minimoan eragin handiena duen faktorea ohandtze estatikoaren altuera (H_0) da. Izan ere, faktore honek duen F balioa guztien artean handiena da eta besteeikiko ezberdintasun handia

dago balioaren magnitudean. Hala ere, iturri bilgailuaren diametroak (D_F) ere eragin nabaria du. Izan ere, ohandzearen altuerarekin duen elkarrekintza bigarren parametro esanguratsuen da eta bera bakarrik hirugarrena. Bi hauek ere F -ren balio esanguratsuak dituzte. Azkenik, partikula tamainak (d_p) eta airearen sarrerako diametroak (D_0) ere eragina duten arren, aurreko faktoreek baino eragin txikiagoa dute iturkuntzarako abiadura minimoan.

Lehen komentatu bezala, menpeko aldagaien hondar diagrama edo balio erresidualen diagrama irudikatu behar da erabilitako eredua fidagarria dela frogatzeko.

3.11. Irudian erakusten da iturkuntzarako abiadura minimorako.



3.11. Irudia. Hondar balioaren irudikapena iturkuntzarako abiadura minimorako.

3.11. Irudiaren bitartez egiaztatzen da azterketa estatistikorako aukeratutako modeloa egokia dela. Aurretik aipatu den bezala, menpeko aldagaiaren hondarrak zorizko eran banatuta daude -3 eta 3 balioen artean. Gainera, ia puntu guztiak -2 eta 2 balioen artean daude, hortaz, hautatutako modeloa egokia dela esan daiteke.

Erabateko iturkuntzarako abiadura, u_{fs}

Iturkuntzarako abiadura minimoan bezala, erabateko iturkuntzarako abiadurarako antzeko prozesua burutu da, baina kasu honetan menpeko aldagaia iturkuntzarako abiadura minimoa izan beharrean erabateko iturkuntzarako abiadura izan da. Oraingo honetan beste konfigurazio bat erabili da, izan ere, aurrerago azalduko den bezala, erdiko hodirik gabeko sistemetan erabateko iturkuntzarako abiadurak ez du aldatuta garrantzitsurik sistema batetik bestera eta analisi estatistikoan ez dira faktore esanguratsu asko lortzen.

Hortaz, kasu honetarako irekiduradun hodian balioak erabili dira eta iturkuntzarako abiadura minimoan bezala, harearen partikula tamaina guztiak erabiliz lortu diren emaitzak erabili dira. 3.8. Taulan azaltzen dira erabateko iturkuntzarako abia-
durarako erabili diren aldagai independenteak, euren mailak eta datu kopurua.

3.8. Taula. Irekiduradun hodia eta harearen frakzio guztietan erabili diren faktoreak, mailak eta datu kopurua.

Aldagaiak	Mailak	N
$\gamma(^{\circ})$	28	13
	36	52
	45	35
$D_F(m)$	0.15	46
	0.20	54
$H_0(m)$	0.20	60
	0.27	40
$D_0(m)$	0.03	5
	0.04	93
	0.05	2
$D_T(m)$	0.04	93
	0.05	7
$IP(\%)$	42	12
	57	78
	78	10
$d_p(mm)$	0.246	48
	0.155	28
	0.094	24
$H_F(m)$	0.02	7
	0.04	9
	0.06	67
	0.08	9
	0.10	8

3.8. Taulan ageri den bezala, bederatzi faktore ezberdin daude azterketa estatistiko honetarako, aurrekoan baino bi gehiago. Izan ere, oraingo honetan sistema batetik bestera irekiduradun hodiak erabiliz hodiaren diametroa eta irekidura portzentiaia ere aldatu dira. Bestalde, 3.5. eta 3.8. Taulak alderatuz, oraingo honetan kontaktorearen angeluak hiru maila ditu, irekiduradun hodiak erabiliz 28°ko kontaktoreak

erabiltzen diren sistemak egonkortzen baitira. Modu honetan, azterketa honetarako erabili diren datu kopurua aurrekoa baino handiagoa da.

3.9. Taulan erakusten dira erabateko iturkuntzarako abiaduraren azterketa estatistikoaren emaitzak, hau da, faktore eta elkarrekintza esanguratsuenak. Kasu honetarako jarraitu diren pausuak aurrekoaren berdinak direnez, hemendik aurrera azken analisiari dagokion taula erakutsiko da zuzenean.

3.9. Taula. Irekiduradun hodia eta harearen frakzio guztien kasurako u_{fs} -ren azterketa estatistikoaren azken analisia.

Jatorria	SSE	Askatasun graduak	MSE	F	Esangura maila	Frogaren Potentzia
Zuzenduriko eredia	563.176 ^a	15	37.545	9.970	.000	1.000
Ebakidura	1387.018	1	1387.018	368.320	.000	1.000
D_0	123.317	2	61.659	16.373	.000	1.000
D_T	54.217	1	54.217	14.397	.000	.963
$D_T^* d_p$	179.600	5	35.920	9.538	.000	1.000
$\gamma^* H_0$	89.545	3	29.848	7.926	.000	.988
$D_0^* d_p$	47.115	2	23.558	6.256	.003	.885
Errorea	316.327	84	3.766			
Totala	9227.249	100				
Zuzenduriko totala	879.503	99				

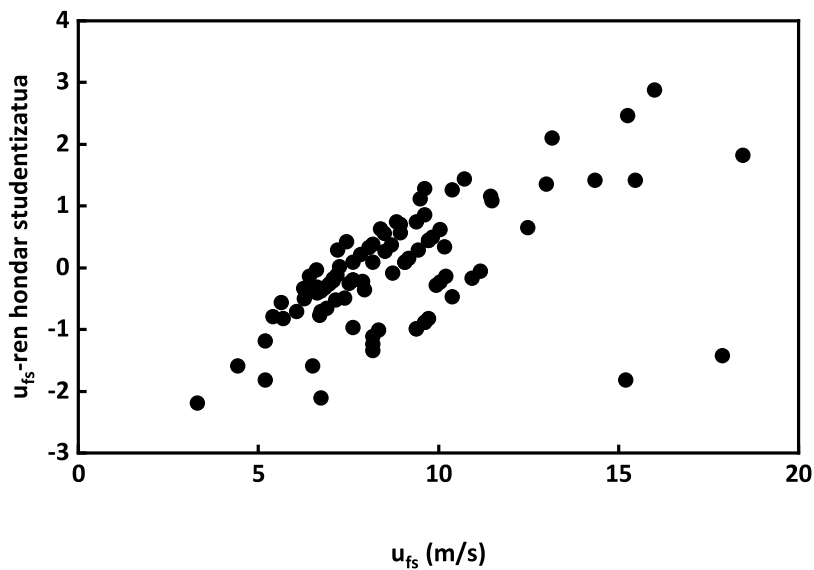
3.9. Taulako F -ren balioak 3.7. Taulan lortutakoekin alderatzen badira, azken kasu honetan F -ren balioak oro har txikiagoak dira. Honek esan nahi du erabilitako faktoreak eragin handiagoa dutela iturkuntzarako abiadura minimoan erabateko iturkuntzarako abiadura baino, hau da, iturkuntzarako abiadura minimoa parametro hidrodinamiko garrantzitsuagoa dela.

Hortaz, 3.9. Taulatik ondorengo ordenan antola daitezke faktoreak eta elkarrekintzak, eragin handienetik txikienera:

$$D_0 > D_T > D_T^* d_p > \gamma^* H_0 > D_0^* d_p$$

3.9. Taulako F balioari erreparatuz, kasu honetan faktore esanguratsuenaren sarrerako diametroa (D_0) da. Bigarren faktore esanguratsuenaren erdiko hodiaren diametroa izan da (D_T), nahiz eta gainerako faktore eta elkarrekintzek antzeko esangura maila izan.

Azkenik, hondar balioen diagrama ikus daitekeen bezala (3.12. Irudia), egiaztatuta geratzen da erabilitako modeloa egokia dela.



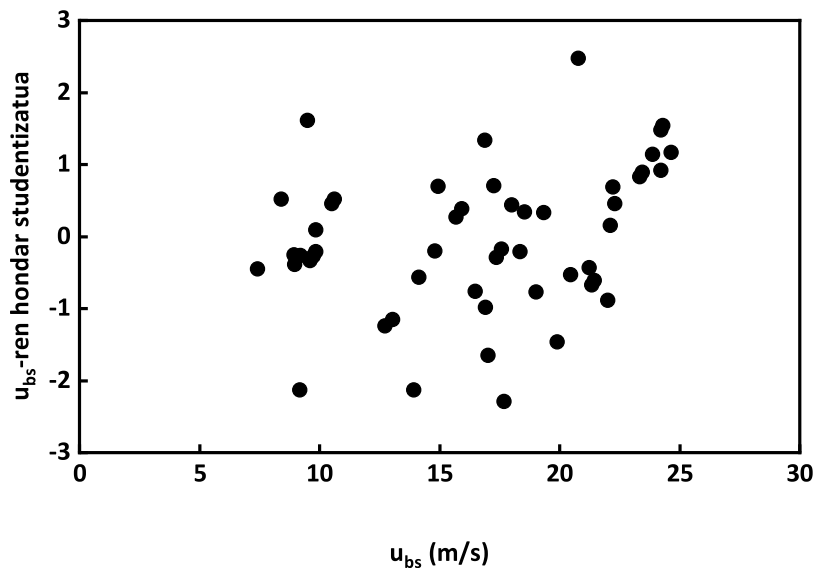
3.12. Irudia. Hondar balioen irudikapena erabateko iturkuntzarako abiadurarako.

Burbuilazko iturkuntzarako abiadura, u_{bs}

Aurreko kasuetan bezala, burbuilazko iturkuntzarako abiadurarako ere burutu da azterketa estatistikoa. Kasu honetarako ere erdiko hodirik gabeko sistema aukeratu da, izan ere, konfigurazio hau da ezegonkorrena eta burbuilazko iturkuntza abiaduraren datu gehien lortu dituen. Hortaz, iturkuntzarako abiadura minimorako erabili diren datuak hartu dira, 3.5. Taulan laburbildurik daudenak hain zuzen. 3.10. Taulan eta 3.13. Irudian erakusten dira lorturiko emaitzak.

3.10. Taula. Erdiko hodirik gabe eta harearen frakzio guztien kasurako u_{bs} -ren azterketa estatistikoaren azken analisia.

Jatorria	SSE	Askatasun graduak	MSE	F	Esangura maila	Frogaren Potentzia
Zuzenduriko eredia	1276.345 ^a	9	141.816	36.057	.000	1.000
Ebakidura	1528.180	1	1528.180	388.540	.000	1.000
γ	568.218	1	568.218	144.470	.000	1.000
H_0	52.965	1	52.965	13.466	.001	.948
D_0	82.519	2	41.260	10.490	.000	.983
d_p	405.235	2	202.617	51.516	.000	1.000
$\gamma^* H_0$	183.628	1	183.628	46.687	.000	1.000
$D_F^* H_0$	53.503	2	26.751	6.802	.003	.900
Errorea	169.125	43	3.933			
Totala	16474.496	53				
Zuzenduriko totala	1445.469	52				



3.13. Irudia. Balio erresidualen irudikapena burbuilazko iturkuntzarako abiadurarako.

3.10. Taularen arabera ondorengo ordenan antola daitezke faktoreak eta elkarrekintzak:

$$\gamma \gg \gg d_p > \gamma^* H_0 \gg H_0 > D_0 > D_F^* H_0$$

3.10. Taulari erreparatuz, diferentzia handiz eragin handiena duen faktorea kontaktorearen gune konikoaren angelua (γ) da. Bestalde, bigarren eta hirugarren parametro garrantzitsuenak partikularen tamaina (d_p), eta angeluaren eta ohantze estatikoaren altueraren arteko elkarrekintzak (γ^*H_0) dira. Gainontzeko faktoreak esanguratsuak dira, baina beraien esangura maila txikiagoa da.

Bestalde, 3.13. Irudian egiaztatzen den bezala, burbuilazko iturkuntzarako abiadurarako burutu den azterketa estatistikoan erabilitako modeloa egokia da.

Iturri-jariorako abiadura minimoa, u_{sf}

Azkenik, hodi ez-porotsuetan iturkuntzarako abiadura minimoa ez ezik iturri-jariorako abiadura minimoa den parametro hidrodinamiko ere lortzen da. Nahiz eta parametro honek eragin handia ez izan operazioan (hodi ez-porotsuak ez dira ezegonkortzen operazio tarte guztian), erabilitako sistemaren arabera asko aldatzen da.

Hortaz, aurreko kasu guztietan bezala, iturri-jariorako abiadura minimorako ere burutu da azterketa estatistikoa. Oraingo honetan hodi ez-porotsudun sistemak aukeratzea beharrezkoa da eta orain arte bezala harearen partikula tamaina guztiak erabiliz lorturiko emaitzak erabili dira. 3.11. Taulan azaltzen dira iturri-jariorako abiadura minimorako erabili diren aldagai independenteak, euren mailak eta datu kopurua.

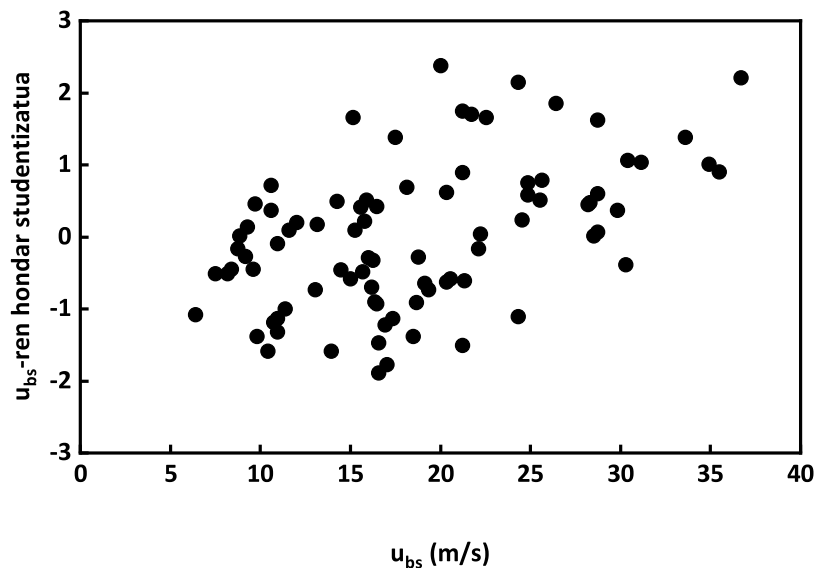
3.11. Taula. Hodi ez-porotsua eta harearen frakzio guztietan erabili diren faktoreak, mailak eta datu kopurua.

Faktoreak	Mailak	N
$\gamma(^{\circ})$	28	17
	36	42
	45	31
$D_F(m)$	0.15	41
	0.20	49
$H_0(m)$	0.20	45
	0.27	45
$D_0(m)$	0.03	3
	0.04	84
	0.05	3
$D_T(m)$	0.04	84
	0.05	6
$L_H(m)$	0.07	62
	0.15	28
$d_p(mm)$	0.246	43
	0.155	24
	0.094	23
$H_F(m)$	0.04	12
	0.06	69
	0.08	1
	0.10	8

Erabateko iturkunza abiaduraren azterketan bezala, kasu honetan erdiko hodia erabili da eta honi dagokion aldagai independenteak kontuan izan behar dira. Kasu honetan erdiko hodi ez-porotsua izanik, hodiaren diametroa (D_T) eta hanken edo nerbioen luzera (L_H) dira sistema batetik bestera aldatu diren faktoreak. Beraz, 3.12. Taulan eta 3.14. Irudian erakusten dira lorturiko emaitzak.

3.12. Taula. Hodi ez-porotsua eta harearen frakzio guztien kasurako u_{sf} -ren azterketa estatistikoaren azken analisia.

Jatorria	SSE	Askatasun graduak	MSE	F	Esangura maila	Frogaren Potentzia
Zuzenduriko eredua	4107.854 ^a	19	216.203	13.980	.000	1.000
Ebakidura	2687.627	1	2687.627	173.784	.000	1.000
γ	838.888	2	419.444	27.122	.000	1.000
D_0	323.545	2	161.772	10.460	.000	.985
L_H	249.440	1	249.440	16.129	.000	.977
d_p	212.825	2	106.412	6.881	.002	.912
$\gamma * d_p$	375.244	4	93.811	6.066	.000	.981
$\gamma * H_0$	211.425	3	70.475	4.557	.005	.869
$D_0 * d_p$	677.424	3	225.808	14.601	.000	1.000
$L_H * d_p$	221.725	2	110.863	7.168	.001	.923
Errorea	1082.575	70	15.465			
Totala	35980.351	90				
Zuzenduriko totala	5190.430	89				



3.14. Irudia. Hondar balioen irudikapena iturri-jariorako abiadura minimorako.

3.12. Taularen arabera ondorengo ordenan antola daitezke faktoreak eta elkarrekintzak:

$$\gamma > L_H > D_0 * d_p > L_H * d_p > d_p > \gamma * d_p > \gamma * H_0$$

Beraz, iturri-jario minimorako abiaduran eragin handiena duen faktorea kontaktorearen angelua (γ) da. Ondoren, hodi ez-porotsuaren hanken altuera (L_H), eta airearen sarrerako diametroaren eta partikula tamainaren arteko elkarrekintza ($D_0 * d_p$) dira esanguratsuenak. Hala ere, 3.12. Taulako F balioa aztertuz gero, faktore eta elkarrekintza guztien artean ez dago ezberdintasun handirik esangura mailan.

Bestalde, 3.14. Irudiko hondar balioei erreparatuz, agerian geratzen da azterketa estatistikorako aukeratutako modeloa egokia dela.

Orain arte, parametro hidrodinamiko guztietarako azterketa estatistikoaren adibide bat azaldu da, baina prozedura berdina jarraitu da harearen partikula tamaina bakoitzerako. Bestalde, zerrautsa erabiliz lortu diren emaitzetatik abiatuz ere burutu da analisi estatistikoa parametro hidrodinamiko guztietarako.

Hortaz, tesi honetan erabili diren bi solido ezberdinei azterketa estatistikoa egin zaie indibidualki, baina solidoaren dentsitateak parametro hidrodinamikoe-tan duen eragina aztertzeko asmoz, bi solido ezberdinen emaitzak elkartu eta guztien analisi bateratua egin da.

Azkenik, hau guztia konfigurazio bakoitzerako errepikatu da, bakoitzari dagozkion parametro hidrodinamikoetan: hoderik gabeko eta irekiduradun holidun sistemetan (iturkuntzarako abiadura minimoa, erabateko iturkuntzarako abiadura eta burbuilazko iturkuntza abiadura) eta hodi ez-porotsuetan (iturkuntzarako abiadura minimoa eta iturri-jariorako abiadura minimoa). Hala ere, 3.3.1 eta 3.3.2 Ataletan garbi geratu den bezala, konfigurazio edo erdiko hodiaren arabera lorturiko erregimenak eta parametro hidrodinamikoaren balioak ezberdinak dira. Beraz, jakinik konfigurazioak eragin handia duela sisteman, tesi honetako hidrodinamika atalean lorturiko emaitza guztien analisi estatistikoa burutu da erdiko hodiaren eragina egiaztatzeke eta zenbatzeke.

Emaitzen atala luzeegia eta errepikakorregia gera ez dadin, esanguratsuenak diren faktoreak zuzenean erakutsiko dira laburbildurik 3.13. (erdiko hoderik gabe), 3.14. (irekiduradun hodiak) eta 3.15. (hodi ez-porotsuak) Tauletan eraginaren arabera ordenatuta. Analisi estatistikoa guztietan hondar balioen irudikapenak egin dira eta erabilitako modeloak egokiak izan direla erakutsi dute.

3.13. Taula. Erdiko hodirik gabeko sistema esperimental guztietarako faktore eta elkarrekintza esanguratsuenen ordena solido eta partikula tamaina ezberdinetarako.

Solidoa	Partikula tamaina (mm)	Menpeko aldagaia	Esangura ordena	
Harea	0.094	u_{ms}	—	
		u_{fs}	—	
		u_{bs}	—	
	0.155	u_{ms}	—	
		u_{fs}	—	
		u_{bs}	—	
	0.246	u_{ms}	$H_0 \gg \gg H_0^* D_F > D_F$	
		u_{fs}	—	
		u_{bs}	$\gamma \gg \gg \gamma^* H_0 \gg H_0 > D_F^* H_0 > \gamma^* D_F > \gamma^* H_F > D_0 > H_F$	
		u_{ms}	$H_0 \gg H_0^* D_F > D_F > d_p > D_0$	
		Bateratua	u_{fs}	—
			u_{bs}	$\gamma \gg d_p > \gamma^* H_0 > H_0 > D_0 > D_F^* H_0$
Zerrautsa	0.344	u_{ms}	$D_0 > H_0 > \gamma > H_0^* D_0$	
		u_{fs}	D_0	
		u_{bs}	H_0	
Harea-Zerrautsa nahasketa	—	u_{ms}	$H_0 > \rho_s > D_F^* H_0 > H_0^* \rho_s$	
		u_{fs}	—	
		u_{bs}	$\gamma^* \rho_s > \gamma^* H_0$	

3.14. Taula. Erdiko irekiduradun hodidun sistema esperimantal guztietarako faktore eta elkarrekintza esanguratsuenen ordena solido eta partikula tamaina ezberdinetarako.

Solidoa	Partikula tamaina (mm)	Menpeko aldagaia	Esangura ordena
Harea	0.094	u_{ms}	$H_0 > D_0 > D_T$
		u_{fs}	—
		u_{bs}	—
	0.155	u_{ms}	D_0
		u_{fs}	$D_T > D_0$
		u_{bs}	—
	0.246	u_{ms}	$H_0 > D_T > D_0 > D_0^* D_T \gg \gamma > \gamma^* D_F$
		u_{fs}	$D_0 \gg \gamma > D_0^* D_T > \gamma^* D_F$
		u_{bs}	—
	Bateratua	u_{ms}	$H_0 \gg d_p > D_0 > D_T > D_0^* D_T > D_T^* d_p$
		u_{fs}	$D_0 > D_T > D_T^* d_p > \gamma^* H_0 > D_0^* d_p$
		u_{bs}	—
Zerrautsa	0.344	u_{ms}	$H_0 > IP > \gamma > D_0 > D_T > D_F^* H_0$
		u_{fs}	$D_0 > IP > D_F > D_T > H_0 > \gamma^* D_F$
		u_{bs}	—
Harea-Zerrautsa nahasketa	—	u_{ms}	$\rho_s > H_0^* \rho_s > d_p > D_0 > D_0^* \rho_s > D_0^* D_T > D_0^* d_p > D_T^* \rho_s > D_T > D_T^* d_p > IP > D_0^* d_p$
		u_{fs}	$\rho_s > D_0 > D_T > \gamma^* H_0 > D_T^* d_p > D_0^* d_p$
		u_{bs}	—

3.15. Taula. Hodi ez-porotsudun sistema esperimantal guztietarako faktore eta elkarrekintza esanguratsuenen ordena solido eta partikula tamaina ezberdinetarako.

Solidoa	Partikula tamaina (mm)	Menpeko aldagaia	Esangura ordena
Harea	0.094	u_{ms}	$H_0 \gg \gamma > L_H > D_0 > \gamma^* H_0$
		u_{sf}	$\gamma > D_T > D_0 > L_H$
	0.155	u_{ms}	H_0
		u_{fs}	$\gamma > D_0 > L_H$
	0.246	u_{ms}	$H_0 > D_0 > \gamma > L_H > D_T$
		u_{sf}	$L_H > D_0 > \gamma^* H_0 > \gamma^* H_F$
	Bateratua	u_{ms}	$H_0 \gg d_p > D_0 > \gamma > L_H > D_F > \gamma^* H_0 > \gamma^* D_F > D_0^* d_p > D_T^* d_p > H_0^* d_p$
			$\gamma > L_H > D_0^* d_p > D_0 > L_H^* d_p > d_p > \gamma^* d_p > \gamma^* H_0$
		u_{fs}	$\gamma > L_H > D_0^* d_p > D_0 > L_H^* d_p > d_p > \gamma^* d_p > \gamma^* H_0$
	Zerrautsa	0.344	u_{ms}	$H_0 > D_0 > D_T > \gamma > L_H \gg D_F^* H_0 > H_F$
u_{fs}			$D_F > \gamma > L_H > D_0$
Harea-Zerrautsa nahasketa	-	u_{ms}	$\rho_s > H_0 \gg d_p > L_H > \gamma > D_T^* d_p > \gamma^* D_F > H_0^* d_p > D_0 > D_0^* d_p > D_0^* \rho_s > \gamma^* H_0 > H_F > \gamma^* H_F$
		u_{sf}	$D_0^* d_p > \gamma > D_0^* \rho_s > L_H^* d_p > D_0 > d_p > \gamma^* d_p > L_H^* \rho_s > d_p^* H_F$

3.13., 3.14. eta 3.15. Tauletan hodirik gabe, irekiduradun hodia eta hodi ez-porotsudun saiakuntzetan lortu diren faktore eta elkarrekintza esanguratsuenen ordena erakusten da. Taula bakoitzean harearen tamaina bakoitza (0.246, 0.155 eta 0.094 mm) eta bateratua aztertu dira. Azken honen helburua partikula tamainaren eragina aztertzea izan da. Bestalde, zerrautsa erabiliz lorturiko emaitzak ere erabili dira parametro hidrodinamikoetan eragin handiena duten faktore eta elkarrekintzak aztertzeko. Azkenik, solidoaren dentsitatearen eragina neurtzeko, konfigurazio bakoitzarekin lorturiko emaitza guztien azterketa estatistiko bateratua burutu da (azterketa honetan solidoaren partikula tamaina ere sartu da faktore bezala).

3.13. Taulari erreparatuz ikus daitekeenez, harearen 0.094 eta 0.155 mm partikula tamainak banaka aztertu direnean ez da lortu faktore edo elkarrekintza esanguratsurik. Honen arrazoia datu esperimantal gutxi eta konfiantza maila altua erabiltzea izan da.

Bestalde, iturkuntzarako abiadura minimoan (u_{ms}) eragina duten parametro esanguratsuak aztertuz gero (3.13. Taula), harearen kasuan ohantze estatikoaren altuera (H_0) eta bilgailuaren diametroa (D_F) dira faktore esanguratsuenak. Zerrautsa erabiliz ostera, ohantzearen altueraz gain airearen sarrerako diametroa (D_0) eta kontaktorearen angelua (γ) ere faktore esanguratsuak dira. Bestalde, harearen frakzio guztien datuak erabiltzerakoan partikularen tamaina (d_p) ere azaltzen da esanguratsu bezala, nahiz eta ez izan lehenetarikoa. Azkenik, erdiko hodirik gabeko sistema guztien emaitzen analisia egin ostean ohantzearen altuerarekin batera solidoaren dentsitatea (ρ_s) ere faktore esanguratsuenak dela ondorioztatzen da.

Bestalde, zerrautsezko ohantzeen erabateko iturkuntzarako abiadurari dagokionez (u_{fs}), airearen sarrerako diametroa (D_0) baino ez da esanguratsua %95eko konfiantza mailarekin.

3.13. Taularekin amaitzeko, burbuilazko iturkuntzarako abiadurako (u_{bs}) faktore esanguratsuenak kontaktorearen angelua (γ) eta ohantze estatikoaren altuera (H_0) izan dira. Bi faktore hauetaz gain, harearen kasuan bilgailuaren diametroak (D_F) eta ohantzearen gainazalaren eta bilgailuaren arteko distantziak (H_F) ere eragina dute. Bestalde, harearen frakzio guztiak erabili diren kasuan solidoaren partikula tamaina (d_p) ere esanguratsua da. Zerrautsaren kasuan, ohantzearen altuera izan da faktore esanguratsu bakarra eta hodirik gabeko sistema guztiak kontuan hartuta kontaktorearen angeluak solido dentsitatearekin ($\gamma * \rho_s$) eta ohantzearen altuerarekin ($\gamma * H_0$) duen elkarrekintzak dira esanguratsuak.

Irekiduradun hodian kasuan (3.14. Taula), iturkuntzarako abiadura minimoa (u_{ms}) aztertu denean, hodirik gabeko sistemen faktore beraiek dira esanguratsuak, hau da, ohantze estatikoaren altuera (H_0) eta airearen sarrerako diametroa (D_0). Gainera, kasu honetan erdiko hodiaren diametroa (D_T) ere izan da faktore esanguratsua. Bestalde, 0.246 mm -ko partikula tamaina duen harearen azterketan, kontaktorearen angelua (γ) eta iturri bilgailuaren diametroa (D_F) ere izan dira esanguratsuak. Zerrautsa erabiliz lortu diren emaitzetan ordea, ohantzearen altuera ez ezik hodiaren irekidura portzentaia (IP) eta kontaktorearen angelua (γ) ere izan dira faktore esanguratsuenak (airearen sarrerako diametroa, D_0 , eta hodiaren diametroa, D_T , ere esanguratsuak izan direlarik). Azkenik, harearen frakzio guztien azterketan, partikula tamaina (d_p) izan da faktore esanguratsuenak eta sistema guztien azterketan solidoaren dentsitatea (ρ_s).

Bestalde, irekiduradun hodian kasuan, erabateko iturkuntzarako abiaduran (u_{fs}) lortu diren faktore esanguratsuak (harearen frakzio txikienean izan ezik) airearen sarrerako diametroa (D_0), hodiaren diametroa (D_T) eta kontaktorearen angelua (γ) izan dira. 0.246 mm -ko harearen azterketan, bilgailuaren diametroak kontaktorearen angeluarekin duen elkarrekintza ($\gamma * D_F$) izan da esanguratsua, eta harearen frakzio

guztiak kontuan hartuz, partikula tamaina da esanguratsua hainbat elkarrekintzatan ($D_0 * d_p$ eta $D_T * d_p$). Azkenik, sistema guztien azterketa egitean parametro esanguratsuenaren solidoaren dentsitatea (ρ_s) da.

Irekiduradun hodiekin amaitzeko, 3.14. Taulan azaltzen den bezala, ez da parametro esanguratsurik lortu burbuilazko iturkuntzarako abiaduran. Izan ere, irekiduradun hodiekin buruturiko saiakuntza batzuetan operazioa ezegonkorra izan da ekipoak ahalbidetzen duen operazio tartean ($< 200 m^3 N/h$), eta beraz, parametro honekin lorturiko datuak ez dira nahiko izan %95eko konfiantza mailarekin faktore esanguratsuak lortzeko.

Azkenik, 3.15. Taulan erakusten dira hodi ez-porotsuak erabili diren sistemen emaitzak erabiliz azterketa estatistikoan lorturiko emaitzak. Oro har, iturkuntzarako abiadura minimorako (u_{ms}) lortu diren faktore esanguratsuenak ohantze estatikoaren altuera (H_0) eta airearen sarrerako diametroa (D_0) dira. Hala ere, kontaktorearen angelua (γ) eta hodiaren hanken altuera (L_H) ere faktore esanguratsuak dira. Harearen frakzio guztiak batera aztertuz, bigarren faktore esanguratsuenaren partikula tamaina (d_p) izan da, eta sistema guztien nahastea aztertuz, solidoaren dentsitatea (ρ_s).

Bestalde, aurretik aipatu den bezala, hodi ez-porotsuak erabili diren sistemek erregimen bakarra erakusten dute, erabateko iturkuntza erregimena hain zuzen. Hala ere, iturri-jariorako abiadura minimoan karga galerak nabarmen gora egiten du airearen abiadurarekin batera, eta beraz, operaziorako ez da egokia.

Bestalde, aurretik aipatu den bezala, hodi ez-porotsuak erabili diren sistemek erregimen bakarra dute, erabateko iturkuntza erregimena hain zuzen. Hala ere, iturri-jariorako abiadura minimoan karga galerak nabarmen egiten gora du airearen abiadurarekin eta, beraz, operaziorako ez da egokia. Beraz, 3.15. Taulan agertzen den bezala, parametro honetan gehien eragiten duten faktoreak kontaktorearen angelua (γ), hodiaren hanken altuera (L_H) eta airearen sarrerako diametroa (D_0) dira. Zerrautsaren kasuan, hiru hauez gain, iturri bilgailuaren diametroa (D_F) da parametro esanguratsuenaren. Bestalde, sistema guztiak bateratuz egindako analisisian, partikula tamainak (d_p) badu garrantzia baina airearen sarrerarekin elkarrekintza moduan ($D_0 * d_p$). Azkenik, solidoaren dentsitatea (ρ_s) azaltzen da esanguratsua bezala, baina elkarrekintza moduan airearen diametroarekin batera ($D_0 * \rho_s$).

Beraz, hiru tauletako iturkuntzarako abiadura minimoa aztertuz, ohantze estatikoaren altuera (H_0) da faktore esanguratsuenaren konfigurazio guztietarako. Faktore honen ostean, konfigurazioaren arabera honako hauek dira faktore esanguratsuak: hodorik gabeko sistematan bilgailuaren diametroa (D_F), irekiduradun hodiaren sistematan airearen sarrerako diametroa (D_0) eta hodiaren diametroa (D_T), eta hodi ez-porotsudun sistematan sarrerako airearen diametroa (D_0).

Azkenik, aurrean aipatu bezala, konfigurazio edo erdiko hodi motaren arabera lortzen diren kurba karakteristiko zein erregimen motak ezberdinak dira, baita egonkortasun maila ere. Hori dela eta, argi geratzen da erdiko hodiak sisteman duen eragina oso garrantzitsua dela, eta hau horrela dela egiaztatzeko sistema guztien azterketa estatistiko bateratua egin da. Horretarako, konfigurazio ezberdinetako emaitza guztiak bildu dira eta erdiko hodia (EH) faktore bezala sartu da analisisian. Modu honetan, erdiko hodiaren eragina aztertzeko, hodirik gabeko (HG), irekiduradun hodiaren (IH) eta hodi ez-porotsudun (HEP) sistemak ezberdindu dira.

Azterketa estatistiko bateratu honetan lortu diren faktore esanguratsuenak eta euren garrantzi ordenak 3.16. Taulan erakusten dira laburbildurik.

3.16. Taulako iturkuntzarako abiadura minimoari dagozkion (u_{ms}) emaitzak aztertzeko, hiru konfigurazio ezberdinen datuak erabili dira eta bertan ikus daitekeen bezala erdiko hodia da parametro esanguratsuenetakoa. Harearen kasuan, erdiko hodiekin batera ohantze estatikoaren altuera (H_0) eta partikula tamaina (d_p) esanguratsuak dira. Zerrautsa erabiliz ordea, erdiko hodiarekin batera gasaren sarrerako diametroa (D_0), ohantze estatikoaren altuera (H_0) eta kontaktorearen angelua (γ) dira faktore esanguratsuenak. Azkenik, emaitza guztiak bateraturik solidoaren dentsitatea (ρ_s) eta partikula tamaina (d_p) ere faktore esanguratsuak direla ikus daiteke.

Erabateko iturkuntzarako abiaduraren kasuan (u_{fs}) erdiko hodirik gabe eta irekiduradun hodiaren emaitzak erabili dira. Harearen frakzio txikienetan (0.094 eta 0.155 mm) ez da faktore esanguratsurik lortu, baina gainerakoetan erdiko hodia da faktore esanguratsua. Honetaz gain, airearen sarrerako diametroa (D_0) eta kontaktorearen angelua (γ) dira faktore garrantzitsuenak, baita solidoaren dentsitatea (ρ_s) ere saiakuntza guztiak bateratu diren kasuan.

Azkenik, burbuilazko iturkuntzarako abiaduraren kasuan (u_{bs}) erdiko hodirik gabeko eta irekiduradun hodiaren sistemen emaitzak erabili dira. Kasu honetan ere erdiko hodia da faktore esanguratsua. Honekin batera, kontaktorearen angelua (γ) eta iturri bilgailuaren diametroa (D_F) dira faktore esanguratsuenak, baita ohantze estatikoaren altuera (H_0) ere zerrautsaren kasuan.

Erdiko hodie dagozkien faktoreen eragina alde batera utzita, sistema guztiak bateraturik buruturiko emaitzen analisisian lorturiko faktore esanguratsuenak (3.16. Taula) konfigurazio ezberdinak banaka aztertuz lorturiko emaitzekin (3.13., 3.14. eta 3.15. Taulak) alderatuz, antzeko faktore esanguratsuak lortu dira. Izan ere, konfigurazioka banaturik buruturiko analisisian, ohantze estatikoaren altuera (H_0) eta airearen sarrerako diametroa (D_0) dira esanguratsuenak kasu gehienetan iturkuntza abaidura minimoaren (u_{ms}) kasuan. Bestalde, harearen frakzio guztien analisisian partikula tamaina (d_p) da faktore esanguratsua, eta bi solidoak bateratutako analisisian partikula

tamaina eta solido dentsitatea (ρ_s). Erabateko iturkuntzarako abiaduraren (u_{fs}) kasuan, konfigurazio bateratuen (3.16. Taula) zein irekiduradun hodidun (3.14. Taula) sistemetako azterketa estatistikoetan airearen sarrerako diametroa (D_0) eta kontaktorearen angelua (γ) dira faktore esanguratsuak. Azkenik, burbuilazko iturkuntzarako abiaduraren (u_{bs}) kasuan, kontaktorearen angelua (γ), bilgailuaren diametroa (D_F) eta airearen sarrerako diametroa (D_0) dira faktore esanguratsuak, bai konfigurazio bateratuen (3.16. Taula) zein hoderik gabeko sistemen (3.13. Taula) azterketa estatistikoetan. Hala ere, 3.16. Taulan ikus daitekeenez, u_{bs} -ean eragina duten faktore esanguratsuenak erdiko hodia eta honen hainbat elkarrekintza dira.

3.16. Taula. Konfigurazio ezberdinen azterketa bateratuan lorturiko faktore eta elkarrekintza esanguratsuenen ordena.

Solidoa	Partikula tamaina (mm)	Menpeko aldagaia	Esangura ordena
Harea	0.094	u_{ms}	$H_0 \gg D_0 > EH > \gamma > D_0 * H_0 > \gamma * H_0$
		u_{fs}	—
		u_{bs}	—
	0.155	u_{ms}	$H_0 \gg EH > D_0 > H_0 * EH > \gamma$
		u_{fs}	—
		u_{bs}	EH
	0.246	u_{ms}	$H_0 \gg EH > H_0 * EH > D_F * H_0 > D_F * EH > D_0 > \gamma$
		u_{fs}	$EH > D_0 * EH > D_0 > \gamma * EH$
		u_{bs}	$EH \gg \gamma * EH > D_F * EH > \gamma$
	Bateratua	u_{ms}	$H_0 \gg d_p > EH \gg H_0 * EH > D_0 > D_F * H_0 > D_F > \gamma > D_F * EH$
		u_{fs}	$EH > D_0 * EH > \gamma * EH > D_0 > \gamma * H_0$
		u_{bs}	$EH \gg D_F * EH > \gamma * EH > D_0 > H_0 * EH$
Zerrautsa	0.344	u_{ms}	$EH > D_0 > H_0 \gg \gamma > H_0 * D_0 > D_F * H_0$
		u_{fs}	$EH > D_0 \gg D_0 * EH > D_F * EH > \gamma * EH > \gamma$
		u_{bs}	$H_0 > EH$
Harea-Zerrautsa nahasketa	—	u_{ms}	$\rho_s \gg d_p > EH \gg H_0 * EH > D_0 > H_0 * \rho_s > D_F * H_0 > D_F * \gamma > D_F * EH$
		u_{fs}	$\gamma > \rho_s * EH > \gamma * EH > d_p * EH > D_0 * EH > \gamma * d_p > D_0 * \rho_s > EH > D_0 * d_p$
		u_{bs}	$EH \gg D_F * EH > \gamma * EH$

3.3.5. Faktore esanguratsuenen eraginaren adierazpen grafikoa

Azterketa estatistikoaren bidez, menpeko aldagaietan (iturkuntza abiadura minimoa, erabateko iturkuntzarako abiadura, burbuilazko iturkuntzarako abiadura eta iturri-jariorako abiadura minimoa) eragin handiena duten faktore eta elkarrekintzen

ordena kalkula daiteke. Hala, faktore hauek zeintzuk diren atera ondoren, menpeko aldagaietan duten eragina kuantifikatu da eta beraien joera zehaztuko da atal honetan.

Faktore eta elkarrekintza hauek menpeko aldagaietan duten eragina kuantifikatzeko modu bat menpeko aldagaiaren irudikapen grafikoa faktore esanguratsuekiko egitean datza. Horrela, faktore esanguratsuenen maila aldaketak menpeko aldagaian sortzen duen aldaketa eta joera aztertu daiteke.

Orain arte bezala, irudikapen grafikoak alde batetik konfigurazioaren arabera banatu dira eta, bestalde, konfigurazio bakoitzaren barnean solido motaren araberako banaketa egin da. Nahiz eta azterketa estatistikoan harearen partikula tamaina ezberdinetarako egin den analisia, irudikapenean ez da banaketa hau burutuko. Izan ere, oro har partikula tamaina ezberdinei dagozkien faktore esanguratsuenak berdinak izan dira, eta grafikoetan joera berdinak izango dira. Hala ere, kasuren baten faktore ezberdinen bat badago, aintzat hartuko da eta bere eragina irudikatuko da. Bestalde, bi solido ezberdinen analisi bateratuan solidoaren dentsitatea faktore esanguratsu atera den kasuetan, beronen irudikapena egingo da.

3.3.5.1 Erdiko hodirik gabe

Harea

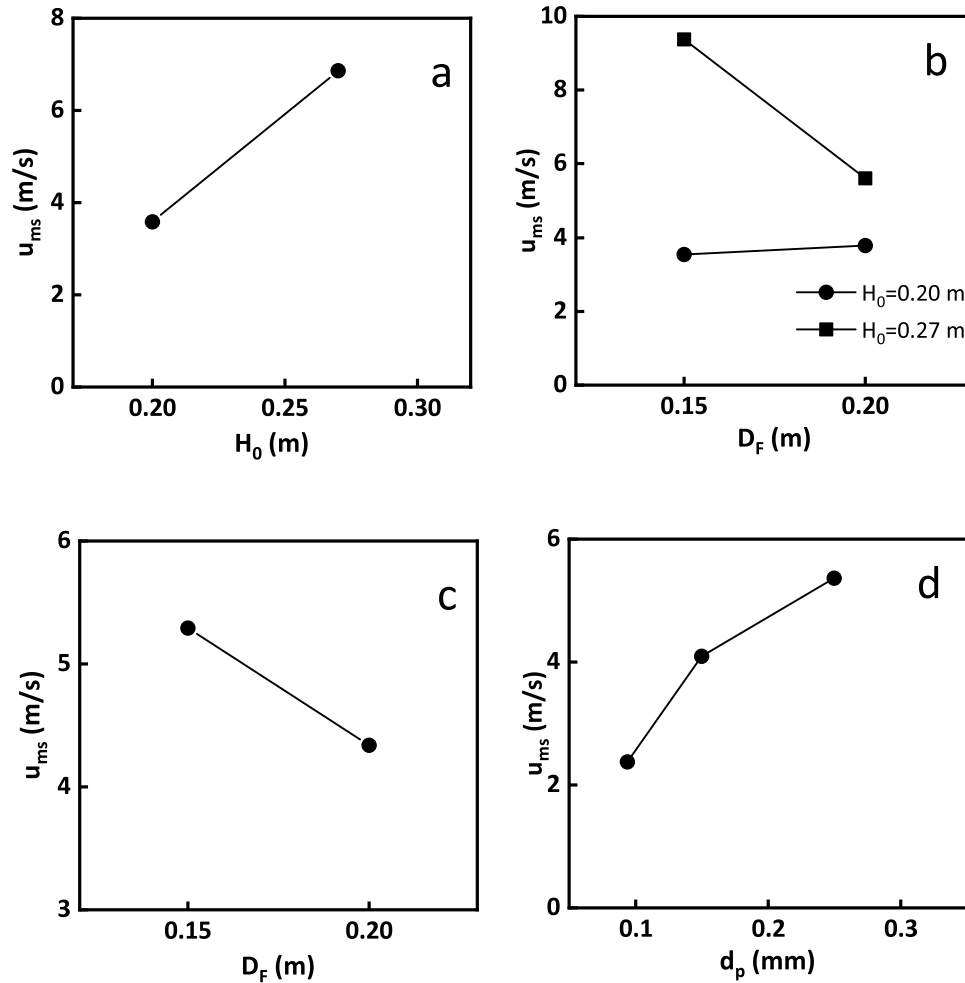
Iturkuntzarako abiadura minimoa, u_{ms}

Erdiko hodirik gabeko sistemetan iturkuntzarako abiadura minimoan gehien eragiten duten faktore eta elkarrekintzak ohantze estatikoaren altuera (H_0), ohantzearen altueraren eta bilgailuaren diametroaren arteko elkarrekintza ($H_0 * D_F$), bilgailuaren diametroa (D_F), partikula tamaina (d_p) eta airearen sarrerako diametroa dira (D_0).

Hortaz, faktore eta elkarrekintza hauen maila aldaketak iturkuntzarako abiadura minimoan sortzen duten aldaketak aztertuko dira jarraian. Horretarako, aztertu den faktorea konstante mantendu den saiakuntza esperimentalen iturkuntzarako abiadura minimoaren batezbestekoak lortu dira maila bakoitzerako.

3.15. Irudian erakusten dira faktore eta elkarrekintza esanguratsuen irudikapen grafikoak. Kasu batzuetan faktore eta elkarrekintza asko atera dira esanguratsu bezala, baina hauen artean garrantzitsuenak irudikatuko dira soilik lana ez luzatzeko. Hortaz, erdiko hodirik gabeko sistemetan, iturkuntzarako abiadura minimoaren kasuan airearen sarrerako diametroak duenez esangura maila txikiena, ez da irudikatuko. Beraz, 3.15. Irudian ohantzearen altuerak, ohantzearen altueraren eta bilgailuaren

diametroaren arteko elkarrekintzak, bilgailuaren diametroak eta partikula tamainak iturkuntzarako abiadura minimoan sortzen dituzten aldaketak ikus daitezke.



3.15. Irudia. (a) Ohantzearen altuerak, (b) ohantzearen altueraren eta iturri bilgailuaren diametroaren interakzioak, (c) iturri bilgailuaren diametroak eta (d) partikula tamainak iturkuntzarako abiadura minimoan sortzen dituzten aldaketak.

3.13. Taulan ageri den bezala, ohantzearen altuera da erdiko hodirik gabe iturkuntzarako abiadura minimoan eragin handiena duen faktorea. 3.14.a Irudian erakusten den bezala, ohantzearen altuera handitzerakoan iturkuntzarako abiadura minimoa handiagoa da. Izan ere, ohantzearen altuera handitzean kontaktorean dagoen solido kantitatea ere handiagoa da eta emari edo abiadura handiagoa behar da kontaktorean iturgunea ireki eta mantentzeko, eta hortaz, iturria egonkorra izateko.

3.14.b Irudian erakusten den bezala, bigarren faktore esanguratsua ohantzearen altueraren eta iturri bilgailuaren arteko elkarrekintza da. Hau da, bilgailuaren diametroaren eragina desberdina da ohantze estatikoaren altueraren arabera. Ohan-

tzearen altuera txikia denean (0.20 m), bilgailuaren diametroak ez du eraginik. Ohantzearen altuera handietan ostera, bilgailuaren diametroa handitzean, iturri guztia biltzen da eta airearen abiadura txikiagoetan egonkortzen da sistema (iturkuntzarako abiadura minimo txikiagoa).

Hurrengo faktore esanguratsuena iturri bilgailuaren diametroa da eta 3.14.c Irudian erakusten da iturkuntzarako abiadura minimoan duen eragina. Kasu honetan, iturri bilgailuaren diametroa handitzean iturkuntzarako abiadura minimoa txikiagoa da. Aurreko kasuan aipatu den bezala, bilgailuaren diametroa handitzeak bere barneko bolumena handitzea dakar eta iturri handiak zein txikiak biltzeko gai da. Diametro txikiko bilgailuak ordea, ez ditu ondo biltzen iturri handiak eta operazio egonkorrerako behar diren airearen abiadurak handiagoak dira.

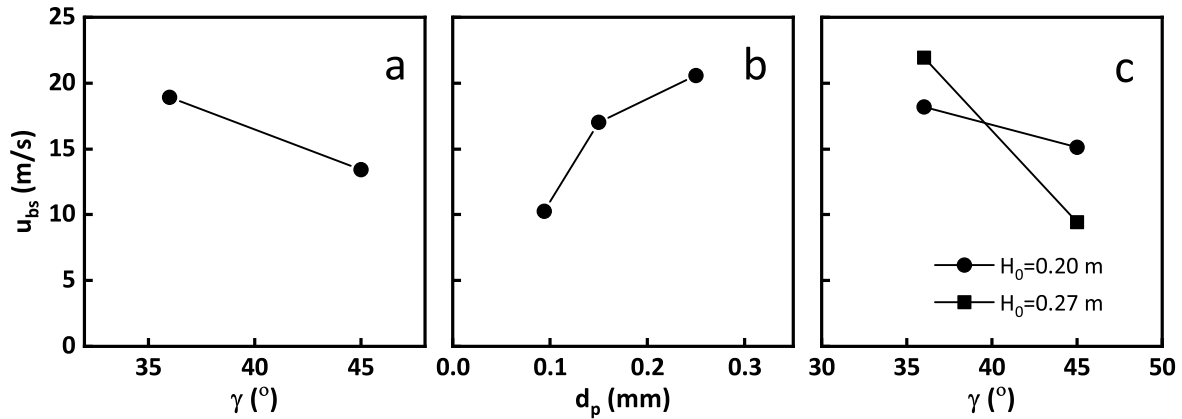
Azkenik, solidoaren partikula tamaina ere faktore esanguratsua da iturkuntzarako abiadura minimoan. 3.14.d Irudian erakusten denez, iturkuntzarako abiadura minimoa handiagoa da partikula tamaina handiagoa denean. Izan ere, diametro handiagoko partikulaz osaturiko ohantzeak duen kontaktua azalera partikula txikiagoek dutena baino txikiagoa denez (arraste indar txikiagoa), aire abiadura handiagoa behar da iturkuntza minimoan funtzionatu ahal izateko.

Burbuilazko iturkuntzarako abiadura, u_{bs}

3.13. Taulan ageri den bezala, hodirik gabeko konfigurazioan harea erabiliz erabateko iturkuntzarako abiaduraren kasuan egindako azterketa estatistikoan ez da faktore edo elkarrekintza esanguratsurik lortu %95eko konfiantza mailarako. Hortaz, zuzenean burbuilazko iturkuntzarako abiaduran lortu diren faktore esanguratsuenen eraginak aztertzeraz pasako da.

Burbuilazko iturkuntzarako abiaduran eragin handiena duten faktore edo elkarrekintzak kontaktorearen angelua, partikula tamaina eta kontaktorearen angeluaren eta ohantzearen altueraren arteko elkarrekintza dira hurrenez hurren.

3.16. Irudian erakusten dira aipaturiko faktore eta elkarrekintzek burbuilazko iturkuntzarako abiaduran sortzen dituzten aldaketak.



3.16. Irudia. (a) Kontaktorearen angeluak, (b) partikula diametroak eta (c) kontaktorearen angelua eta ohandzearen altueraren arteko elkarrekintzak burbuilazko iturkuntzarako abiadura sortzen dituzten aldaketak.

3.16.a Irudian erakusten denez, kontaktorearen angelua dela harea erabiltzean burbuilazko iturkuntzarako abiadura gehien eragiten duen faktorea. Aurretik aipatu den bezala, nahiz eta iturri bilgailuak hodirik gabeko sistemak egonkortu egiten dituen, ez da posible izan 28° ko kontaktoreak erabiltzen diren sistematan iturkuntza erregimena lortzea. Hortaz, ezin izan dira lortu sistema hauei dagozkien datuak. 3.16.a Irudian erakusten den bezala, kontaktorearen angelua handitzean, burbuilazko iturkuntzarako abiadurak behera egiten da, hau da, 36° ko sistemak airearen abiadura handiagoetan ezegonkortzen dira. Parametro hidrodinamiko honen garrantzia oso handia da, izan ere, burbuilazko iturkuntzarako abiaduraren balioa zenbat eta handiagoa izan operazio tartea zabalagoa da. Kontaktorearen angelua handitzean gune konikoaren pareten malda txikigoa da eta eraztunguneko partikulak hobeto eusten dira. Hori dela eta, partikulen grabitazio indarra edo masaren zati bat kontaktorearen paretek jasaten dute eta aireak abiadura txikiagoa behar du eraztunguneko sortzen duen presioa gainditzeko.

Bestalde, harea erabiliz burbuilazko iturkuntzarako abiaduraren bigarren faktore esanguratsua partikula tamaina da. 3.16.b Irudian ikus daitekeen bezala, solidoaren partikula tamaina handitzean burbuilazko iturkuntzarako abiadura ere handiagoa da.

Azkenik, hirugarren faktore esanguratsua ohandzearen altueraren eta kontaktorearen angeluaren arteko elkarrekintza da. 3.16.c Irudian erakusten den bezala, angeluaren joera 3.16.a Irudian agertzen denaren berdina da, baina eragina nabariagoa da ohandzearen altuera handiengan. Izan ere, kontaktorearen angelu eta ohandzearen altuera handietarako ez dira erregimen oso egonkorak lortu, hau da, diametro txikiko bilgailuarekin ez da sistema egonkorrik lortu eta handiarekin abiadura txikietan lortzen da ezegonkortasuna. Hori dela eta, ohandzearen altuera eta kontaktorearen angelu

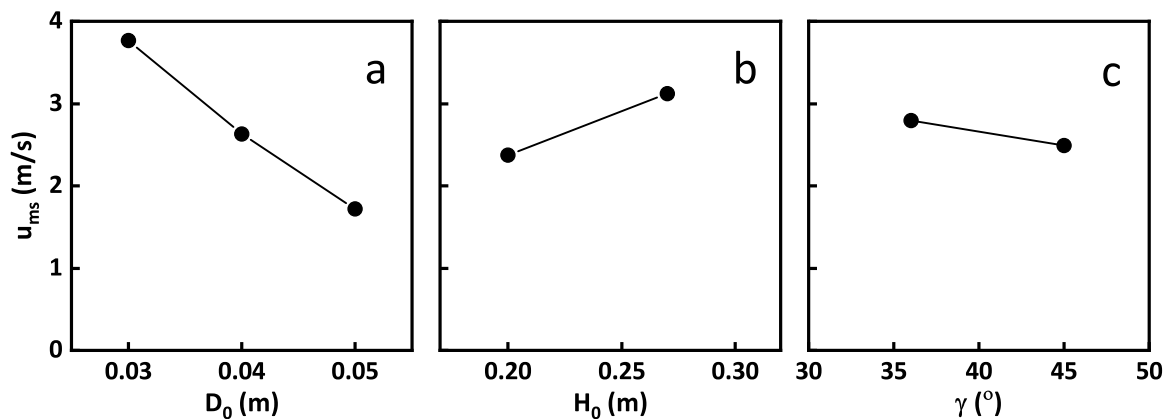
handiak erabiliz, airearen abiadura txikietan lortzen da ezegonkortasuna.

Zerrautsa

Iturkuntzarako abiadura minimoa, u_{ms}

Aurretik harearekin egin den bezala, zerrautsa erabiliz ere hainbat saiakuntza hidrodinamiko burutu dira, eta parametro hidrodinamikoaren balioak lortu ostean berauen gain gehien eragiten duten faktoreen eta elkarrekintzen azterketa estatistikoa burutu da. Kasu honetan partikula tamaina bakarra erabili denez (0.344 mm) ezin izan da faktore honen eragina aztertu.

3.17. Irudian, airearen sarrerako diametroak, ohantzearen altuerak eta kontaktorearen angeluak iturkuntzarako abiadura minimoan sortzen dituzten aldaketak ikus daitezke.



3.17. Irudia. (a) Airearen sarrerako diametroak, (b) ohantzearen altuerak eta (c) kontaktorearen angeluak iturkuntzarako abiadura minimoan sortzen duten aldaketa.

Analisi estatistikoan ondorioztatu den bezala, airearen sarrerako diametroa da iturkuntzarako abiadura minimoan eragin handiena duen faktorea. 3.17.a Irudiko grafikoan ikus daitekeenez, sarrerako diametroa handitzean iturkuntzarako abiadura minimoaren balioa txikiagoa da. Izan ere, sarrerako diametroa handiagoa den heinean, operatzeko behar den aire emaria handiagoa da. Hala ere, aipatu behar da iturkuntzarako abiadura minimoa gasaren sarrerako azalera unitateko kalkulatzen denez sarrerako diametroa handitzean airearen abiadura txikiagoa da, eta horregatik gertatzen da abiaduraren joera beherakor hau. Joera hau bera ikusi zuen Altzibar-ek bere tesian [20] hiru konfigurazio ezberdinetan beira eta harea erabiliz, baita San José et al.ek [340] hodi ez-porotsuak erabili zituzten kasuan ere. Hortaz, joera hau (iturri bilgailua izan edo ez izan) konfigurazio guztietan eta solido mota ezberdinetarako gertatzen dela esan daiteke.

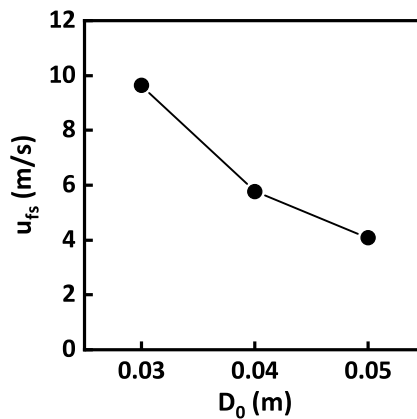
Bestalde, 3.17.b Irudian agertzen den bezala, zerrautsa erabiliz iturkuntzarako abiadura minimoan gehien eragiten duen bigarren faktorea ohantzearen altuera da. Harearekin gertatzen den bezala, ohantzearen altuera handitzean solido masa handiagoa sartzen da kontaktorean, eta ondorioz, iturria egonkor mantentzeko behar den aire abiadura handiagoa da.

Azkenik, 3.17.c Irudiari erreparatzen bazaio, kontaktorearen angeluak iturkuntzarako abiadura minimoan sortzen duen aldaketa aurreko bi kasuetan baino txikiagoa da. Joera honen arrazoia 3.16.a Irudian eman den arrazoinamenduarekin dago erlazionatuta. Hau da, kontaktorearen angelua handitzerakoan eraztunguneak kontaktorearen paretan duen euskarria handiagoa dela eta eraztungunetik jaisten diren partikulak grabitazio indarrak txikiagoak dira. Hori dela eta, iturri egonkorra lortzeko behar den airearen abiadura txikiagoa da.

Erabateko iturkuntzarako abiadura, u_{fs}

Aurretik harearen kasuan gertatu ez bezala, zerrautsa solido bezala erabiliz erabateko iturkuntzarako abiaduraren azterketa estatistikoan airearen sarrerako diametroa atera da faktore esanguratsu bezala.

3.18. Irudian erakusten da airearen sarrerako diametroak erabateko iturkuntzarako abiaduran sortzen duen aldaketa.



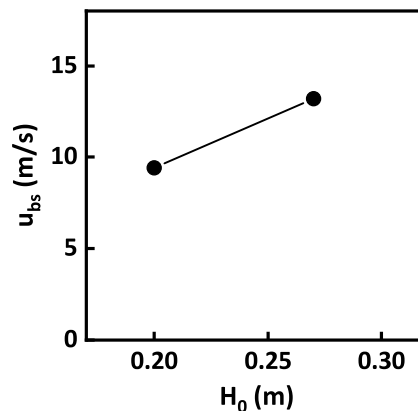
3.18. Irudia. Airearen sarrerako diametroak erabateko iturkuntzarako abiaduran sortzen duen aldaketa.

Iturkuntzarako abiadura minimoaren kasuan bezala, kasu honetan ere faktore esanguratsua airearen sarrerako diametroa da. 3.18. Irudian ikus daitekeenez, joera beherakorra da, hau da, sarrerako diametroa handitzean burbuilazko iturkuntzarako abiadura txikiagoa da. Izan ere, sarrerako diametroa handitzean, ohantzean zehar zabaltzen den airearen abiadura txikiagoa da eta burbuilak eta ezegonkortasuna sortzen

dira. Bestalde, sarrerako diametroak eragin berbera du iturkuntzarako abiadura minimoan (3.17.a Irudia) eta erabateko iturkuntzarako abiaduran (3.18. Irudia), baina azkenengoaren balioak handiagoak dira.

Burbuilazko iturkuntzarako abiadura, u_{bs}

Azkenik, zerrautsa erabiliz burbuilazko iturkuntzarako abiaduran gehien eragiten duen faktorea ohandzearen altuera da. 3.19. Irudian erakusten da faktore honek parametro hidrodinamikoan sortzen dituen aldaketak.



3.19. Irudia. Ohantzearen altuerak burbuilazko iturkuntzarako abiaduran sortzen duen aldaketa.

3.19. Irudiak erakusten duen bezala, burbuilazko iturkuntzarako abiadurak gora egiten du ohandzearen altuera handitzean kontaktorean sartzen den solido kantitatea ere handiagoa baita.

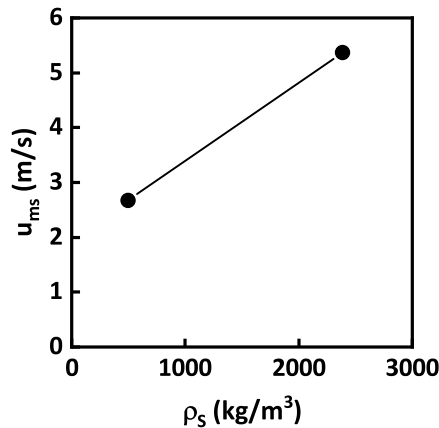
Harea-Zerrautsa nahasketa

3.13. Taulan erakusten den bezala, solido ezberdinen emaitzen azterketa estatistiko bateratuan solidoaren dentsitatea faktore oso garrantzitsua da. Harearen kasuan bezala, %95eko konfiantza maila erabiliz ez da faktore esanguratsurik lortu erabateko iturkuntzarako abiadurarako, baina bai gainerako parametro hidrodinamikoetarako. Esan bezala, solidoaren dentsitatea faktore esanguratsu bezala atera da iturkuntzarako abiadura minimoan eta burbuilazko iturkuntzarako abiaduran, baina beste hainbat faktore ere izan dira esanguratsuak. Gainerako faktore hauek aurreko kasuetako berdinak dira eta dagoeneko aztertu direnez, atal honetan solidoaren dentsitatea aztertuko da soilik.

Iturkuntzarako abiadura minimoa, u_{ms}

3.13. Taulan erakusten den bezala, harea-zerrautsa nahasteari buruturiko azterketa estatistikok hainbat faktore esanguratsu lortu dira: ohandzearen altuera, solidoaren dentsitatea eta iturri bilgailuaren diametroaren eta ohandzearen altueraren arteko elkarrekintza. Lehenengo (H_0) eta hirugarren faktoreen ($D_F * H_0$) eraginak dagoeneko aztertu direnez, solidoaren dentsitatearen eragina aztertuko da jarraian.

3.20. Irudian erakusten dira solidoaren dentsitateak iturkuntzarako abiadura minimoan sortzen dituen aldaketak.



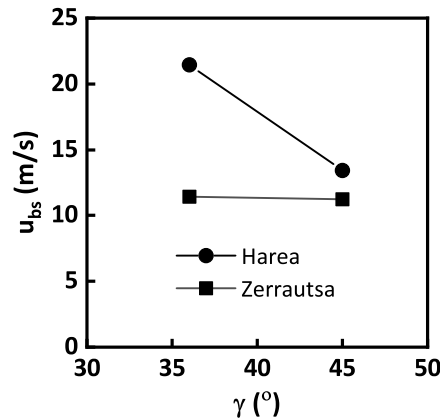
3.20. Irudia. Solidoaren dentsitateak iturkuntzarako abiadura minimoan sortzen duen aldaketa.

3.20. Irudian ikus daitekeen bezala, solidoaren dentsitatea handitzean iturkuntzarako abiadura nabarmen handitzen da. Hau da, solidoaren dentsitatea handitzean partikula indibidualen masa handiagoa da eta honek grabitazio indarra handitzea dakar. Beraz, iturkuntza erregimen edo iturri egonkorra lortzeko beharrezkoa den aire abiadura handiagoa da.

Burbuilazko iturkuntzarako abiadura, u_{bs}

3.13. Taulan ikus daitekeen bezala, burbuilazko iturkuntzarako abiaduran faktore edo elkarrekintza esanguratsuenak hurrengoak izan dira: kontaktorearen angeluaren eta solido dentsitatearen arteko elkarrekintza, eta kontaktorearen angeluaren eta ohandzearen altueraren arteko elkarrekintza. Azken faktore honen elkarrekintza dagoeneko 3.16.c Irudian aztertu denez, angeluaren eta solidoaren dentsitatearen arteko elkarrekintzaren eragina aztertuko da soilik.

3.21. Irudian erakusten da kontaktorearen angeluaren eta solido dentsitatearen arteko elkarrekintzaren eragina burbuilazko iturkuntzarako abiaduran.



3.21. Irudia. Kontaktorearen angeluaren eta solidoaren dentsitatearen arteko elkarrekintzak burbuilazko iturkuntzarako abiaduran sortzen duen aldaketa.

3.21. Irudian erakusten den bezala, nahiz eta kontaktorearen angelua handitzean burbuilazko iturkuntzarako abiadura txikiagoa den, eragina nabariagoa da solidoaren dentsitatea handia denean. Hau da, zerrautsa erabiltzen denean angeluak ez du burbuilazko iturkuntzarako abiaduran ia eragiten. Harea erabiltzen denean ostera, kontaktorearen angelu eta altura hadietan frogatu diren sistema gehienetan ez da lortu iturkuntza erregimenean operatzea eta lortu direnetan gasaren abiadura txikietan lortu da burbuilazko iturkuntzarako abiadura (erabateko iturkuntzarako abiadura lortu gabe).

3.3.5.2 Irekiduradun hodiak

Hodirik gabeko kasuetan egin den bezala, irekiduradun hodiak erabiliz lortu diren emaitzekin azterketa estatistikoak burutu dira faktore edo elkarrekintza esanguratsuenak zeintzuk diren jakiteko. Irekiduradun hodiekin lortzen diren parametro hidrodinamikoak hurrengoak dira: iturkuntzarako abiadura minimoa (u_{ms}), erabateko iturkuntzarako abiadura (u_{fs}) eta burbuilazko iturkuntzarako abiadura (u_{bs}).

Hortaz, hodirik gabeko atalean egin den bezala, azterketa estatistikoek emaitzak solido mota eta parametro hidrodinamikoek arabera banatu dira.

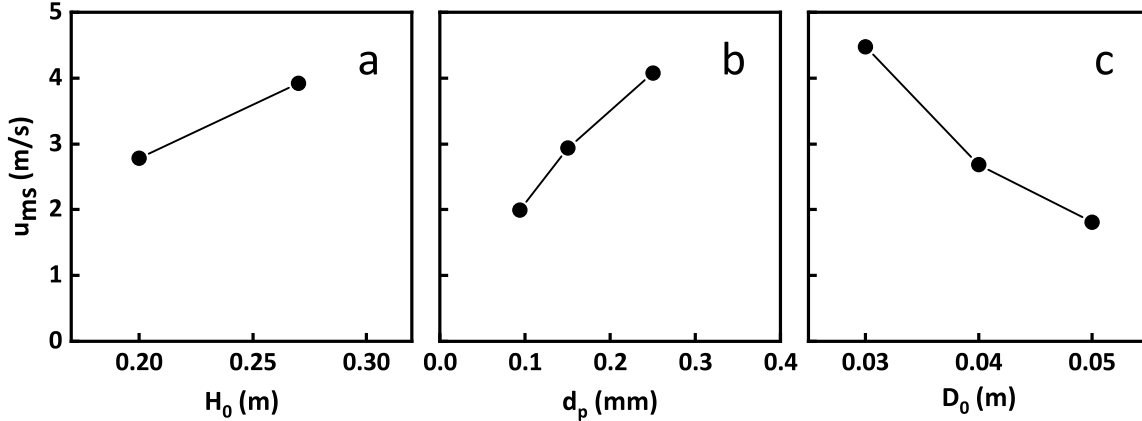
Harea

Iturkuntzarako abiadura minimoa, u_{ms}

Irekiduradun hodiekin burutu diren sistemetan lortu diren emaitzen azterketa estatistikoek faktore esanguratsuenak 3.14. Taulan laburbiltzen dira. Harea erabiliz

iturkuntzarako abiadura minimoan gehien eragiten duten faktoreak ohantzearen altuera, partikula tamaina eta airearen sarrerako diametroa dira.

3.22. Irudian erakusten dira aipaturiko faktoreak iturkuntzarako abiadura minimoan sortzen duten aldaketa.



3.22. Irudia. (a) Ohantzearen altuerak, (b) partikula tamainak eta (c) airearen sarrerako diametroak iturkuntzarako abiadura minimoan sortzen duten aldaketa.

3.22.a Irudian erakusten den bezala, irekiduradun hodia eta harea erabilitako sistemetan ohantzearen altuera da iturkuntzarako abiadura minimoan faktore esanguratsuen. Hodirik gabeko sistemetan ere ikusi da ohantzearen altuera handitzean sistemaren iturkuntzarako abiadura minimoa handitu egiten dela. Izan ere, ohantzearen altuera handitzean kontaktorean dagoen solido masa handiagoa da eta, beraz, airearen abiadura handiagoa behar da iturkuntza erregimena mantentzeko.

3.22.b Irudian ikus daitekeenez, iturkuntzarako abiadura minimoan gehien eragiten duen bigarren faktorea partikula tamaina dela. Izan ere, faktore hau handitzean iturkuntzarako abiadura minimoa handiagoa da, hodorik gabeko sistemetan bezala (3.15.d Irudia), hau da, partikula tamaina handitzean partikula bakoitzaren masa handiagoa da eta aire abiadura handiagoa behar da iturkuntza erregimena mantentzeko.

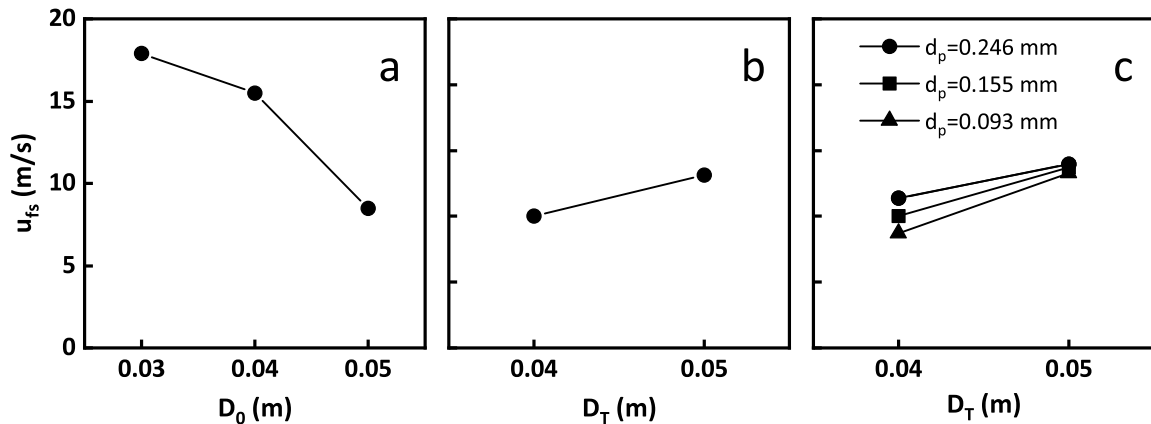
Azkenik, 3.22.c Irudian erakusten da airearen sarrerako diametroak iturkuntzarako abiadura minimoan eragiten duen aldaketa. Bertan azaltzen den bezala, sarrerako diametroa handitzean iturkuntzarako abiadura minimoa txikiagoa da, beste arrazoi batzuren artean sarrerako sekzioa handitzeak airearen abiadura txikitzea dakarrelako.

Erabateko iturkuntzarako abiadura, u_{fs}

Hodorik gabeko kasuetan ez bezala, irekiduradun hodieta burutu diren erabateko iturkuntzarako abiaduraren azterketa estatistikoan hainbat faktore eta elkarre-

kintza esanguratsu lortu dira. Kasu honetan, faktore esanguratsuenak hurrengoak dira: airearen sarrerako diametroa, erdiko hodiaren diametroa eta kontaktorearen angelua eta ohandzearen altueraren arteko elkarrekintza.

3.23. Irudian erakusten da faktore eta elkarrekintza hauen eragina erabateko iturkuntzarako abiaduran.



3.23. Irudia. (a) Airearen sarrerako diametroak, (b) erdiko hodiaren diametroak eta (c) kontaktorearen angeluaren eta ohandzearen altuerak erabateko iturkuntzarako abiaduran sortzen duten aldaketa.

3.23.a Irudian erakusten den bezala, erabateko iturkuntzarako abiaduran gehien eragiten duen faktorea airearen sarrerako diametroa da. Aipatutako irudian erakusten den joera beherakorra da, hau da, sarrerako diametroa handitzean erabateko iturkuntzarako abiadura txikiagoa da. Iturkuntzarako abiadura minimoan lortu den joera ere (3.22.c Irudia) berdina izan da, izan ere, sarrerako sekzioa handitzean airearen abiadura txikiagoa da.

Erabateko iturkuntzarako abiaduran gehien eragiten duen bigarren faktorea erdiko hodiaren diametroa da, 3.23.b Irudian ikusten den bezala. Hodiaren diametroa handitzean erabateko iturkuntzarako abiadura handitu egiten da, izan ere, hodiaren diametroa handitzeak iturgunearen bolumena handitzea dakar eta ondorioz, eraztun-gunetik iturgunera sartzeko azalera ere. Hortaz, diametroa handitzean solido gehiago sartzen dira iturgunera eta airearen abiadura handiagoa behar da iturgunea guztiz definitzeko, eta beraz, iturri indartsua lortzeko.

Azkenik, 3.23.c Irudian erakusten den bezala, partikula tamainaren eta hodiaren diametroaren arteko elkarrekintza da erabateko iturkuntzarako abiaduran gehien eragiten duen hirugarren faktorea. Partikula tamaina zein hodiaren diametroa handitzean erabateko iturkuntzarako abiaduraren balioa handiago egiten den arren, eragina nabarmenagoa da partikula tamaina txikitzen denean. Izan ere, partikula tamaina txikitzean eraztun-guneari zehar jaisten diren solidoen abiadura txikitu egiten da eta

partikula kopuru txikiagoa sartzen da iturgunera. Modu honetan, lorturiko erabateko iturkuntzarako abiadura txikiagoa da.

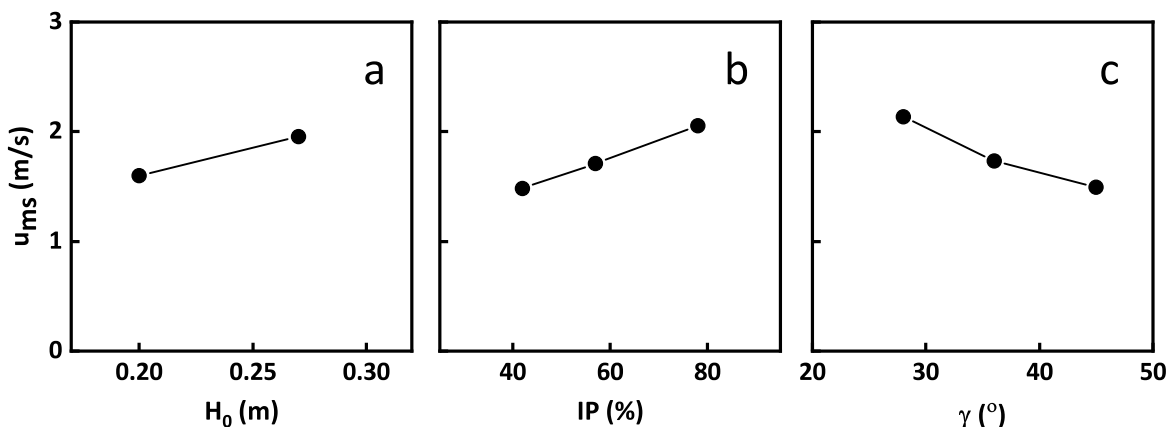
3.14. Taulan ageri den bezala, irekiduradun hodiak erabiliz ez da lortu burbuilazko iturkuntzarako abiaduran eragin handirik duen faktorerik. Nahiz eta hendirik gabeko eta irekiduradun hodiekin antzeko erregimenak izan, irekiduradun hodia ezartzean guztiz erregimen egonkorak lortzen dira eta muturreko baldintzak behar dira iturkuntza erregimena galdu eta ezegonkortasuna lortzeko. Hala ere, buruturiko hainbat saiakuntzetan lortu da erregimen honetara heltzea, baina buruturikoen erdia baino gutxiagoetan heldu da aipaturiko baldintzetara. Gainera, ezegonkortasuna lortu den sistemetan gasaren abiadura oso handiak behar izan dira. Hortaz, ez da datu nahikorik izan %95eko konfiantza mailarekin burbuilazko iturkuntzarako abiaduran esanguratsu diren faktore edo elkarrekintzak lortzeko. Hori dela eta, zuzenean pasako da zerrautsarekin lortu diren emaitzak azaltzera.

Zerrautsa

Iturkuntzarako abiadura minimoa, u_{ms}

Hendirik gabeko sistemetan bezala, kasu honetan ere zerrautsa solido bezala erabili den sistemetan lorturiko emaitzei azterketa estatistikoa aplikatu zaie eta hurrengo faktoreak izan dira esanguratsuenak: ohandzearen altuera, irekiduradun hodiaren irekidura portzentaia eta kontaktorearen angelua.

3.24. Irudian erakusten dira aipatutako faktoreek iturkuntzarako abiadura minimoan eragiten duten aldaketa.



3.24. Irudia. (a) Ohantzearen altuerak, (b) erdiko hodiaren irekidura portzentaia eta (c) kontaktorearen angeluak iturkuntzarako abiadura minimoan sortzen duten aldaketa.

Harearen kasuan bezala, 3.24.a Irudian erakusten da ohantzearen altuera dela iturkuntzarako abiadura minimoan gehien eragiten duen faktorea. Ohantzearen altuera handitzean iturkuntzarako abiadura minimoa handitu egiten da kontaktorean solido kopuru handiagoa dagoelako, eta ondorioz beharrezkoa den airearen abiadura handiagoa da.

Bestalde, bigarren faktore esanguratsuena irekiduradun hodiaren irekidura portzentaia da. 3.24.b Irudian azaltzen den bezala, irekidura portzentaia handitzean iturkuntzarako abiadura minimoaren balioa handiagoa da. Izan ere, irekidura portzentaia txikitzean eraztungune-iturgune interfasea txikiagoa da, hau da, eraztungunetik jaisten ari diren solidoak azalera txikiagoa dute iturgunera sartzeko. Hori dela eta, iturguneari dagoen solido kantitatea txikiagoa da, edo beste era batera esanda, iturgunea diluituagoa da. Hori dela eta, iturri egonkorra lortzeko beharrezkoa den aire abiadura txikiagoa da.

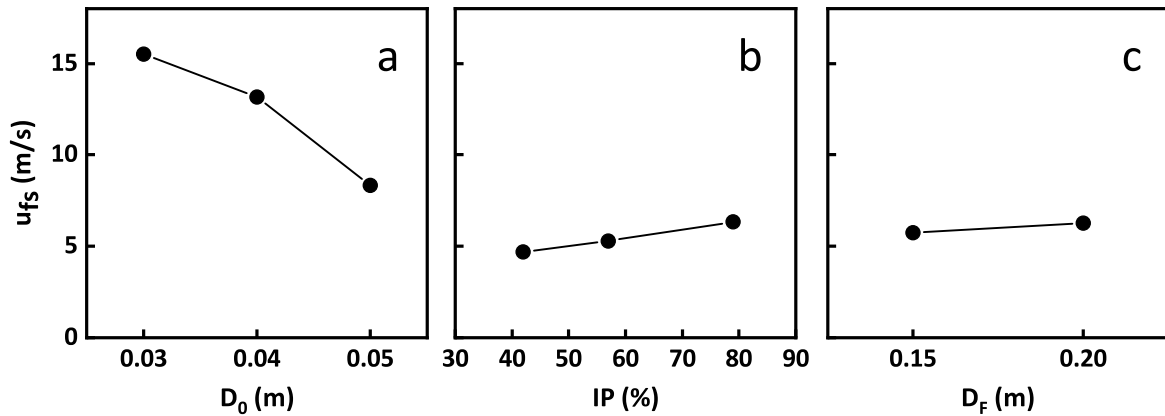
Azkenik, iturkuntzarako abiadura minimoan gehien eragiten duen hirugarren faktorea kontaktorearen angelua da. 3.24.c Irudian azaltzen den bezala, kontaktorearen angelua handitzean iturkuntzarako abiadura minimoa txikiagoa da. 3.17.c Irudian arrazoitu den bezala, kontaktorearen angelua handitzean paretek ohantzearengan egiten duten sostengua handiagoa da eta partikulen grabitazio indarra txikiagoa, iturri egonkorra mantentzeko beharrezkoa den airearen abiadura ere txikiagoa delarik.

Erabateko iturkuntzarako abiadura, u_{fs}

Zerrautsa erabiliz erabateko iturkuntzarako abiaduran gehien eragiten duten faktoreak hurrengoak dira: airearen sarrerako diametroa, irekiduradun hodiaren irekidura portzentaia eta iturri bilgailuaren diametroa.

3.25. Irudian erakusten dira aipaturiko faktoreek erabateko iturkuntzarako abiaduran eragiten duten aldaketak.

Harearekin bezala, zerrautsa erabiliz erabateko iturkuntzarako abiaduran gehien eragiten duen faktorea airearen sarrerako diametroa da. Gainera, 3.25. Irudia aztertzen bada argi ikus daiteke airearen sarrerako diametroaren eragina beste biena baino askoz garrantzitsuagoa dela, izan ere, 3.25.a Irudiko joeraren malda beste biena baino handiagoa da. Grafikari erreparatuz, sarrerako diametroa handitzean erabateko iturkuntzarako abiadura txikiagoa da. Eragin honen arrazoia 3.23.a Irudian azaldu denaren berdintsua da.



3.25. Irudia. (a) Airearen sarrerako diametroak, (b) erdiko hodiaren irekidura portzentaiak eta (c) iturri bilgailuaren diametroak erabateko iturkuntzarako abiadura sortzen duten aldaketa.

Bestalde, 3.25.b Irudian azaltzen den bezala, erdiko hodiaren irekidura portzentaia da bigarren eragin esanguratsuena. Irekidura portzentaia handitzean erabateko iturkuntzarako abiadura handitu egiten da. Joera hau iturkuntzarako abiadura minimoarekin (3.24.b Irudia) lorturikoarekin erlazionatua dago, hau da, irekidura portzentaia txikitzean partikula kantitate txikiagoa sartzen da iturgunera. Hori dela eta, aireak abiadura txikiagoa behar du iturgunea definitzeko eta iturri indartsua lortzeko.

Azkenik, iturri bilgailuaren diametroa da erabateko iturkuntzarako abiadura gehien eragiten duen hirugarren faktorea. 3.25.c Irudian erakusten den bezala, iturri bilgailuaren diametroa handitzean erabateko iturkuntzarako abiadura handiagoa da. Kasu honetan, zerrautsak dentsitate oso txikia izateagatik sortzen den iturria oso altua eta estua da, eta beraz diametro txikiagoko bilgailuak hobeto biltzen du iturria. Izan ere, bilgailuaren diametroa handitzean iturria ez da geldi mantentzen eta bilgailuaren barnean mugitzen da, iturgunearen definizioa zailduz.

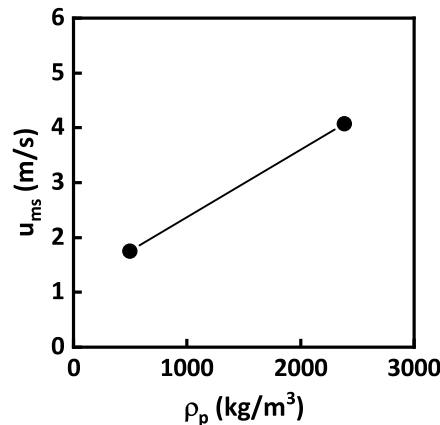
Harea-Zerrautsa nahasketa

Hodirik gabeko sistemetan egin den bezala, solidoaren dentsitatearen eragina garrantzitsua den edo ez jakiteko irekiduradun hodia erabiliz burutu diren saiakuntza guztien emaitzekin azterketa estatistikoa burutu da.

3.14. Taulan erakusten den bezala, iturkuntzarako abiadura minimoan eta erabateko iturkuntzarako abiadura hainbat faktore eta elkarrekintza esanguratsu lortu dira, baina bietan esanguratsuena solidoaren dentsitatea izan da. Solidoaren dentsitateaz gain beste hainbat faktore atera dira esanguratsu bi parametro hidrodinamikoetan, baina hauen eragina dagoeneko aztertuta izan denez, solidoaren dentsitatearen eragina baino ez da aztertuko atal honetan.

Iturkuntzarako abiadura minimoa, u_{ms}

Esan bezala, irekiduradun hodidun sistemetan azterketa estatistiko bateratuan faktore esanguratsuen solidoaren dentsitatea da, eta 3.26. Irudian erakusten da honek iturkuntzarako abiadura minimoan eragiten duen aldaketa.



3.26. Irudia. Solidoaren dentsitateak iturkuntzarako abiadura minimoan sortzen duen aldaketa.

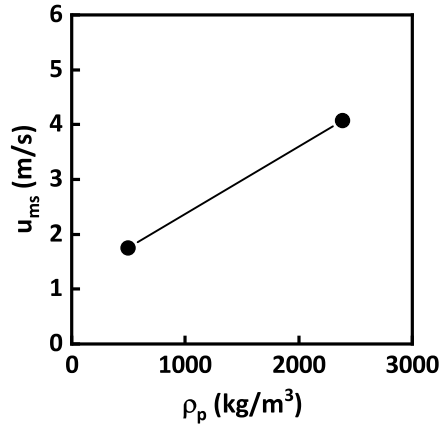
Hodirik gabeko sistemetan ikusi den bezala, solidoaren dentsitatea handitzean iturkuntzarako abiadura minimoa handitu egiten da. Izan ere, solidoaren dentsitatea handitzeak partikula indibidualen masa handitzea dakar, eta honek iturri egonkorra mantentzeko airearen abiadura handiagoren beharra sortzen du.

Erabateko iturkuntzarako abiadura, u_{fs}

3.27. Irudian erakusten da solidoaren dentsitateak erabateko iturkuntzarako abiaduran duen eragina.

3.27. Irudian erakusten den bezala, solidoaren dentsitatea handitzean erabateko iturkuntzarako abiadura handitu egiten da. Izan ere, iturgunean aurkitzen diren solidoen masa handiagoa da solidoaren dentsitatea handitzean eta hauek grabitazio indar handiago sortzen dute. Hortaz, airearen abiadurak handiagoa izan behar du kontaktorean iturgunea guztiz definitzeko eta iturri indartsua lortzeko.

Aurretik aipatu bezala, irekiduradun hodiak erabiliz sistema oso egonkorrak lortzen dira eta asko zabaltzen dute operazio tartea. Gainera, sistema askotan ez da lortu egoera ezegonkorrik laborategiko ekipoak baimentzen duen lan tarte guztian. Hortaz, sistema askotan ezin izan dira burbuilazko iturkuntzarako abiadurak lortu eta lortutakoak ez dira nahikoa izan azterketa estatistikoan faktore esanguratsuak lortzeko. Hori dela eta, honekin bukatzen da irekiduradun hodie dagokien atala.



3.27. Irudia. Solidoaren dentsitateak erabateko iturkuntzarako abiadura sortzen dituen aldaketak.

3.3.5.3 Hodi ez-porotsuak

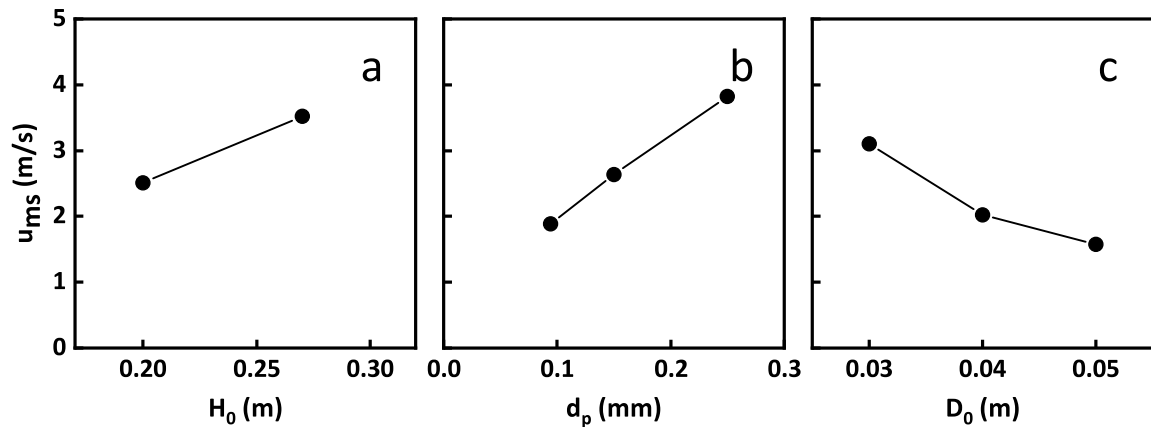
Aurreko bi konfigurazioekin bezala, hodi ez-porotsuak erabiliz lorturiko emaitzekin azterketa estatistikoa egin da solido mota bakoitzerako eta emaitza guztiak bateratuta. Gogorazi behar da kasu honetan hodi ez-porotsuekin lortzen den iturri ohantze erregimena aurrekoen ezberdina dela, hau da, oso erregimen egonkorra lortzen da, baina iturri oso altu eta diluituarekin. Aurretik aipatu bezala, hodi ez-porotsuekin erabateko iturkuntzarako abiadura ia minimoaren berdina da, izan ere, solido kantitate txikia sartzen baita iturgunera. Bestalde, aipatu bezala, ez da erregimen ezegonkorrik lortzen eta uneoro iturkuntza erregimenak dirau, hortaz, burbuilazko iturkuntzarako abiadurarik ez da lortzen. Hala ere, 3.4. Irudian azaldu den bezala, airearen abiadura zehatz batetik aurrera presio galera handitzen hasten da eta hau sistemaren araberakoa da. Beraz, hodi ez-porotsuekin lortzen diren parametro hidrodinamikoak hurrengoak dira: iturkuntzarako abiadura minimoa (u_{ms}) eta iturri-jariorako abiadura minimoa (u_{sf}). Jarraian bi parametro hauen gain eragin handiena duten faktoreen eragina aztertuko da.

Harea

Iturkuntzarako abiadura minimoa, u_{ms}

3.15. Taula aztertuz, faktore eta elkarrekintza askok eragiten dute iturkuntzarako abiadura minimoan. Hala ere, esanguratsuenak ohantzearen altuera, partikula tamaina eta airearen sarrerako abiadura dira.

3.28. Irudian erakusten da ohantzearen altuerak, partikula tamainak eta airearen sarrerako diametroak iturkuntzarako abiadura minimoan duten eragina.



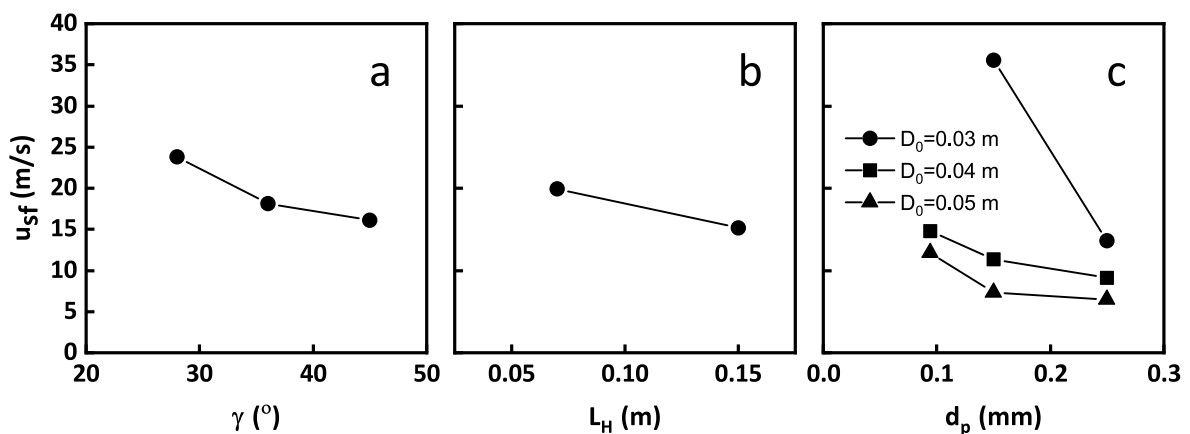
3.28. Irudia. (a) Ohantzearen altuerak, (b) partikula tamainak eta (c) airearen sarrerako diametroak iturkuntzarako abiadura minimoan sortzen duten aldaketak.

3.28.a Irudian erakusten den bezala, iturkuntzarako abiadura minimoan gehien eragiten duen faktorea ohantzearen altuera da. Hodi ez-porotsuetan lortu diren faktore esanguratsuenak irekidura hodiekin lortu diren berdina dira eta 3.22. Irudirako azaldu diren joerak eta arrazoiak 3.28. Irudirako ere baliogarriak dira.

Iturri-jariorako abiadura minimoa, u_{sf}

Iturri-jariorako abaiduran gehien eragiten duten faktoreak hurrengoak izan dira: kontaktorearen angelua, erdiko hodiaren hanken luzera, eta airearen sarrerako diametroaren eta partikula tamainaren arteko elkarrekintza.

3.29. Irudian erakusten dira aipatutako faktore eta elkarrekintzak iturri-jariorako abaiduran eragiten duten aldaketa.



3.29. Irudia. (a) Kontaktorearen angeluak, (b) erdiko hodiaren hanken altuerak eta (c) partikula tamainaren eta airearen sarrerako diametroaren arteko elkarrekintzak iturri-jariorako abaiduran sortzen duten aldaketa.

3.29.a Irudian erakusten den bezala, kontaktorearen angelua da iturri-jariorako abiadura minimoan gehien eragiten duen faktorea. Angeluaren balioa handitzean iturri-jariorako behar den abiadura minimoa txikiagoa da. Izan ere, angelua handitzean gune konikoaren pareten malda txikiagoa da eta eraztunguneko partikulek euskarri handiagoa dute. Beraz, partikulek presio galera txikiagoa eragiten dute airearengan eta honek abiadura txikiagoa behar du eraztungunea zeharkatzeko.

Bestalde, iturri-jariorako abiadura minimoan gehien eragiten duen bigarren faktorea erdiko hodiaren hanken luzera da. 3.29.b Irudian ikus daitekeen bezala, hanken luzera handitzean iturri-jariorako behar den abiadura txikiagoa da. Honen arrazoiak eraztungune-iturgune interfasean dago, hau da, hanken luzera txikietarako hodiak eusten dio solidoari. Beste era batera azalduta, hanken luzera handitzean airearen frakzio bat lehenago hasten da ohandze zeharkatzen.

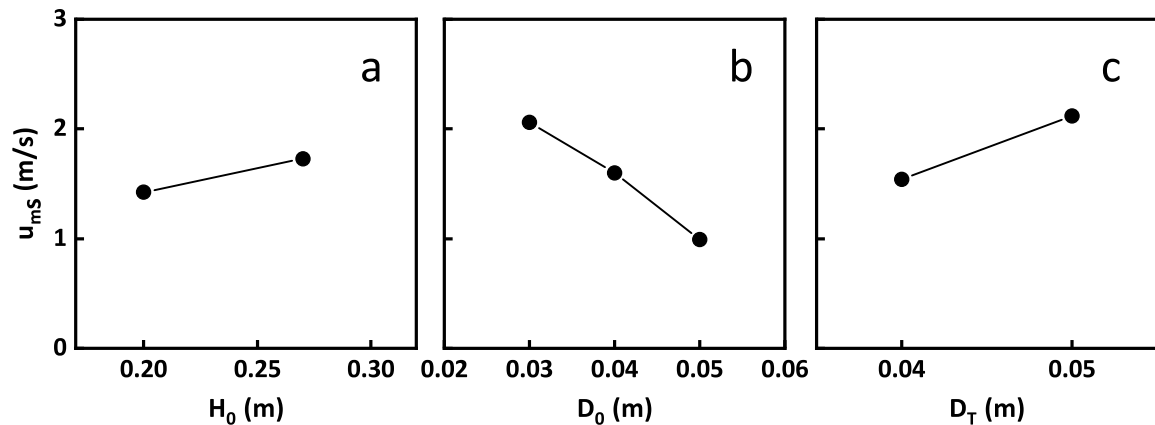
Azkenik, airearen sarrerako diametroaren eta partikula tamainaren arteko elkarrekintza da azken faktore esanguratsua. 3.29.c Irudian erakusten den bezala, partikula tamaina txikiagoa erabiltzean eta sarrerako diametroa handiago iturri-jariorako behar den abiadura txikiagoa da, hala ere, eragina nabarmenagoa da sarrerako diametroa txikiagoa denean. Partikula tamaina handitzean airea erraztasun handiagorekin barneratzen da eraztungunean zehar (permeabilitatea handiagoa). Bestalde, sarrerako diametroa txikitzean aire abiadura handiak behar dira iturgunea zabaldu eta burbuilak sortzeko eraztungunean zehar.

Zerrautsa

Iturkuntzarako abiadura minimoa, u_{ms}

3.14. Taulan erakutsi den bezala, zerrautsa erabiliz iturkuntzarako abiadura minimoan gehien eragiten duten faktoreak hurrengoak dira: ohandzearen altuera, airearen sarrerako diametroa eta erdiko hodiaren diametroa.

3.30. Irudian erakusten dira aipaturiko faktoreek iturkuntzarako abiadura minimoan eragiten duten aldaketak.



3.30. Irudia. (a) Ohantzearen altuerak, (b) airearen sarrerako diametroak eta (c) erdiko hodiaren diametroak iturkuntzarako abiadura minimoan sortzen duten aldaketak.

3.30.a Irudia eta 3.14. Taula kontuan hartuz, zerrautsa erabiliz iturkuntzarako abiadura minimoan gehien eragiten duen faktorea ohantzearen altuera da. Harearen kasuan ere ohantzearen altuera izan da parametro hidrodinamiko honetan gehien eragiten duen faktorea. 3.22.a Irudian aipatu diren joera eta arrazoi berdintsuak dira baliogarri kasu honetarako ere.

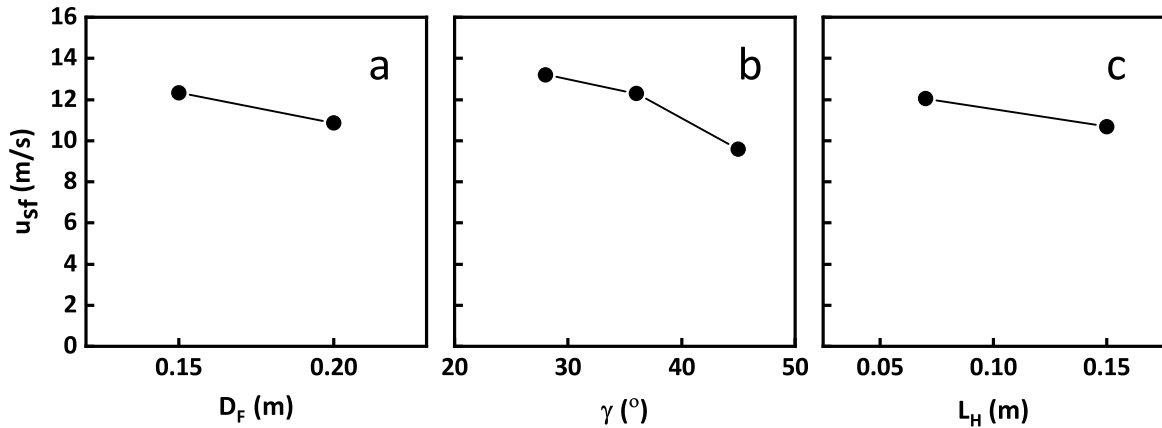
Bestalde, iturkuntzarako abiadura minimoan gehien eragiten duen bigarren faktorea airearen sarrerako diametroa da. 3.30.b Irudian erakusten da iturkuntzarako behar den abiadura minimoa txikiagoa dela sarrerako diametro handiagoetarako. Joera berdina lortu da 3.22.c Irudian eta bertan azaldu den arrazoia baliogarri da kasu honetarako ere.

Azkenik, 3.30.c Irudian azaltzen den bezala, erdiko hodi ez-porotsuaren diametroa da iturkuntzarako abiadura minimoan gehien eragiten duen hirugarren faktorea. Kasu honetan, hodiaren diametroa handitzean, iturkuntzarako behar den abiadura minimoa handiagoa da, izan ere, erdiko hodiak jasaten baitu ohantzearen presio gehiena. Hortaz, erdiko hodiaren diametroa handitzean eraztungunetik solido gehiago sartzen da iturgunera eta iturri egonkorra lortzeko beharko den aire abiadura handiagoa izango da.

Iturri-jariorako abiadura minimoa, u_{sf}

3.14. Taulari erreparatuz, zerrautsa erabili den sistemetan iturri-jariorako abiadura minimoan gehien eragiten duten faktoreak iturri bilgailuaren diametroa, kontaktorearen angelua eta erdiko hodiaren haken luzera dira.

3.31. Irudian erakusten da aipaturiko faktoreen eragina iturri-jariorako abiadura minimoan.



3.31. Irudia. (a) Iturri bilgailuaren diametroak, (b) kontaktorearen angeluak eta (c) erdiko hodiaren hanken luzerak iturri-jariorako abiadura sortzen duten aldaketa.

3.31.a Irudia eta 3.14. Taula kontuan izanez, iturri-jariorako abiadura minimoan gehien eragiten duen faktorea iturri bilgailuaren diametroa da. iturri-jariorako behar den abiadura minimoa txikiagoa da iturri bilgailuaren diametroa handiagoa denean.

Bestalde, hurrengo faktore esanguratsuak kontaktorearen angelua eta erdiko hodiaren hanken luzera dira. Harea erabiliz lorturiko faktore esanguratsuenen artean berdinak atera dira (3.29.a eta 3.29.b Irudiak). Hortaz, joera hauen azalpenak harearen kasuan aipaturiko berdinak dira.

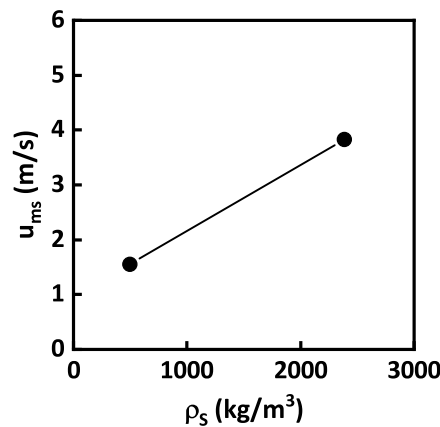
Harea-zerrautsa nahastea

Aurreko konfigurazioetan bezala, hodi ez-porotsuak erabiliz lorturiko emaitzen azterketa estatistiko bateratua egin da. Bai iturkuntzarako abiadura minimoan zein iturri-jariorako abiadura minimoan eragina duten faktore eta elkarrekintza ugari atera dira, baina hauen artean esanguratsuenetakoa solidoaren dentsitatea da. Hortaz, jarraian faktore honek parametro hidrodinamiko ezberdinetan duen eragina aztertuko da.

Iturkuntzarako abiadura minimoa, u_{ms}

3.14. Taula aztertzen bada, agerian geratzen da solidoaren dentsitatea dela iturkuntzarako abiadura minimoan gehien eragiten duen faktorea. Hala ere, honen ostean ohandzearen altuera eta partikula tamaina dira faktore esanguratsuenak. Azken bi hauek dagoeneko harearen kasuan aztertu dira (3.28.a eta 3.28.b Irudiak) eta lorturiko joerak berdinak dira. Hortaz, solidoaren dentsitateak iturkuntzarako abiadura minimoan duen eragina aztertuko da.

3.32. Irudian erakusten da aipaturiko faktoreak iturkuntzarako abiadura minimoan eragiten duen aldaketa.



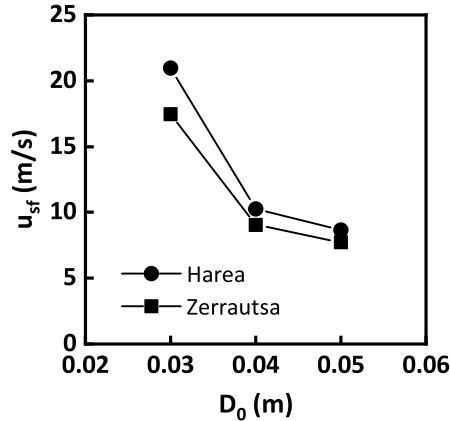
3.32. Irudia. Solidoaren dentsitateak iturkuntzarako abiadura minimoan sortzen duen aldaketa.

3.32. Irudian erakusten den bezala, kasu honetan ere iturkuntzarako behar den abiadura minimoa handiagoa da solidoaren dentsitatea handiagoa denean. Hodirik gabeko (3.20. Irudia) eta irekiduradun hodian (3.26. Irudia) kasuetan joera berdina lortu da, izan ere, kasu guztietan solidoaren dentsitatea handitzean partikularen masa handiagoa da eta iturri egonkorra mantentzeko behar den airearen abiadura handiagoa da.

Iturri-jariorako abiadura minimoa, u_{sf}

Azkenik, iturri-jariorako abiadura minimoan ere faktore eta elkarrekintza esanguratsu ugari lortu dira eta kasu honetan solidoaren dentsitatearen eta airearen sarrerako diametroaren elkarrekintzan atera da esanguratsu bezala. Bestalde, elkarrekintza honekin batera airearen sarrerako diametroaren eta partikula tamainaren arteko elkarrekintza eta kontaktorearen angelua ere izan dira faktore esanguratsuak. Hala ere, hauek harearen kasuan aztertu direnez (3.29. Irudia) solidoaren dentsitatearen elkarrekintzaren eragina baino ez da aztertuko hemen.

3.33. Irudian erakusten da airearen sarrerako diametroaren eta solido dentsitatearen arteko elkarrekintzaren eragina.



3.33. Irudia. Solidoaren dentsitatearen eta airearen sarrerako diametroaren arteko elkarrekintzak iturri-jariorako abiadura minimoan sortzen duen aldaketa.

3.33. Irudian erakusten den bezala, airearen sarrerako diametroa handiagoa denean eta solidoaren dentsitatea txikiagoa denean iturri-jariorako behar den abiadura txikiagoa da, baina eragin nabariena sarrerako diametroaren balio txikietan lortzen da. Izan ere, kasu honetan airearen abiadura handia behar da iturgunea hedatu eta airea eraztungunean barneratzeko. Gainera, harearen kasuan oraindik eta aire abiadura handiagoa behar da eraztungunearen presio galera gainditu eta eraztungunean barneratzeko.

3.3.6. Faktore esanguratsu komunak eragina parametro hidrodinamikoetan

Orain arte, 3. Kapituluaren zehar, konfigurazio mota bakoitzari dagozkion sistemen faktore ezberdinek parametro hidrodinamikoetan (iturkuntzarako abiadura minimoa, erabateko iturkuntzarako abiadura, burbuilazko iturkuntzarako abiadura eta iturri-jariorako abiadura minimoa) duten eragina ikertu da. Buruturiko azterketak konfigurazio mota bakoitzerako egin dira, hau da, hoderik gabe, irekiduradun hodia eta hodi ez porotsuarekin lorturiko emaitzak modu independentean aztertu dira. Hala ere, 3.16. Taulan ikusten den bezala, konfigurazio batetik bestera aldaketa garrantzitsuak gertatzen dira parametro hidrodinamiko ezberdinetan, erdiko hodian erabilerak iturri ohantzeen erregimenean eragin handia baitu. Hortaz, atal honen helburua orain arte buruturiko ikerketa guztiak bateratu eta konfigurazio ezberdinen arteko konparaketa egitea da. Modu honetan, konfigurazio ezberdinak erabiliz, hau da, hoderik gabe, irekiduradun hodiak edota hodi ez-porotsuak erabiliz, iturkuntzarako abiadura minimoan, erabateko iturkuntzarako abiaduran eta burbuilazko iturkuntzarako abiaduran sortzen diren aldaketak aztertuko dira atal honetan. Aipagarria da iturri-jariorako abiadura minimoa ez dela ikertuko, hodi ez-porotsudun sistemetan baino ez baita lortzen.

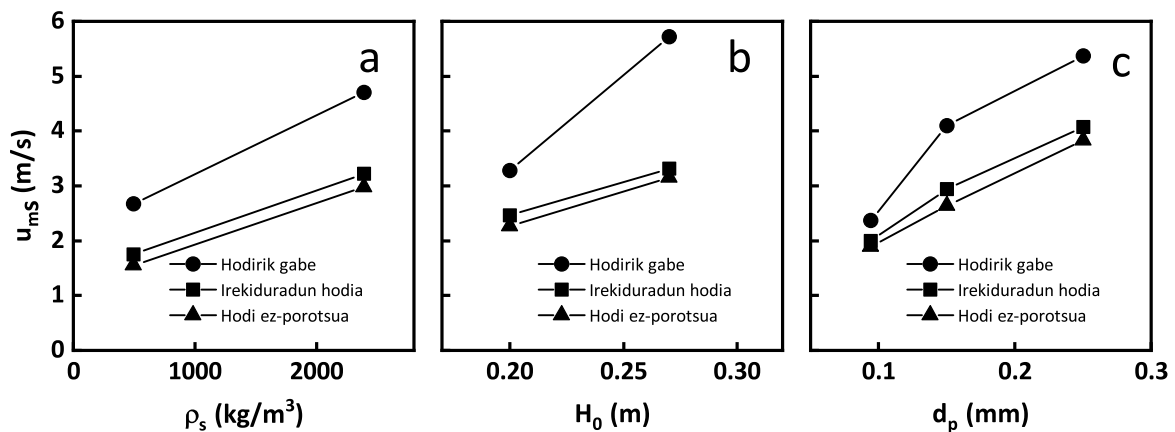
Beraz, konfigurazio bakoitzerako faktore esanguratsuenak indibidualki aztertu ostean, hiru konfigurazioen azterketa bateratua burutuko da. Horretarako, 3.13., 3.14. eta 3.15. Tauletan oinarrituz, konfigurazio guztietan agertzen den parametro hidrodinamikoetan eragina duten faktoreak aztertuko dira.

Bestalde, 3.16. Taulan azaltzen den bezala, erdiko hodi motaren edo konfigurazioaren eragina ere oso garrantzitsua da neurturiko parametro hidrodinamikoetan. Eragin hauek aztertzeko, faktore esanguratsuenak albo batera utzi eta erdiko hodi ezberdina duten konfigurazio bakoitzerako ikerturiko parametro hidrodinamiko bazebesteko balioak kalkulatu eta irudikatuko dira. Modu honetan, konfigurazio batetik bestera parametro hidrodinamiko bakoitza zenbat aldatzen den aztertu ahal izan da.

3.3.6.1 Iturkuntzarako abiadura minimoa

3.3.4 Ataleko 3.13., 3.14. eta 3.15. Taulak aztertzen badira, iturkuntzarako abiadura minimoaren kasuan gehien eragiten duten faktoreak solidoaren dentsitatea (ρ_s), ohandze estatikoaren altuera (H_0) eta partikula tamaina dira (d_p). 3.34. Irudian erakusten da aipaturiko faktoreek iturkuntzarako abiadura minimoan eragiten dituzten aldaketak konfigurazio bakoitzerako.

3.34.a Irudian erakusten den bezala, solidoaren dentsitatea da iturkuntzarako abiadura minimoan gehien eragiten duen faktorea. Faktore hau handitzean iturkuntzarako abiadura minimoak nabarmen egiten du gora hiru kasuetan.



3.34. Irudia. (a) Solidoaren dentsitateak, (b) ohandzearen altuerak eta (c) partikula tamainak iturkuntzarako abiadura minimoan sortzen dituen aldaketak.

Konfigurazio ezberdinak aztertzen badira, argi ikusten da hodiak erabiltzean ezberdintasun nabaria dagoela hodirik gabeko sistemekin alderatuz. Izan ere, irekiduradun hodiaren eta hodi ez-porotsuen artean ez dago ezberdintasun handirik, baina hauek

hodirik gabeko sistemekin alderatuz balio askoz txikiagoak dituzte. Gainera, hodirik gabeko sistemetan solidoaren dentsitatea handitzean iturkuntzarako abiadura minimoak nabarmen egiten du gora (zuzenaren malda handiagoa da). Erdiko hodia erabiltzean sistema asko egonkortzen da, hodiak partzialki eusten baitu solidoen eragiten duten presioa. Hala ere, hodi ez-porotsuak dira ohantzea gehien eutsi eta partikulak iturgunera sartzeko azalera murrizten dutenak. Irekiduradun hodiaren kasuan aldiz, hodiaren altuera guztian zehar sartu ahal dira partikulak. Modu honetan, iturri dentsoagoa lortu ahal da, eta beharrezkoa izango da aire abiadura handiagoa sistema modu egonkorrean mantentzeko. Hori dela eta, irekiduradun sistemak beste bien tartekoak dira, irekiduradun portzentaia handitzean edo txikitzean sistema batera edo bestera hurbiltzen baita.

Ohantzearen altuerari dagokionez, 3.34.b Irudian ikus daiteke faktore honek iturkuntzarako abiadura minimoan duen eragina. Hiru konfigurazio ezberdinetan ondoriozta daiteke ohantzearen altuera handitzean iturkuntzarako abiadura minimoaren balioa handiago egiten dela. Bestalde, aurreko kasuan bezala, erdiko hodiaren balioak hodirik gabekoena baino txikiagoak dira, eta aldaketa handiagoa da hodirik gabeko kasuan. Joera hauen arrazoiak aurreko kasuan aipaturiko berdintsuak dira.

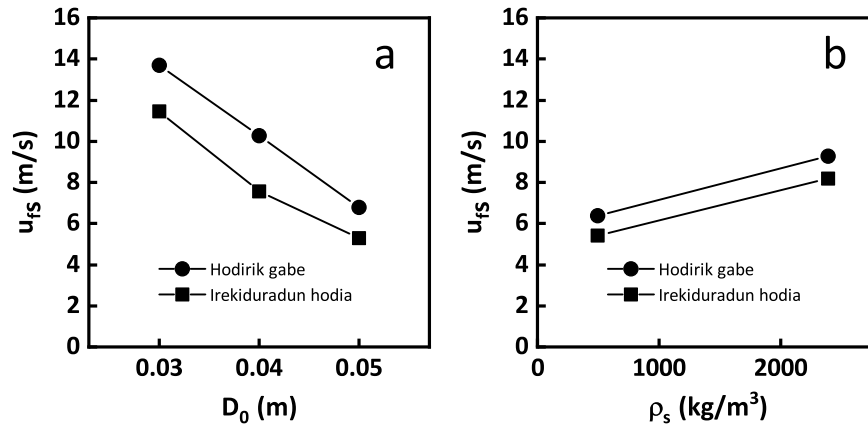
Azkenik, eragin nabarmena duen beste faktorea partikula tamaina da, 3.34.c Irudian erakusten den bezala. Kasu honetan, partikula tamaina handitzean iturkuntzarako abiadura minimoak gora egiten du. Kasu honetan ere, hodi ez-porotsuekin lortzen dira iturkuntzarako abiadura minimoaren balio txikienak, eta aldiz hodirik gabeko sistemekin handienak. Erdiko hodia erabiltzearen efektua ere oso nabarmena da, bi hodi ezberdinek iturkuntzarako abiadura minimoaren balio txikiagoak baitituzte hodirik gabeko sistemekin alderatuta. Hala ere, partikula tamaina txikitzean ezberdintasun hau txikituz doa, eta 0.093 mm -ko partikula tamaina erabiliz hiru konfigurazio ezberdinen arteko ezberdintasuna txikitu egiten da. Joera berdina ikusi zuten Alzibar et al.ek [23] partikula lodiekin lan egitean, hau da, solidoen partikula tamaina 4 mm -tatik 2 mm -tara txikitzean hiru konfigurazio ezberdinen iturkuntzarako abiadura minimoaren balioak gerturatu egiten direla.

3.3.6.2 Erabateko iturkuntzarako abiadura

Parametro hidrodinamiko hau eta dagokion erregimena hiru konfigurazio ezberdinetan mugatu ahal izan da, baina ez hodi ez-porotsudun sistemetako kasu guztietan. Hortaz, parametro honen azterketarako hodirik gabeko eta irekiduradun hodiaren sistemak erabiliko dira.

Hodirik gabeko kasuan (3.13. Taula), airearen sarrerako diametroa izan da

faktore esanguratsu bakarra eta irekiduradun hodian kasuan (3.14. Taula) ostera, aipaturiko faktoreaz gain solidoaren dentsitatea izan da esanguratsua. Hori dela eta, azken bi faktore hauen eragina bi konfigurazio ezberdinetan aztertuko da, 3.35. Irudian erakusten den bezala.



3.35. Irudia. (a) Airearen sarrerako diametroak eta (b) solidoaren dentsitateak erabateko iturkuntzarako abiadura sortzen dituen aldaketak.

3.35.a Irudian eta 3.13. zein 3.14. Taulan erakusten den bezala, erabateko iturkuntzarako abiadura gehien eragiten duen faktorea airearen sarrerako diametroa da. Honek zentzua dauka, izan ere, iturkuntza erregimenean airea burbuila forman igotzen da iturgunean zehar eta erabateko iturkuntzarako abiadura iturgunea definitzen den abiadurari dagokio. Beraz, iturgunearen diametroa eta iturgune-eraztungune interfasean gehien eragiten duen faktorea airearen sarrerako diametroa da, honek mugatzen baititu aipaturiko iturgunearen ezaugarriak. 3.35.a Irudian erakusten den bezala, bi konfigurazio ezberdinetan joera berdina lortzen da, hau da, sarrerako diametroa handitzean erabateko iturkuntzarako abiadurak behera egiten du. Irekiduradun hodiak erabiltzean erabateko iturkuntzarako abiaduraren balio txikiagoak lortzen dira, baina joera berdintsua da. Kasu honetan, irekiduradun hodian nerbioek ohantzearen zati bat eutsi egiten dute eta, ondorioz, erabateko iturkuntzarako behar den airearen abiadura txikiagoa da.

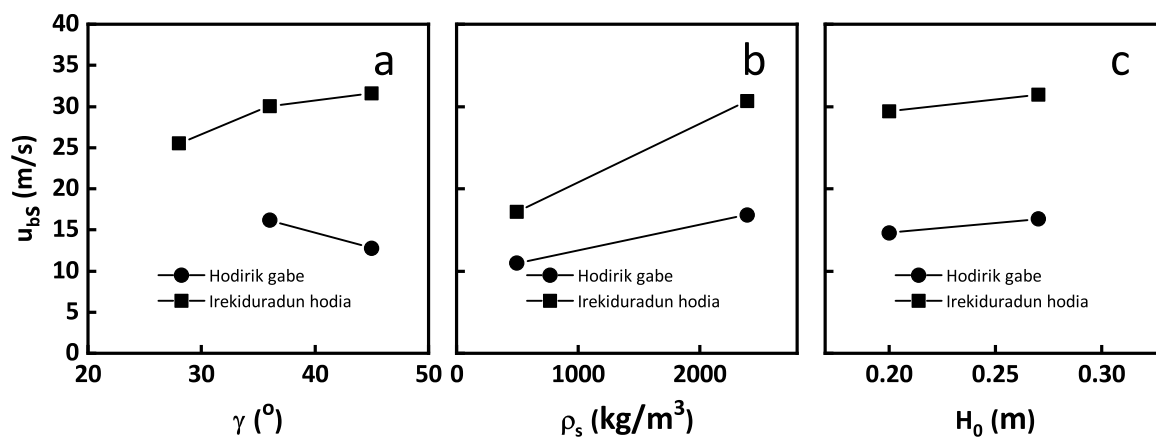
Bestalde, 3.35.b Irudian azaltzen den bezala, parametro hidrodinamiko honetan gehien eragiten duen hurrengo faktorea solidoaren dentsitatea da. Grafikan ikus daitekeenez, erabateko iturkuntzarako abiadurak gora egiten du solidoaren dentsitatea handitzean. Joera berdina lortu da iturkuntzarako abiadura minimoan (3.34.a Irudia), hau da, solidoaren dentsitatea handitzean partikularen masa handitu egiten da eta bai abiadura minimorako zein erabateko iturkuntzarako abiadurarako behar den abiadura. Kasu honetan ere, irekiduradun hodiak erabiliz erabateko iturkuntzarako abiaduraren balio txikiagoak lortzen dira.

3.3.6.3 Burbuilazko iturkuntzarako abiadura

Aipatu den bezala, iturri-jariorako abiadura minimoa hodi ez-porotsudun sistemetan soilik lortu denez, burbuilazko iturkuntzarako abiadura aztertu da. Beraz, hodirik gabeko eta irekiduradun hodiak erabiliz egindako sistemen emaitzak erabiliko dira azpiatal honetan.

Bestalde, azterketa estatistikoan %95eko konfiantza maila erabiliz irekiduradun hodiak erabili direnean ez da faktore esanguratsurik lortu (3.14. Taula). Hodirik gabeko sistemetan ordea (3.13. Taula), ia kasu gehienetan lortu dira faktore esanguratsua eta hurrengoak izan dira: kontaktorearen angelua, solidoaren dentsitatea eta ohanzearen altuera. Beraz, nahiz eta irekiduradun hodiaren sistemetan ez den faktore esanguratsurik lortu, aipaturiko hiru faktore esanguratsua bi konfigurazioetan aztertuko dira.

3.36. Irudian eta 3.13. Taulan erakusten den bezala, kontaktorearen angelua da burbuilazko iturkuntzarako abiaduran gehien eragiten duen faktorea. 3.36.a Irudian ikus daitezke bi konfigurazio ezberdinekin joera ezberdinak. Hodirik gabeko sistemetan angelua handitu ahala burbuilazko iturkuntzarako abiaduraren balioa txikitu egiten da, hau da, egoera ezegonkorra lehenago lortzen da. Izan ere, angelua handitzean kontaktorearen paretek eraztunguneko solidoa gehiago jasaten dute. Bestalde, erdiko hodia erabiltzen bada, honek airea ohanzearen erditik bideratzen laguntzen du eta eraztunguneari zehar sartzen den aire frakzioa txikiagoa da. Hori dela eta, airearen abiadura handiagoa beharko da egoera ezegonkorrera heltzeko. Bi konfigurazioak alderatzen bada, argi ikusten da hodirik gabeko sistemetan burbuilazko iturkuntzarako abiadurak behera egiten duela. Beraz, erdiko hodian erabilerak operazio tartea nabarmen zabal-tzen du.



3.36. Irudia. (a) Kontaktorearen angeluak, (b) solidoaren dentsitateak eta (c) ohanzearen altuerak burbuilazko iturkuntzarako abiaduran sortzen dituen aldaketak.

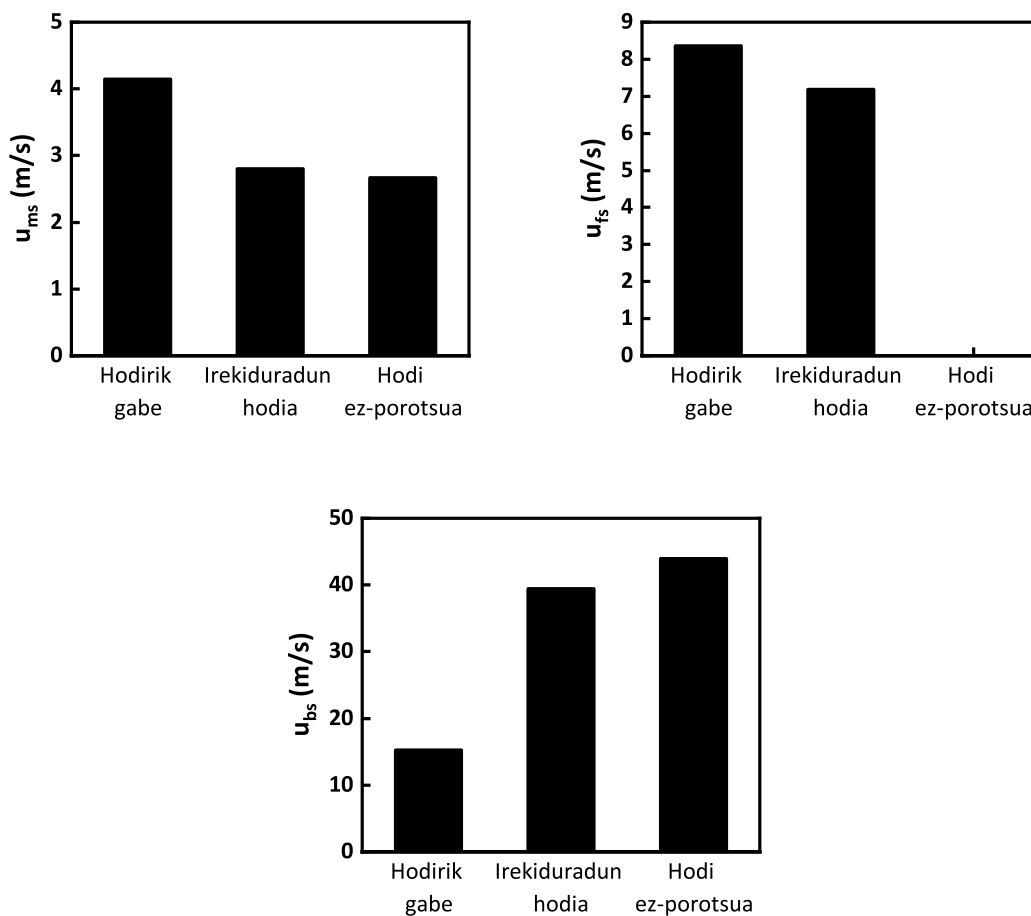
Aurreko parametro hidrodinamikoetan bezala, burbuilazko iturkuntzarako abiaduran ere solidoaren dentsitatea da faktore esanguratsua. 3.36.b Irudian ikus daitekeenez, solidoaren dentsitatea handitzeak burbuilazko iturkuntzarako abiaduraren balioa handitzea dakar. Izan ere, solidoaren dentsitatea handitzerakoan bai partikula eta bai ohantzearen masa handiagoa da. Hori dela eta, solidoaren dentsitatea handitzean aireak abiadura handiagoa behar du slugging efektua lortzeko. Bi konfigurazioek joera berdina dute, baina irekiduradun hodietan solidoaren dentsitatearen eragina nabarmenagoa da eta operazio tartea zabalagoa.

Azkenik, 3.36.c Irudian azaltzen den bezala, ohantzearen altuera da burbuilazko iturkuntzarako abiaduran gehien eragiten duen hirugarren faktorea. Kasu honetan, ohantzearen altuera handitzean burbuilazko iturkuntzarako abiaduraren balioa handiagoa da eta bi konfigurazioetan aldaketa proportzionala da. Bestalde, irekiduradun hodiak erabiltzean burbuilazko iturkuntzarako abiadura bikoiztu egiten da eta operazio tartea zabaldu egiten da.

3.3.7. Konfigurazio motaren eragina hidrodinamikan

3.3.6 Atalean hiru konfigurazio ezberdinetako faktore komun esanguratsuenen eragina aztertu da. Azpiatal honetan, konfigurazio mota bakoitzak parametro hidrodinamiko ezberdinetan duen eragina aztertuko da. Horretarako, erdiko hodi ezberdinez eta erdiko hodirik gabe osaturiko sistemen emaitza esperimentalei dagozkien parametro hidrodinamiko ezberdinen balioen batezbestekoak kalkulatu dira. Modu honetan, konfigurazio mota bakoitzak parametro hauetan sortzen dituen aldaketak aztertu ahal izango dira modu orokorrean.

3.37. Irudian erakusten dira hodirik gabe, irekiduradun hodia eta hodi ezporotsua duten sistemen batezbesteko iturkuntzarako abiadura minimoa, erabateko iturkuntzarako abiadura eta burbuilazko iturkuntzarako abiaduren balioen irudikapena.



3.37. Irudia. Konfigurazio ezberdinen batezbesteko (a) iturkuntzarako abiadura minimoa, (b) erabateko iturkuntzarako abiadura eta (c) burbuilazko iturkuntzarako abiadura.

3.37.a Irudian ikus daitekeenez, konfigurazio bakoitzarekin iturkuntzarako abiadura minimo ezberdinak lortzen dira iturri bilgailudun iturri ohantze konikoetan, baina ezberdintasun nabariena hodirik gabeko sistemen eta hodi ezberdineko sistemen artean dago. Joera hau bibliografian aurki daitezkeen hainbat ikertzaileen bidez frogatua dago [23, 172, 194, 220, 255, 308, 323, 340, 363, 364]. Hodi ez-porotsudun sistemak hodirik gabekoekin alderatuz, hodirik gabeko sistemen iturkuntzarako abiadura minimoaren balioa hodi ez-porotsudun sistemena baino 1.55 aldiz handiagoa da. Diferentzia hau ia ez da aldatzen (1.48 aldiz) erabiltzen den Erdiko hodia irekiduradun hodia den kasuan. Hodien arteko alderaketa egin ezkerrean, 3.37.a Irudia, bien artean ez dago ezberdintasun handirik, hala ere, irekiduradun hodiaren sistemen iturkuntzarako abiadura minimoaren balioa hodi ez-porotsudun sistemek dutena baino handiagoa da. Beraz, erabiltzen den Erdiko hodi motaren arabera iturkuntzarako abiadura minimoaren batezbesteko balio ezberdinak lortzen dira.

3.37.b Irudian berriz, erabateko iturkuntzarako abiadura balioetan ere konfigurazioen artean ezberdintasunak daudela ikus daiteke. Joera iturkuntzarako abiadura minimoan ikusitakoaren antzekoa da, baina ezberdintasun txikiagoa da. Hodirik gabeko sistemetan, abiaduraren balio handiagoa behar da iturgunea definitzeko, izan ere, solido kopuru handiagoa dago zirkulazioan eta erregimena egonkor mantentzeko behar den aire abiadura handiagoa da. Irekidurarun hodiak erabiltzean oster, momentu oro zirkulatzen ari den solido kopurua hodorik gabeko sistemetan baino txikiagoa da eta, ondorioz, behar den airearen abiadura txikiagoa.

Azkenik, 3.37.c Irudian ikus daiteke burbuilazko iturkuntzarako abiaduraren balioetan ere ezberdintasunak daudela konfigurazio ezberdinen artean. Izan ere, irekiduradun hodiak erabiliz, burbuilazko iturkuntzarako abiadura hodorik gabekoen bikoitza da. Aurretik aipatu den bezala, erdiko hodiak erabiliz, airea iturgunean zehar bideratzen da.

3.4. KORRELAZIO HIDRODINAMIKOAK

Lan honen aurreko ataletan, iturri bilgailudun iturri ohandze konikoen konfigurazio ezberdinen kurba karakteristikoak eta bakoitzari dagozkion parametro hidrodinamiko edo puntu karakteristikoak neurtu dira. Gainera, behin puntu hauek identifikatuta, analisi estatistikoa burutu da gehien eragiten duten faktore zein elkarrekin zeintzuk diren jakiteko. Azkenik, faktore hauek parametro hidrodinamikoetan eragiten duten aldaketak aztertu dira.

Hala ere, aipatu behar da lan guzti honen helburu nagusietako bat korrelazio hidrodinamikoaren eraikuntza dela, hau da, operazio baldintza egonkorretan parametro hidrodinamiko bakoitza kalkulatzeko korrelazio hidrodinamikoak proposatzea. Izan ere, iturri ohandzeak prozesu eta operazio ezberdinetan aplikatu ahal izateko beharrezkoak dira parametro hidrodinamikoak kalkulatzeko ahalbidetuko dizkiguten korrelazio enpirikoak lortzea.

Sarrerako atalean aipatu bezala, gaur egun geometria ezberdineko hainbat iturri ohandze aurki daitezke bibliografian eta ezberdintasun nabariak dituzte elkarren artean. Iturri bilgailudun iturri ohandzeen hidrodinamikak ezberdintasun garrantzitsuak ditu ohiko iturri ohandze [234] zein iturri ohandze konikoekin alderatuz [261], baita partikula finak erabiltzen dituzten iturri ohandze konikoekin ere [23]. Honen frogar nagusia bibliografian aurki daitezkeen parametro hidrodinamikoaren kalkulurako garatutako korrelazio hidrodinamikoak dira.

Orain arte, gure ikerketa taldean besteak beste ohiko iturri ohandzeen eta gehien bat iturri ohandze konikoen azterketa hidrodinamiko egin da ingurugiro baldintzetan. 32 urtean zehar hainbat solido ezberdin erabili dira (beirazko bolak, harea, ilar beltz haziak, ogi arrailatua, babarrunak, arroza, garbantzuak, dilistak, zeramikazko solidoak, poliestireno hedatua, poliestireno estrumentua, egur kuboak eta beste hainbat biomasa ezberdin) eta ingurugiro baldintzetan buruturiko saiakuntzen emaitzak erabiliz hainbat korrelazio hidrodinamiko ezberdin eraiki dira [23, 261, 262, 265, 323, 326, 330, 340]. Bestalde, ingurugiro tenperatura eta presioak ez diren beste baldintzetan ere egin dira ikerketak [223, 280]. Aurrerago ikusiko den bezala, orain arteko lan guzti hauetan ez da iturri bilgailua erabili, eta gehienetan erabili diren solidoak tamaina handikoak ($d_p > 1\text{ mm}$) izan dira eta, hortaz, tesi honetan lortu diren emaitzetarako ez dira baliagarriak.

Lan honetan aztertu diren parametro hidrodinamikoak lau izan dira: iturkuntzarako abiadura minimoa, erabateko iturkuntzarako abiadura, burbuilazko iturkuntzarako abiadura eta iturri-jariorako abiadura minimoa. Hauetatik garrantzitsue-

nak iturkuntzarako abiadura minimoa eta burbuilazko iturkuntzarako abiadura dira, sistema konkretuaren operazio tartea mugatzen baitute. Bestalde, erabateko iturkuntzarako abiaduraren bidez sistemaren operazio indartsua zein abiaduratan lortzen den jakin daiteke. Azkenik, iturri-jariorako abiaduraren bidez hodi ez-porotsudun sistemetan presio galera igotzen hasten den abiadura jakin daiteke, baina honek ez du eraginik sistemaren egonkortasunean. Beraz, erabateko iturkuntzarako eta iturri-jariorako ez da korrelaziorik eraiki, ez baitute interes handirik sistemaren egonkortasunean. Bestalde, burbuilazko iturkuntza ezegonkorra da, hau da, hodirik gabeko eta irekiduradun hodi-dun zenbait sistematan gertatzen da. Hori dela eta, ezin izan da burbuilazko iturkuntzarako abiaduraren korrelaziorik eraiki.

Beraz, iturkuntzarako abiadura minimoaren korrelazioa eraiki da soilik, izan ere, parametro hidrodinamiko hau hiru konfigurazio ezberdinetan neurtzen da eta gainera, garrantzi handikoa da. Jarraian, iturri ohantzeen diseinurako garrantzitsua den iturkuntzarako abiadura minimoa aztertuko da.

3.4.1. Iturkuntzarako abiadura minimoa

Aipatu bezala, iturkuntzarako abiadura minimoaren balioa jakitea oso garrantzitsua da, izan ere, oinarritzko ezaugarria da iturri ohantze erregimena lortzeko beharrezkoa den airearen abiadura minimoa mugatzeko eta prozesuen baldintzak finkatzeko. Bestalde, erabiltzen den airearen abiadurak airearen egoitza denbora eta partikulen abiadura (edota erregimenaren zurrumbilotasuna) baldintzatzen du, eta honek ohantzearen masari dagokion balio minimoa baino handiagoa izan behar du uneoro.

Iturkuntzarako abiadura minimoaren balioa hainbat faktoreren arabera da, hala nola, erabiltzen den solido eta jariakinaren propietateak, kontaktorearen angeluaren eta barnean sartzen diren gailuen (erdiko hodiak eta iturri bilgailuak) geometria. Beraz, bibliografian ez da aurkitu hau guztia bateraturik kontuan hartzen duen korrelazio hidrodinamikorik. Bibliografian aurki daitezkeen korrelazioak erabilitako iturri ohantze eta erdiko hodi motaren arabera sailkatzen dira. 3.17. Taulan aurki daitezke laburbildurik ohiko iturri ohantzeak erabiliz proposatu diren korrelazioak. Korrelazio guzti hauei dagozkien emaitza esperimentalak ingurugiro tenperatura eta presioan neurtuak dira.

Jakina da tesi honetan iturri ohantze konikoak erabili direna, baina iturri bilgailuekin lorturiko erregimenak ezberdinak dira eta sistema aire abiaduraren balio txikiagoekin egonkortzea lortzen da. Hala ere, bibliografian aurki daitezkeen iturri ohantzeen korrelazioak erabili dira hasierako abiapuntu gisa. Jarraian, ohiko iturri

ohantzeen korrelazio hauek aztertuko dira.

3.17. Taula. Ohiko iturri ohantzeen iturkuntzarako abiadura minimoaren kalkulurako bibliografian aurki daitezkeen korrelazioak.

Autorea eta urtea	Korrelazioa
Mathur eta Gishler (1955)	$u_{ms} = \left(\frac{d_p}{D_C} \right) \left(\frac{D_0}{D_C} \right)^{1/3} \frac{\sqrt{2gH_0(\rho_s - \rho_g)}}{\rho_g} \quad (3.8)$
Madonna eta Lama (1958)	$u_{ms} = k(1 - \epsilon) \left(\frac{D_0}{D_C} \right)^2 \frac{\sqrt{2gH_0(\rho_s - \rho_g)}}{\rho_g} \quad (3.9)$
Smith eta Reddy (1964)	$u_{ms} = \left(\frac{d_p(0.905 - 152D_0^2)}{(2H_0)} \right)^{3.52D_0} \frac{\sqrt{2gH_0(\rho_s - \rho_g)}}{\rho_g} \quad (3.10)$
Ghosh (1965)	$u_{ms} = k \left(\frac{d_p}{D_C} \right) \left(\frac{D_0}{D_C} \right)^2 \frac{\sqrt{2gH_0(\rho_s - \rho_g)}}{\rho_g} \quad (3.11)$
Abdelrazek (1969)	$u_{ms} = \frac{1}{1.74} \left[\left(\frac{d_p}{D_C} \right) (D_0/D_C) \left(\frac{D_0}{D_C} \right)^{1/3} \frac{\sqrt{2gH_0(\rho_s - \rho_g)}}{\rho_g} \right] \quad (3.12)$
Brunello et al. (1974)	$u_{ms} = 0.0143D_0^{0.741} H_0^{0.592} \frac{\sqrt{2gH_0(\rho_s - \rho_g)}}{\rho_g} \quad (3.13)$
Uemaki (1983)	$u_{ms} = 0.977 \left(\frac{d_p}{D_C} \right)^{0.615} \left(\frac{D_0}{D_C} \right)^{0.274} \frac{2gH_0(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} \quad (3.14)$

3.17. Taula. Jarraipena.

Autorea eta urtea	Korrelazioa
Fane eta Mitchell (1984)	$u_{ms} = 2D_C^{1-e^{(-7D_C^2)}} \left(\frac{d_p}{D_C}\right) \left(\frac{D_0}{D_C}\right)^{1/3} \left(\frac{\sqrt{2gH_0(\rho_s - \rho_g)}}{\rho_g}\right)^{0.324} \quad (3.15)$
Chen eta Lam (1985)	$u_{ms} = k\epsilon^{3/2} \left(\frac{d_p}{D_C}\right)^{1/2} \left(\frac{D_0}{D_C}\right)^{1/3} \frac{\sqrt{2gH_0(\rho_s - \rho_g)}}{\rho_g} \quad (3.16)$
Olazar et al. (1994)	$u_{ms} = \left(\frac{d_p}{D_C}\right) \left(\frac{D_0}{D_C}\right)^{0.1} \frac{\sqrt{2gH_0(\rho_s - \rho_g)}}{\rho_g} \quad (3.17)$
Aravinth eta Murugesan (1997) ($H_0/D_C < 1$)	$(Re_0)_{ms} = 0.023Ar^{0.63} \left(\frac{H_0}{D_C}\right) \left(\frac{D_0}{D_C}\right)^{0.2} \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)^{0.5} \quad (3.18)$
Aravinth eta Murugesan (1997) ($H_0/D_C > 1$)	$(Re_0)_{ms} = 0.03Ar^{0.63} \left(\frac{H_0}{D_C}\right)^{0.25} \left(\frac{D_0}{D_C}\right)^{0.2} \left(\frac{\gamma}{2}\right)^{-0.2} \quad (3.19)$
Venkatachalam et al. (2010)	$(Re_0)_{ms} = 1.05Ar^{0.45} \left(\frac{d_p}{D_C}\right)^{0.18} \left(\frac{H_0}{D_C}\right)^{0.58} \left(\frac{D_0}{D_C}\right)^{0.61} \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g}\right)^{0.07} \quad (3.20)$
Zhong et al. (2013)	$u_{ms} = 0.4 \left(\frac{d_p^{3.48}}{D_C}\right)^{0.23} \left(\frac{D_0}{D_C}\right)^{1.98} \left(\frac{H_0}{D_C}\right)^{0.3} \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g}\right)^{0.67} \quad (3.21)$

Mathur eta Gislher [233] izan ziren lehenengoak iturri ohantzeak ikertzen eta 3.17. Taulako (3.8) Ekuazioa proposatu zuten iturkuntzarako abiadura minimoaren kalkulurako. Proposaturiko korrelazioa operazio baldintza tarte oso zabalean neurturiko datuekin eraikia da, eta ohantzearen altuera handiko ($H_0/D_C > 1$) datuetara oso ondo doitzen da. Hauek proposaturiko korrelazioa modu enpirikoan eraiki zuten eta, (3.8) Ekuazioan adierazten den bezala, ohantzearen altueraren erro karratuari proportzionala da iturkuntzarako abiadura minimoa.

Mathur eta Gislher-en ostean iturkuntzarako abiadura minimoaren kalkulurako proposaturiko korrelazioek (3.8) Ekuazioaren forma orokorra dute d_p/D_C , D_0/D_C eta $2gH_0(\rho_s - \rho_g)/\rho_g$ moduluen berretzaileak aldatuta. Hala ere, 3.17. Taulan agertzen diren ekuazio guztiak ez dira modu enpirikoan eraiki, hau da, (3.10), (3.12), (3.17), (3.19), (3.20) eta (3.21) Ekuazioak energia balantzeetan oinarrituz garatu dira.

Bestalde, 3.17. Taulan erakusten den bezala, (3.8) Ekuazioa proposatu zene-tik (D_0/D_C) terminoaren berretzaileak hainbat aldaketa izan ditu [44, 82, 136, 221, 264, 375, 377, 410]. Madonna eta Lama-k [221], Ghosh-ek [136], Chen eta Lam-ek [82] eta Zhong-ek [410] iturkuntzarako abiadura minimoa (D_0/D_C)² terminoarekiko proporzionala dela aurkitu zuten. Ostera, Uemaki-k [375], Olazar-ek [264], Aravinth eta Murugesan-ek [44] eta Venkatachalam-ek [377] (D_0/D_C)^{0.1-0.6} terminoari proporzio-nala dela adierazi zuten. Abdelrazek-ek [1] eta Fane eta Mitchell-ek [123] aldiz, (3.8) Ekuazioaren terminoak aldatu gabe utzi zituzten, baina Abdelrazek-ek [1] bi konstante gehitu zituen ekuazioan ((3.12) Ekuazioa) eta Fane eta Mitchell-ek [123] zutabearen diametroa erlazionatzen duen termino bat gehitu zuten.

Orain arte aipaturiko ekuazioak eraikitzeko erabilitako saiakuntzetan ez dira partikula tamaina ezberdinezko ohantzeak erabili, eta Smith eta Reddy-k [353] erabili zituzten lehen aldiz tamaina distribuzioa duten ohantzeak. Hauen arabera, ordura arte argitaratuta ziren korrelazioak ((3.8) eta (3.9) Ekuazioak) ez zuten beraiek erabilitako sistema aurreikusten. Hortaz, partikula tamaina, sarrera diametroa eta zutabearen diametroa erlazionatzen duen terminoa sartu zuten. Urte batzuk geroago, Brunello et al.ek [77] bi solido ezberdin erabiliz egin zituzten saiakuntzak, eta hurrengo ondorioak atera zituzten: (3.8) Ekuazioa erabiliz iturkuntzarako abiadura minimoaren balio oso txikiak lortzen zirela eta Smith eta Reddy-ren [353] korrelazioa ez zela egokia (D_0/D_C) erlazioaren balio handietarako. Hortaz, (3.13) Ekuazioa proposatu zuten. Hala ere, Uemaki-k [375] partikula tamaina ezberdinezko ohantzeak erabiliz (3.8), (3.10) eta (3.13) Ekuazioen baliagarritasuna aztertu zuen. (3.13) Ekuazioa erabiliz, emaitza onargarriak lortzen ziren, baina (3.8) eta (3.10) Ekuazioak erabiliz gasaren abiadura txikietan balio handiak lortu zituzten eta gasaren abiadura handietarako ostera, txikiak. Hortaz, (3.8) Ekuazioa beraien emaitzetara doitu zuten termino guztien

berretzaileak aldatuz eta konstante biderkatzailea gehituz.

Geroago, Fane eta Mitchell-ek [123] $D_C > 0.4m$ baino zutabe handiagoetarako ohandzearen altuera handia den kasua aztertu zuten. Izan ere, iturkuntzarako abiadura minimoa ohandzearen altuerarekiko proportzionala da sakonera txikiko ohandzeetan [68], baina ohandze oso sakonetan dependentzia txikiagoa da.

Bestalde, Aravinth eta Murugesan-ek [44] saiakuntzetan operazio baldintza oso zabalak erabili zituzten eta H_0/D_C erlazioaren arabera bi korrelazio ezberdin proposatu zituzten. Venkatachala et al.en [377] arabera, korrelazio bakoitza erabilitako operazio baldintzen menpekoa da eta bibliografiako emaitzak erabiliz (3.20) Ekuazioa proposatu zuten. Azkenik, Zhong et al.ek [410] iturri ohandzeen eskala handitzearen arazoa konpontzeko, He et al.ek [155] erabilitako iturri ohandzearen dimentsioa 2 – 8 aldiz handiago hartu zuten (eskala ezberdineko 7 iturri ohandze ezberdin) eta simulazio bidez iturkuntzarako abiadura minimorako korrelazioa proposatu zuten, (3.21) Ekuazioa hain zuzen.

Jarraian, 3.18. Taulan, bibliografian iturri ohandze konikoei dagozkien iturkuntzarako abiadura minimoaren kalkulurako proposatu diren korrelazioak laburbildu dira.

3.18. Taulan ikus daitekeenez, bibliografian aurkitzen diren korrelazioetan solidoaren izaera erlazionatzen duten faktoreak agertzen dira, oro har dimentsiorik gabeko Arquimedesen modulua (Ar) erabiliz edo eta partikula tamainaren faktorea sartuz [87]. Bestalde, korrelazio guztietan agertzen dira ohandzearekin loturiko faktoreak, hala nola, ohandze estatikoaren altuera (H_0) edo ohandzearen gainazalaren diametroa (D_b). Gainera, 3.18. Taulako korrelazio gehienetan kontaktorearen angelua agertzen da, edo honen menpekoa den beste faktoreren bat, ohandzearen gainazaleko diametroa (D_b) adibidez.

3.18. Taulan adierazten den bezala, Nicolaev eta Golubev [258] izan ziren iturri ohandze konikoen iturkuntzarako abiadura minimoa aurrerako korrelazioa proposatu zuten lehenak ((3.22) Ekuazioa). Horretarako, 1.75 eta 5.6 mm arteko bost partikula diametroko esferak erabili zituzten, nahiz eta ez zuten zehaztu erabilitako kontaktorearen angelua. Bestalde, erabilitako airearen sarrerako diametroa 0.02 eta 0.05 m artekoa izan zen, eta 0.12 m-ko diametroa duen kontaktorea.

3.18. Taula. Iturri ohandze konikoen abiadura minimoaren kalkulurako bibliografian aurki daitezkeen korrelazioak

Autorea eta urtea	Korrelazioa	
Nicolaev eta Golubev (1964)	$(Re_0)_{ms} = 0.051Ar^{0.59} \left(\frac{H_0}{D_C}\right)^{0.25} \left(\frac{D_0}{D_C}\right)^{0.1}$	(3.22)
Gorshtein eta Mukhlenov (1964)	$(Re_0)_{ms} = 0.174Ar^{0.5} \left(\frac{D_b}{D_0}\right)^{0.25} \left(\tan\frac{\gamma}{2}\right)^{-1.25}$	(3.23)
Mukhlenov eta Gorshtein (1965)	$(Re_0)_{ms} = 3.32Ar^{0.33} \left(\frac{H_0}{D_0}\right) \left(\tan\frac{\gamma}{2}\right)^{0.55}$	(3.24)
Goltsiker (1967)	$(Re_0)_{ms} = 73Ar^{0.14} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{0.9} (\rho_s - \rho_g)^{0.47}$	(3.25)
Tsvick et al. (1967)	$(Re_0)_{ms} = 0.4Ar^{0.52} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{1.24} \left(\tan\frac{\gamma}{2}\right)^{0.42}$	(3.26)
Kmiec (1977)	$(Re_0)_{ms} = 0.0176Ar^{0.71} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{1.535} \gamma^{0.71} \epsilon_{ms}^{2.21}$	(3.27)
Markowski eta Kaminski (1983)	$(Re_0)_{ms} = 0.028Ar^{0.57} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{0.58} \left(\frac{D_C}{D_0}\right)^{1.27}$	(3.28)
Kmiec (1983)	$(Re_0)_{ms}^2 \left[1.75 + 150 \frac{1 - \epsilon_{ms}}{(Re_0)_{ms}} \right] = 31.31Ar \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{1.76} \left(\frac{D_0}{D_C}\right)^{0.03} \left(\tan\frac{\gamma}{2}\right)^{2.07} \epsilon_{ms}^3$	(3.29)

3.18. Taula. Jarraipena.

Autorea eta urtea	Korrelazioa
Olazar et al. (1992)	$(Re_0)_{ms} = 0.126 Ar^{0.5} \left(\frac{D_b}{D_0}\right)^{1.68} \left(\tan\frac{\gamma}{2}\right)^{-0.57} \quad (3.30)$
Choi eta Meisen (1992)	$u_{ms} = 18.5(2gH_0)^{0.5} \left(\frac{d_p}{D_C}\right)^{1.19} \left(\frac{D_0}{D_C}\right)^{0.37} \left(\frac{H_0}{D_C}\right)^{-0.19} \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g}\right)^{0.26} \quad (3.31)$
Olazar et al. (1996)	$(Re_0)_{ms} = 0.126 Ar^{0.39} \left(\frac{D_b}{D_0}\right)^{1.68} \left(\tan\frac{\gamma}{2}\right)^{-0.57} \quad (3.32)$
Bi et al. (1997) ($D_b/D_i > 1.66$)	$(Re_0)_{ms} = \left[0.3 - \frac{0.27}{(D_b/D_0)^2}\right] \sqrt{Ar \left(\frac{D_b}{D_0}\right) \left[\left(\frac{D_b}{D_0}\right)^2 + \left(\frac{D_b}{D_0}\right) + 1\right]} / 3 \quad (3.33)$
Bi et al. (1997) ($D_b/D_i < 1.66$)	$(Re_0)_{ms} = 0.202 \sqrt{Ar \left(\frac{D_b}{D_0}\right) \left[\left(\frac{D_b}{D_0}\right)^2 + \left(\frac{D_b}{D_0}\right) + 1\right]} / 3 \quad (3.34)$
Altzibar et al. (2013)	$(Re_0)_{ms} = 0.126 Ar^{0.5} \left(\frac{D_b}{D_0}\right)^{1.68} \left(\tan\frac{\gamma}{2}\right)^{-0.57} \quad (3.35)$
Saldarriaga et al. (2016)	$(Re_0)_{ms} = 0.126 Ar^{0.51} \left(\frac{D_b}{D_0}\right)^{1.37} \left(\tan\frac{\gamma}{2}\right)^{-0.57} \quad (3.36)$

3.18. Taula. Jarraipena.

Autorea eta urtea	Korrelazioa
Golsthan et al. (2018)	$(Re_0)_{ms} = 0.0965 Ar^{0.67} \left(\frac{H_0}{D_0} \right)^{1.32} \left(\tan \frac{\gamma}{2} \right)^{0.76} \quad (3.37)$

3.18. Taulako (3.23) Ekuazioa Gorshtein eta Mukhlenov-ek [140] proposatu zuten. Hauek hainbat solido ezberdin erabili zituzten, hala nola, kuartzoa, harea, artaxiki aleak eta silikoaluminatoak, 0.5 eta 2.5 mm arteko partikula diametroa zutelarik. Erabilitako ohantze konikoak 0.010 eta 0.013 m arteko sarrerako diametroa zuten eta 12 eta 60° arteko kontaktore angelua. Bestalde, lanerako erabili zituzten ohantzearen altuerak 0.03 eta 0.15 m artekoak izan ziren. 3.18. Taulako (3.24) Ekuazioa, aipatu diren antzeko baldintzetan garatu zuten Mukhlenov eta Gorshtein-ek [249].

Goltsiker-ek [139] 3.18. Taulako (3.25) Ekuazioa proposatu zuen 1 eta 3 mm arteko partikula diametroa zituzten ongarri eta silize aleak erabiliz. Honek, 0.05 eta 0.31 m arteko ohantzearen altuerekin egin zuen lan eta 0.041 eta 0.123 m arteko sarrera diametroak erabiliz. Azkenik, kontaktorearen konoaren angelua aldatuz egin zuen lan, 26 eta 60° arteko angeluak zituzten ohantze konikoekin hain zuzen.

Tsivk-ek [373] (3.18. Taulako (3.26) Ekuazioa) 1.5 eta 4 mm arteko partikula diametroa zuen ongarri aleak eta 0.10 eta 0.15 m arteko ohantzearen altuerak erabili zituen. Bestalde, 0.020 eta 0.042 m arteko sarrerako diametroak eta 20 eta 50° arteko angeluak zituzten ohantze konikoak erabili zituen.

Kmiec-ek [192] 3.18. Taulako (3.27) Ekuazioa proposatu zuen. Korrelazio honen eraikuntzarako geometria ezberdineko bi kontaktore erabili zituen: alde batetik, 0.088 m-ko zutabearen diametroko 30 eta 60° kontaktoreak; eta bestetik, 0.18 m-ko zutabearen diametroko 24.1 eta 52.9°ko kontaktoreak. Lehenengo kontaktoreek 0.015 m-ko airearen sarrerako diametroa zuten eta besteek oster, 0.035 m-koa. Bestalde, hainbat solido ezberdin erabili zituen saiakuntzetan: 21.6 eta 61.7 mm-ko beirazko bolak, 5.48 mm-ko ioi trukerako partikulak, 3.32 eta 2.24 mm-ko silika gel partikulak, eta 3.32, 2.24 eta 0.875 mm-ko harea. (3.27) Ekuazioaz gain, Kmiec-ek [193] beste korrelazio bat proposatu zuen, baina oraingo honetan ez zuen modu enpirikoan eraiki. Ohantzean zeharreko jariakinaren arraste indarraren eta partikulen grabitate indarraren arteko oreka balantzeak erabiliz eraiki zuen (3.29) Ekuazioa.

3.18. Taulako (3.28) Ekuazioa lortzeko Markowsky eta Kaminsky-k [227] jet

spouted bed edo iturri ohantze diluitu erregimena erabili zuten, eta ondorioz, operazioan erabili zituzten ohantzeen porositateak 0.85etik gorakoak izan ziren. Saiakuntza hauetarako hiru solido ezberdin erabili zituzten: 4.24 eta 4.84 *mm*-ko Agalit esferak, 6.22 eta 8.28 *mm*-ko partikula tamainadun polipropilenoeko esferak, eta 3.41, 4.38 eta 10.35 *mm*-ko tefloizko kuboak. Erabilitako ohantzearen altuerak 0.14 eta 0.43 *m* artekoak izan ziren eta sarrerako diametroak 0.018 eta 0.056 *m* artekoak. Azkenik, 37°ko angelua zuten bost kontaktoreekin egin zuten lan.

Ondoren, Olazar et al.ek [261] (3.30) Ekuazioa proposatu zuten iturkuntzarako abiadura minimoaren kalkulurako. Bertan, izaera eta tamaina anitzeko partikula lodiak ($d_p > 1 \text{ mm}$) erabili zituzten: 1 eta 8 *mm* arteko beirazko bolak, 3 eta 9.6 *mm* arteko arroza, dilista, ilar, garbantzu eta babarrun aleak, 3.5 *mm*-ko poliestireno estruitu eta hedatuak eta 25 *mm*-ko egur kuboak. Material hauekin erabili ziren ohantzearen altuerak berriz, 0.02 eta 0.30 *m* bitartekoak izan ziren. Bestalde, angelu ezberdineko bost kontaktore erabili ziren (28, 33, 36, 39 eta 45°), eta kontaktore bakoitzarekin 0.03, 0.04, 0.05 eta 0.06 *m*-ko sarrerako diametroak. Aurrerago, Olazar et al.-ek [266] zerrautsa erabiliz eta antzeko baldintzetan operatuz lorturiko emaitzak (3.30) Ekuaziora ondo doitzen zirela frogatu zuten.

Jarraian, Choi eta Meisen-ek [87] (3.31) Ekuazioa proposatu zuten iturkuntzarako abiadura minimoaren kalkulurako. Hauek 2.1 eta 2.8 *mm* arteko partikula diametrodun urea, sulfuroz estaliriko urea, poliformaldehidoa eta poliestirenoa erabili zituzten. 0.24 eta 0.40 *m* arteko ohantzearen altuerarekin egin zuten lan 60°ko kontaktoreak erabiliz. Azkenik, 0.021 eta 0.035 *m* arteko airearen sarrerako diametroarekin egin zuten lan.

(3.30) Ekuazioa bezala, Olazar et al.ek [269] partikula finen iturkuntzarako abiadura minimoa kalkulatzeko korrelazioa proposatu zuten ((3.32) Ekuazioa) iturri ohantze konikoa erabiliz. Hau lortzeko erabili zituzten materialak 0.3 eta 1.2 *mm* arteko partikula diametroa duten beirazko bolak, 0.12 eta 0.5 *mm* arteko diametroa duten silika gela eta 0.09 *mm*-ko diametroa duen zeolita izan ziren. Horretarako, 0.05 eta 0.40 *m* arteko ohantzearen altuerak erabili ziren 15, 20, 25, 30, 40, 45 eta 50°ko kontaktoreak erabiliz. Kontaktore bakoitzean 3 eta 12 *mm* arteko zazpi sarrera diametro ezberdin erabili ziren.

Bestalde, Bi et al.ek [67] bi korrelazio ezberdin proposatu zituzten ((3.33) eta (3.34) Ekuazioak) iturkuntzarako abiadura minimoaren kalkulurako. Ekuazio bakoitzak D_b/D_i erlazioaren balio ezberdinetarako kalkulatuak izan ziren, ez baitzuten lortu ohantzearen gainazaleko diametroaren eta sarrerako diametroaren balio handi eta txikietarako emaitzak ekuazio bakarrean modu egokian doitzea. Bestalde, bi ekuazioak erdi-enpirikoak dira, hau da, datu esperimentaletan eta ohantzean zehar gertatzen di-

ren indarren balantzeetan oinarritu ziren ekuazioak lortzeko. Bestalde, ez da zehazten zein solido mota erabili ziren, baina bai 0.88 eta 6.17mm arteko diametrokoak eta dentsitate ezberdinekoak izan zirela, 0.05 eta 0.71m arteko ohantzearen altuerekin lan eginez. Erabilitako kontaktorearen angeluak 24 eta 60° artekoak izan ziren eta 0.015 eta 0.030m arteko sarrerako diametroak.

Altzibar et al.ek [23] (3.35) Ekuazioa proposatu zuten iturkuntzarako abiadura minimoaren kalkulurako. Horretarako, partikula fin eta lodiak erabili zituzten: 2 eta 4mm partikula diametroa duten beirazko bolak, 3.4mm -ko ilar beltz haziak eta 0.4 eta 0.85mm partikula diametroa duten bi harea frakzio ezberdin. Solido hauek 0.14 eta 0.30m arteko ohantzearen altuera ezberdinetan erabili ziren hiru angelu ezberdineko (28 , 36 eta 45°) kontaktoreetan. Azkenik, kontaktore mota bakoitzean 0.03 , 0.04 , 0.05 eta 0.06m -ko sarrerako diametroak erabili ziren. Aurrerago aipatuko den bezala, saiakuntzak konfigurazio ezberdinetarako egin ziren (hodirik gabe, irekiduradun hodia eta hodi ez-porotsuak) eta bakoitzerako korrelazio bana proposatu zen, konfigurazio motak eragin handia baitu iturkuntzarako abiadura minimoan. Aipatu behar da hodirik gabeko sistemetarako proposaturiko korrelazioa partikula lodiekin neurturiko emaitzekin eraiki zela, sistema hauetan ez baitzen posible finak erabiliz iturri ohantze erregimena lortzea.

Bestalde, argi ikus daiteke Saldarriaga et al.ek [323] proposatutako (3.36) Ekuazioak (3.35) Ekuazioaren antza nabaria duela. Izan ere, nahiz eta Saldarriaga et al.ek [323] solido ezberdinak erabili, operazio baldintzak antzekoak izan ziren. Kasu honetan 0.76 eta 2.33mm arteko bost biomasa ezberdin erabili ziren; zerrautsa, Rumex landarea, algak, arrozaren azalak eta olibondo hezurak hain zuzen. Erabilitako ohantzearen altuera 0.05 eta 0.30m artekoak izan ziren; 0.03 , 0.04 , 0.05 eta 0.06m -ko sarrera diametroak erabiliz. Azkenik, angelu ezberdineko (28 , 33 , 36 eta 45°) lau kontaktore ezberdin erabili ziren.

Iturri ohantze konikoen iturkuntzarako abiadura minimorako korrelazioekin bukatzeko, Golsthan et al.ek [138] partikula oso dentsuak erabiliz (3.37) Ekuazioa proposatu zuten. Erabilitako solidoak zirkonioa, alumina bidez sendotutako zirkonioa eta beirazko bolak izan ziren, 1 eta 2.4mm arteko partikula tamainarekin. Ohantzearen altuera 0.080 eta 0.302m artekoak izan ziren eta airearen sarrerako diametroak oster, 0.012 eta 0.024m artekoak. Hau guztia bi kontaktore ezberdinetan burutu zen: alde batetik, 0.15m -ko zutabe diametroa duen 30 , 45 eta 60° ko kontaktoreetan; eta bestetik, 0.25m -ko zutabe diametroa duen 31 eta 66° ko kontaktoreetan.

3.18. Taulan ikus daitekeen bezala, hainbat korrelaziotan [87, 192, 193, 227, 258] kontaktorearen zati zilindrikoaren diametroaren (D_C) terminoa azaltzen da. Termino honen erabilera iturri ohantze konikoen iturkuntzarako abiadura minimoen kal-

kuluan ez da egokia [67], izan ere, ohantzea kontaktorearen gunekoan kokatzen da eta termino honen balioaren aldaketak ez du inongo eraginik iturkuntzarako abiadura minimoan. Bestalde, ohiko iturri ohantzeetan ohantzea gunekoan zein zilindrikoan kokatzen da, eta arrazoi honengatik termino honen eragina oso garrantzitsua da, 3.17. Taulako korrelazioetan ikus daitezkeen bezala.

Ohiko iturri ohantzeetan ez bezala, 3.18. Taulako korrelazio gehienak modu enpirikoan eraikitakoak dira. Bi et al.en [67] (3.33) eta (3.34) Ekuazioak baino ez dira erdi-enpirikoak.

Aipatu behar da 3.18. Taulan azaltzen diren korrelazio guztiak erdiko hoderik gabeko sistemetarako eraiki direla eta ez direla egokiak erdiko hodiak erabiltzen diren sistemen iturkuntzarako abiadura minimoa aurreratzeko. Nahiz eta erdiko hodiekin sistemen eraginkortasunean omura itzela egin, bibliografian erdiko hodiekin parametroak kontuan hartzen dituzten korrelazio gutxi daude. 3.19. eta 3.20. Taulan irekiduradun hodiak eta hodi ez-porotsuak erabiliz eraikitako korrelazioak erakusten dira.

3.19. Taula. Irekiduradun hodiak erabiliz iturkuntzarako abiadura minimoaren kalkulurako bibliografian aurki daitezkeen korrelazioak.

Autorea eta urtea	Korrelazioa
Altzibar et al. (2013)	$(Re_0)_{ms} = 0.126 Ar^{0.5} \left(\frac{D_b}{D_0} \right)^{1.68} \tan \left(\frac{\gamma}{2} \right)^{-0.57} \left(\frac{A_0}{A_T} \right)^{0.3} \quad (3.38)$
Saldarriaga et al. (2016)	$(Re_0)_{ms} = 0.272 Ar^{0.5} \left(\frac{D_b}{D_0} \right)^{1.25} \left(\frac{\gamma}{2} \right)^{-0.57} \left(\frac{A_0}{A_T} \right)^{0.3} \phi^{0.54} \quad (3.39)$

3.19. eta 3.20. Taulatan ikus daitezkeen bezala, erdiko hodiak erabiliz proposatu diren korrelazio gehienak gure ikerketa taldeak proposaturikoak dira: irekiduradun hodiekin kasuan, Altzibar et al.ek [23] eta Saldarriaga et al.ek [323] proposatuak; eta hodi ez-porotsuen kasuan, San José et al.ek [340], Altzibar et al.ek [23] eta Saldarriaga et al.ek [323] proposatuak.

3.20. Taula. Hodi ez-porotsuak erabiliz iturkuntzarako abiadura minimoaren kalkulurako bibliografian aurki daitezkeen korrelazioak.

Autorea eta urtea	Korrelazioa
San José et al. (2007)	$u_{ms} = 0.126 Ar^{0.5} \left(\frac{D_b}{D_0}\right)^{1.68} \left(\tan\frac{\gamma}{2}\right)^{-0.57} \left(\frac{H_0 - l_d}{H_0}\right)^{0.45} \left(\frac{D_i}{D_i - D_T}\right)^{0.17} \quad (3.40)$
Kmiec et al. (2009)	$(Re_0)_{ms} = 0.0137 Ar^{0.71} \left(\frac{D_b}{D_0}\right)^{-0.55} \left(\frac{\varphi V_r}{V_0}\right)^{0.41} \gamma^{0.8} \quad (3.41)$
Altzibar et al. (2013)	$(Re_0)_{ms} = 0.25 Ar^{0.5} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{1.2} \left(\frac{L_H}{D_0}\right)^{0.3} \quad (3.42)$
Puspasari et al. (2014)	$u_{ms} = \left[\left(\frac{d_p}{D_C}\right) \left(\frac{D_0}{D_C}\right)^{1/3} \frac{\sqrt{2gH_0(\rho_s - \rho_g)}}{\rho_g} \right] 2.3 \left(\frac{H_0}{D_C}\right)^{0.35} \quad (3.43)$
Saldarriaga et al. (2016)	$(Re_0)_{ms} = 0.5 Ar^{0.5} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{1.7} \left(\frac{L_H}{D_0}\right)^{0.1} \phi^{0.54} \quad (3.44)$

3.19. Taulako (3.38) Ekuazioa Altzibar et al.ek [23] proposatu zuten eta hodi dirik gabeko sistemetan erabilitako antzeko operazio baldintzak erabili zituzten (kasu honetan irekiduradun hodiak erabiliz). (3.35) eta (3.38) Ekuazioen artean ezberdintasun bakarra (3.38) Ekuazioko azken terminoan dago, hau da, (A_0/A_T) moduluan. Izan ere, beste termino eta berretzaileak berdinak dira, eta soilik irekiduradun hodiari

erreferentzia egiten dion terminoa gehitu da (irekidura portzentaia hain zuzen).

Bestalde, Saldarriaga et al.ek [323] proposaturiko (3.39) Ekuazioa (3.38) Ekuazioaren oso antzekoa da. Hala ere, Saldarriaga et al.ek [323] esferizitate baxuko biomasak erabili zituzten beraien saiakuntzetarako, eta hori dela eta, esferizitatearen terminoa korrelazioan sartuz doiketa egokiak lortu zituzten. Honetaz gain, konstante biderkatzailea eta (D_b/D_0) modulua berretzailea ere doitu zituzten.

Hodi ez-porotsuen kasuan, San José et al.ek [340] 3.20. Taulako (3.40) Ekuazioa proposatu zuten. Korrelazio hau eraikitzeke 1 eta 6 mm arteko partikula tamainako beirazko bolak erabili zituzten 0.05 eta 0.35 m arteko ohantze altueratan. Bestalde, erabilitako kontaktorearen angeluak 28 eta 45° artekoak izan ziren, eta kontaktore bakoitzean 0.03, 0.04, 0.05 eta 0.06 m-ko sarrerako diametroak. Erabilitako hodi ez-porotsuetan hodiaren gorputzaren luzera ($l_d = 0.02$ eta 0.34 m artekoak) eta hanken luzera ($L_H = 0.01$ eta 0.09 m artekoak) faktore geometrikoen balioak ere aldatu zituzten. Korrelazio hau eraikitzeke Olazar et al.en [261] erdiko hodirik gabeko iturri ohantze konikoetarako proposaturiko (3.30) Ekuazioa hartu zuten oinarri gisa. Bi korrelazioak aztertzen badira ((3.30) eta (3.40) Ekuazioak), argi ikusten da San José et al.ek [340] proposatutako korrelazioan (3.30) Ekuazioarekiko ezberdinak diren terminoak azkeneko bi moduluak direla. Izan ere, bi termino hauek hodi ez-porotsuen aldagai geometrikoak erlazionatzen dituzte ($H_0 - l_d/H_0$ eta $D_i/(D_i - D_T)$), eta beste termino guztiak eta euren berretzaileak berdindu dira.

3.20. Taulako (3.41) Ekuazioa Kmiec et al.ek [194] proposatu zuten. Horretarako, 0.91 eta 3.25 mm arteko partikula diametroa duten koltza haziak, ionita eta algalite esferak erabili zituzten 0.06 eta 0.18 m arteko ohantze altuera ezberdinetan. Bestalde, sei hodi ez-porotsu ezberdin erabili zituzten, hodiaren diametroa eta altuera aldatuz. Hala ere, ez dute zehazten erabilitako kontaktorearen angelua ezta airearen sarrerako diametroa ere. (3.41) Ekuazioan erakusten diren terminoak (kontaktorearen angelua ezik, γ) saiakuntzak burutzeko aldatu zituzten aldagaien menpekoak dira: Arquimedesen moduluak, partikula tamaina; D_b/D_0 terminoa, ohantzearen altuera; $\varphi V_r/V_0$ terminoa eta erdiko hodiak. Azkeneko terminoko V_r parametroa erdiko hodiaren bolumenari dagokio eta V_0 ohantzearen bolumenari. Gainera, φ terminoak erdiko hodiaren eta ohantzearen altuerak erlazionatzen ditu.

Bestalde, hodirik gabe eta irekiduradun hodian kasuan, Altzibar et al.ek [23] hodi ez-porotsuak erabiliz (3.42) Ekuazioa proposatu zuten. Hortaz, iturkuntzarako abiadura minimoan faktore esanguratsuenak erabiliz (partikula tamaina, sarrerako diametroa, hodiaren hanken luzera eta ohantzearen altuera) eraiki zuten korrelazioa.

Puspasari et al.ek [308] proposatutako (3.43) Ekuazioa hodirik gabe eta hodi ez-porotsuen emaitzekin eraikita dago. Hauek ondorioztatu ahal izan zuten hodi

ez-porotsuaren erabilerak iturkuntzarako abiadura minimoaren balioa %7–8 artean txikitzen zuela. Ezberdintasuna hain handia ez izateak bi konfigurazioen emaitzekin korrelazio bakar bat proposatzea ahalbidetu zuen. Bestalde, aipagarria da Puspasari et al.ek [308] ohiko iturri ohandzeak erabili zituztela, eta Mathur eta Gishler-en [233] (3.8) Ekuazioari konstante biderkatzaile eta termino bat gehitu ziotela. Solido bezala arroza erabili zuten eta 0.31 eta 0.62 m arteko ohandzeekin egin zuten lan. Bestalde, erabilitako kontaktorearen angelua eta sarrerako diametroa 40° eta 0.075 m izan ziren.

Azkenik, Saldarriaga et al.ek [323] (3.44) Ekuazioa proposatu zuten hodi ez-porotsuak erabiliz. Irekiduradun hodietan bezala, Altzibar et al.en [23] (3.42) Ekuazioa hartu zuten oinarri bezala, doiketa onena berak zuelako. Hala ere, doiketa hobetzeko asmoz (3.42) Ekuazioko berretzaileak egokitu eta partikularen esferizitate terminoa sartu zuten.

Ohiko iturri ohandze edo iturri ohandze konikoak bezala, beste hainbat iturri ohandze mota daude, eta hauen artean garrantzitsuenak irekiduradun iturri ohandze laukizuzenak dira. Gaur egun, lan ugari aurki daiteke bibliografian iturri ohandze mota honi buruz, eta 3.21. Taulan jasotzen dira proposaturiko hainbat korrelazio iturkuntzarako abiadura minimorako.

3.21. Taula. Irekiduradun iturri ohandze laukizuzena erabiliz iturkuntzarako abiadura minimoaren kalkulurako bibliografian aurki daitezkeen korrelazioak.

Autorea eta urtea	Korrelazioa
Murthy eta Singh (1994)	$(Re_0)_{ms} = 0.013 \left(\frac{D_0}{z}\right)^{0.11} \left(\frac{H_0}{z}\right)^{0.52} Ar^{0.7} \left(\frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g}\right)^{0.08} \quad (3.45)$
Anabtawi (1998)	$u_{ms} = 0.25 \left(\frac{d_p}{D_C}\right)^{0.65} \left(\frac{D_0}{D_C}\right)^{0.31} \left(\frac{H_0}{D_C}\right)^{0.25} \left[\frac{2gH_0(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g}\right] \quad (3.46)$

3.21. Taulako (3.45) Ekuazioa Murthy eta Singh-ek [252] proposatu zuten iturkuntzarako abiadura minimoaren kalkulurako 2, 3 eta 4 irekiduradun iturri ohan-

tze laukizuzen paraleloan jarritz. Kontaktore bakoitzak $75 \times 75 \text{ mm}$ -ko dimentsioa du eta 60° ko piramide alderantzikatua du oinarrian. Airearen zehar erabili zuten jariakin bezala eta hauen sarrerako diametroak 8 eta 18 mm artekoak izan ziren. Erabilitako materialak beirazko bolak, raagi haziak, material polimerikoak eta lekale berdeak izan ziren, 1.25 eta 3 mm arteko partikula tamainakoak hain zuzen. Bestalde, erabilitako ohantzearen altuerak 0.135 eta 0.240 m artekoak izan ziren. Murthy eta Singh-ek [252] emaitzak Mathur eta Gishler-ek [233] proposaturiko (3.8) Ekuazioaren emaitzekin alderatu zituzten eta datu esperimentalak (3.8) Ekuazioarekin lorturikoak baino handiagoak ziren. Gainera, desbideraketa handiagoa da kontaktore kopurua handitzean edota ura jariakin bezala erabiltzean, (3.8) Ekuazioan ez baita jariakinaren biskositate kontuan hartzen.

Ostera, 3.21. Taulako (3.46) Ekuazioa Anabtawi-k [36] proposatu zuen irekiduradun iturri ohantze laukizuzena erabiliz. 1.18 eta 2 mm -ko poliestirenozko esferak erabili zituen eta hauen arteko zazpi nahasketa ezberdinen iturkuntzarako abiadura minimoak neurtu zituen. Neurri ezberdineko hiru kontaktore erabili zituen eta bakoitzerako 5 eta 11 mm arteko bost sarrerako diametro ezberdin. Lorturiko datu esperimentalak Mathur eta Gishler-ek [233], Smith eta Reddy-k [353], Littman eta Morgan-ek [208] eta Brunello et al.ek [77] proposatutako korrelazioekin alderatu zituen eta desbiderapen nabarmenak zirela ikusi zuten. Hala ere, aipagarria da ez zuela Murthy eta Singh-ek [252] proposaturiko korrelazioarekin alderatu.

Orain arte aipaturiko korrelazio guztiak ((3.8)-(3.46) Ekuazioak) giro tenperatura eta presiopean buruturiko emaitzetatik lorturikoak dira, baina baldintza hauetan burutu ez diren korrelazioak ere aurki daitezke bibliografian. 3.22. Taulan erakusten dira tenperatura altuetan buruturiko saiakuntzetatik lorturiko iturkuntzarako abiadura minimoaren kalkulurako hainbat korrelazio.

3.22. Taula. Tenperatura altuak erabiliz iturkuntzarako abiadura minimoaren kalkulurako bibliografian aurki daitezkeen korrelazioak.

Autorea eta urtea	Korrelazioa
Wu et al. (1987)	$\frac{u_{ms}}{\sqrt{2gH_0}} = 10.6 \left(\frac{d_p}{D_C}\right)^{1.05} \left(\frac{D_0}{D_C}\right)^{0.27} \left(\frac{H_0}{D_C}\right)^{-0.095} \left(\frac{(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g}\right)^{0.256} \quad (3.47)$
Rocha et al. (1995)	$Q_{ms} = 5.92 \times 10^{-2} \left(\frac{d_p}{D_C \phi}\right)^{0.05} \left(\frac{D_0}{D_C}\right)^{-2.6} \left(\frac{\sqrt{2gH_0(\rho_s - \rho_g)}}{\rho_g}\right) \left(\tan \frac{\gamma}{2}\right)^{0.06} \quad (3.48)$
Olazar et al. (2009)	$(Re_0)_{ms} = 0.0082 Ar^{0.82} \left(\frac{D_b}{D_0}\right)^{1.68} \left(\tan \frac{\gamma}{2}\right)^{-0.57} \quad (3.49)$
Makibar et al. (2011)	$(Re_0)_{ms} = 2.9 Ar^{0.82} \left(\frac{D_b}{D_0}\right)^{1.68} \left(\tan \frac{\gamma}{2}\right)^{-0.57} \quad (3.50)$

3.4.1.1 Emaitzen doiketa bibliografiako korrelazioetara

Aurreko atalean aztertu diren korrelazio guztiak ((3.8-3.50) Ekuazioak) iturri ohandze mota (ohiko iturri ohandzea, iturri ohandze konikoa eta irekiduradun iturri ohandze laukizuzena) eta lan baldintza (konfigurazio, solido eta kontaktorearen geometria) ezberdinetan lorturikoak izan dira, baina iturkuntzarako abiadura minimoaren kalkulurako iturri bilgailudun iturri ohandzea erabiliz lorturiko korrelaziorik ez da orain arte garatu. Hori dela eta, aurreko atalean planteaturiko ekuazio guztiak erabili dira tesi honetan lorturiko emaitzen doiketarako.

Tesi honetan hiru konfigurazio ezberdin erabili dira saiakuntzetan (hodirik gabeko, irekiduradun hodiak eta hodi ez-porotsuak), baina, aurreko atalean erakusten den

bezala, 42 ekuaziotik 7 dira erdiko hodiak erabiliz eraiki direnak, 2 irekidura hodieta-rako (biak gure ikerketa taldekoak izanik) eta 5 hodi ez-porotsuetarako. Iturri bilgailua partikula finekin erabiliz erregimen berriak lortu direnez, emaitzak ekuazio guztiekin erabili dira doiketa egiteko, baita erdiko hodi ezberdinak erabiliz lorturikoak ere. Hala ere, aipatu behar da hodirik gabe lortu diren emaitzak hodirik gabeko korrelazioekin bakarrik doitu direla, eta erdiko hodi mota bakoitza hodirik gabeko zein hodi mota horretako korrelazioekin.

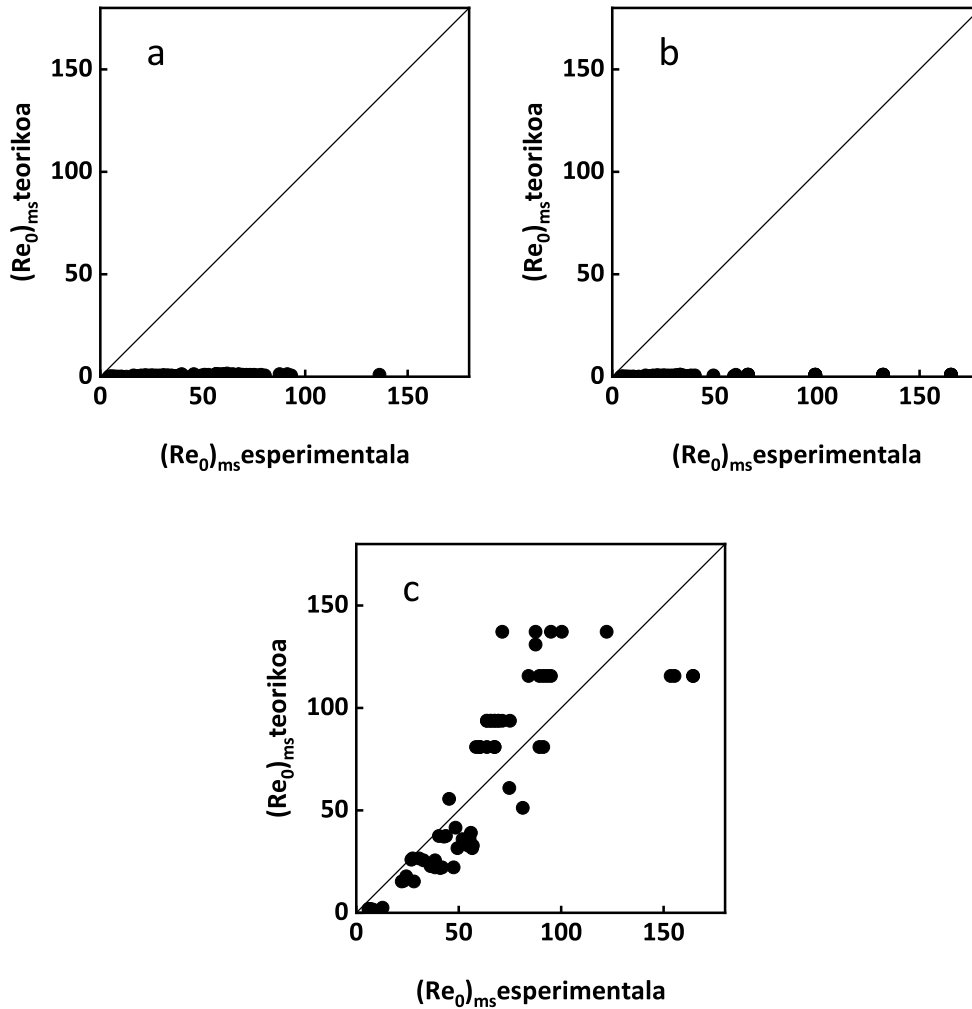
Emaitza esperimentalen doiketa aztertzeke, erabilitako konfigurazio motaren arabera banatu dira sistemak, hau da, hodirik gabe, irekiduradun hodiak eta hodi ez-porotsuak. Bestalde, nahiz eta bi solido ezberdin erabili diren tesi honetan, emaitza esperimentalen doiketa bateratua egin da kasu honetan, izan ere, biek portaera berdina baitute iturri ohantzean eta beraien artean nagusiki aldatzen den faktore bakarra solidoaren dentsitatea baita.

Hodirik gabe

Aipatu bezala, hodirik gabeko sistemetan eta harea zein zerrautsa solido bezala erabilia lorturiko datu esperimentalak 3.17.-3.22. Taulako ekuazioetara nola doitzen diren aztertu da. Horretarako, (3.8)-(3.50) Ekuazioak erabiliz, sistema bakoitzari dagokion iturkuntzarako abiadura minimorako Reynolds zenbakiaren balio teorikoa $((Re_0)_{ms\text{teorikoa}})$ kalkulatu da. Bestalde, Reynolds zenbakiaren balio esperimentalak $((Re_0)_{ms\text{esperimentalak}})$ kalkulatu dira emaitza esperimentaletako iturkuntzarako abiadura minimoaren balioetatik. Gainera, doikuntzei dagozkien erregresio koefizienteak kalkulatu (R^2) dira eta Reynolds zenbakiaren balio teorikoak balio esperimentalekiko irudikatu dira.

3.17. Taulako ekuazioekin lorturiko emaitza teorikoak ez datoz bat esperimentalekin. Izan ere, 3.17. Taulako ekuazioak ohiko iturri ohantzeekin garaturiko korrelazioak dira eta hauekin kalkulaturiko iturkuntzarako abiadura minimoaren balioak konikoekin neurturikoak baino txikiagoak dira. Hori dela eta, kalkulaturiko datu teorikoak oso baxuak dira esperimentalen aldean eta lorturiko erregresio koefizienteak oso baxuak dira (emaitzen desbideratzea %100ekoa baino handiagoa ere bada zenbait kasuetan). Iturri ohantze mota hauen adibide bezala Mathur eta Gishler-en [233] (3.8) Ekuazioa erabili da eta Reynolds zenbakiaren balio teoriko eta esperimentalen arteko irudikapena egin da 3.31.a Irudian. Irekiduradun iturri ohantze laukizuzenen kasurako (3.21. Taula) berdina gertatzen da, hau da, emaitza teorikoak esperimentalak baino baxuagoak dira (3.31.b Irudia). Azkenik, tenperatura alturako garaturiko ekuazioak (3.22. Taula) erabiltzean abiadura teorikoen balioak esperimentalenak baino handiagoak dira (3.31.c Irudia).

Beraz, 3.38. Irudian erakusten dira (3.8), (3.45) eta (3.49) Ekuazioekin kalkulaturiko iturkuntzarako abiadura minimoari dagozkien Reynolds zenbakiaren balio teorikoaren eta balio esperimentalen arteko konparaketa.

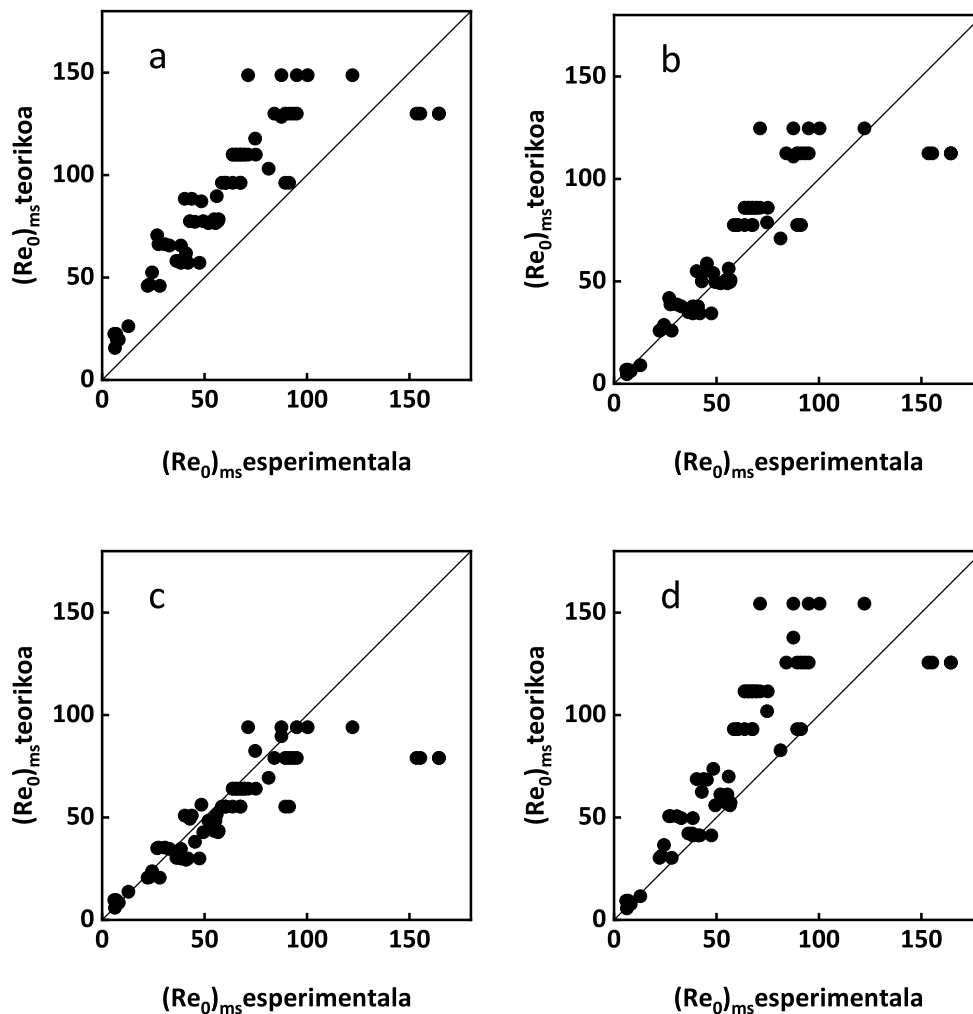


3.38. Irudia. Iturkuntzarako abiadura minimorako (a) (3.8) Ekuazioa, (b) (3.45) Ekuazioa eta (c) (3.49) Ekuazioa erabiliz kalkulaturiko Reynolds zenbakiaren balio teorikoen eta balio esperimentalen arteko konparaketa hendirik gabeko sistemen kasurako.

3.38.a eta 3.38.b Irudietan ikus daitekeenez, iturri bilgailua eta partikula finak erabiliz neurturiko datu esperimentalak oso gaizki doitzen dira (3.8) eta (3.45) Ekuazioetara. Izan ere, bi ekuazio hauekin lortzen den errorea oso handia da, Reynolds zenbakiaren balio teorikoak balio esperimentalak baino askoz txikiagoak baitira. Honen arrazoia iturri ohantze motan datza, hau da, (3.8) Ekuazioa ohiko iturri ohantzeekin lorturiko korrelazioa da eta (3.45) Ekuazioa irekiduradun iturri ohantze laukizuzentarako. Hori dela eta, doiketa ez da egokia. Bestalde, 3.38.c Irudiko doiketa nahiz eta

egokia ez izan beste biak baino hobea da. Bestalde, gainerako faktore geometrikoak tesi honetan erabilitakoen antzekoak dira, baina Olazar et al.ek [280] temperatura altuak eta presio baxuak ere erabili zituzten. Azken baldintza hauetan, iturkuntzarako abiadura minimoa txikiagoa da. Iturri bilgailuak ere efektu berdina sortzen du, hau da, u_{ms} -ren balioa txikitzen du eta arrazoi honengatik doiketa hobea da. Korrelazio honekin lorturiko erregresio koefizientea $R^2 = 0.58$ koa izan da.

3.18. Taulako iturri ohandtze konikoekin lorturiko ekuazioak erabiliz, oro har ez dira doiketa egokiak lortu. Gehien hurbildu direnak (3.24), (3.26), (3.32) eta (3.36) Ekuazioak izan dira. 3.39. Irudian erakusten dira lorturiko emaitzak.



3.39. Irudia. Iturkuntzarako abiadura minimorako (a) (3.24) Ekuazioa, (b) (3.26) Ekuazioa, (c) (3.32) Ekuazioa eta (d) (3.36) Ekuazioa erabiliz kalkulaturiko Reynolds zenbakiaren balio teorikoen eta balio esperimentalen arteko konparaketa hodirik gabeko sistemen kasurako.

3.39. Irudian ikus daitekeen bezala, iturri ohandtze konikoen korrelazioak erabili direnean doiketak hobekak izan dira. Lau ekuazio ezberdinen artean erregresio koe-

fiziente handiena (3.26) Ekuazioak (3.39.b Irudia) izan du 0.77 balioarekin. Honen ostean (3.32) Ekuazioak (3.39.c Irudia) 0.57 balioarekin, ondoren (3.36) Ekuazioak (3.39.d Irudia) 0.367 balioarekin, eta azkenik, (3.24) Ekuazioak (3.39.a Irudia) 0.21 balioarekin.

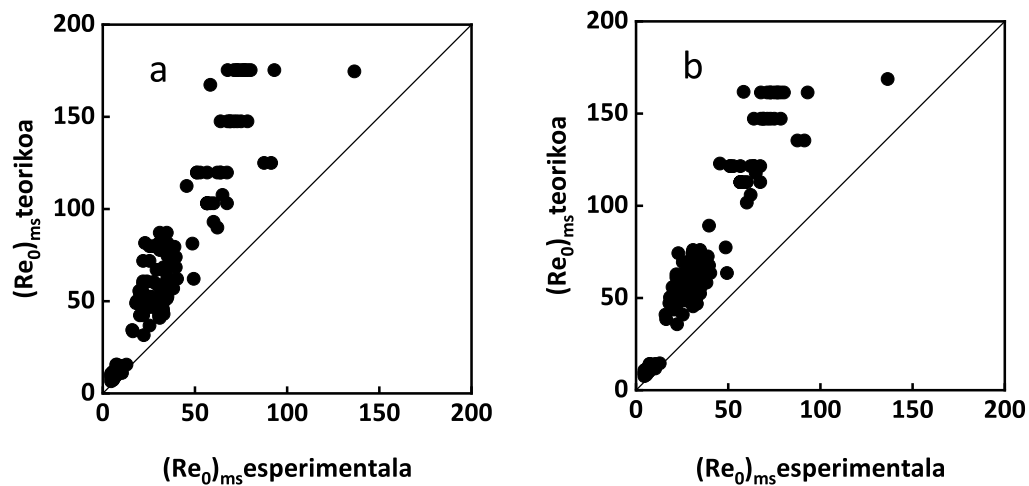
Lau ekuazioak aztertuz, oso antzekoak dira, hau da, Arquimedesen modulua, sarrerako diametroa eta kontaktorearen angelua erlazionatzen dituzte denek. Hala ere, Tsvick et al.ek [373] ((3.26) Ekuazioa) proposatutako ekuazioan ohantze estatikoaren altueraren terminoa (H_0) agertzen da, eta beste guztietan ohantzearen gainazalaren diametroa (D_b). Nahiz eta azken hau ohantzearen altuerarekin erlazionatuta egon, ez ditu guztiz ondo aurrezaten tesi honetako sistemen emaitzak. Izan ere, 3.13. Taula aztertzen bada, bertan argi geratzen da gehien eragiten duen faktorea ohantzearen altuera dela, eta honekin batera sarrerako diametroa eta partikula tamaina. Hortaz, (3.26) Ekuazioa da aipatutako faktore gehien erabiltzen duen ekuazioa.

Bestalde, (3.32) eta (3.26) Ekuazioak Olazar et al.ek [269] eta Saldarriaga et al.ek [323] proposaturiko korrelazioak dira. Nahiz eta ekuazio hauetan ohantzearen altueraren terminoa ez agertu, (3.32) Ekuazioa partikula finak erabiliz eraiki zen, eta (3.36) Ekuazioa ostera, biomasarekin. Bi partikula mota hauek iturkuntzarako abiadura minimo txikiagoak behar dituzte eta arrazoi honen ondorioz emaitza teoriko eta esperimentalen arteko hurbilketa handiagoa da. Gainera, erabilitako lan baldintzak tesi honen antzekoak izan dira. Azkenik, Mukhlenov eta Gorshtein-ek [249] (3.24) Ekuazioa proposatu zuten eta erabilitako solido motak tesi honetan erabilitakoaren antzekoak izan ziren. Hala ere, ohantzearen altuera eta sarrerako diametro ezberdinak erabili zituzten, eta lorturiko desbideraketa arrazoi horiengatik izan daiteke.

Irekiduradun hodiak

Hodirik gabeko kasuan bezala, irekiduradun hodiak erabiliz lorturiko emaitzak bibliografiako korrelazioetara nola doitzen diren aztertu da. Hala ere, irekiduradun hodiak erabiliz bibliografian aurki daitezkeen korrelazio bakarrak 3.19. Taulakoak dira, eta gure ikerketa taldean garatuak dira. 3.40. Irudian erakusten dira lorturiko emaitzak.

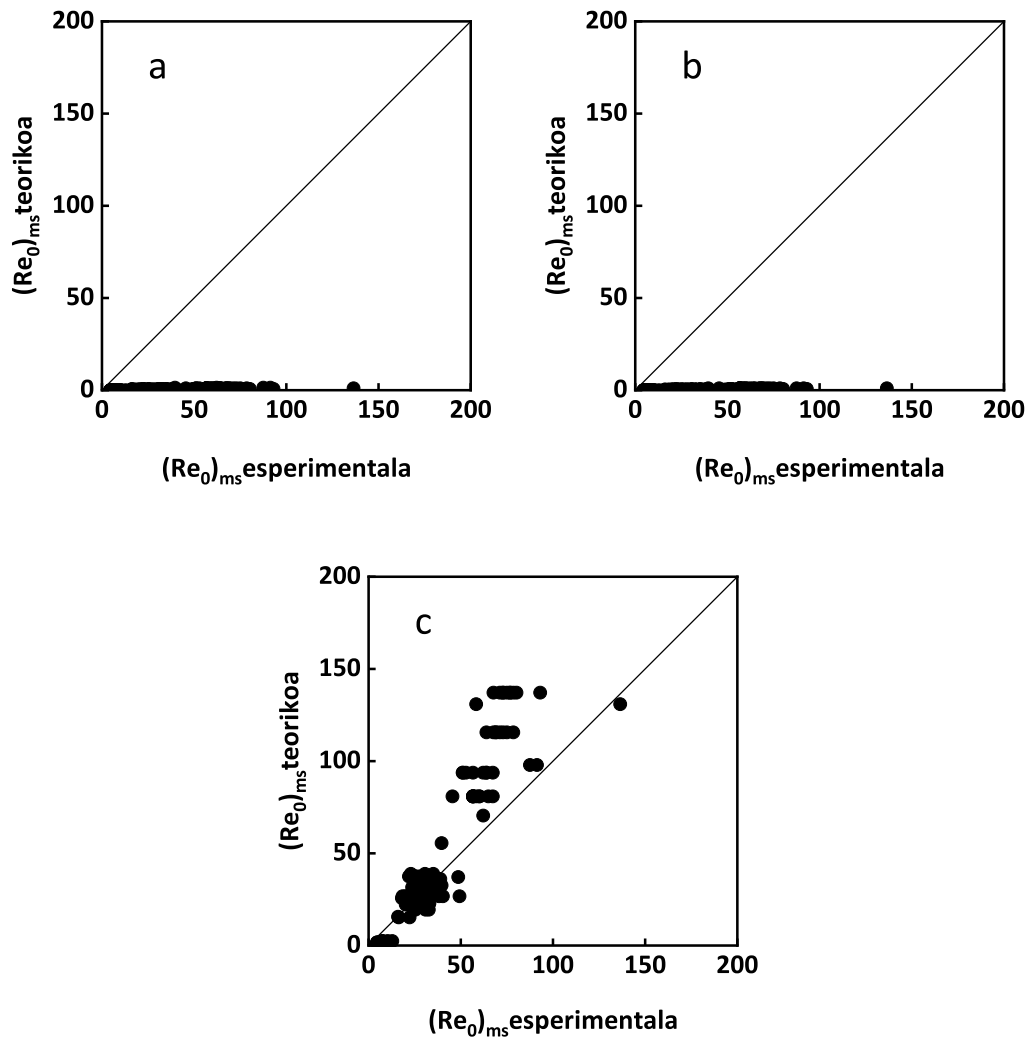
3.40. Irudian azaltzen den bezala, (3.38) eta (3.39) Ekuazioak erabiltzean doiketak ez dira egokiak, emaitza teorikoak esperimentalak baino handiagoak baitira. Nahiz eta korrelazio hauek gure ikerketa taldeak garatuak izan diren, Altzibar et al.ek [23] eta Saldarriaga et al.ek [323] erabili zituzten irekiduradun hodiak tesi honetan erabili direnekin alderatuz ezberdinak dira. Tesi honetan erabilitako hodian altuerak (L_T) ohantzearen altuera berdinekoak izan dira (arrazoi honengatik ezin izan dira H_0 ezberdin asko erabili) eta beste ikertzaileek ostera, 0.5 m luzerako irekiduradun hodiekin erabili dituzte kasu guztietan.



3.40. Irudia. Iturkuntzarako abiadura minimorako (a) (3.38) Ekuazioa eta (b) (3.39) Ekuazioa erabiliz kalkulatoriko Reynolds zenbakiaren balio teorikoen eta esperimentalen arteko konparaketa irekiduradun hodia erabili den kasuan.

Hodirik gabeko kasuan bezala, 3.17.-3.22. Tauletako ekuazioak ez dira egoki doitzen tesi honetako emaitza esperimentaletara. 3.41. Irudian erakusten dira (3.8), (3.45) eta (3.49) Ekuazioekin kalkulatoriko iturkuntzarako abiadura minimoari dagozkien Reynolds zenbakiaren balio teorikoen eta esperimentalen arteko konparaketa.

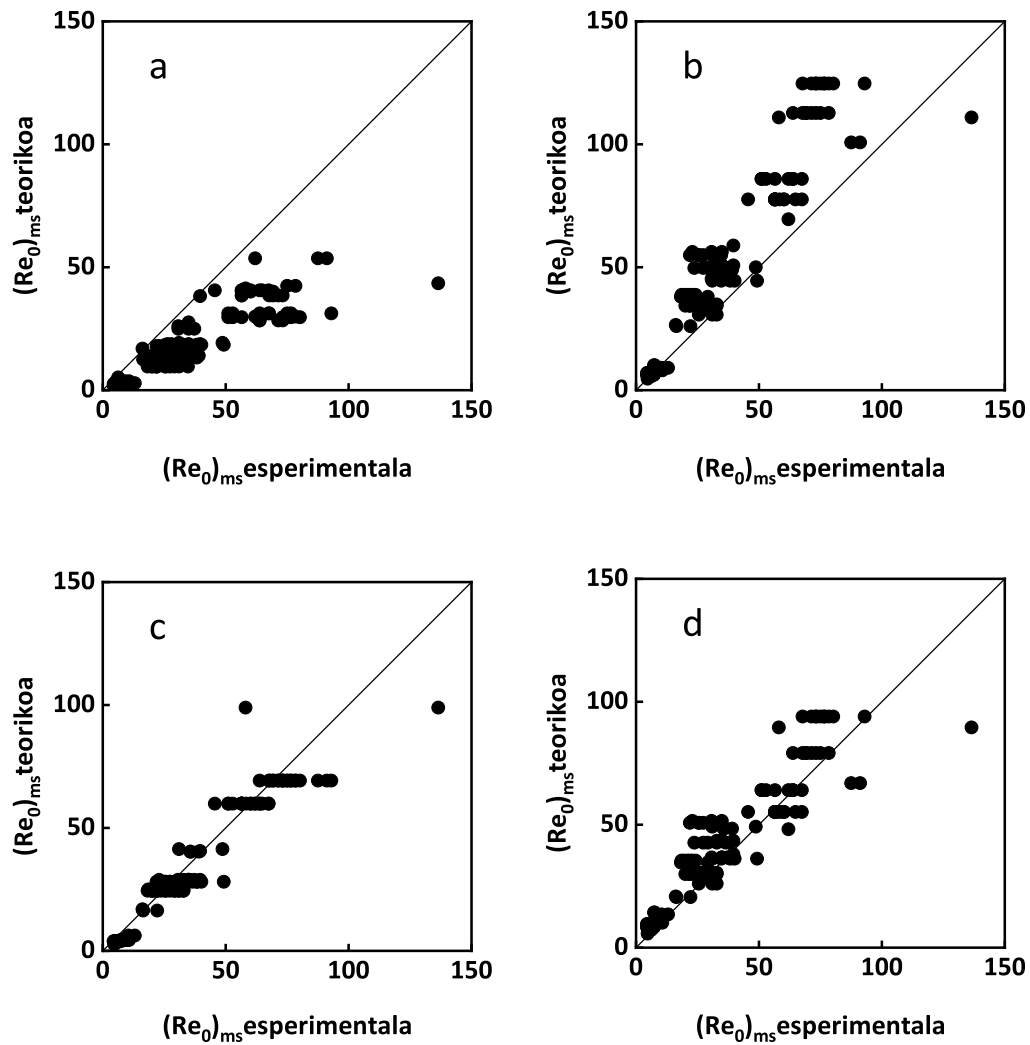
Hodirik gabeko sistemetan bezala (3.38. Irudia), ohiko iturri ohandzeekin garrantutako korrelazioek (3.41.a Irudia) ez dituzte ondo aurre-saten iturkuntzarako abiadura minimoaren balioak, izan ere, emaitza esperimentalak baino askoz txikiagoak aurre-saten dituzte. Berdina gertatzen da irekiduradun iturri ohandze laukizuzenekin. (3.49) Ekuazioa erabiliz ordea, lorturiko doiketa aurreko baina baino hobea da, baina ez da egokia. Hiru kasu hauen arrazoa 3.38. Irudian azaldu denaren berdina da.



3.41. Irudia. Iturkuntzarako abiadura minimorako (a) (3.8) Ekuazioa, (b) (3.45) Ekuazioa eta (c) (3.49) Ekuazioa erabiliz kalkulatoriko Reynolds zenbakiaren balio teorikoen eta balio esperimentalen arteko konparaketa irekiduradun hodiak erabilitako sistemetan.

Beraz, doiketarik onenak ohandze konikoei dagozkien 3.18. Taulako korrelazioak erabiliz lortu direnez, hots, (3.23), (3.26), (3.28) eta (3.32) Ekuazioak erabiliz, 3.42. Irudian erakusten dira aipaturiko korrelazioak erabiliz kalkulatoriko Reynolds zenbakiaren balio teorikoen eta balio esperimentalen arteko konparaketa irekiduradun hodian kasuen.

3.42. Irudiko grafikoak aztertuz, doiketak hobeak dira. Lau ekuazioen artean erregresio koefiziente handiena duena (3.28) Ekuazioa (3.42.c Irudia) izan da 0.9 balioarekin, honen ostean (3.32) Ekuazioa (3.42.d Irudia) 0.77 balioarekin, ondoren (3.23) Ekuazioa (3.42.a Irudia) 0.17 balioarekin, eta azkenik, (3.23) Ekuazioa (3.42.b Irudia) 0.15 balioarekin.



3.42. Irudia. Iturkuntzarako abiadura minimorako (a) (3.23) Ekuazioa, (b) (3.26) Ekuazioa, (c) (3.28) Ekuazioa eta (d) (3.32) Ekuazioa erabiliz kalkulaturiko Reynolds zenbakiaren balio teorikoen eta balio esperimentalen arteko konparaketa irekiduradun hodiak erabili diren kasurako.

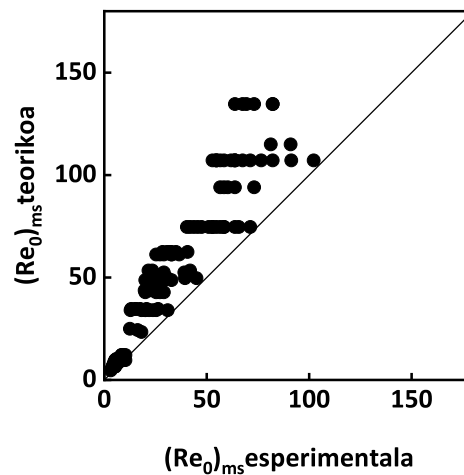
Markowski eta Kaminski-k [227] (3.28) Ekuazioa proposatu zuten iturkuntzarako abiadura minimoaren kalkulurako. Hauek iturri ohandze konikoa erabili zuten arren, proposaturiko korrelazioan kontaktorearen guneko zilindrikoaren diametroa (D_C) sartu zuten. Hala ere, (3.28) Ekuazioko azken terminoa sarrerako diametroaren menpekoa da, hau da, korrelazioa solidoen ezaugarrien (d_p eta ρ_s), ohandzearen altueraren (H_0) eta sarrerako diametroaren (D_0) menpekoa da. 3.14. Taula aztertzen bada, tesi honetan irekiduradun hodiak erabiliz lorturiko iturkuntzarako abiadura minimorako faktore esanguratsuenak aipaturiko faktoreak izan dira, eta arrazoi honengatik doiketa egokia da. Hala ere, 3.42.a Irudian estratifikazioa agertzen da.

3.42. Irudiko gainerako grafikoetan erabili diren korrelazioak aztertzen badi-

ra, argi geratzen da (3.23), (3.26) eta (3.32) Ekuazioak oso antzekoak direla. Hala ere, bi ezberdintasun nagusi daude beraien artean: H_0 eta D_b -ren erabilera, eta kontakto-rearen angeluaren berretzailea. Olazar et al.en [269] eta Gorshtein eta Mukhlenov-en [140] korrelazioak ohantzearen gainazalaren diametroa erabiltzen duten bitartean, Tsvick et al.ek [373] ohantzearen altuera erabiltzen dute. Hala ere, Olazar et al.en [269] korrelazioarekin lortzen da doiketa hoberena, izan ere, angeluaren berretzaileak zeinu negatiboa du (3.32) Ekuazioan eta 3.38.c Irudian erakusten den bezala, tesi honetan ere angeluaren balioa handitzean iturkuntzarako abiadura minimoak behera egiten du.

Hodi ez-porotsua

Azkenik, aurreko bi konfigurazioekin egin den bezala, hodi ez-porotsuak erabiliz lorturiko emaitzen doiketa aztertu da bibliografiako korrelazioetara. Hala ere, irekiduradun hodiekin bezala, hodi mota hauek erabiliz lorturiko bost korrelazio baino ez dira aurkitu bibliografian (giro baldintzetan egindakoak) eta hauetatik hiru ((3.40), (3.42) eta (3.44) Ekuazioak) gure ikerketa taldeak proposatuak dira. Doiketa onargarria duen bakarra (3.42) Ekuazioa da. 3.43. Irudian erakusten da aipaturiko ekuazioa erabiliz lorturiko Reynolds zenbakiaren balio teorikoen eta balio esperimentalen arteko konparaketa.

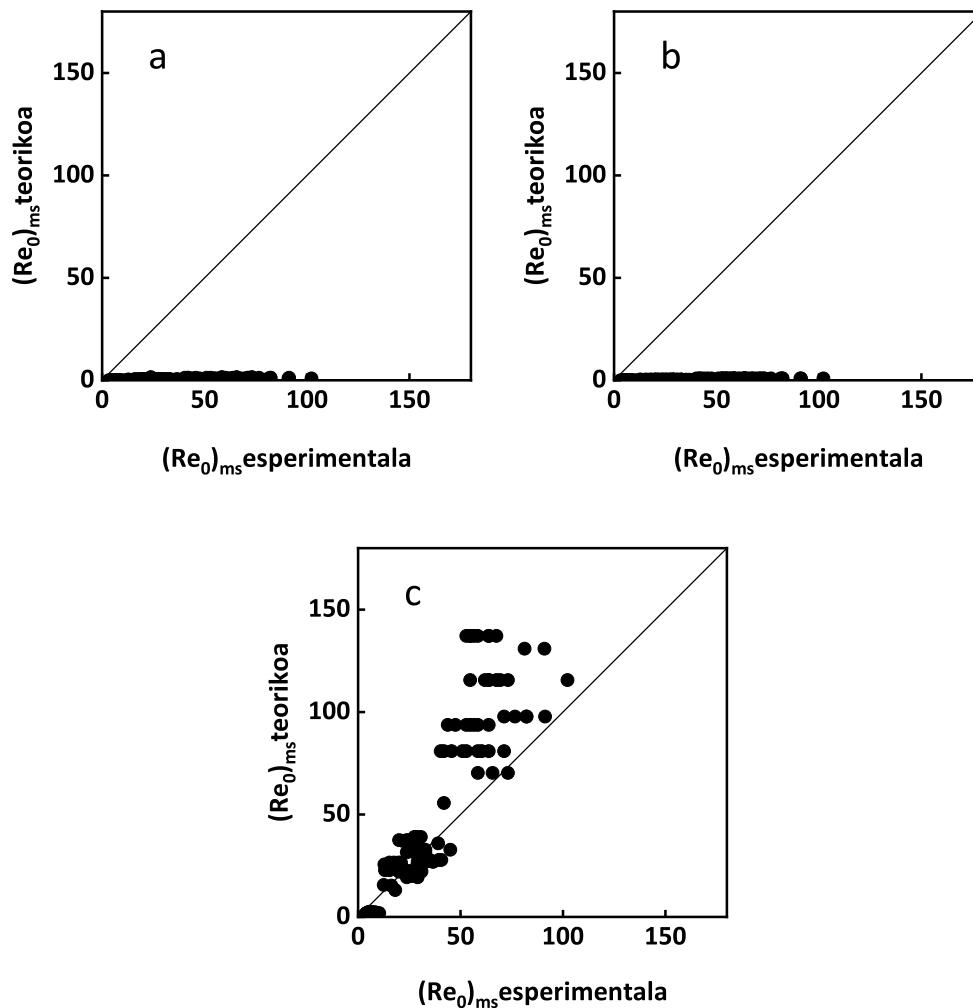


3.43. Irudia. Iturkuntzarako abiadura minimorako (3.42) Ekuazioa erabiliz kalkulaturiko Reynolds zenbakiaren balio teorikoen eta balio esperimentalen arteko konparaketa hodi ez-porotsuak erabili diren kasurako.

3.43. Irudia aztertuz, (3.42) Ekuazioa erabiliz lorturiko emaitzak emaitza esperimentalak baino handiagoak dira. Izan ere, Altzibar et al.ek [23] egin zituzten saiakuntzetan tesi honetan erabilitakoak baino material handiagoak erabili zituzten eta beraiek erabilitako hodiaren altuera ez zen sistema guztietan ohantzearen altueraren

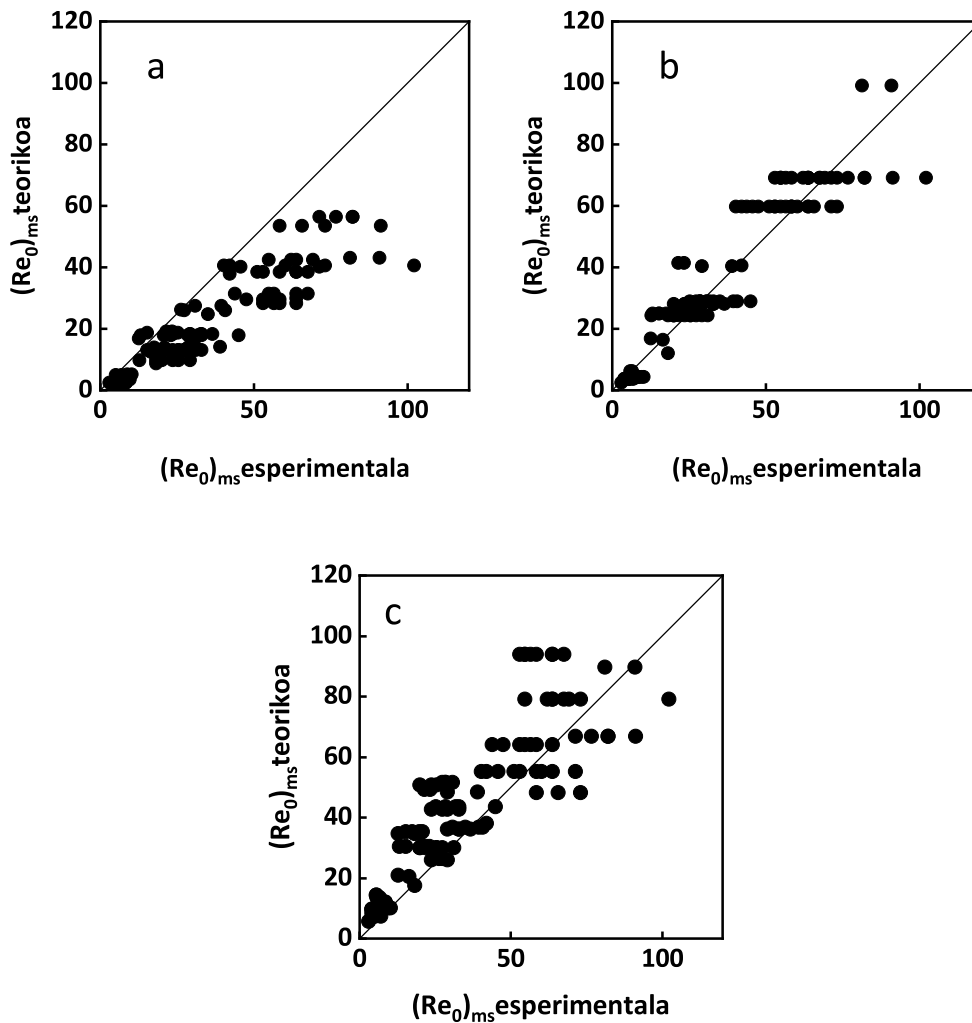
berdina. Hori dela eta, (3.42) Ekuazioak iturkuntzarako abiadura minimoaren balio handiagoak ematen ditu. Bestalde, (3.42) Ekuazioa aztertzen bada, solidoaren propietateak (d_p eta ρ_s), ohande estatikoaren altuera (H_0), sarrerako diametroa (D_0) eta hodiaren hanken luzeraren (L_H) parametroak erlazionatzen ditu. Tesi honetan ere (3.15. Taula) parametro guzti horiek dira faktore esanguratsuak, baita kontaktorearen angelua ere.

Aurreko kasuetan bezala, hodi ez-porotsudun sistemen emaitzak ohiko iturri ohanderako, irekiduradun iturri ohande laukizuzenerako eta giro baldintzetan ez diren egoeretako lorturiko korrelazioekin alderatu dira. Hiru kasu hauek 3.44. Irudian grafikatu dira eta hoderik gabe zein irekiduradun hodietan lorturiko doiketa berdintsua lortu da (arrazoia 3.38. eta 3.41. Irudietan azaldutakoaren berdintsua delarik).



3.44. Irudia. Iturkuntzarako abiadura minimorako (a) (3.8) Ekuazioa, (b) (3.45) Ekuazioa eta (c) (3.49) Ekuazioa erabiliz kalkulaturiko Reynolds zenbakiaren balio teorikoen eta balio esperimentalen arteko konparaketa hodi ez-porotsuak erabili diren kasurako.

Nahiz eta Altzibar et al.en [23] (3.42) Ekuazioarekin lorturiko emaitza teorikoen eta balio esperimentalen arteko ezberdintasunak oso handiak ez diren, 3.15. Taulako korrelazioak erabili dira doiketen egokitasuna ikusteko. Hala ere, aurreko konfigurazioekin bezala, oro har doiketa eskasak lortu dira, baina (3.23), (3.28) eta (3.32) Ekuazioekin lorturikoak balio esperimentaletatik hurbilago daude. 3.45. Irudian erakusten dira aipaturiko korrelazioak erabiliz lorturiko Reynolds zenbakiaren balio teorikoen eta balio esperimentalen arteko konparaketa hodi ez-porotsuak erabili diren kasurako.



3.45. Irudia. Iturkuntzarako abiadura minimorako (a) (3.23) Ekuazioa, (b) (3.28) Ekuazioa eta (c) (3.32) Ekuazioa erabiliz kalkulaturiko Reynolds zenbakiaren balio teorikoen eta balio esperimentalen arteko konparaketa hodi ez-porotsudun sistemen kasurako.

Kasu honetan ere, irekiduradun hodia duten sistemen berdintsuak dira hobe biekien doitzen diren korrelazioak ((3.26) Ekuazioa izan ezik). Erregresio koefiziente handiena Markowski eta Kaminski-ren [227] (3.28) Ekuazioarekin (3.45.b Irudia) lor-

tu da, nahiz eta estratifikazio fenomeno nabarmena agertzen den. Bestalde, gainerako bi korrelazioekin doiketa onargarriak lortu dira eta lorturiko erregresio koefizienteak hurrengoak izan dira: (3.32) Ekuazioarekin [269] 0.6ko balioa eta (3.23) Ekuazioarekin [140] 0.46ko balioa. Bestalde, angeluaren tangentearen berretzaileak zeinu egokia du, baina hodirik gabeko sistemetarako eraiki zirenez, ez dute erdiko hodiari erreferentzia egiten dien parametrarik.

3.4.1.2 Proposaturiko korrelazio enpirikoak

Aurreko atalean ikusi bezala, konfigurazio bakoitzean bibliografiako zenbait korrelaziok doiketa onargarriak izan dituzte. Hala ere, doiketa hauek hobetu egin behar izan dira: alde batetik, erregresio koefizientearen balioak ez direlako oso altuak; eta bestetik, erabilitako korrelazioek iturri bilgailuari erreferentzia egiten dion parametrarik ez dutelako. Hortaz, korrelazio enpirikoak proposatuko dira konfigurazio desberdinetarako.

Nahiz eta gure ikerketa taldean hainbat korrelazio proposatu diren [23, 261, 269, 280, 323, 340], hauetan guztietan ez da iturri bilgailurik erabili eta, beraz, ez da azaltzen iturkuntzarako abiadura minimoan duen eragina. Hori dela eta, korrelazio hauek ezin izan dira oinarri bezala erabili eta hasieratik korrelazio berriak eraiki behar izan dira konfigurazio bakoitzerako.

Korrelazio enpiriko bat sortzeko lehenengo pausua ikertu nahi den menpeko aldagaian gehien eragiten duten faktore edo elkarrekintzak zeintzuk diren jakitea da. Pausu hau dagoeneko 3.3.4 Atalean burutu da konfigurazio bakoitzerako eta 3.13., 3.14. eta 3.15. Tauletan laburbilduta dago. Ondoren, esanguratsuenak diren faktoreek menpeko aldagaian nola eragiten duten jakin behar da erabiliko diren moduluak egoki eraikitzeko. Azken pausu honetarako, Vaschy-Buckingham-en π -ren teorema erabili da tesi honetan.

Oro har, fenomeno fisikoak \mathbf{n} aldagai edo magnitude fisikoz osaturiko ekuazioaren bidez deskriba daitezke. Aldagai horiek independenteak diren \mathbf{k} termino fisikoz azaldu badaitezke, aipaturiko ekuazioa $\mathbf{n-k}$ zenbaki edo modulu adimentsionalen bidez idatzi daitezke. Gure kasuan, hurrengoak izan dira erabili diren aldagaiak:

$$f(v, \rho_s, \rho_g, d_p, \mu_g, g, H_0, D_0, H_F, D_F, D_T, L_H, IP) = 0 \quad (3.51)$$

Beraz, erabilitako aldagai guztien arteko modulu adimentsionalak lor daitezke π metodoaren bidez, baina modulua osatuko duten faktoreak egokiak izan daitezen, hurrengoa bete behar da: moduluaren goialdean dagoen faktore bakoitzaren balioa

handitzean, parametro hidrodinamikoaren balioak (kasu honetan Reynolds zenbakiaren balioak) gora egin behar du, eta behealdean dagoen bakoitzak kontrako joera izan behar du.

Hortaz, konfigurazio bakoitzerako esanguratsuenak diren faktoreen arteko moduluak aukeratu dira, eta moduluen berretzaileak eta konstante biderkatzailea doitu dira. Kasu bakoitzean minimizatu den errorearen helburu funtzioa (EHF) hurrengoa da:

$$EHF = \frac{\sum_{i=1}^N ((Re_{0ms})_{teorikoa} - (Re_{0ms})_{esperimental})^2}{N} \quad (3.52)$$

non N datu kopurua den.

Doiketa *Matlab* kalkulu softwarearean idatziriko programaren bidez egin da, eta *fminsearch* azpirrutina erabili da errorearen helburu funtzioa minimizatzeko eta doiketa onena ematen duten parametroen balioak lortzeko.

Jarraian, konfigurazio mota bakoitzerako doiketarik egokienak eta ekuazioak zehaztuko dira.

Hodirik gabe

Hodirik gabeko sistemak erabiltzean neurturiko emaitza esperimentalak bibliografiako korrelazioetara nola doitzen diren aztertu eta gero, gehienak gaizki doitzen direla ikusi da. Hala ere, Tsvick et al.ek [373] proposaturiko (3.26) Ekuazioa da egokiena ($R^2 = 0.71$), baina ez da nahikoa ontzat emateko.

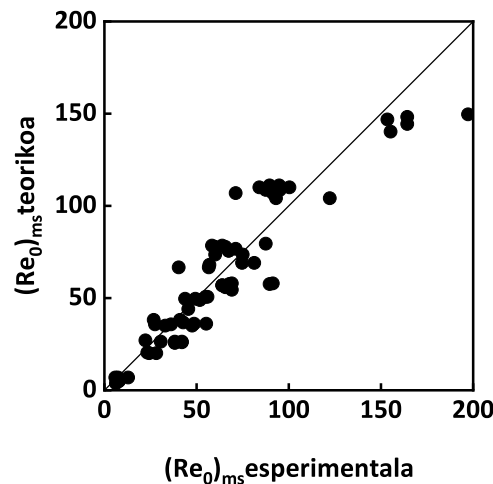
3.13. Taula aztertuz, hodirik gabeko sistemen faktore esanguratsuenak hurrengoak dira: ohandze estatikoaren altuera (H_0), airearen sarrerako diametroa (D_0), solidoaren partikula tamaina (d_p) eta dentsitatea (ρ_s), eta iturri bilgailuaren diametroa (D_F). (3.26) Ekuazioak iturri bilgailuaren faktoreak ez ezik beste guztiak ere kontuan hartzen ditu (solidoaren propietateak Arquimedes-en zenbakiaren bidez eta H_0/D_0 moduluen bidez), baita kontaktorearen angelua ere. Azkeneko hau ez da esanguratsua hodirik gabeko sistemetan.

Hortaz, π metodoa erabiliz eta faktore esanguratsuenak kontuan hartuz, hurrengoak izan dira aukeratu diren moduluak: Arquimedes-en zenbakia (Ar), H_0/D_0 modulua, H_0/D_F modulua eta H_F/D_F modulua. Lehenengoak esanguratsu atera diren solidoen propietateak batzen ditu, beraz, guztiz beharrezkoa da. H_0/D_0 modulua ere aukeratu da ohandzearen altuera handitzean eta sarrerako diametroa txikitzean iturkuntzarako abiadura minimo handiagoa behar delako. Bestalde, iturri bilgailuaren

diametroa faktore esanguratsua denez, bi modulutan erabili da, hots, H_0/D_F moduluan bi faktoreak esanguratsuak direlako eta H_F/D_F moduluan. Azken modulu honetako H_F faktorea ez da esanguratsu atera azterketa estatistikoa, baina ekuazioan gehitu ezean u_{ms} -ren balio berdina auresaten da H_F -ren balio ezberdinetarako, eta 3.6., 3.7. eta 3.8. Irudietan ikusi da iturri bilgailuaren posizioak iturkuntzarako abiadura minimoaren balioa aldatu egiten duela. Beraz, terminoen berretzaileak eta konstante biderkatzailea doitu dira eta hurrengo ekuazioa lortu da:

$$(Re_0)_{ms} = 0.25 Ar^{0.5} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{1.15} \left(\frac{H_0}{D_F}\right) \left(\frac{H_F}{D_F}\right)^{0.04} \quad (3.53)$$

3.46. Irudian erakusten da emaitza esperimentalak proposatu den 3.53 Ekuazio honetara nola doitzen diren.



3.46. Irudia. Proposaturiko (3.53) Ekuazioarekin kalkulaturiko iturkuntzarako abiadura minimorako Reynolds zenbakiaren balio teorikoen eta balio esperimentalen arteko konparaketa hodirik gabeko kasuan.

3.46. Irudian ikus daitekeen bezala, emaitza esperimentalak oso ondo doitzen dira (3.53) Ekuaziora. Doiketa honi dagokion erregresio koefizientearen balioa $R^2 = 0.86$ da. (3.26) eta (3.53) Ekuazioak konparatzen badira, biak antzekoak dira, bi ekuazioetako konstante biderkatzaileak eta Arquimedes zenbakiaren zein H_0/D_0 moduluen berretzaileak ere antzekoak baitira. Hala ere, kontaktorearen angeluaren terminoa azaltzen da (3.26) Ekuazioan eta iturri bilgailuaren ezaugarriak erlazionatzen dituen bi modulu (3.53) Ekuazioan. Arrazoi hauek eragiten dute (3.53) Ekuazioaren doiketa (3.26) Ekuazioarena baino hobea izatea.

Irekiduradun hodia

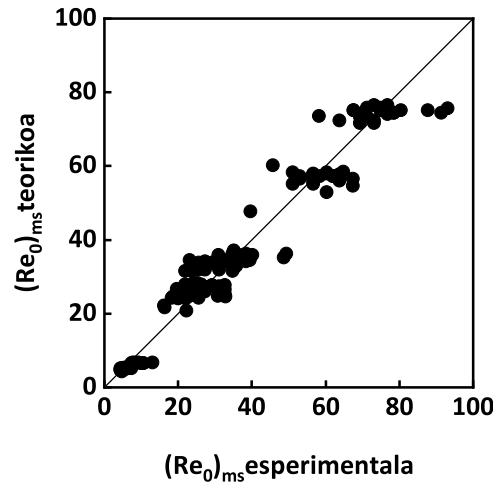
Aurretik aipatu den bezala, irekiduradun hodia duten sistematarako bi korrelazio baino ez daude bibliografian eta biak gure ikerketa taldean garatuak dira ((3.38) eta (3.39) Ekuazioak hain zuzen), baina batoren zein besteren doiketa ez da behar den beste egokia. Hala ere, irekiduradun hodiak erabiliz buruturiko saiakuntzen emaitzak iturri ohantze mota ezberdinetarako garaturiko korrelazioekin alderatu dira eta Markowski eta Kaminski-ren [227] (3.28) Ekuazioa doitzen da ondoen ($R^2 = 0.9$).

3.14. Taulari erreparatzen bazaio, faktore esanguratsuenak hurrengoak izan dira: solidoaren propietateak (partikula tamaina (d_p) zein solidoaren dentsitatea (ρ_s)), ohantze estatikoaren altuera (H_0), airearen sarrerako diametroa (D_0) eta irekiduradun hodiaren parametro geometrikoak (hodiaren diametroa (D_T) zein irekidura portzentaia (IP)). Oraingo honetan, iturri bilgailuaren diametroa ere faktore esanguratsua da, baina bere esangura maila ez da hain handia izan. (3.28) Ekuazioa aztertzen bada, bertan azaltzen diren faktore guztiak orain aipaturikoen artean daude, baina bertan azaltzen den azken moduluak (D_C/D_0) kontaktorearen diametroa eta sarrerako diametroa lotzen ditu. Hortaz, solidoaren propietateak (Ar), ohantze estatikoaren altuera (H_0) eta sarreraren diametroa (D_0) lotzen dira (3.28) Ekuazioan. 3.14. Taulari erreparatuz, aipaturiko aldagai geometrikoak dira kasu honetan ere faktore esanguratsuenak, eta hau dela eta lorturiko doiketa onargarria da.

Hortaz, π metodoa erabiliz eta faktore esanguratsuenak kontuan hartuz, hurrengoak izan dira aukeratu diren moduluak: Arquimedes-en zenbakia (Ar), H_0/D_0 modulua, H_F/D_F modulua eta A_0/A_T modulua. Solidoaren dentsitatea eta partikula tamaina faktore esanguratsuenak izan dira eta Arquimedes-en zenbakian biltzen dira. Bestalde, hodirik gabeko konfigurazioan bezala, ohantzearen altuera eta sarrerako diametroa faktore esanguratsuenak izan dira eta H_0/D_0 moduluan bildu dira. Honetaz gain, iturri bilgailuaren diametroa faktore esanguratsua bezala atera da, baina esanguratasun maila ez da handia izan eta angelua edo ohantzearen altuerarekin elkarrekintzan atera da. Kontaktorearen angeluarekin bilduz gero, ez da dimentsiorik gabeko modulua lortzen eta, beraz, elkarrekintza hori ezin da erabili. Ohantzearen altuerarekin batu ahalko litzateke termino batean, baina estratifikazio fenomeno txikitzeko asmoz H_F faktorearekin batu da (3.53) Ekuazioan bezala. Azkenik, D_T eta IP faktoreak erdiko hodiari dagozkie eta hauek A_0 terminoan biltzen dira, hau da, zenbat eta D_T eta IP balioak handiagoak izan A_0 handiagoa izango da. Beraz, terminoen berretzaileak eta konstante biderkatzailea doitu dira eta hurrengo ekuazioa lortu da:

$$(Re_0)_{ms} = 0.43Ar^{0.5} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{0.9} \left(\frac{H_F}{D_F}\right)^{0.03} \left(\frac{A_0}{A_T}\right)^{0.2} \quad (3.54)$$

3.47. Irudian erakusten da emaitza esperimentalak proposatu den (3.54) Ekuazio honetara nola doitzen diren.



3.47. Irudia. Proposaturiko (3.54) Ekuazioarekin kalkulaturiko iturkuntzarako abiadura minimorako Reynolds zenbakiaren balio teorikoen eta balio esperimentalen arteko konparaketa irekiduradun hodian kasuan.

3.47. Irudian ikus daitekeen bezala, emaitza esperimentalak oso ondo doitzen dira (3.54) Ekuaziora eta doiketa honi dagokion erregresio koefizientearen balioa $R^2 = 0.95$ da. Aipatu behar da estratifikazio fenomenoaren eragina ere igartzen dela, hala ere, honen efektua murriztu egin da H_F/D_F terminoa erabiliz. (3.54) Ekuazioa (3.28) Ekuazioarekin alderatzen bada, bi termino berdin dituzte, Ar eta H_0/D_0 terminoak hain zuzen ere, baina azken honen berretzailea eta konstante biderkatzailea ezberdinak dira. Bestalde, (3.28) Ekuazioa iturri ohande konikoetarako proposatu zen, hau da, erdiko hodirik gabeko sistemetakarako, baina 3.14. Taularen arabera, irekiduradun hodiaren parametro geometrikoak esanguratsuak dira. Hori dela eta, A_0/A_T modulua funtsezkoa da doiketa egokia lortzeko. Azkenik, aipatu den bezala, iturri bilgailuaren parametro geometrikoak erabili dira estratifikazio fenomeno murrizteko, bilgailuaren diametroa izan delarik bilgailuaren aldagai esanguratsuenak. Hala ere, esanguratasun maila txikia izan da eta moduluaren berretzailearen balioa da horren adierazpide.

Hodi ez-porotsua

Azkenik, aurreko bi kasuetan bezala, hodi ez-porotsuak erabiliz neurturiko emaitza esperimentalekin iturkuntzarako abiadura minimorako korrelazioa proposatu da. Kasu honetan, 3.20. Taulan erakusten den bezala, hodi ez-porotsuen kasuan bost korrelazio aurki daitezke bibliografian eta horietatik hiru gure ikerketa taldean garatuak

dira. Hala ere, Altzibar et al.en [23] (3.42) Ekuazioaren bidez kalkulaturiko emaitza teorikoak baino ez dira hurbiltzen emaitza esperimentaletara, baina doiketa ez da oso egokia ($R^2 = 0.62$). Hortaz, erdiko hoderik gabeko iturri ohandze konikoetarako gaturiko korrelazioekin saiatu da, eta irekiduradun hodiekin bezala (3.28) Ekuazioaren doiketa hobea da.

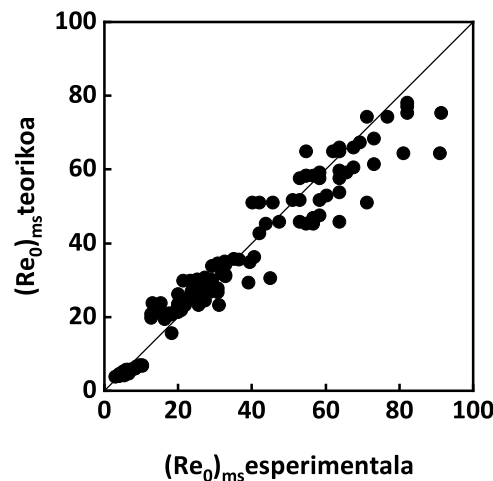
3.15. Taulari erreparatzen bazaio, hodi ez-porotsuekin burutu diren sistemen faktore esanguratsuenak hurrengoak izan dira: solidoaren propietateak (partikula tamaina (d_p) zein solidoaren dentsitatea (ρ_s)), ohandze estatikoaren altuera (H_0), airearen sarrerako diametroa (D_0), kontaktorearen gune konikoaren angelua (γ) eta hodi ez-porotsuaren parametro geometrikoak (hodiaren diametroa (D_T) zein hanken luzera (L_H)). Aurreko kasuan aipatu den bezala, (3.28) Ekuazioak biltzen dituen parametro guztiak (D_C izan ezik) 3.15. Taulan agertzen dira.

Hortaz, π metodoa erabiliz eta faktore esanguratsuenak kontuan hartuz, hurrengoak izan dira aukeratu diren moduluak: Arquimedes-en zenbakia (Ar), H_0/D_0 modulua, L_H/D_F modulua eta $\tan(\gamma/2)$ modulua. Aurreko bi kasuetan bezala, solidoaren ezaugarriak (partikula tamaina (d_p) eta solidoaren dentsitatea (ρ_s)) izan dira faktore esanguratsuenak eta Arquimedes-en zenbakian biltzen dira. Bestalde, ohandzearen altuera eta sarrerako diametroa faktore esanguratsuak izan dira eta H_0/D_0 moduluan bildu dira. 3.15. Taula aztertzen bada, kontaktorearen gune konikoaren angelua (γ) eta erdiko hodiaren hanken luzera (L_H) faktore esanguratsuak dira, baina bi hauek ezin dira modulu batean bildu ez baitituzte unitate berdinak. Hortaz, azterketa estatistikoan iturri bilgailuaren diametroa faktore esanguratsu bezala atera denez, erdiko hodiaren hanken luzerarekin bildu eta modulu adimentsional bezala erabili da. Azkenik, kontaktorearen angeluaren faktorea ekuazioan sartu ahal izateko honen tangentea erabili da (3.38) eta (3.39) Ekuazioetan bezala. Kasu hauetan, iturri bilgailuen helburu nagusia solidoen arrastea ekiditea da, iturriak diluituak eta altuak baitira sistema mota hauetan. Hortaz, H_F -ren balio ezberdinetarako iturkuntzarako abiadura minimoa ez denez asko aldatzen, hodi ez-porotsuen korrelazioan H_F faktorea ez sartzeak ez du estratifikazio efektu garrantzitsurik sortu.

Kasu honetan ere (3.28) Ekuazioarekin lortu da doiketa egokiena eta honen zergatiak aurreko kasuan komentaturiko berdimentsuak dira. Beraz, terminoen berretzailak eta konstante biderkatzailea doitu dira eta hurrengo ekuazioa lortu da:

$$(Re_0)_{ms} = 0.23Ar^{0.5} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{0.8} \left(\frac{L_H}{D_F}\right)^{0.05} \left(\tan\frac{\gamma}{2}\right)^{-0.5} \quad (3.55)$$

3.48. Irudian erakusten da emaitza esperimentalak proposatu den (3.55) Ekuazio honetara nola doitzen diren.



3.48. Irudia. Proposaturiko (3.55) Ekuazioarekin kalkulaturiko iturkuntzarako abiadura minimorako Reynolds zenbakiaren balio teorikoen eta balio esperimentalen arteko konparaketa hodi ez-porotsuen kasuan.

3.48. Irudian ikus daitekeen bezala, emaitza esperimentalak oso ondo doitu dira (3.55) Ekuaziora eta doiketa honi dagokion erregresio koefizientearen balioa $R^2 = 0.92$ da. Aurretik aipatu den bezala, nahiz eta (3.55) Ekuazioan H_F -ren faktorea ez den sartu 3.48. Irudian ez da estratifikaziorik igartzen.

Beraz, hiru konfigurazio ezberdinetarako garaturiko ekuazioak alderatzen bada, hau da, (3.53), (3.54) eta (3.55) Ekuazioak, hurrengo ondorioak lortzen dira:

- Konfigurazio guztietan ohandze estatikoaren altuera (H_0), airearen sarrerako diametroa (D_0) eta solidoaren ezaugarriak (d_p eta ρ_s) izan dira faktore garrantzitsuenak. Hori dela eta, proposaturiko hiru korrelazioetan Ar eta H_0/D_0 moduluak azaltzen dira. Bestalde, Arquimedes-en zenbakiaren berretzailea kasu guztietan 0.5 izan da, bibliografian aurki daitezkeen beste hainbat korrelazioetan bezala [23, 140, 261, 323, 340]. H_0/D_0 moduluak oster, zenbat eta sistema egonkorragoa izan berretzaileak balio txikiagoa du, hau da, hodirik gabeko sistemetan balio altuena du eta hodi ez-porotsudun sistemetan baxuena.
- Iturri bilgailuaren parametroak (batez ere diametroa) faktore esanguratsua izan dira hiru konfigurazioetan, nahiz eta hauen esanguratasun maila ez izan aurrekoen bestekoa. Hala ere, sartu egin behar izan dira korrelazioetan bi arrazoirengatik: alde batetik, esanguratsuak direlako; eta bestetik, estratifikazio fenomenoak murrizteko.
- Azkenik, erdiko hodiak erabili diren kasuetan, hauek erlazionatzen dituzten parametroak ere esanguratsuak izan dira (IP irekiduradun kasuetan, L_H hodi ez-

porotsuen kasuan eta D_T bien kasuan). Hori dela eta, (3.54) eta (3.55) Ekuazioetan sartu egin behar izan dira faktore hauek.

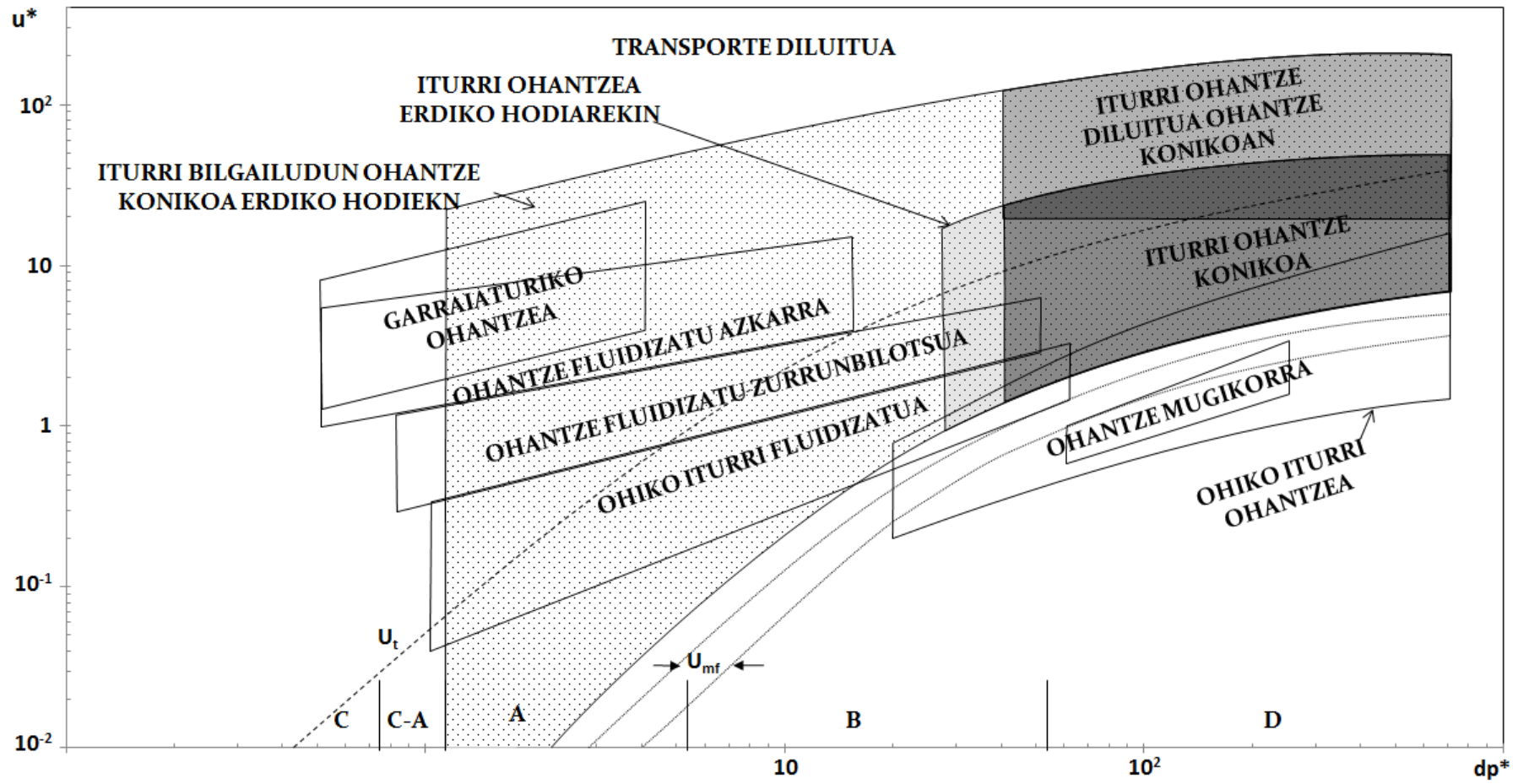
3.5. OPERAZIO EGONKORREKO MUGAK

Nahiz eta iturri bilgailua erabiliz partikula finak tratatu daitezkeen era egonkorrean, aztertu diren hainbat saiakuntzek erregimen ezegonkorra dute airearen abiadura handietan. Hau hodorik gabeko sistemetan gertatzen da batez ere. Irekiduradun hodiekin buruturiko hainbat saiakuntzetan ere erregimen ezegonkorra lortu da. Hortaz, atal hau bukatzeko, konfigurazio bakoitzaren operazio egonkorrerako mugak definitu dira saiakuntza guztien emaitzen batezbestekoa kalkulatu, eta hainbat aldagai geometriko egonkortasunean duen eragina aztertu da.

Mathur eta Gishler [233] izan ziren iturri ohandzea erabili zuten lehenak. Hasiere batean iturri ohandzeak ohandze fluidizatuen aldaera gisa hartu zituzten zenbait ikertzailek. Urteak aurrera egin ahal ohiko iturri ohandzeen hainbat aldaera egin dira operazio tartea zabaltzeko. Besteak beste, partikula mota eta tamaina ezberdinekin lan egitea eta ohandzearen altuera handiagoak erabiltzea lortu da.

Hala ere, iturri ohandzeek betidanik izan duten erroka nagusia eskala handitzea izan da. Izan ere, hodorik gabe egindako aurreko lanetan ikusi denez [261], iturri ohandze konikoak egonkorak izateko parametro garrantzitsua airearen sarrerako diametroaren eta partikula diametroaren arteko erlazioa da. Orain arte, iturri ohandze konikoetan hodorik gabe lan egin ahal izateko aipaturiko erlazioaren balioak 20 – 30 baino txikiagoa izan behar zuen. Tarte honetatik kanpoko balioetan era egonkorrean lan egin ahal izateko nahitaezkoa da erdiko hodia erabiltzea.

Hortaz, erdiko hodorik gabeko iturri ohandzeetan partikula tamainaren faktorea muga garrantzitsua izan da eta arazo honen konponbide ohikoena erdiko hodia erabiltzea izan da. Iturri bilgailuari esker posible izan da partikula mota ezberdinekin (solido dentsitate eta partikula tamaina ezberdinak) lan egitea iturri ohandze erregimenean. Pablos-en tesian [283] iturri bilgailudun iturri ohandze konikoak erabili ziren partikula fin eta ultrafinak lehertzeko, eta iturri bilgailu zein erdiko hodiak erabiliz operazioko tartearen mugak definitu ziren, 3.49. Irudian [284] ikus daitezkeen bezala.

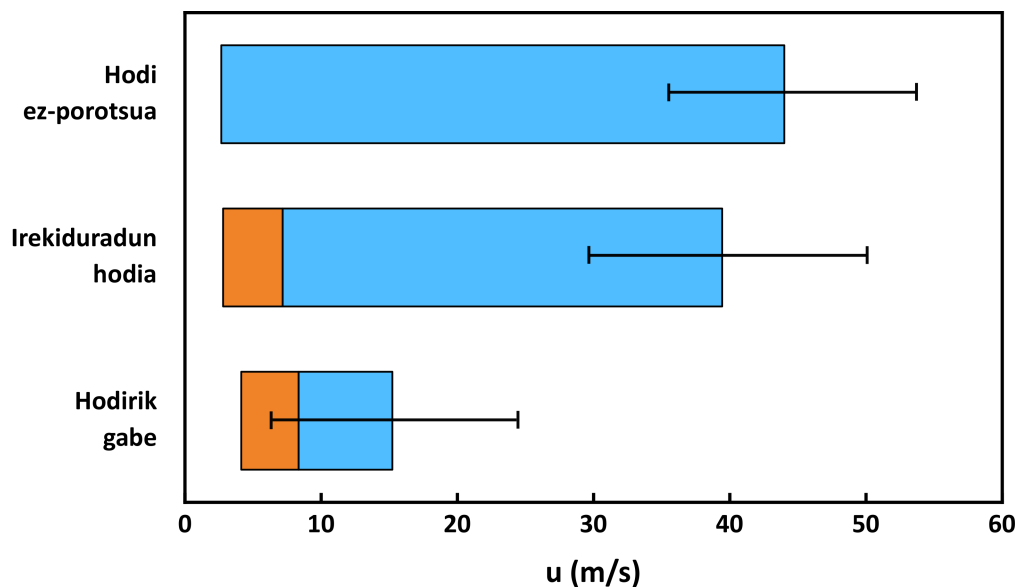


3.49. Irudia. Iturri bilgailua eta erdiko hodia duten iturri ohantze konikoen eta ohiko gas-solido teknologien operazio mapa [284].

3.49. Irudian argi ikusten da iturri ohandzearen aldakortasuna, izan ere, erabilpen tartea beste edozein teknologia baino zabalagoa da. Solido mota (solidoaren tamaina eta dentsitatea) ezberdinekin lan egin ahal izateaz gain (Geldart sailkapeneko D, B eta A multzoko solidoekin), solido mota berdina erabiliz abiadura tarte oso zabalean lan egitea ahalbidetzen du.

Pablos et al.ek [284] garatu eta argitaratu zuten operazio mapak (3.49. Irudia) oso ondo azaltzen du tesi honetan erabili den iturri ohandzearen operazio tartea, izan ere, tesi honetan erabili diren solidoak 3.49. Irudia egiteko erabili direnen antzekoak izan baitira ($0.25 - 0.05 \mu\text{m}$). Hala ere, 3.49. Irudiak operazio tartearen mugak era orokorrean erakusten ditu (partikula tamaina eta airearen abiadurarekiko), eta ez da zehazten zein baldintzatan lortzen den egoera ezegonkorra. Hori dela eta, tesi honen ikerketa hidrodinamikorako egindako esperimentazioaz baliatuz, era egonkorrean funtzionatu ahal izateko baldintza esperimentalen mugapena edo lanerako tartea zehaztuko da jarraian.

Hala ere, zenbait baldintza esperimentaletan ezin da operazio egonkorra lortu 3.49. Irudiko operazio leihoan, eta azpiatal honetan sistema hauek bereizi eta azalduko dira. 3.50. Irudian erakusten da konfigurazio bakoitzerako operazio tarte egonkorra. Konfigurazio bakoitzeko parametro hidrodinamikoaren balioak (iturkuntzarako abiadura minimoa, erabateko iturkuntzarako abiadura eta burbuilazko iturkuntzarako abiadura) konfigurazio horretan aztertutako sistema guztien batezbestekoak dira.



3.50. Irudia. Hodirik gabe, irekiduradun hodia eta hodi ez-porotsuen operazio tartea.

3.50. Irudiak erakusten duen bezala, agerian geratzen da konfigurazio mota bakoitzaren operazio tarte egonkorra oso ezberdina dela. Aipatu behar da tarte bakoitza bi azpitartez osaturik dagoela: alde batetik, iturkuntza erregimena (iturkuntzarako

abiadura minimoaren eta erabateko iturkuntzarako abiaduraren arteko tartea); eta bestetik, erabateko iturkuntza erregimena (erabateko iturkuntzarako abiaduraren eta burbuilazko iturkuntzarako abiaduraren arteko tartea). Bestalde, 3.50. Irudian erakusten diren balioak batezbestekoak direnez, balio hauen %95eko konfidantza tartea ere irudikatu dira (errore barren bidez adierazita).

Hortaz, 3.50. Irudia aztertuz, hodirik gabeko sistemak dira operazio tarte egonkor txikienak dituztenak. Izan ere, beraietan behar da iturkuntza minimorako abiadurarik handiena eta burbuilazko iturkuntzarako abiadurarik txikiena erakusten dutenak. Irekiduradun hodidun sistemen kasuan, airearen abiaduraren balio txikiagotan lan egiteko gai dira eta abiaduraren balio handiak behar dituzte erregimena ezegonkortzeko. Hortaz, batezbesteko balioak kontuan izanda, irekiduradun hodian operazio tarte hodirik gabekoena baino hiru aldiz handiagoa da.

Azkenik, hodi ez-porotsudun sistemak dira operazio tarte zabalena duten sistemak. Irekiduradun hodiekin baino abiadura txikiagoa behar dute iturkuntza minimorako, eta 2. Kapituluaz azaldu den bezala, ekipoak baimentzen duen emari guztia erabil daiteke ohandura egonkor dela. Irekiduradun hodiak erabilitako sistemetan ere kasu gehienetan ez da egoera ezegonkorrera heltzen. Beraz, hodi mota bi hauetan, baliatzen arrastea izan arte operatu ahal izatea era egonkorrean. 3.50. Irudian osteran, ekipoaren ahalmena jarri da goi muga, hots, 40 m/s eta 44 m/s , irekiduradun hodia eta ez-porotsua erabili direnean, hurrenez hurren.

Bestalde, hodirik gabeko sistemetan eta irekiduradun hodidun hodia dute netan, biek antzeko tartea dute iturkuntza erregimenean, baina bigarrenaren kasuan abiaduraren balio txikiagoetara dago desplazatua. Beraz, bi sistema mota ezberdinetan iturkuntzarako abiadura minimotik gora antzeko gasaren abiadura gehikuntza behar dute erabateko iturkuntza erregimena lortzeko.

Funtzionamendu egonkorreko baldintzetan mugatu aurretik, egoera ezegonkorra edo funtzionamendu ezegokia definitu behar da. Hau da, iturri ohandura erregimenean ezaugarri den mugimendu ziklikoa izan behar dute partikulek eta berari dagozkion guneak garbi bereiztu behar dira.

Iturri ohandura iturburuaren portaera izaten da ezegonkortasunaren adierazle garbiena. Egoera egonkorrean iturriak etengabe egon behar du ikusgai, hau da, funtzionamendu ezegokitzat hartuko da iturria desagertu eta agertu egiten bada. Oro har, egoera hau izan da ezegonkortasunaren adierazle, baina kasu batzuetan iturria ohandura erdian sortu beharrean horma kontrari agertzen da, hots, paretan zehar. Bestalde, iturria agertu eta desagertu egiten denean, ohandura ere gora-behera ikusten da (slugging efektua) eta presio aldaketa handiak gertatzen dira. Honek puzgailuan kalteak eragin ditzake eta eskala handian (industria mailan) arazo larriak sortu. Itur-

gunearen funtzionamendua iturriarekin lotuta dago, hau iturgunearen amaiera baita. Hortaz, nahiz eta iturgunea begi bistaz ezin den ikusi, iturburuan ikusitako ezegonkortasunak aplikagarriak dira iturgunean.

Egonkortasunaz gain eraginkortasuna ere garrantzitsua da, hau da, bi faseen arteko kontaktu egokia. Gas-solido kontaktua hobetzeko solidoaren zirkulazio azkarra ezinbestekoa da, izan ere, modu honetan solido kantitate handiagoa egongo da uneoro airearekin kontaktuan eta, beraz, masa eta bero transferentziak ere handiagoak izango dira uneoro. Hala ere, solidoaren zirkulazio azkarra lortzeko modu bakarra gasaren abiaduraren balio handiak erabiltzea da. 3.50. Irudiaren arabera, hodi ez-porotsuak dira abiaduraren balio handiak erabiltzea baimentzen duten sistemak, baina kasu hauetan solido kantitate txikia sartzen da iturgunera eta zirkulazio motela lortzen da. Bestalde, gainerako bi konfigurazioetan gasaren abiaduraren balioa handitzean sistema ezegonkortu egiten da; hodirik gabeko kasuetan delarik tartea estuena. Beraz, aplikazioaren arabera aukeratu behar da konfigurazio egokiena egonkortasuna eta eraginkortasuna kontuan izanda.

Erabilitako hodi ez-porotsudun sistema guztiak egonkorak izan dira, hortaz, hodi mota hauei buruz ez da aipamenik egingo. Bestalde, irekiduradun hodiak dituzten zenbait sistema eta, batez ere zenbait hodirik gabeko sistemak, ezegonkorak izan dira. Hortaz, ezegonkorak izan diren sistemak aipatuko dira lehendabizi eta ostean aldagai geometriko ezberdinen aldaketak egonkortasunean duen eragina azalduko da.

3.5.1. Hodirik gabeko sistemak

Aipatu behar da hodirik gabe burutu diren saiakuntza guztietan, abiadura muga jakin bat baino handiagoa denean, sistema ezegonkortu egiten dela (gehienetan egoera egonkorraren ostean). Hala ere, ohantzearen altuera izan da ezegonkortasunean gehien eragin duen faktorea. Harearen frakzio lodiena ($d_p = 0.246\text{ mm}$) eta ohantzearen altuera zein angelu zabalenak erabili diren kasuetan ($H_0 = 0.27\text{ m}$ eta $\gamma = 45^\circ$) iturri bilgailu zabalenarekin ($D_F = 0.20\text{ m}$) soilik lortu dira sistema egonkorak, baina gasaren abiadura txikietan ezegonkorak dira. Zenbat eta partikula txikiagoa izan ohantze altuen ezegonkortasuna handiagoa da, eta frakzio txikiena ($d_p = 0.093\text{ mm}$) erabiliz iturri bilgailua ez da gai ohantze altua duten sistemak egonkortzeko. Zerrautsaren kasuan, sistema guztiak izan dira egonkorak, baina kontuan izan behar da partikula tamaina handiagoa dela ($d_p = 0.344\text{ mm}$).

Ohantzearen altueraz gain, kontaktorearen angelu txikienean ($\gamma = 28^\circ$) ezinezkoa izan da sistema egonkorra izatea. Izan ere, airea ez da gai iturgunea irekitzeko eta ohantzean zehar zabaltzen da burbuila handiak eta slugging efektua sortzen duela.

Bestalde, iturri bilgailuari dagokionez, ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren azpialdearen arteko distantzia (H_F) laburtzeak (muga batera arte) iturkuntza minimorako behar den abiadura txikiagoa izatea dakar eta tesi honetan erabilitako edozein H_F -tan sistema egonkorra izan da (aurretik aipatu diren kasuak kenduta). Bilgailuaren diametroa (D_F) aldatzean oster, bilgailu zabalak ($D_F = 0.20\text{ m}$) hobeto biltzen du iturria, beti ere bilgailuaren eta kontaktorearen pareten artean hutsune onargarria dagoenean. Izan ere, ohantzearen altuera txikia denean ohantzearen gainazalaren diametroa txikia da eta hainbat kasutan operazio tarte zabalagoa lortu da iturri bilgailu estua erabilia.

Airearen sarrerako diametroak (D_0) ez du asko eragiten ezegonkortasunaren aldetik, hau da, sistema jakin batean egoera egonkorrean opera daiteke airearen sarrerako diametro guztietarako ($D_0 = 0.03, 0.04$ eta 0.05 m). Hala ere, aurretik aipatu den bezala, sarrerako diametroa handitzean, iturkuntza minimorako eta burbuilazko iturkuntzarako behar diren abiadurak txikiagoak dira, hau da, operazio tarte airearen abiaduraren balio txikiagoetara desplazatzen da.

Azkenik, solido mota (ρ_s) aldatu arren, sistema egonkorra da. Izan ere, solido dentsuagoak erabiltzean operazio tarte airearen abiaduraren balio handiagoetara desplazatzen da, aireak abiadura handiagoak behar baitu iturria egonkor mantentzeko (u_{ms}) baita ohantzean zehar burbuilak sortzeko (u_{bs}) ere. Efektu berdina lortzen da solidoaren partikula diametroa handitzean.

3.5.2. Irekiduradun hodia

Hodirik gabeko sistemetan ez bezala, kasu honetan aldagai geometriko guztien balio guztietarako sistemak egonkorak izan dira. Beraz, zuzenean aldagai ezberdinen aldaketak egonkortasunean nola eragiten duen aztertzea pasako da.

Kontaktorearen gune konikoaren angeluari (γ) dagokionez, balioa zenbat eta handiagoa izan sistema egonkorragoa da, hau da, ezegonkortasuna gertatzekotan airearen abiaduraren balio handietan gertatzen da. Izan ere, zenbat eta kontaktorearen angelua estuagoa den ohantzea gero eta gutxiago pausatzen da kontaktorearen horman eta aireak ohantzearen pisu guztia gainditu behar du. Fenomeno hau gehienbat 28° ko kontaktoreekin gertatzen da, honi dagozkion sistemak izan baitira ezegonkorrenak.

Iturri bilgailuari dagokionez, hodirik gabeko sistemetan duen eragin berdina du irekiduradun sistemetan. H_F -ren balioa zenbat eta txikiagoa izan ezegonkortasun arazo handiagoak gertatzen dira. Bestalde, sistema hauen iturria oso dentsua denez iturri bilgailu zabalek ezegonkortasun arazo txikiagoak dituzte. Hala ere, hodirik gabeko sistemetan bezala, iturri bilgailu zabala ohantzearen gainazaletik gertu kokatzen bada

eta ohantzearen altuera txikiak erabiltzen badira, bilgailu estuek baino ezegonkortasun arazo handiagoak dituzte.

Ohantze estatikoaren altuera (H_0) handitzean operazio tartea airearen abiaduraren balio handiagoetara desplazatzen da. Izan ere, airearen abiaduraren balio handiagoak behar dira iturria modu egonkorrean mantentzeko, eta aireak eraztungunean gora burbuila forman igotzeko gainditu behar duen presioa ere handiagoa da. Beraz, sistema egonkorra den kasuetan, ohantzearen altuera handiak ezegonkortasun arazo txikiagoak dituzte.

Airearen sarrerako diametroak (D_0) eta erdiko hodiaren diametroak (D_T) modu berean eragiten dute sistemaren ezegonkortasunean. Bi faktore hauen balioa handitzean ezegonkortasun arazoak handiagoak dira. Bestalde, Altzibar-en tesian [20] aipatzen den bezala, komenigarria da sarrerako diametroa hodiaren diametroaren berdina edo txikiagoa izatea. Era honetan, kontaktorerara sartzen den airea gehienbat hoditik igoko da eta ezegonkortasunak murriztu egingo dira. Hala ere, komenigarria izaten da airearen zati bat eraztungunean zehar igotzea, honek ohantzea laxatu egiten baitu, eta beraz, solidoen zirkulazio azkartu.

Solido motaren kasuan, hodirik gabeko sistemetan bezala, partikula tamaina eta solidoaren dentsitatea txikitzean kurba karakteristikoa abiaduraren balio txikiagoetara desplazatzen da eta ezegonkortasun arazoak areagotu egiten dira.

Azkenik, esperimendazioan ikusi denaren arabera, irekiduradun hodien irekidura portzentaia (IP) handitzean, ohantzea ezegonkorragoa da. Izan ere, IP ren balioa handitzean hodirik gabeko sistemetara hurbiltzen da. Aldiz, IP ren balioa txikitzean, hodi ez-porotsuen sistemetara hurbiltzen da eta egoera egonkorragoak lortzen dira, nahiz eta kontaktu eta zirkulazio eskasagoak lortu.

4. KAPITULUA

IRUDIEN BIDEZKO PARTIKULEN JARRAIPENA

4.1	SISTEMA OPTIKOAK ETA BERAIEN OINARRIA	207
4.2	ESPERIMENTUEN DISEINUA	212
4.3	PROZEDURA ESPERIMENTALA	219
4.4	PARTIKULEN JARRAIPENERAKO METODOAK	222
4.4.1	Gune dentsorako kodea (Farneback-en metodoa)	225
4.4.2	Gune diluiturako kodea	234
4.5	SISTEMA OPTIKOAREN KALIBRAKETA	245
4.5.1	Distantzia optikoaren kalibraketa	245
4.5.2	Espaziagailuaren posizioaren kalibraketa	247
4.5.3	Gune dentsoko kodearen kalibraketa	249
4.5.4	Gune diluituko kodearen kalibraketa	255
4.6	IRUDIEN BIDEZKO PARTIKULEN JARRAIPENAREN EMAITZAK	257
4.6.1	Abiadura oszilazioak	257
4.6.2	Profil erradialak	261
4.6.3	Profil Axialak	265
4.6.4	Iturgune/iturriaren forma	266
4.6.5	Irekiduradun hodian irekidura portzentaiaren eragina	270

4.6.6	Airearen abiaduraren eragina	274
4.6.7	Iturri ohantze konikoaren abiadura mapak	281
4.6.8	Solidoaren eragina abiaduran	286

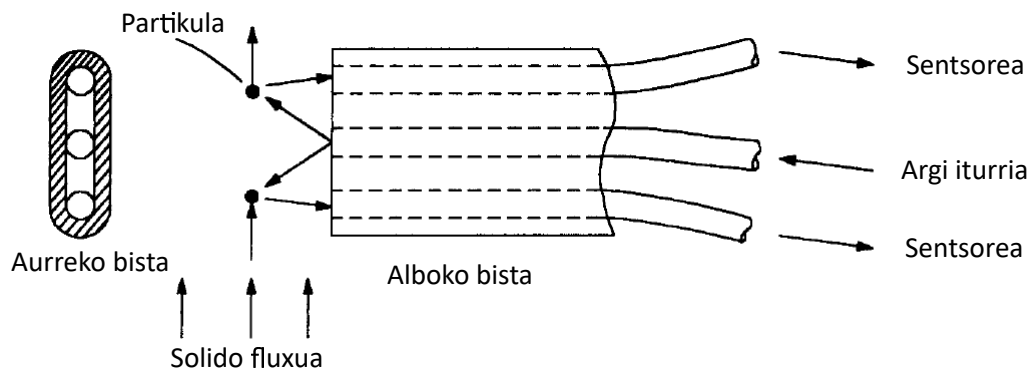
3. Kapituluhan ikusi ahal izan den bezala, iturri bilgailua erabiltzeak dakartzan onurak izugarriak dira. Gailu hau erabili gabe, ohiko iturri ohandze edo iturri ohandze konikoetan erregimen egonkorretan operatuz erabili daitekeen partikula tamaina txikiena ($D_0 = 0.04m$ -ko sarrerako diametroa erabiliz) $d_p = 1,3mm$ diametrokoa da, hau da, D_0/d_p erlazioak har dezakeen gehieneko balioa $20 - 30$ da (60 ohiko iturri ohandzeetan, [261]). Muga honek iturri ohandzeen eskala handitzea eragozten du, teknologia honen erabilera industria mailan ezinezkoa bihurtuz. Aldiz, aipagarria da tesi honetan iturri bilgailua erabiliz $d_p = 0.093mm$ -ko batezbesteko partikula diametroa duen ohandze erabili dela erregimen egonkorrean operatuz. Hala, iturri bilgailuaren bidez D_0/d_p erlazioaren balioa 430era igo da.

Bestalde, partikula finekin lan eginez lortzen diren erregimenak gainerako partikulekin lorturikoen ezberdinak dira. Izan ere, partikula lodiak erabiltzerakoan lorturiko iturriak txikiak eta uniformeak diren bitartean partikula finak erabiltzean lorturiko iturriak airearen emariaren araberakoak dira: aire emari txikiak erabiltzerakoan oso altuera handiko iturriak lortzen dira, bai eta kaotikoak ere; bestalde, airearen emaria handitzerakoan iturriak bilgailu osoa betetzen du iturri oso indartsua sortuz.

Beraz, iturri bilgailuaren erabilera ezinbestekoa da partikula finak erabiltzerako orduan, edota iturri ohandzearen eskala handitzeko. Hau guztia dela eta, iturri bilgailuak sisteman duen eragina ezagutzeko asmoz, ezin bestekoa da kontaktorearen barnean ematen diren fenomeno guztiak ezagutu eta ulertzea, batez ere iturri bilgailuaren barnean. Izan ere, gailu honek gasaren ibilbidea eta erresidentzia denbora aldatzen ditu, hau da, airearen frakzio handiena iturgunetik ateratzerakoan bilgailura sartzen da iturrian dauden solidoekin batera, baina gailuaren goiko aldera heltzean berriz ere behera egin behar du iturritik gora doazen partikulekin berriz ere kontaktuan jarri. Modu honetan, iturri bilgailudun iturri ohandze konikoetan iturrian gasak egingo lukeen ibilbidea ohiko iturri ohandzeetan egingo lukeena baino hiru aldiz handiagoa izango da.

Beraz, bilgailuaren barneko solidoen mugimendua aztertzeke nahikoa da iturri ohandze konikoan zirkulatzen ari diren solidoen jarraipena egitea. Hala ere, solidoen jarraipena burutzea ez da lan erraza sistemak eta batez ere partikula motak asko eragiten baitu. Tesi honetako 1. Kapituluhan aipatu den bezala, bibliografian hainbat teknika mota ezberdin aurki daitezke solidoen jarraipena burutzeko, teknika bakoitzak alde onak zein txarrak dituelarik.

Gure ikerketa taldean, partikulen jarraipenezko hainbat lan argitaratu dira [24, 114, 116, 118, 267, 270, 271, 276, 275, 321, 324, 329, 332, 334, 335, 336, 337, 339, 341]. Erabilitako teknikak bi izan dira: alde batetik, kameraren bidezko jarraipena; eta bestetik, zuntz optikoaren erabilera. Bi hauen artean erabiliena zuntz optikoa izan da, kameraren bidez solidoen ibilbidea baino ezin baitzen lortu [270, 276, 334, 336, 341].



4.1. Irudia. Zuntz optikoaren eskema eta funtzionamendu orokorra [333].

4.1. Irudian [333] erakusten den bezala, gure ikerketa taldeak erabilitako zuntz optikoa argi iturri bat eta bi sentsorez osaturik dago. Hiru gailuak posizio horizontalean jartzen dira bata bestearen gainean, argi iturria sentsoreen artean kokatzen delarik. Partikula bat norabide bertikalean desplazatzen bada, argi iturritik jasotzen duen argia islatu eta lehenengo sentsoreak jasotzen du (behekoak, partikula behetik gora desplazatzen bada edota alderantziz) intentsitate piko bat sortuz. Partikula desplazatu ahala, honen islapena bigarren sentsorerera heltzen da eta honek ere intentsitate piko bat sortzen du. Beraz, bi seinaleen denbora desplazamendua eta bi sentsoreen arteko distantzia jakinda, partikularen abiadura kalkula daiteke.

Nahiz eta zuntz optikoaren teknikak oso erakargarriak diren, ezinezkoa da tesi honetan erabiltzea. Izan ere, partikularen tamaina handia izan behar da zuntz optikoak islatutako argia sentsoreak detektatzeko. Aurretik argitaratutako lanetan erabili diren partikula tamainak $1 - 8\text{ mm}$ artekoak izan dira. Hori dela eta, $0.093 - 0.246\text{ mm}$ tamainako partikulek sorturiko isladapena ez da nahikoa sentsoreek detektatzeko. Bestalde, zuntz optikoak emandako emaitzak adierazgarriak izateko gune oso diluituetan neurtutakoak izan behar dute, non partikulak indibidualki igarotzen diren sentsoreen aurretik. Izan ere, aldi berean partikula bat baino gehiago igarotzen badira zaila da jakitea lorturiko neurriak zein partikulari dagozkion. Aipatu den hau gune dentsuetan bano ezin da aplikatu, hau da, eraztungunean ohantzearen porositatea txikia da eta partikulak elkarrekin desplazatzen dira. Hori dela eta, sentsoreetara heldutako seinaleak partikula askorenak dira eta ezin da partikulen abiadura adierazgarria lortu iturri ohantze konikoen gune honetan.

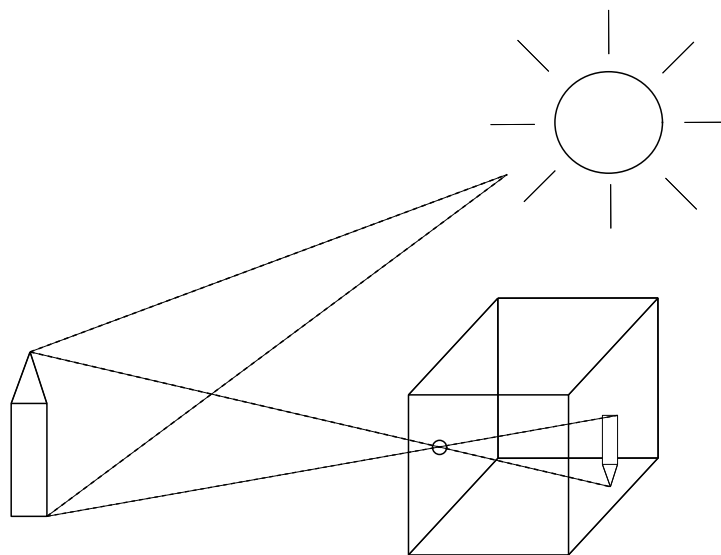
Hori dela eta, eta aurretik aipaturiko arrazoiengatik, tesi honetan zuntz optikoaren erabilera baztertu egin da. Honen ordez PIV (*Particle Image Velocimetry*) edo irudien bidezko partikulen jarraipenaren teknika erabili da. Jarraian azalduko da zertan datzan teknika hau eta berarekin lorturiko emaitzak.

4.1. SISTEMA OPTIKOAK ETA BERAIEN OINARRIA

2. Kapituluako 2.2 Atalean azaldu den bezala, tesi honetan iturri ohantze konikoaren barnean solidoen jarraipena burutzeko abiadura handiko kamera erabili da. Gaur egun, kamera hitza erabiltzen denean bideo edo argazki kameraz hitz egiten da, baina hauen artean ez dago ezberdintasun handirik. Izan ere, bi kamerek argazkiak edo irudiak sortzen dituzte, baina bideo kamerek hainbat irudi ematen dituzte denbora unitateko. Ohiko kameraren artean, bideo grabaketaren abiadura (irudi lorpen abiadura) 25 irudi segundoko izaten da eta abiadura honetatik gorako kamerak abiadura handiko edo “slow motion” (mugimendu geldoko) kamerak bezala ezagutzen dira.

Kamera bat azken finean sistema optiko bat da eta begiaren funtzionamendu berdina du. Gure inguruko gorputzek argia igortzen dute (islatutakoa) norabide guztietan eta horregatik ikus dezakegu. Kanpo edo inguruko argi izpiak gure begitatik sartu eta garunera igarotzen dira, honek informazioa prozesatuz eta irudia sortuz.

Behin fenomenoak ulerturik, aipatu behar da kamerak XI. mendearen hasieran izan zuela bere sorrera. Ibn al-Haitham arabiarrek eguzkia eta ilargiaren eklipseak aztertu zituen. Horretarako, argirik ez zegoen gela bateko zulo batetik ilargian islatzen ziren eguzkiaren argi izpiak pasarazi eta aurkako horman proiektatu zituen. Aipaturiko gela honi gela iluna deritza eta 4.2. Irudian erakusten da bere funtzionamendua.



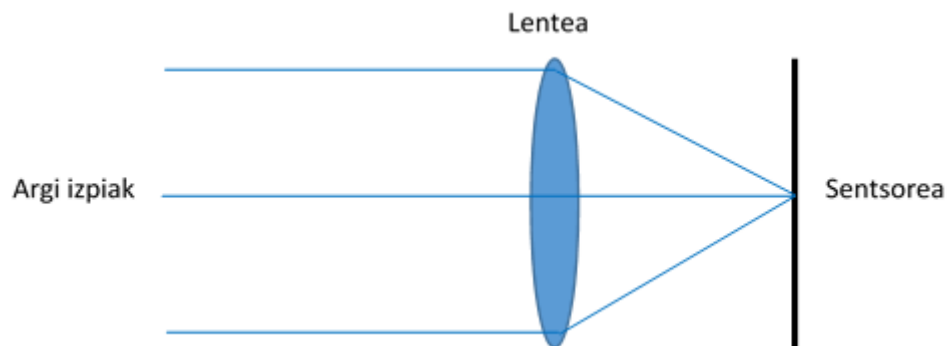
4.2. Irudia. Gela ilunaren funtzionamendua.

Aurrerago ikusienez, foku-distantzia egokiko lentea zuloan kokatuz gero irudi garbiagoak lortzen ziren. Hala, printzipio hau erabiliz hainbat objektu (eraikinak, zelaiak eta abar) erreproduzitzeko asmoarekin XVII eta XVIII. mendean marrazki tresna bezala erabiltzen hasi ziren. Muga nagusia irudiaren kontserbazioa zen, ez

baitzegoen modurik irudia gainazal baten gainean irudikatzeko (marrazketa izan ezik). Hau guztia dela eta, Louis Daguerre Frantziarra har daiteke kameraren sortzaile gisa. Honek, zilar ioduroz estalitako kobrezko plakak erabili zituen proiektatutako irudiaren gainazaltzat. Izan ere, zilarrezko gatz hauek argiarekiko sentikorrek dira eta merkurio lurrinak errebelatzaile bezala funtzionatzen du.

Nahiz eta Daguerreren asmakizuna izugarrizko aurrerakuntza izan zen, argazkilariak behartuta zeuden produktu kimiko ugari gainean eramatera eta, gainera, garai horietako kamerak dimentsio handikoak ziren. Zentzu honetan, aurrerapen handia eman zen zilar gatzak gelatinazko gainazal erresistentean nahastu zituztenean. George Eastman Kodak amerikarrak zeluloidezko zinta malguaren gainean kapa sentikorra aplikatzeko metodoa argitaratu zuen, negatiboak biribilkietan gorde ahal zirelarik. Hala, argazkia ez zegoen atera zen lekuan bertan errebelatu beharrik eta etxean egin zitekeen.

Deskribaturikoa kamera analogikoen sorrera da. Gaur egun berriz, gehien erabiltzen diren kamera motak digitalak dira (tesi honetan erabilitakoa digitala da). Bi moten arteko ezberdintasun nagusia irudia gordetzeko modua da. Izan ere, bi kameretan obturadoreari ematerakoan argi izpiak sartzen dira kamera barrura eta elementu fotosentikorrarekin jartzen dira kontaktuan, 4.3. Irudian ageri den bezala.



4.3. Irudia. Kamera analogiko zein digitalen funtzionamendua.

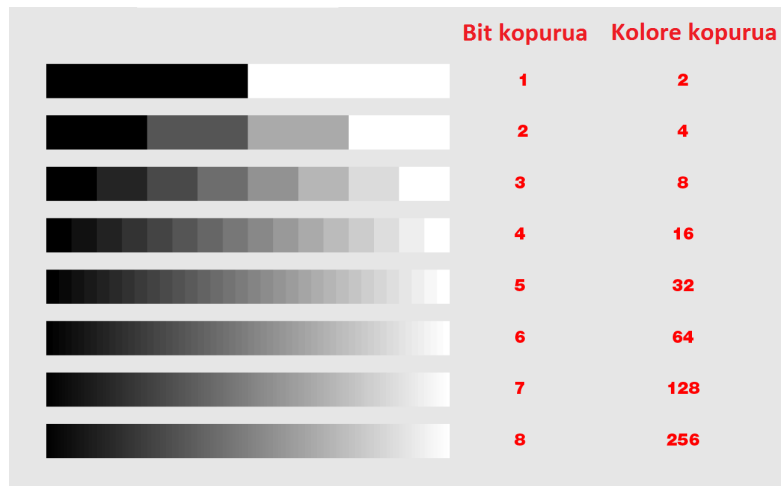
Hortaz, gaur egungo kamerak lehendabizikoen printzipio berari jarraitzen diote, hau da, kaxa ilun bat dira zeinetan alde bateko zulutik argi izpiak sartu eta bestean irudia jasotzen duen elementu fotosentikorra dute. Argi kantitatea zuloaren tamaina eta irekita dagoen denboraz kontrolatua dago.

Kamera analogikoen kasuan, elementu sentikorra aipaturiko zilar gatzak dituen filma da, eta digitaletan oster, sentsore elektronikoa. Analogikoen kasuan, zilar gatzak argiarekin kontaktuan jartzerakoan erreakzio fotokimikoa ematen da eta, ondorioz, film geruza bakoitzak argazki bat ateratzeko balio du soilik. Kamera digitaletako

elementu sentikorra argia atzeman eta seinale elektrikoan bihurtzen duten milioika fotodiodo edo fototrantsistorez osatua dago, CCD (*Charge-Coupled Device*) edo CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) deituak. Seinale elektriko hauek modu egokian prozesatuak izan ostean edozein memoria digitalean gorde daitezke.

Kamera digitalen sentsoire elektrikoak argiari sentikorrak diren hainbat sentsoire ñimiñoz osaturik dago. Hauek pixel izenarekin ezagutzen dira (*picture element*) eta irudi digitala sortzen duten unitate txikiak dira. Beraz, kamera digitalekin lorturiko irudiak pixelez osaturik daude, hau da, kolore homogeneoa duten hainbat laukiz (pixelak). Pixelak hartzen duen kolorea argiak sentsoire horretan duen intentsitatearen araberakoa izateaz gain, pixelaren bit (digitu bitarren bidez osaturiko informazioa) kopuruaren araberakoa da ere. Hortaz, zenbat eta pixel gehiago eta pixel bakoitzaren bit kopurua handiagoa izan, lorturiko argazkiaren bereizmena edo kalitatea handiagoa izango da.

Beraz, pixel bakoitzak kolore bat izango du eta bit kopuruaren araberakoa izango da. Irudi baten pixel bakoitzaren kolorearen informazioa kodifikatu eta gordezko beharrezkoak diren bit kantitateari kolorearen sakontasuna deritzo. Bit bat azken finean memoria posizio bat da eta 0 edo 1 balioa har dezake. Kolorearen sakontasuna bitetan zenbat eta handiagoa izan, irudiak kolore-sorta zabalagoa izango du eta pixel batetik besterako kolore aldaketa leunagoa izango da. Pixelak bit batekoak badira irudiak soilik bi kolore izango ditu: 0 kolore beltza eta 1 kolore zuria (gris kolorerik gabe). Ostera, bi bit erabiltzen badira hauen arteko konbinazioak 4 kolore ematen ditu, orokorrenak 00 kolore beltza, 11 kolore zuria eta 01 zein 10 tarteko gris kolore ezberdinak izanik. Beraz, aipatu bezala, pixelen bit kopurua handitzerakoan pixelak har dezakeen kolore kantitatea handiagoa da eta lortzen den irudiaren kalitatea hobetuzkoa da. 4.4. Irudian erakusten da bit eta kolore kopuruaren arteko erlazioa. Tesi honetarako erabili den kamera eta orokorrean, gaur egungo kamera mota gehienak 8 bitekoak izaten dira. Bit kopuru honekin pixelek 256 kolore ezberdin har dezakete, 00000000 beltza, 11111111 zuria eta tarteko konbinazio guztiak (254 kolore) gris eskala izanik. Gaur egun 24 biteko kamerak aurki daitezke 16.7 milioi kolore ezberdinak dituztenak, baina kamera hauek erabiliz lorturiko irudiak memorian gorde ahal izateko espazio handia behar da.



4.4. Irudia. Bit eta gris eskalaren arteko erlazioa.

Orain arte aipaturiko guztia kamera monokromo edo kolore bakarrekoei dagokie, hau da, txuri-beltzeko eta gris eskalako kamerak. Kolore hauetaz gain, gehiago lortu nahi badira elementu sentikor gehiago erabili behar dira. Kamera hauei RGB kamera (*Red Green Blue*) deritze eta kolore ezberdinak gorria, berdea eta urdinaren konbinazioz lortzen dira. Pixel baten kolorea lortzeko lau pixel erabiltzen dira: bat kolore urdinarekiko sentikorra dena, beste bat kolore gorriarekiko, beste bat berdearekiko eta azkeneko bat alfa kanala deritzona. Kamera hauen pixelak orokorrean (eta gutxienez) 8 bitekoak izaten dira, hau da, kolore gorria, urdina eta berdearen 256 kolore ezberdin edo eskala lortzen dira eta hauen konbinazioz lortzen da pixel baten kolorea. Hau dela eta, kolorezko kamerak 24 bitekoak izango dira, edo 32koak alfa kanala erabiltzen bada. Tesi honetan erabili den kamera monokromoa eta 8 bitekoa izan da, beraz, pixelaren balioak 0tik 255erainoko balioa hartzen dute. Arrazoi honengatik ez da gehiago sakonduko RGB kameretan.

Gaur egungo kamera digitalek memoria erauzgarria izaten dute eta argazkiak bertan gorde ohi dira. Tesi honetan erabilitako kamerak barneko memoria dauka eta bideoa grabatu edo argazkiak atera ostean ordenagailuan gorde daitezke.

Aurretik aipatu den bezala, kameraren elementu sentikorra argiarekiko babestua egoten da eta soilik obturadoreari ematerakoan jartzen dira kontaktuan, irudia sortuz. Kontaktuan dauden denborari esposizio denbora deritzo eta faktore oso garrantzitsua da. Izan ere, faktore honen arabera argi eta bereizmen handiagoko argazkiak lortuko baitaitezke. Argazkia atera nahi den objektua geldirik badago, esposizio denborak argazkiaren argiztapenean izango du soilik eragina. Baina objektua mugimenduan badago argiaren esposizio denborak objektuaren mugimenduarena (pixel batetik besterako mugimendua) baino txikiagoa izan behar du. Hau horrela ez bada, objektua ez da garbi azalduko irudian eta mugimendu efektua azalduko da, hau da, objektua

haloarekin azalduko da eta bereizmena galduko du. Efektu hau ekiditeko bi parametroen balioak alda daitezke: bereizmen denbora edo grabaketa abiadura. Lehenengoa, aipatu bezala, argia eta elementu sentikorraren arteko kontaktu denbora da eta objektuaren desplazamendua baino txikiagoa bada irudia bereizmen onargarriarekin lortzen da. Hala ere, honek irudiaren argiztapena txikitzea dakar. Bigarren parametroa berriz (grabaketa abiadura) bideo kamerek izaten dute, baina ez guztiek. Ohiko bideo kamerek segundoko 25 irudi ateratzen dituzte eta bideo kamera batzuk aukera ematen dute grabaketa abiadura igotzeko, hau da, 25 irudi segundoko baino gehiago. Hortaz, esposizio denbora aldatzea baliagarria ez bada (irudi ilunak lortzen direlako) grabaketa abiadura handituz irudi garbiagoak lortzen dira, beti ere grabaketa abiadura objektuaren abiadura baino handiagoa bada.

Tesi honetarako parametro hauen balioen aukeraketa egokia oso garrantzitsua izan da, izan ere, iturgunean edo iturrian solidoak abiadura handian desplazatzen baitira eta bereizmen handia edo irudi garbiak lortzeko beharrezkoa da bi parametro hauen balio optimoak aukeratzea.

Tesi honetan abiadura handiko bideo kamera erabili da, baina kameratik lorturiko bideoa irudi independenteen multzo bezala erabili da. Aurretik aipatu den bezala, irudi bakoitza hainbat pixelez osaturik dago eta hauetariko pixel bakoitzak 0 – 255 arteko balio bat du, erabilitako kamera 8 biteko kolore bakarreko kamera baita. Hortaz, grabaketetan lorturiko irudi bakoitza $n \times m$ dimentsioko matrizea da eta bideoa k kopuruko irudi sorta denez, azken finean $n \times m$ -ko k matrizeak dira.

4.2. ESPERIMENTUEN DISEINUA

Metakrilatoz edo PETez egindako kontaktore gardenek asko laguntzen dute begi bistaz iturri ohantze konikoen portaeraren ezagutzan, eta iturri bilgailudun iturri ohantze konikoetan ezinbestekoa izan da kurba karakteristikoekin batera lortzen diren erregimen ezberdinak ezberdindu eta ulertzeko. Ohiko iturri ohantzeetan material ezberdinekin lortzen diren erregimenak ongi ikertuak eta karakterizatuak daude, eta ezagunak dira dagoeneko.

Ikerketa taldean garatu eta patentatu den iturri bilgailua erabiltzean ordea, lorturiko kurba karakteristikoak erabiltzen den solidoaren eta sistemaren araberakoak dira. Barneko gailu hau Altzibarren tesian [20] garatu eta erabili zen lehendabizikoz tamaina ezberdineko partikulen ohantzean finen arrastea aztertzeke. Erabilitako solido nahastea 4 mm -ko partikula diametroa duten beirazko bolak eta 0.41 mm -ko partikula diametroko ogi arrailatuz osatua izan zen (beiraren dentsitatea ogi arrailatuaren bikoitza baino handiagoa izanik). Ohantzearen iturkuntzarako abiadura minimoa beirazko bolen menpekoa da eta abiadura handituz gero finen arrastea gertatzen da. Hala, finen arrastearen azterketa burutu baino lehen, tamaina ezberdineko beira eta ilar beltzak solido bezala erabiliz burutu zen azterketa hidrodinamikoa.

Sistema hauen azterketa hidrodinamikoan lorturiko kurba karakteristikoak iturri bilgailu gabe lorturikoen antzekoak izan ziren. Izan ere, partikula mota hauekin nahiko egonkorra da ohantzea iturri bilgailu gabe, eta bilgailua ezartzerakoan lortzen den aldaketa ez da handia. Bilgailua erabiltzean iturkuntzarako abiadura minimoa asko aldatzen ez zen arren karga galeran jaitsiera nabarmena zen.

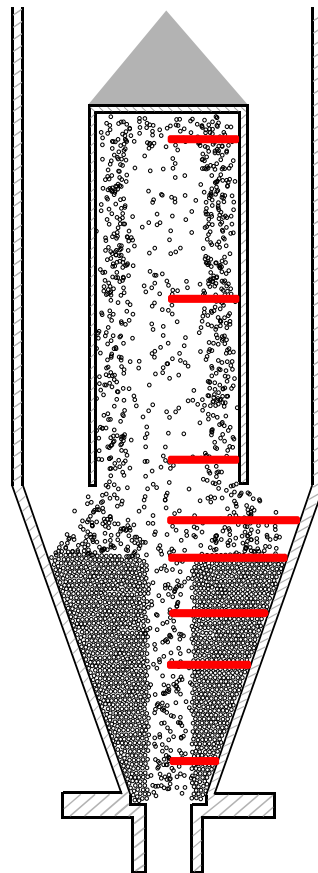
Iturri bilgailuak sistema ezberdinetan lorturiko iturriak bildu egiten ditu (bilgailura egokituz) eta finen arrastea jaitsi. Hala, argi dago iturri bilgailuak sistemaren egonkortasunean eragiten duena, eragin handiena iturrian delarik. Partikula lodiak erabiltzean, hau da, $D_0/dp < 20 - 30$ duen sistema erabiliz, iturriaren altuera eta sistemaren egonkortasuna handiagoa da iturri bilgailuaren diametroa handitzean [26]. Ostera, partikula oso finak erabiltzean sistemaren egonkortasuna izugarri handiagoa da iturri bilgailua erabiltzean.

Beraz, kasu hauetan iturri bilgailuaren barnean gertatzen den solidoaren mugimendua eta desplazamendua ezezagunak dira, eta oso garrantzitsua da hauen ibilbidea eta abiadura ezagutzea bertan gertatzen den gas-solido kontaktua ezagutzeko. Helburu hau betetzeko 2.2 Atalean deskribatu den sistema optikoa erabili da.

Aurretik aipatu den bezala, sistema optikoa abiadura handiko kamera, optika eta endoskopio sistemaz osaturiko dago. Sistema honen bidez endoskopioaren puntaren

aurreko aldean gertatzen den guztia ikusi eta grabatu daiteke. Kamera monokromoa denez, lorturiko bideoak edo irudiak gris eskalan lortzen dira eta ez da kolorerik azaltzen. Hala ere, solidoak endoskopio paretik igarotzen direnean argi iturriaren argi izpiak islatu eta kameraren sentsorera heltzen dira. Modu honetan, partikulak gris argi edo txuri (islapena oso handia bada) kolorearekin agertzen dira eta azpi beltzetik ondo bereizten dira. Beraz, kasu honetan ez da beharrezkoa koloredun irudiak erabiltzea.

Nahiz eta aurretik aipatu den iturri bilgailuaren eragin zuzenena iturrian izan, sistemaren egonkortasunean ere eragin handia duela ikusi da, eta ondorioz iturri ohantze konikoaren gune guztietan gertatzen dira aldaketak. Hau dela eta, iturri ohantze konikoaren ezaugarri diren hiru gune ezberdinetan neurtu da partikulen abiadura puntuala: eraztungunean, iturgunean eta iturrian. 4.5. Irudian erakusten da kamera erabiliz burutu diren neurketen posizioak iturri ohantze konikoan.



4.5. Irudia. Abiadura handiko kamerarekin iturri ohantze konikoan neurturiko posizioak.

4.5. Irudian erakusten den bezala, kamera erabiliz iturri ohantze konikoaren hiru gune ezberdinetako posizio ezberdinetan burutu dira saiakuntzak. Iturrian lau posizio ezberdinetan burutu dira neurketak: ohantzearen eta iturri bilgailuaren artean, eta gainerakoak iturri bilgailuaren barnean. Lehenengoaren bidez solidoak iturgunetik

atera berri duten abiadura neurtzen da eta gainerakoekin bilgailuaren barnean duten eboluzioa jarraitu daiteke. Azken hauetan bilgailuaren beheko, erdiko eta goiko zonaldeetan neurtu da. Eraztungunean eta iturgunean neurtzeko posizio berdinak erabili dira eta lau posizio ezberdin izan dira guztira.

3. Kapituluian ikusi ahal izan den bezala, erabiltzen den iturri ohandze konikoaren konfigurazioaren arabera erregimen eta kurba karakteristiko ezberdinak lortzen dira. Hau dela eta, atal honetarako burutu diren saiakuntza guztiak erdiko hodiaren edo konfigurazioaren arabera hiru talde ezberdinetan banatu dira. Erabilitako konfigurazioaren arabera solidoek burutzen duten ibilbidea eta duten abiadura ezberdina izaten da. Hau horrela izanik, tesi honetan egindako saiakuntzak konfigurazio ezberdinak erabiliz burutu dira, eta konfigurazio bakoitzaren barnean erregimen edo airearen abiadura ezberdinetan egin dira saiakuntzak.

Erdiko hodirik gabe eta irekiduradun hodiak erabiliz erregimen ezberdinak lortzen dira konfigurazio bakoitzean, horietariko bat egoera ezegonkorra izanik (burbuilazko iturkuntza erregimena). Azken hau ez da iturkuntza erregimena baizik eta egoera ezegonkorra (slugging efektua lortzen baita). Hau dela eta, erregimen honetan ez da saiakuntzarik burutu. Hodirik gabeko sisteman airearen bi abiadura ezberdinetan burutu dira neurketak, bakoitza erregimen egonkor bati dagokiolarik (iturkuntza eta erabateko iturkuntza erregimena). Irekiduradun hodia erabiliz airearen hiru abiadura ezberdinetan egin dira neurketak: bat iturkuntza erregimenean, beste bat karga galera maximoa lortzen den abiadura (u_{fs}) eta azkena erabateko iturkuntza erregimeneko airearen abiadura handian. Azkenik, hodi ez-porotsuak erabiliz airearen lau abiadura ezberdinetan egin dira neurketak: iturkuntzarako abiadura minimoan (u_{ms}), iturkuntzarako abiadura minimoaren bikoitza, hirukoitza eta 8.6 aldiz iturkuntzarako abiadura minimoan (karga galera handitzen den gunean). 4.1. eta 4.2. Tauletan erakusten dira konfigurazio bakoitzean erabilitako baldintzak harea eta zerrautsa erabiliz.

4.1. Taula. Konfigurazioen baldintza esperimentalak eta ohantzeetan azterturiko al-tuerak harea erabili denean.

Konfigurazioa		Airearen abiadura	Azterturiko altuera, H (cm)
Hodirik gabe		u_{ms}	3, 11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53, 73
		$3.31u_{ms}$	3, 11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53, 73
Irekiduradun hodia	$IP = \%78$	$2.7u_{ms}$	11.3, 15.5, 20
		u_{ms}	11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53
	$IP = \%57$	u_{ms}	11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53, 73
		$2.7u_{ms}$	3, 11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53, 73
	$IP = \%42$	$2.7u_{ms}$	20
Hodi ez-porotsua		u_{ms}	3, 11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53, 73
		$2u_{ms}$	11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53, 73
		$3u_{ms}$	11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53, 73
		$4u_{ms}$	3, 11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53, 73

Orain arte tesi honetan zehar bi material ezberdin erabili dira eta 3. Kapitu-luan hauen kurba karakteristikoak lortu dira. Hori dela eta, kameraren bidez buruturi-ko saiakuntzak bi materialekin burutu dira. Orain arte aipaturiko neurketa baldintzak material bezala harea erabili den kasukoak izan dira, eta aipatu behar da zerrautsare-kin neurketa kopuru txikiagoa egin dela. Zerrautsaren kasuan irekiduradun hodiaren irekidura portzentaiaren efektua ez da neurtu eta orokorrean emari kopuru txikiagotan neurtu da. Bestalde, konfigurazio ezberdin bakoitzeko iturkuntzarako abiadura mini-moan ez da neurtu bilgailuaren goiko aldean, izan ere, zerrautsarekin lorturiko iturriak oso txikiak dira eta ez dira gune honetara heltzen.

4.2. Taula. Konfigurazioen baldintza esperimentalak eta ohantzeetan azterturiko altuerak zerrautsa erabili denean.

Konfigurazioa	Airearen abiadura	Azterturiko altuera, H (cm)
Hodirik gabe	u_{ms}	3, 11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53
	$1.12u_{ms}$	3, 11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53, 73
Irekiduradun hodia ($IP = \%57$)	u_{ms}	3, 11.3, 15.5, 20, 24, 30.5
	$2.77u_{ms}$	3, 11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53, 73
Hodi ez-porotsua	u_{ms}	3, 11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53
	$2u_{ms}$	3, 11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53, 73
	$3u_{ms}$	3, 11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53, 73

Bestalde, 4.1. Taulan erakusten den bezala, irekiduradun hodiak erabili diren kasuan gehien erabili den hodia tarteko irekidura portzentaia duena izan da. Izan ere, gainerako irekiduradun hodiak irekidura portzentaia iturgunearen forman edo sakanaketan duen eragina aztertzeko baino ez dira erabili. Prozedura esperimentalean ikusi ahal izango den bezala, sistema optikoa eta irudien tratamenduaren bidez iturgune/eraztungune interfasearen posizioa neurtu daiteke eta, modu honetan, iturgunearen forma eta eboluzioa lortu.

Kamerarekin saiakuntzak aurrera eramanez ahal izateko sistema egonkorra aukeratu behar izan da eta 4.3. Taulan laburbiltzen dira konfigurazio bakoitzerako erabiltako faktore geometrikoak eta euren mailak.

4.3. Taula. Kameraz neurketak egiteko erabili diren sistemen faktore geometrikoak eta euren mailak.

Faktore geometrikoak	Mailak		
	Hodirik gabe	Irekiduradun Hodia	Hodi ez-porotsua
$\gamma(^{\circ})$	36	36	36
$D_0(m)$	0.04	0.04	0.04
$H_0(m)$	0.20	0.20	0.20
$D_F(m)$	0.20	0.20	0.20
$H_F(m)$	0.06	0.06	0.06
$D_T(m)$	0.04	0.04	0.04
$IP(\%)$			
Harea	–	78, 57, 42	–
Zerrautsa	–	57	–
$L_H(m)$	–	–	0.07

4.3. Taulan erakusten den bezala, konfigurazio guztietarako sistema berbera erabili da, izan ere, 3. Kapituluaren ikusi ahal izan baita konfigurazio ezberdin guztietarako 4.3. Taulan erakusten den sistema dela egonkorra. Aipagarria da harearen kasuan soilik frakzio lodiena erabili dela, hau da, batezbesteko 0.246mm partikula tamaina duen harea frakzioa.

Beste alde batetik, partikula tamainaren eragina aztertu nahi izan da eta horretarako sistema ezberdina aukeratu da. Sistemaren egonkortasuna ziurtatzeko asmoz, hodi ez-porotsudun konfigurazioa aukeratu da eta harearen frakzio lodienak erabili dira, hala nola, 0.246 eta 0.155 batezbesteko partikula tamaina duten harea frakzioak. 4.4. eta 4.5. Taulatan erakusten dira erabilitako baldintza esperimentalak eta faktore geometrikoen mailak.

4.4. Taula. Partikula tamainaren eragina aztertzeke baldintza esperimentalak.

Konfigurazioa	Partikula tamaina (mm)	Airearen abiadura	Azterturiko altuera, H (cm)
HEP	0.246	u_{ms}	3, 11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53, 73
		$1.5u_{ms}$	3, 11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53, 73
		$2u_{ms}$	3, 11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53, 73
	0.155	u_{ms}	3, 11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53, 73
		$1.5u_{ms}$	3, 11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53, 73
		$2u_{ms}$	3, 11.3, 15.5, 20, 24, 30.5, 53, 73

4.5. Taula. Partikula tamainaren eragina aztertzeke erabilitako sistemaren faktore geometrikoak eta euren mailak.

Faktore geometrikoak	Mailak
γ ($^\circ$)	28
D_0 (m)	0.04
H_0 (m)	0.20
D_F (m)	0.15
H_F (m)	0.06
D_T (m)	0.04
L_H (m)	0.07

4.3. PROZEDURA ESPERIMENTALA

Atal honetan deskribatzen den moduan, esperimentuak burutu ahal izateko erabili den prozedura esperimentalak antzekoa izan da saiakuntza guztietarako. Aurre-rago azalduko den bezala, esperimentuen arteko aldaketa bakarrak neurtu nahi izan den iturri ohantze konikoaren eremuaren araberrakoak izan dira, gune diluituan edo dentsoan neurtzeko baldintzak ezberdinak baitira.

Atal honen helburua solidoen abiadura neurtzea denez, beharrezkoa da kamera kontaktore barrura sartzea eta horretarako beharrezkoa da endoskopio sistema erabiltzea. Hala ere, endoskopioa errektore barruan sartu ahal izateko kontaktorearen horman hainbat altuera ezberdinetan 15 mm-ko zuloak egin behar izan dira. Zuloa eta endoskopioaren arteko zirriketua estaltzeko kautxuzko junta bat erabili da, modu honetan zuloa ondo itxita geratzen da eta ez da ohantzearen galerarik gertatzen.

Sistema optikoarekin saiakuntzak burutzeko jarraitu beharreko pausuak hurrengoak dira: lehendabizi, neurtu behar den altuerako zuloa ez ezik beste altuera guztiei dagozkien kontaktorearen hormako zuloak estali behar dira. Behin kontaktorea prest jarri denean, sistema esperimentalaren osagai guztiak kokatu dira, hau da, dagokion kontaktorea, iturri bilgailua, erdiko hodia (erabili behar den kasuetan) eta gasaren sarrerako diametroa. Osagai guzti hauek plantan kokatu dira eta kontaktoreari airearen sarrerako eta irteerako hodiak konektatu zaizkio. Planta muntatua dagoelarik erraila sistema (erradiala, bertikala eta horizontala) instalatu da eta neurtuko den altueran kokatzen da modu egokian. Bestalde, sistema optikoa muntatu da (kamera, optika egokigailua, endoskopioa, babes hodia eta argi iturria) eta endoskopioaren eta babes hodiaren lenteen arteko distantzia egokia doitu da. Hau prest jarri denean, babes hodia kontaktorearen hormako zulutik sartu eta lehenengo neurketa egin den posizioan kokatu da. Behin sistema optikoa erraila horizontalean kokatu eta ondo lotuta dagoelarik, endoskopioa babes hodian barneratu da. Azkenik, kamerari energia-iturria eta ethernet kableak konektatu zaizkio. Lehenengoak, argindarra ematen dio piztu eta funtziona dezan (nahiz eta barne bateria bat ere izan) eta bigarrenaren bidez ordenagailura konektatzen da.

Behin sistema optikoa kokatuta eta endoskopioaren punta neurtu nahi den posizioan ezarrita, kamera piztu da. Honen kontrola *AOS Image Studio* softwarearen bidez burutzen da eta hortaz, kamera konektatuta dagoen ordenagailuan aipaturiko programa irekitzen da. Programa honek hainbat aldagaien balioak aldatzeko aukera ematen du, baina garrantzitsuenak eta erabilienak irudiaren neurriak (paxeletan), grabaketa abiadura (irudi/segundo) eta sentsoaren esposizio denbora edo “shutter time”(segundotan) dira. Aipaturiko aldagaietan emandako balioen arabera, irudi ba-

koitzak pisu handiagoa edo txikiagoa izango du (bytetan), eta ondorioz, kameraren memoria azkarrago edo astiroago beteko da. Hau da, grabaketa denbora ezberdina izango da aipaturiko aldagaien balioen arabera. Hori dela eta, programak aukeran ematen du grabaketa denbora osoan zehar noiz hasi abiadura handian grabatzen. Hala ere, honek ez du zentzu handirik kasu honetarako, eta ondorioz, beti zero balioa esleitu zaio eta hasieratik hasiko da abiadura handian grabatzen.

Aipatu bezala, programak hainbat aldagairen balioak aldatzeko aukera du eta hauen balioak oso garrantzitsuak dira neurtu nahi den eremu edo zonaldearen arabera. Izan ere, partikula baten abiadura puntuala neurtu ahal izateko partikulak gutxienez bi iruditan agertu behar du jarraian. Partikulen abiadura handia bada, kameraren grabaketa abiadura handitu egin behar da eta honek grabaketa eremuaren murrizketa dakar, hau da, pixel kopuru txikiagoa. Hortaz, orokorrean propietate ezberdinak dituzten bi eremu bereiz daitezke iturri ohandze konikoan.

Eraztunguneko porositatea oso txikia izaten da eta solido guztiak abiadura berdinean jaisten dira. Hori dela eta, iturri ohandze konikoaren zonalde honetan solidoek abiadura txikia dute (milimetro gutxi batzuk segundoko) eta ez da beharrezkoa grabaketa abiadura oso handia erabiltzea. Kasu honetan erabiltzen den grabaketa abiadura 3259 irudi segundokoa da eta 400×400 pixeleko irudi tamaina erabiltzen da, $105 \mu s$ -ko shutter denbora erabiliz.

Bestalde, iturgune edo iturriko solidoen abiadura neurtu nahi bada parameetroen balioak aldatu behar dira. Iturri ohandze konikoaren gune hauetan partikulak orokorrean indibidualki mugitzen dira eta ondorioz partikulen abiadura askoz handiagoa da (metro gutxi batzuk segundoko), eta baita porositatea ere. Hortaz, zonalde hauetan guztiz beharrezkoa da grabaketa abiadura handia erabiltzea, hau da, 16500 irudi segundoko. Kasu honetan, 150×150 edo 125×125 pixel tamainako irudiak erabili dira eta $30 \mu s$ -ko shutter denbora.

Hortaz, iturri ohandze konikoan grabatu edo neurtutako zonaldearen arabera, lorturiko irudien tamaina eta kantitatea ezberdina izango da. Izan ere, zenbat eta irudiaren tamaina handiagoa izan orduan eta byte gehiago ditu. Modu honetan, aukeratutako irudiaren tamaina eta grabaketa abiaduraren arabera, kameraren memoria betetzeko behar den bideoaren iraupena ezberdina izango da. Hala ere, zonalde dentsoko bideoek (400×400 irudi tamaina eta 3259ko grabaketa abiadurakoak) gehieneko 2.5 segundoko bideo iraupena dute eta hori dela eta, zonalde diluituko bideoak ere grabaketa iraupen horretara mugatzen dira (nahiz eta denbora luzeagoan graba dezaketen).

Hala, behin programako aldagaien balioak finkatu direnean, kamera grabatzeko prest dago eta ohandzea osatuko duen solidoa jarri da kontaktorean. Puzgailua piztu eta neurtu nahi den erregimen edo gasaren abiadura finkatu da. Beraz, behin guztia

prest jarri denean, eskuzko triggerra edo programakoari eman zaio grabatzen has dadin. Behin bideoa grabatuta, hau 90° biratu behar da (alde batera edo bestera), izan ere, kamera errailean kokatzerakoan 90° biratuta geratzen da eta lorturiko grabaketan partikulak bertikalki mugitu beharrean horizontalki mugitzen dira. Azkenik, grabaturiko bideoa ordenagailuan gorde da. Programak bideoa hainbat formatu ezberdinetan gordetzea ahalbidetzen du (raw3, avi, bmp...), baina zentzuzkoena formatu originalean gordetzea da, hau da, raw3-an. Hau formatu gordina da (eraldaketarik gabekoa) eta hainbat neurri burutu ahal dira aipaturiko programaren bidez. Hala ere, aipagarria da ondorengo irudien tratamendurako bideoak avi formatura pasatu behar direla.

Aipatu bezala, grabaketa bakoitzaren iraupena 2.5 segundokoa da eta hau ez da nahikoa adierazgarria izateko. Horretarako, beharrezkoa da iraupen handiagoko laginak hartzea, baina kameraren barne memoria dela eta ez da posible. Hori dela eta, momentu ezberdinetan hainbat bideo grabatu dira, modu honetan sistemaren errealtatea osotasun handiagoan erregistratu delarik. Hortaz, lehenengo bideoa grabatu eta ordenagailuan gorde ostean, berriz ere bigarren bideo bat grabatzen izan da. Modu honetan, neurtu nahi den posizio bakoitzean lau bideo grabatzen izan dira, izan ere, ondoren egingo den irudien tratamenduan ordenagailuak gehienez lau bideo tratatu ditzake paraleloan.

Behin posizio horretan bideo guztiak grabaturik, hurrengo grabaketa posizioa pasatzen izan da. Horretarako, sistema optikoa babes hoditik ateratzen izan da eta azken hau hurrengo posizioan ondo kokatu, berriz ere sistema optikoa babes hodian barneratuz. Hala ere, hurrengo posizioa ez bada erradioan zehar (hau da, beste altuera batean), sistema optikoa zein esperimentalak (kontaktorea eta abar) desmuntatu behar izan da neurketa altuera aldatzeko. Hortaz, aurretik aipaturiko prozedura jarraitu behar izan da.

Behin neurketak buruturik, bideo guztiak avi formatura bihurtu behar dira partikulen jarraipenerako tratamenduan erabiliak izateko. Jarraian partikulen jarraipena burutzeko erabili diren kode ezberdinak azalduko dira.

4.4. PARTIKULEN JARRAIPENERAKO METODOAK

PIV metodoa gasaren eta solido partikulen abiadura irudien bidez lortzean datza. Lehenengoaren kasuan, gasaren abiadura bera hartzen duten solido trazatzaileak erabiltzen dira, normalean tamaina oso txikikoak izaten direlarik; eta bigarrenaren kasuan, zuzenean solidoak dira neurtu nahi den fasea.

Teorian metodo hau oso sinplea da, izan ere, jarraian harturiko bi irudien bidez lortu baitaiteke abiaduraren balioa. Horretarako, nahikoa da bi irudietan zehar partikulek buruturiko distantzia eta irudi batetik besterako denbora tartea ezagutzea. Hala ere, metodo hau oso neketsua bilakatzen da irudian partikula bat baino gehiago jarraitu nahi direnean, edo denbora tarte txikiagoan egin nahi direnean neurketak. Hau burutu ahal izateko irudien tratamendua deritzon prozesua erabiltzen da.

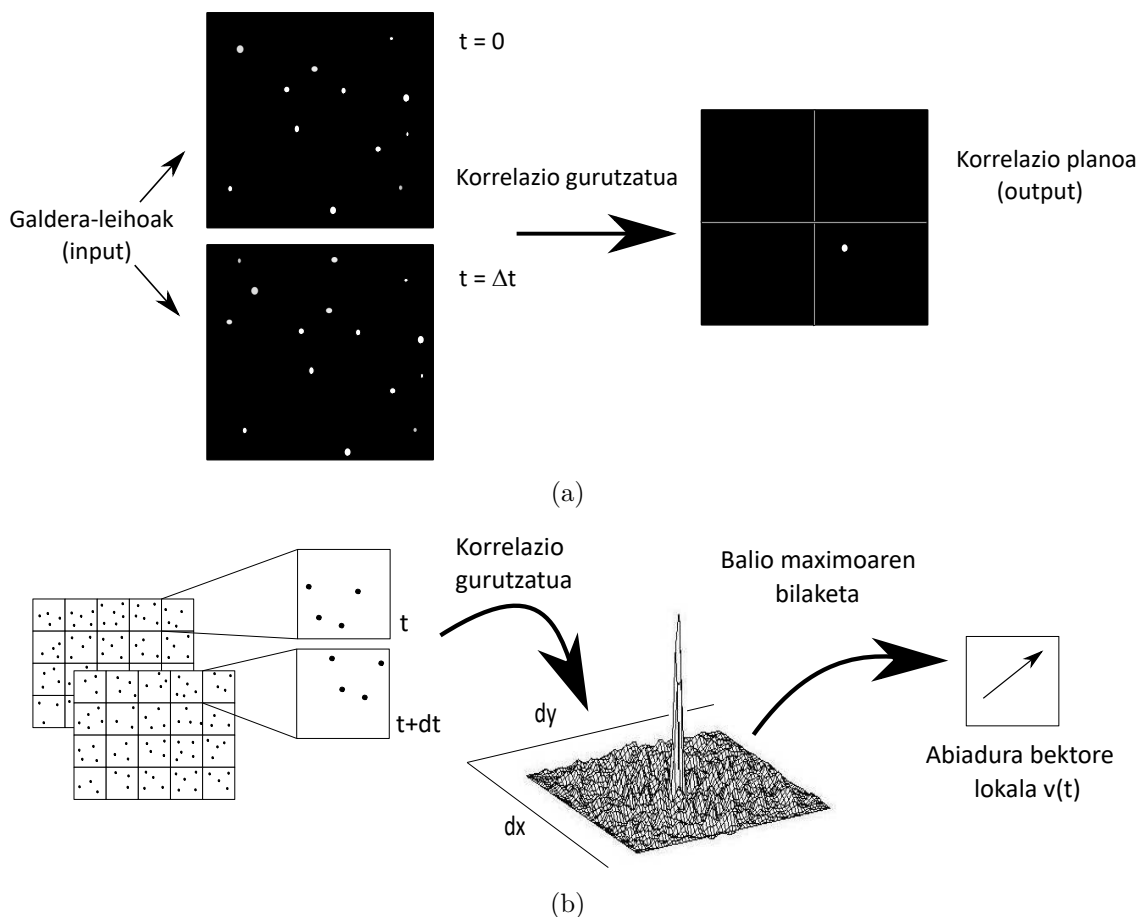
1. Kapituluian aipatu den bezala, irudien tratamendurako metodorik erabiliena korrelazio gurutzatua da. Metodo honen funtsa lortzen diren irudiak galdera-leiho txikietan banatu eta jarraikako bi galdera-leihoetan korrelazioa aplikatzean datza. Partikula talde bakoitzaren batezbesteko desplazamendua neurtzeko parametro estatistiko bat erabiltzen da, hots, korrelazio koefizientea. Une ezberdinetan lorturiko irudietan, galdera leiho berdinak aukeratzen dira eta korrelazio koefizienteak balio maximoa hartzen duen posizioa neurtzen da. Hortaz, korrelazio koefiziente maximoei dagozkien posizioen arteko distantzia da partikulak eginiko batezbesteko desplazamendua. ?? Irudian erakusten da korrelazio gurutzatuaren funtzionamenduaren eskema orokorra.

Korrelazio gurutzatua modu egokian aplikatzeko galdera-leihoak tamaina egokikoak izan behar dira, hau da, leihoko partikula guztiak modu homogeanoan mugitu behar dira (norabide, norantza eta magnitude berberarekin). Bestalde, ez da komenigarria leihoaren tamaina asko txikitzea beharrezkoa baita gutxienez dozena bat partikula izatea korrelazio egokia lortzeko.

Behin irudia galdera-leihoetan banaturik, C korrelazio gurutzatuaren adierazpen matematikoa hurrengoa da:

$$C(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{a_1} \int I_1 \bullet I_2(x + \Delta x, y + \Delta y) dx dy \quad (4.1)$$

non a_1 galdera-leihoaren azalera den eta $I_1(x, y)$ zein $I_2(x, y)$ lehenengo eta bigarren irudien galdera-leihoen argi intentsitatearen distribuzioak diren.



4.6. Irudia. (a) Galdera-leihoen eta dagokion korrelazio planoaren adibidea, eta (b) galdera-leiho baten korrelazio gurutzatua.

4.1 Ekuazioa forma diskretuan idatzita honela geratzen da:

$$C(s, t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_1^{i,j}(m, n) \bullet I_2^{i,j}(m - s, n - t) \tag{4.2}$$

Hala ere, kalkulu denbora handiak behar izaten direnez, normalean korrelazioa ez da zuzenean burutzen. Hala, aipaturiko funtzioa bi dimentsio digitaleko Fourier-en Transformatu Azkarraren (*Fast Fourier Transform*, FFT) algoritmoaren bidez kalkulatu daiteke. 4.1 Ekuazioa hurrengo forman idatzi daiteke:

$$C(s_x, s_y) = I_1(x, y) \circ I_2(x + \Delta x, y + \Delta y) \tag{4.3}$$

non \circ sinboloak korrelazio operadorea (konboluzioaren produktua) adierazten duen.

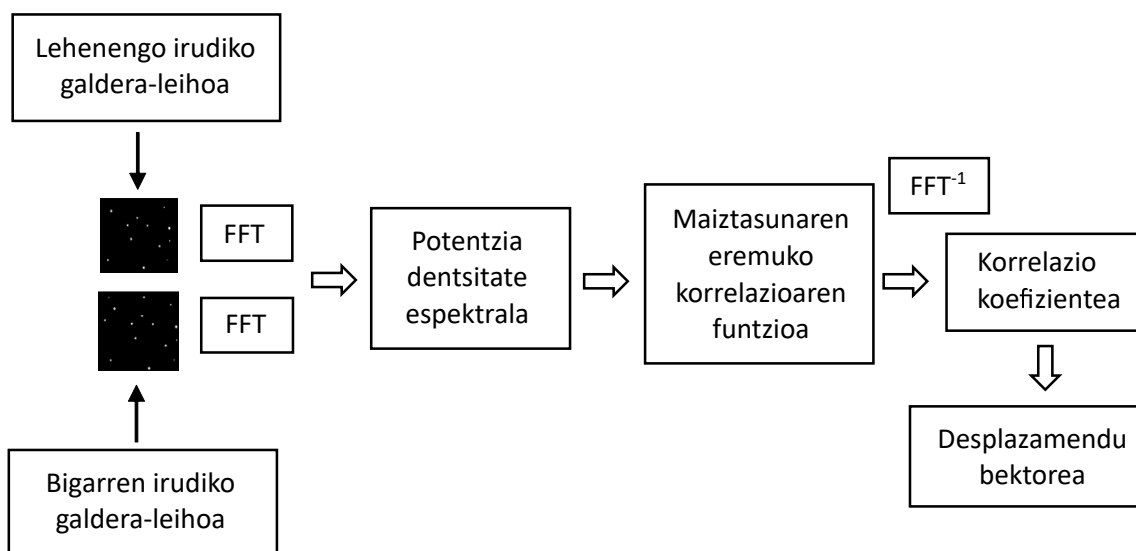
Korrelazio gurutzatuaren funtzioa kalkulatzeko Wiener-Kitchine-ren [188, 392] teorema erabili daiteke. Honen arabera, Fourier-en anti-transformatuaren potentzia

dentsitate espektralaren eta seinalearen korrelazio funtzioaren artean baliokidetasuna dago. Teorema hau aplikatuz, espazio planoko korrelaziotik maiztasun plano proporzionalera pasa daiteke. Beraz, Fourier-en transformatuak eta konboluzioaren produktuaren propietateak erabiliz hurrengo lortzen da:

$$C(\Delta x, \Delta y) = F^{-1}\{F(u, v) * G(u, v)\} \quad (4.4)$$

non, F^{-1} Fourier-en aurkako transformatua eta $*$ konjugatu konplexua diren.

Beraz, FFTren algoritmoan jarraitu beharreko eskema 4.7. Irudian erakusten da.

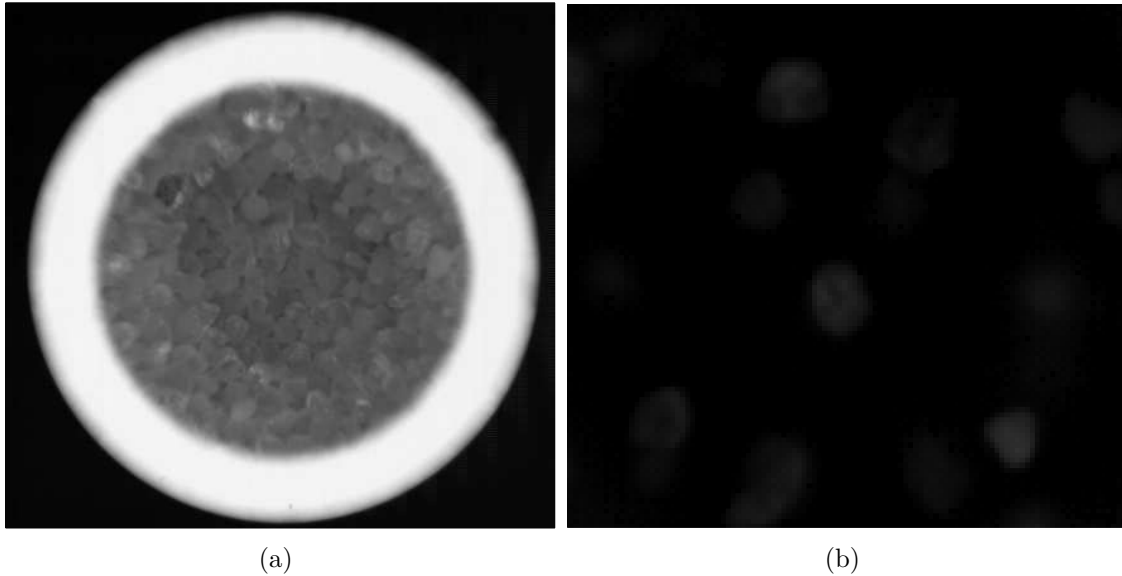


4.7. Irudia. Desplazamenduaren kalkulurako eskema.

Aurretik aipatu den bezala, metodo mota hau aplikatzen den irudietan partikulak tamaina txikikoak izan behar dira eta partikula multzoaren jarraipena burutzen da. Nahiz eta korrelazio gurutzatuaren metodoa sinpletasunagatik oso erakargarria izan, tesi honetan lortu diren irudietarako ez da aplikagarria. 4.8. Irudian erakusten dira tesi honetan lortzen diren bi irudi mota.

4.8. Irudian erakusten den bezala, tesi honetan lortzen diren irudietan partikulak ez dira puntu zuri bat bezala ikusten, baizik eta tamaina handiagoa erakusten dute. Gainera, erabilitako solidoek forma irregularra dutenez, hauek islatutako argia ezberdina da partikularen alde ezberdinetan. Arrazoi hauengatik korrelazio gurutzatuaren erabilera ez da aplikagarria lan honetarako.

Nahiz eta korrelazio gurutzatuaren metodoa ez den erabilgarria, solidoen abiadura eskuz kalkula daiteke 4.5 Ekuazioaren bidez:



4.8. Irudia. (a) Gune dentsuan eta (b) gune diluituan lorturiko irudiak.

$$v = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{\Delta t} \tag{4.5}$$

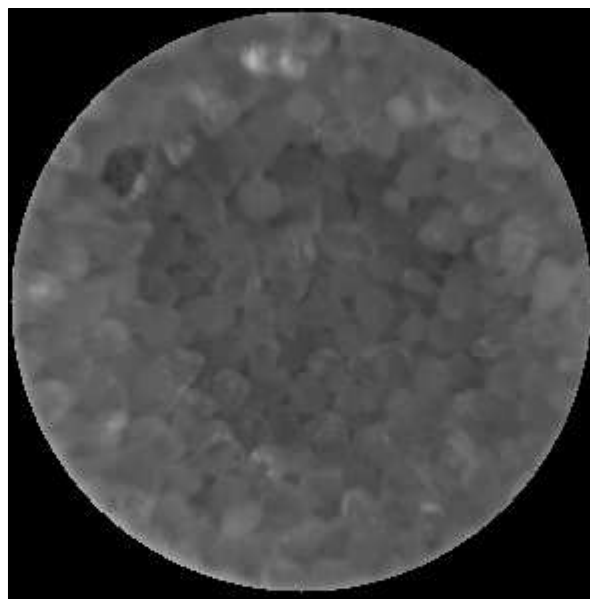
non, x eta y irudiko partikulen posizioa den pixel unitatetan adierazita.

4.5 Ekuazioa erabiliz partikula indibidualen abiadura puntuala kalkula daiteke, baina kontuan izan behar da gune dentsuan 8100 irudi eta diluituan 41250 irudi lortzen direla grabaketa bakoitzean, eta posizio bakoitzean 4 grabaketa burutzen dira. Beraz, posizio bakoitzean batez besteko solidoen abiadura lortzeko eskuzko neurketa ez da bideragarria. Arazo honen aurrean, irudien tratamenduaren bidezko solidoen abiaduraren neurketa burutu da. Hala ere, 4.8. Irudian erakusten den bezala, eraztungunean lorturiko irudiak beste bi guneetan (iturri eta iturgunea) lorturikoen oso ezberdinak dira, eta beraz, kode ezberdinak sortu behar izan dira. Jarraian, azalduko dira gune bakoitzerako erabili diren kodeak.

4.4.1. Gune dentsorako kodea (Farneback-en metodoa)

Aurretik aipatu den bezala, eraztunguneko porositatea baxua da (0.4 inguru) eta solidoak modu konbektiboan edo multzoka jaisten dira eraztungunean zehar. Partikula solidoak ohandean bata bestearen ondoan kokatuta daudenez zaila izaten da bakoitza ondo bereiztea. Korrelazio gurutzatua ez ezik beste hainbat metodo daude partikulen jarraipena egiteko, baina metodo guzti hauen artean Farneback-ena da fase dentsoetarako eraiki den kode bakarra.

Metodoa azaltzen hasi aurretik aipatu behar da lorturiko irudiei aurre tratamendu bat aplikatu behar zaiela Farneback-en algoritmoak modu egokian funtziona dezan. 2.2 Atalean azaldu den bezala, endoskopioaren lentea hareak marratua izan ez dadin, zafirozko lentea duen babes-hodia erabili da. Hala ere, bi lenteen arteko distantziaren arabera zafiroak sorturiko islapena heltzen da sentzorera eta lorturiko irudiak argi haloa du, 4.8.a Irudian erakusten den bezala. Hau dela eta, beharrezkoa da lorturiko irudietatik argi haloa kentzea, jarraian aipatuko diren arrazoi ezberdinengatik. Lehenik, argia irudikatzen duten pixelek ez dute inolako informazio baliagarririk ematen. Bestalde, partikulek erakusten duten pixelak soilik dira beharrezkoak eta gainontzeko guneen pixel guztiak ez dira beharrezkoak, pixel hauen tratamenduak kodearen exekuzio denbora luzatzen baitute. Azkenik, argiaren eta partikulen intentsitate gradientea dela eta, errealak ez diren interfasearekiko (argi haloa/partikulak) tangenteak diren abiadurak neurtzen ditu. Beraz, irudiaren aurre tratamenduaren ostean argiaren haloa kentzeaz gain irudiaren tamaina edo matrizea txikitu egin behar da, tratatu beharreko pixel kopurua txikiagoa izan dadin. 4.9. Irudian erakusten da 4.8.a Irudiko frame landuan tratamendua egin ostean.



4.9. Irudia. Farneback-en metodoa aplikatu aurretik eraztungunean lorturiko irudiei aplikaturiko aurre tratamendua.

Behin irudien aurre tratamendua egin ondoren, Farneback-en metodoaren algoritmoa aplika daiteke. Metodoaren izena sortzaileari dagokio, hots, Gunnar Farneback-i, eta 2002. urtean *Polynomial expansion for orientation and motion estimation* izeneko tesian [124] landu zuen. Izan ere, hainbat kasutan Fourier-en eremuaren erabilera konplexua bilakatzen da, hala nola, seinale irregularretan (Nyquist-en maiztasuna espazialki mugitzen da lagin lokalaren dentsitatearen arabera) eta sinpleagoa da espazio

eremua erabiltzea.

Farneback-en metodoa nahiko konplexua da matematikoki, azken finean metodo bera doktoretza tesi bat baita. Gainera, tesi honetan Farneback-en algoritmoa ez da aldatu, soilik lorturiko irudietara moldatu da. Hau dela eta, Farneback-en metodoa modu simple eta laburrean azalduko da jarraian.

Irudi sekuentzia bateko frame-ak bata besteekin pilatzerakoan hiru dimentsioko espazio-denboradun bolumen irudia lortzen da. Irudi sekuentzian sortzen den mugimenduak orientazio jakin batzuk dituen egiturak sortzen ditu. Adibidez, mugitu den puntu bat zuzen bihurtzen da eta bere bolumeneko norabidea zuzeneko abiadurari dagokio.

Orientazio-tentsorea orientazio lokalaren adierazpen garrantzitsua da. Hiru dimentsioko espazioan tentsore honek 3×3 ko T matrize simetrikoko positibo erdi definituaren forma hartzen du eta $\hat{u}^T T \hat{u}$ forma koadratikoa seinalearen aldaketa kuantifikatzen duen neurri gisa har daiteke \hat{u} bektorearen norabidean.

Hiru dimentsioko eremu batean orientazio-tentsoreak estimatzeko Farneback-en metodoa erabiltzen da. Metodo honen oinarria lorturiko seinalea bigarren mailako polinomioan proiektatzean datza (pixel-auzo guztian zehar):

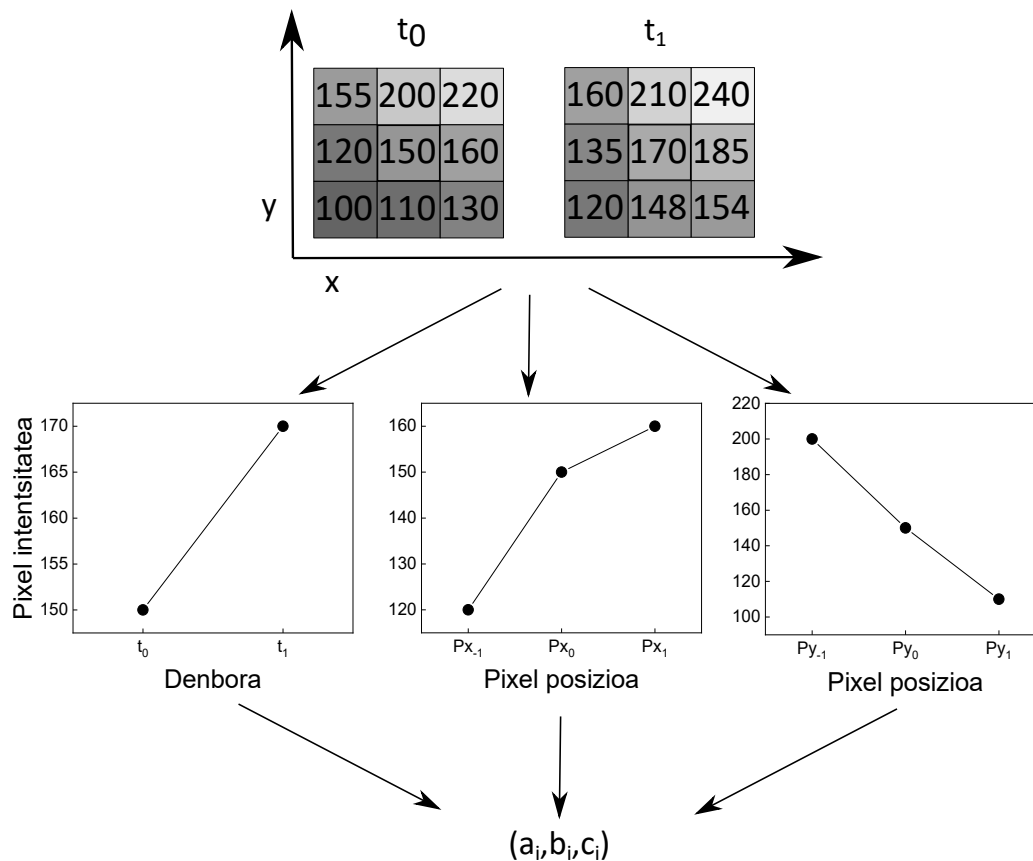
$$f(x) \sim x^T A x + b^T x + c \quad (4.6)$$

non A matrize simetrikoa, b bektorea eta c zenbaki eskalarra diren.

4.10. irudian erakusten den bezala, irudiko pixel bakoitzaren intentsitate aldaketa 4.6 Ekuaziora doitzen da aukeraturiko pixel-auzoa erabiliz. Doiketa x , y eta denbora dimentsioetan burutzen da, eta pixel guztien mugimendu minimoa doitzen duten 4.6 Ekuazio koadratikoak aukeratzen dira.

Modeloaren koefizienteak hiru dimentsioko oinarri funtzioen bidezko konbolutzio normalizatuaren bidez estimatu daitezke:

$$\{1, x, y, t, xy, xt, yt, x^2, y^2, t^2\} \quad (4.7)$$



4.10. Irudia. Farneback-en metodoaren diagrama.

A , b eta c parametroak seinaleari minimo karratuen hurbilketa aplikatuz kalkulatu dira. Horrela lorturiko pisuen balioak Gauss-en funtzioaren arabera izaten dira. Beheko adierazpenetan, hiru dimentsioko konboluzio normalizatuaren bidez lorturiko r_i koefizienteen eta modeloaren parametroen arteko erlazioak erakusten dira:

$$c = r_1 \quad (4.8)$$

$$b = \begin{pmatrix} r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

$$A = \begin{pmatrix} r_8 & r_5 & r_6 \\ r_5 & r_9 & r_7 \\ r_6 & r_7 & r_{10} \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Beraz,

$$\begin{aligned}
 (x \ y \ t)A \begin{pmatrix} x \\ y \\ t \end{pmatrix} + b^T \begin{pmatrix} x \\ y \\ t \end{pmatrix} + c = \\
 = (x \ y \ t) \begin{pmatrix} r_8 & r_5 & r_6 \\ r_5 & r_9 & r_7 \\ r_6 & r_7 & r_{10} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ t \end{pmatrix} + (r_2 \ r_3 \ r_4) \begin{pmatrix} x \\ y \\ t \end{pmatrix} + r_1 \quad (4.11)
 \end{aligned}$$

Oinarri funtzioen eginkizuna seinalearen eredu lokala lortzea da. Oinarri funtzio bakoitzak aurretik aipaturiko pixel-auzoaren tamaina dauka eta $n \times 1$ bektore zutabearen bi elementuz adierazita dago. Beraz, seinalearen puntu bakoitzeko konboluzio normalizatuaren operazioa f seinalearen pixel-auzo guztian zeharreko b_i bektore multzoaren bidezko adierazpena da. Horretarako, seinalearen eremuan $\|\cdot\|_w$ norma ponderatua eta koefizientearen eremuan arau Euclideanra erabili behar dira. Konboluzio normalizatuaren emaitza pixel-auzo bakoitzeko bektore multzoaren adierazpenean erabilitako r koefizienteen multzoa da:

$$r = \begin{pmatrix} (a \ c \ b_1, b_1) & (a \ c \ b_1, b_m) \\ (a \ c \ b_m, b_{m1}) & (a \ c \ b_m, b_m) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} (a \ c \ b_1, f) \\ (a \ c \ b_m, f) \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

Ziurtasun konstante bat hartuz ($c = 0$),

$$r = \begin{pmatrix} (a \ b_1, b_1) & (a \ b_1, b_m) \\ (a \ b_m, b_{m1}) & (a \ b_m, b_m) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} (a \ b_1, f) \\ (a \ b_m, f) \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

$$G = \begin{pmatrix} (a \ b_1, b_1) & (a \ b_1, b_m) \\ (a \ b_m, b_{m1}) & (a \ b_m, b_m) \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

$$r(x) = G^{-1} \begin{pmatrix} ((a \ b_1) * f)(x) \\ ((a \ b_m) * f)(x) \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

Hurrengo pausua G eta G^{-1} egiturak aztertzea da. Hauek simple geratzen dira ardatz guztietan zehar uniformeak eta berberak direla onartzen bada. Gainera, 4.14 Ekuazioko $(a \cdot b_k, b_l)$ barne produktuak zero bilakatzen dira, izan ere, $(a \cdot b_k, b_l)$ produktu gehienak bakoitiak baitira gutxienez ardatz berean. Beraz, 4.16 Ekuazioan erakusten den moduan geratzen da G^{-1} egitura:

$$d(v, T) = v^T T v \tag{4.19}$$

$$d_{tot} = \sum_i d_1(v_i, T_i) \tag{4.20}$$

Mugimenduaren modelo parametrizatua erabiliz, hurrengo pausua d_{tot} minimizatzen duten parametroak kalkulatzeko da. Prozesu hau azaltzeko afin mugimendu modelo erabiltzen da eta jarraian erakusten den eran adiearazi daiteke:

$$v_x(x, y) = ax + by + c \tag{4.21}$$

$$v_y(x, y) = dx + ey + f \tag{4.22}$$

non x eta y irudiko koordenatuak diren.

4.21 eta 4.22 Ekuazioak espazio-denbora bektorearen gaien bidez berridatzi daitezke:

$$v = Sp \tag{4.23}$$

$$v = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ 1 \end{pmatrix} \tag{4.24}$$

Afin mugimendu modelo aplikatuz honela geratzen da:

$$d(v, T) = v^T T v = p^T S^T T S p = p^T Q p \tag{4.25}$$

non $Q = S^T T S$ forma koadratiko erdi definitu positiboa den.

Eskualde guztian zehar batuz hurrengoa lortzen da:

$$d_{tot}(p) = \sum_i d(v_i, T_i) = \sum_i p^T S_i^T T_i S_i p = p^T \left(\sum_i Q_i \right) p = p^T Q_{tot} p \quad (4.26)$$

4.26 Ekuazioako p azken elementuaren balioa 1 dela minimizatu behar da, eta horretarako, p eta Q jarraian erakusten den moduan zatikatu behar dira:

$$p = \begin{pmatrix} \bar{p} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.27)$$

$$p = \begin{pmatrix} \bar{Q} & q \\ q^T & \alpha \end{pmatrix} \quad (4.28)$$

4.26 Ekuazioa 4.29 Ekuazio bihurtuz:

$$d_{tot}(p) = \bar{p}^T \bar{Q} \bar{p} + \bar{p}^T q + q^T \bar{p} + \alpha \quad (4.29)$$

Jarraian minimizazioa eginez,

$$\bar{p} = -\bar{Q}^{-1} q \quad (4.30)$$

Balio minimoa hurrengo terminoak adierazten du:

$$\alpha - q^T \bar{Q}^{-1} q \quad (4.31)$$

Parametroen kalkulu metodo hau erabili ahal izateko, mugimendu modelook parametro linealak izan behar ditu, hau da, $v = Sp$ forman adierazi ahal direnak.

Bi abantaila garrantzitsu ditu kalkulua puntuz puntu egin beharrean eskualde guztian egiteak. Lehenengoa, zarataren eta zehaztasun ezaren efektuak murriztu egiten direla tentsorearen kalkuluan; eta bigarrena, nahiz eta eskualdearen gune batzuetan irekitze arazoa izan, beste gune batzuetako informazioak lagun dezake falta diren abiaduraren osagaiak betetzeko.

Eskualde guztian zeharreko metodoaren desabantaila bat benetako abiadura-aren eta modeloaren arteko berdintasun eza da, izan ere, metodo honen bidez benetako

abiadura eremua aukeratutako abiadura modeloarekin bat datorrela onartzen baita. Bestalde, abiadura modelo bat erabili beharrean aldibereko segmentazio eta abiaduraren kalkulua burutu daiteke, baina kostu konputazionala handiagoa da. Kasu honetan, abiaduraren kalkulu egokiari ematen zaio lehentasuna, kostu konputazionalaren arazoa alde batera utziz.

Hala ere, abiaduraren kalkulua azkartzen duen algoritmoaren aldaera erabil daiteke eta mugimendu modeloaren puntu bakoitzerako ponderaturiko distantzia minimizatzean datza:

$$d_{tot}(p) = \sum_i w_i d(v_i, T_i) = p^T \left(\sum_i w_i Q_i \right) p = p^T Q_{tot} p \quad (4.32)$$

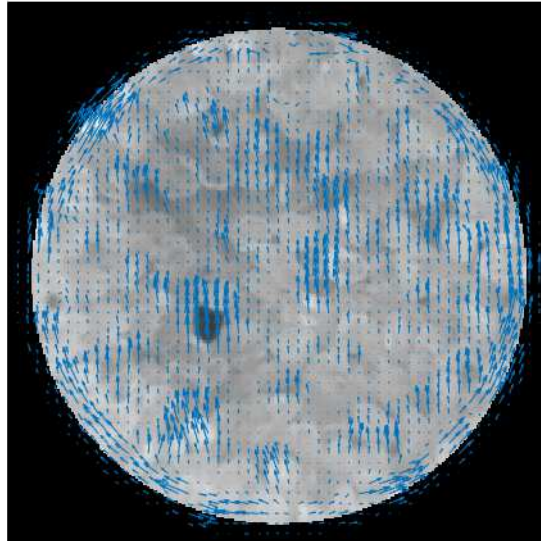
4.32 Ekuazioaren bidez puntu bakoitzaren pixel-auzo guztian egiten da batuketa, eta w_i pisuak gauss itxurakoak dira. 4.32 Ekuazioaren arabera, pisu funtzioaren bidez Q_i forma koadratikoak irudiaren gainean konboluzionatzen dira.

Beraz, hurrengo lau pausuetan laburbildu daiteke algoritmoa:

1. Dagokion frame-rako orientazio tentsorea kalkulatu, eraginkortasun konputazionala maximizatzeko korrelazio banangarriaren metodoa erabiliz.
2. Mugimendu modeloarekin bat datozen forma koadratikoak ($Q_i = S_i^T T_i S_i$) kalkulatu.
3. Forma koadratikoen batez besteko normalizatua aplikatu.
4. p_i parametro optimoetarako ebatzi eta dagokion $v_i = S_i p_i$ abiadurak kalkulatu.

Behin kodeak abiadura bektoreak kalkulatu dituelarik, *Matlab*-ek pixel bakoitzerako abiadurak itzultzen ditu, hau da, irudiaren tamaina bera duen abiadura matrize bat itzultzen du. 4.11. Irudian erakusten dira bektore hauek irudiaren gainean.

Ondorioz Farneback-en metodoa erabiliko da eraztunguneko solidoen abiadura puntualak neurtzeko, eraztungunean solido guztiak solido multzo handietan era konbektiboan mugitzen baitira. Aipagarria da, metodo honek lehenengo irudiaren abiadura ere neurtzen duela, baina metodo honen azalpenean aipatu den bezala, gutxienez bi irudi behar dira abiadura bektoreak kalkulatzeko. Beraz, *Matlab*-eko algoritmoak lehenengo irudiaren abiadura neurtzeko irudi beltz bat hartzen du erreferentzia gisa, modu honetan neurturiko abiadurak oso handiak baitira (pixelen intentsitate gradienteak hiru dimentsioetan oso handiak dira).



4.11. Irudia. Farneback-en metodoa erabiliz eraztunguneko frame-an lorturiko abiadura bektoreak.

Bestalde, algoritmoaren gainean ez da inolako aldaketarik egin. Izan ere, *Matlab*-ek ez dauka Farneback-en kode originalik, hau da, software honek *Open CV*-ko kodea erabiltzen du zuzenean. Hala ere, *Matlab*-ek Farneback-en kode piramidala eskaintzen du eta bertan aldatu daitezkeen hainbat parametro daude. Parametro hauen balioak kalibraketarako aldatu dira eta 4.5.2 Atalean azalduko dira zehaztasun handiagoarekin.

4.4.2. Gune diluiturako kodea

Iturri ohantze konikoaren gune diluituetan, hau da, iturrian eta iturgunean, porositatea eraztungunean baino handiagoa izaten da eta solidoak indibidualki mugitzen dira. Hala, gune diluitu hauetan lorturiko irudietan partikulen artean hutsunea edo hondo beltza ikusten da, 4.8.b Irudian ageri den bezala. Hau dela eta, ez da komenigarria Farneback-en metodoa erabiltzea, partikulen eta hondo beltzaren arteko kolore edo intentsitate gradientearen ondorioz abiadura irrealak (benetakoak baino askoz handiagoak) neurtzen baititu.

Bestalde, bibliografian fluxu optikoa kalkulatzeko aurki daitezkeen metodoak ez dira egokiak 4.8.b Irudia bezalako irudietan aplikatzeko. Izan ere, bibliografiako metodo gehienetan irudia galdera-leihoetan zatitzen da eta pixel zehatz baten pixel-auzo guztian abiadura konstantea dela onartzen da. Gainera, karratu minimoen irizpidea aplikatuz pixel-auzoko pixel guztietarako fluxu optikoaren oinarri ekuazioak ebatzen dituzte.

Tesi honetan lorturiko irudietan solidoak tamaina handikoak dira, hain zuzen ere 314pixel^2 inguruko azalera duten partikulak. Ondorioz, partikula batek pixel kopuru handia hartzen du bere gain, eta hauek indibidualki mugitzen direnez eta forma irregularra dutenez, partikula zati bati dagokion pixelaren intentsitatea aldatuz doa frame batetik bestera. Hori dela eta, bibliografiako metodo gehienak abiadura okerrak ematen dituzte.

Arazo honen aurrean, gune diluituko irudien tratamendurako kode bat erakitzearen beharra sortu da [52]. Kasu honetan, eraikitako kodea Farneback-en metodoaren aldean oso ezberdina da, bertan pixelen intentsitatearen bilakaera jarraitu beharrean partikulen detekzioa egiten baita.

4.8.b Irudian erakusten den bezala, tesi honetan erabilitako materialak ez dira erregularrak, hau da, ez dute forma konkretu bat eta hau arazoa da partikulak detektatzeko orduan. Partikulak zirkularrak izateak asko errazten duenez berauen detekzioa, lehendabiziko pausua partikulak borobiltzea edo forma zirkularra ematea da. Horretarako, forma zirkularra duen 9×9 tamainako filtro matrizea sartuko da. Matrize hau eskuz eraiki daiteke, baina kasu honetan *Matlab*-eko *strel* komandoa erabiltzen da. Honek hainbat formako filtroak eraikitzea baimentzen du, baina kasu honetan zirkularra behar denez “disk” hitz sarrera erabiltzen da forma zirkularra emateko. Honetaz gain, zirkuluaren erradioa ere zehaztu behar da, kasu honetan 5 pixelekoa izanik. 4.33 Ekuazioan erakusten da eraikitako forma zirkularra duen filtroa:

$$Se = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{4.33}$$

Behin filtroa sorturik, irudi gordinaren ganean aplikatzen da *Matlab*-eko *imopen* komandoa erabiliz. Komando honen bidez irudiko gorputzak edo formak morfologikoki irekitzen dira. Irekitze operazio honetan disko filtroaren bidez irudia higitu egiten da eta ondoren, dilatatu eta berriz ere higitu. Modu honetan, irudiko objektu txikiak ezabatu egiten dira eta handien forma eta tamaina mantendu. Gainera, filtroa zirkularra denez, operazio honetan irudiko objektuei forma zirkularra ematen zaie. 4.13.a eta 4.13.b Irudietan erakusten dira irudi gordina eta imopen komandoa erabili ostean

lorturikoa.

Aurretik aipatu den bezala, bideoak *Matlab*-en tratatu ahal izateko beharrezkoa da hauek avi formatuan izatea, baina formatu bihurtze prozesu honetan frame edo matrize bakoitza hirukoiztu egiten da, hau da, RGB kanala sortzen da. Hau dela eta, frame bakoitza hiru matrizez osaturik dago, baina kamerak gris eskalan grabatzen duenez, frame bakoitzeko hiru matrizeak berdinak izango dira. Beraz, frame bakoitza matrize batera murrizteko *Matlab*-eko *rgb2gray* komandoa erabili da.

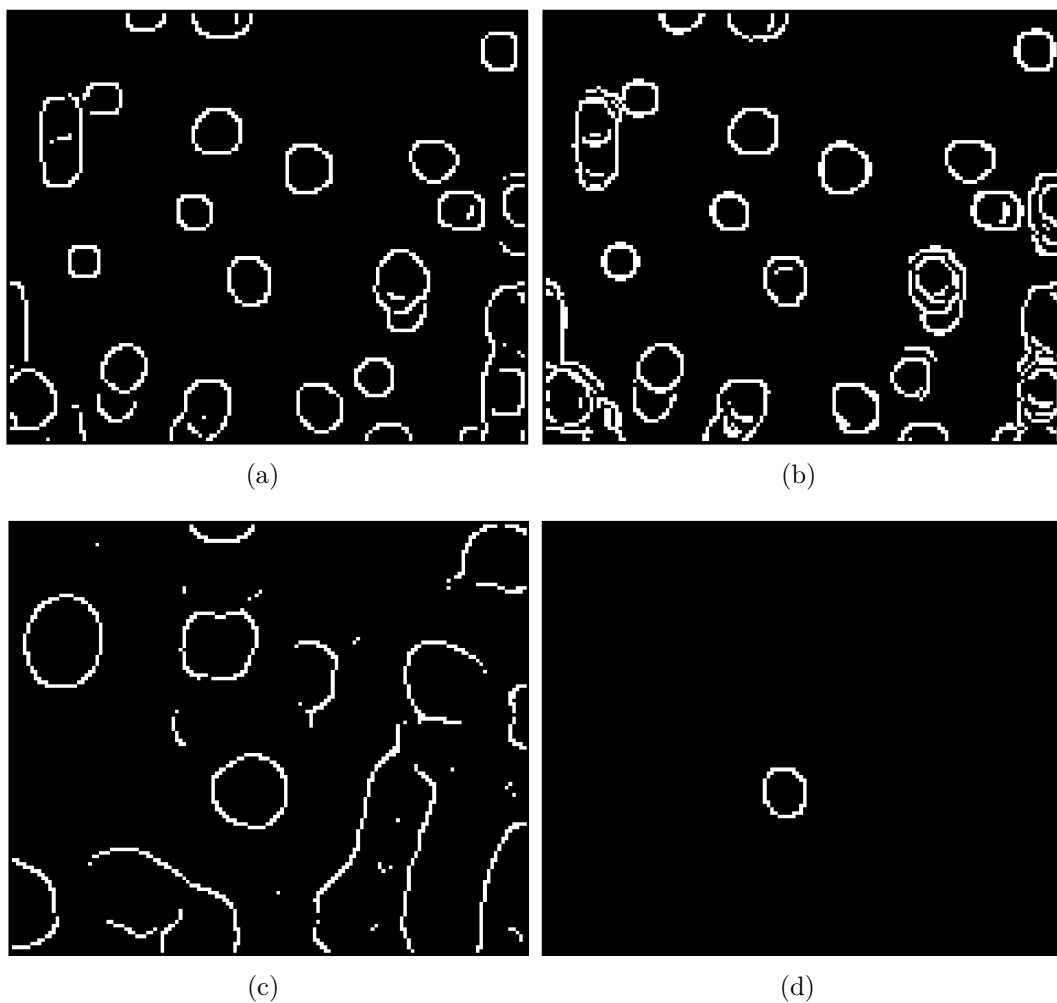
Jarraian, ertzen detekzioa egin da. Pausu hau oso garrantzitsua da partikulak modu egokian detektatu eta jarraituak izateko. Horretarako, *edge* komandoa erabili da. Komando honek ertzak kalkulatzeko hainbat metodo ezberdin erabiltzeko aukera ematen du. Hala ere, gaur egun metodo optimoena *canny* ertz detektagailua da. Honek gauss funtzioaren σ parametroa eta “threshold” edo muga aldatzeko aukera ematen du. Lehenengoaren bidez gauss filtroaren desbideraketa estandarra aldatzen da eta honek kanpaiaren zabaleraren aldaketa dakar. Balio handiak erabiliz irudiko zarata murriztu egiten da, baina ertz nabarmenenak ahuldu egiten dira. Ostera, balio txikietarako ertz nagusienak nabarmentzen dira (kontrastea handituz), baina zarata sortzen da irudian.

Bestalde, “threshold” edo muga balioa eskalarra edo bektorea izan daiteke. Erabilitakoak 0 eta 1 artekoak dira, balio txikia azpi muga eta balio handia goi muga izanik. Goi mugako balioa sentikortasun txikiko ertzak detektatzeko erabiltzen da, eta behe mugakoa ostera sentibilitate handiko ertzetarako erabiltzen da. Gainera, komandoan balio bakarra sartzen bada goi mugakoa bezala hartzen du eta behekoa lortzeko balio horren %40a hartzen du. Oso garrantzitsua da bi parametro hauen balio hautaketa egokia egitea, izan ere, irudian detektaturiko ertzak balio hauen arabera izango dira eta partikulen jarraipen egokian eragin zuzena dute. 4.12. Irudian erakusten da bi parametroen balioek detektaturiko ertzetan duten eragina.

4.12.a, 4.12.b eta 4.12.c Irudiak aztertzen badira, argi ikusten da σ handitzean irudi garbia lortzen dela, hau da, zarata gutxiko irudiak lortzen dira, baina lorturiko ertzak ez datoz guztiz bat 4.8.b Irudiko partikulekin. Ostera, σ txikitzean lorturiko ertzak partikulei dagozkie, baina hauetaz gain ertz gehiago lortzen dira, hots, irudian zarata lortzen da eta hori ez da komenigarria partikulen detekziorako. Bestalde, 4.12.a eta 4.12.d irudiak alderatuz ikus daitekeenez, muga balio handiak erabiltzean ertz gutxi detektatzen dira. Beraz, balio egokienak 4.12.a Irudiari dagozkionak dira.

Nahiz eta partikulen ertzak detektatzea lortu den, ez dira guztiz definituak geratzen. Izan ere, ez dira detektatzen partikulen buelta osoko ertzak, eta eremu itxi bat lortu beharrean zenbait kasutan eremu irekiak lortzen dira. Hauek ixteko *imclose* komandoa eta aurretik sorturiko filtro zirkularra erabili dira, hots, 4.33 Ekuazioko matrizea. Komando honen bidez filtroa pixel guztietan zehar pasaratzen da eta diametro

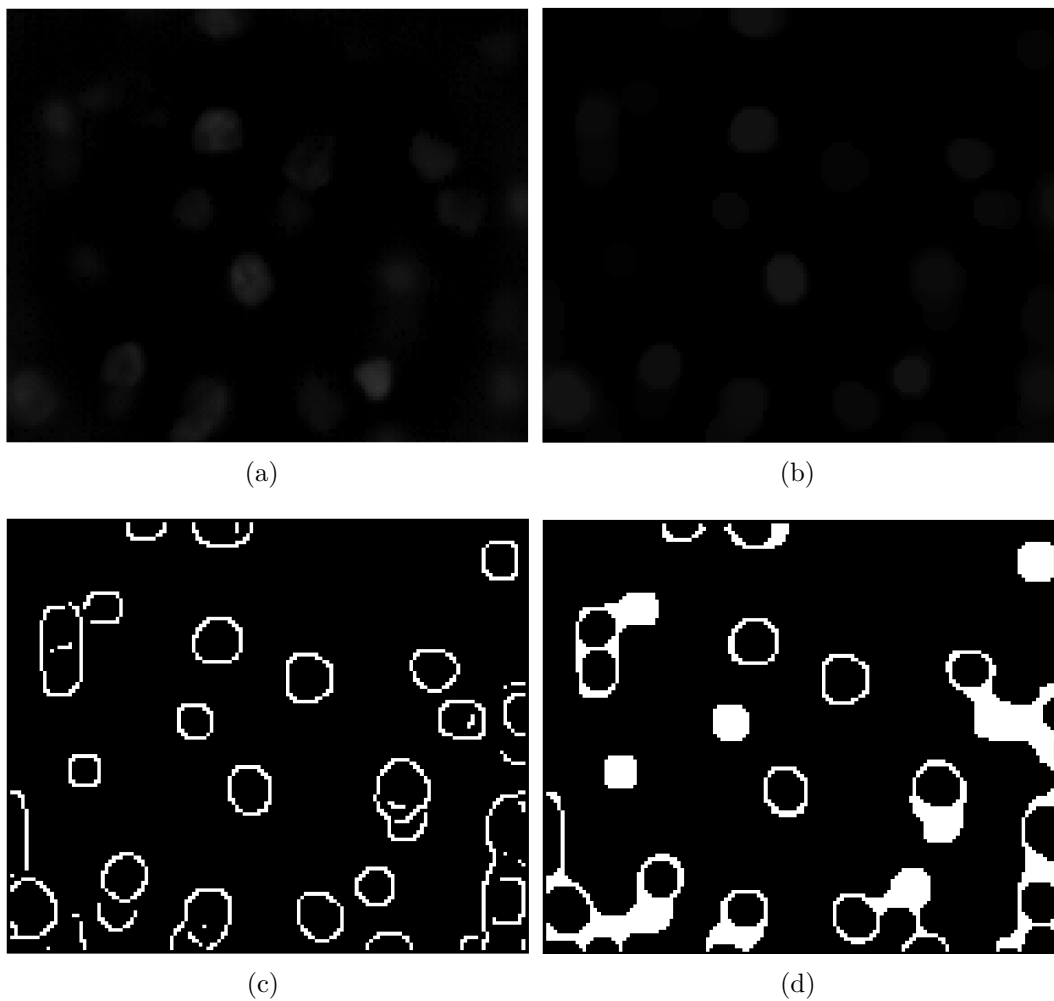
berbera duten eremu irekiak itxi egiten ditu. 4.13.d Irudian erakusten da komando hau erabiliz lorturiko emaitza. Bestalde, *imclose* komandoak duen desabantaila bat gertu dauden partikulak elkartzean datza. Izan ere, elkarrengatik gertu dauden zenbait partikulen ertzen kokapenaren arabera komando honek elkartu egiten ditu partikula hauek, eta errealitatean partikula bati ez dagokion eremu itxi handi bat sortzen du. Hala ere, aipagarria da efektu hau ez dela asko gertatzen eta ez duela inongo eraginik abiaduraren kalkuluan. Gainera, hurrengo pausu batean eremu itxi handiak baztertu egingo dira.



4.12. Irudia. 4.8.b Irudi gordinaren ertz detektatze ezberdinak *canny* komandoaren balio ezberdinetarako: (a) $\sigma = 1$ eta muga= [0.01 0.05], (b) $\sigma = 0.1$ eta muga= [0.01 0.05], (c) $\sigma = 10$ eta muga= [0.01 0.05], eta (d) $\sigma = 1$ eta muga= [0.5 0.9].

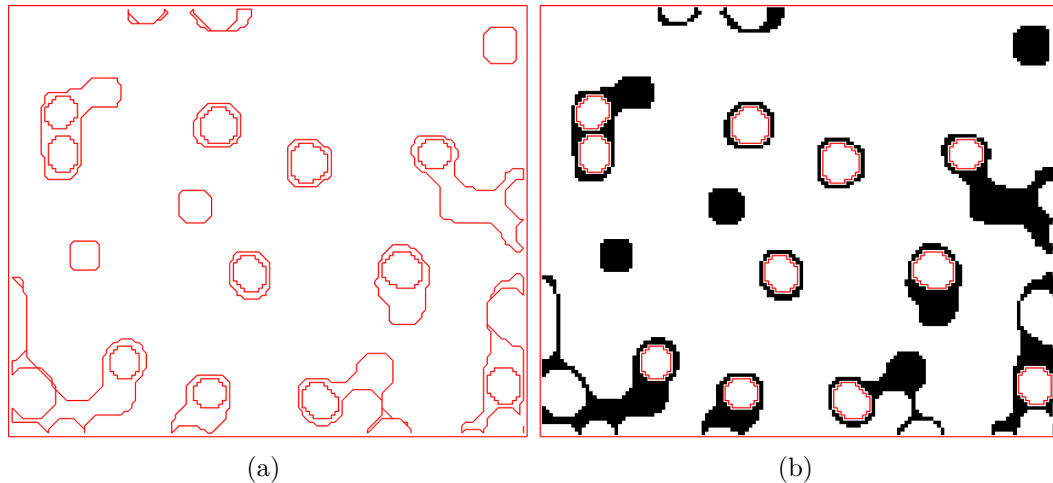
Behin irudian eremu itxiak lortuta, hauek detektatu edo eta hauen pixelak aukeratu behar dira. Horretarako, *buboundaries* komandoa erabili da. Honek eremu itxien mugak trazatzen ditu eta objektuen kanpoko mugak zein barneko zuloen mugak trazatzen ditu. Azken kasua (barneko zuloen mugak) aukeratu daiteke komandoaren

holes edo *noholes* hitz sarrera erabiliz. 4.14. Irudian erakusten dira bi kasuetan 4.13.d Irudirako lorturiko emaitzak.



4.13. Irudia. (a) Gune diluituan lorturiko irudi gordina, (b) *imopen* komandoa erabiliz lorturiko emaitza, (c) *edge* komandoa erabiliz lorturiko ertzak eta (d) *imclose* komandoa erabiliz lorturiko eremu itxiak.

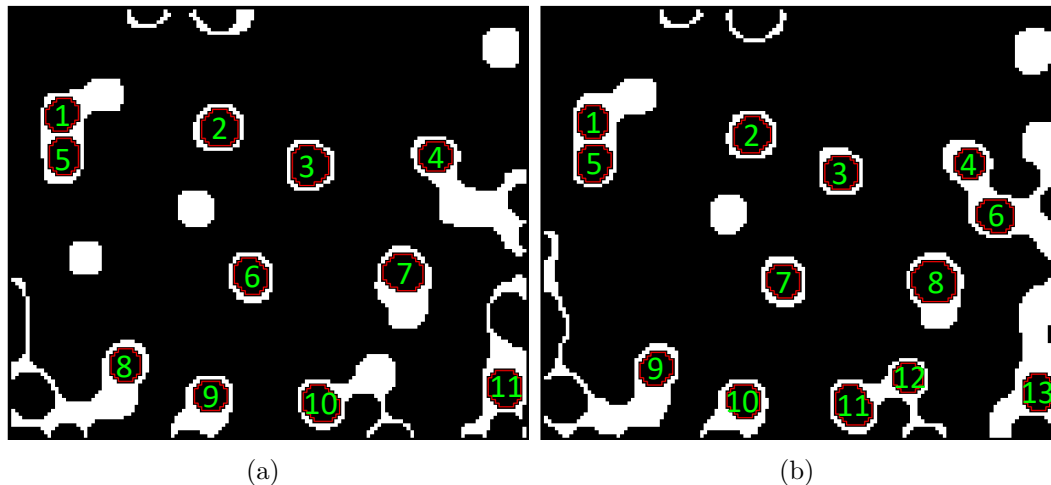
4.14.a Irudian erakusten den bezala, *holes* hitz sarrera erabiltzean eremu itxi guztiak hartzen ditu kontuan (gorriz markaturiko eremu guztiak dira detektaturiko eremu itxiak), baita barneko zuloak ere. Ostera, *noholes* erabiltzean eremuen zuloak soilik hartzen ditu aintzat. Azken kasu hau interesgarria da partikulak soilik hartzen baitira kontuan. Bestalde, 4.14.a eta 4.14.b Irudietan ageri den bezala, irudi osoa ere hartzen da eremu itxi bezala, baina hurrengo pausu batean ezabatzen da eremu hau.



4.14. Irudia. (a) *holes* eta (b) *noholes* hitz sarrerak erabiliz *bboundaries* komandoa aplikatu osteko emaitzak.

Ondorioz, *bboundaries* komandoak eremu itxi bakoitzaren ertz edo mugako pixelen posizioak dituen egitura itzultzen du, eta *regionprops* komandoak eremu bakoitzaren azalera (píxeletan) eta zentroa neurtzen ditu. Hurrengo atalean azalduko den bezala, endoskopioaren eta babes hodiaren arteko distantziaren arabera, sentsoretik distantzia ezberdinera pasatuko dira partikulak, eta beraz irudiko partikularen tamaina desberdina izango da. Tesi honetan bi lentineen arteko distantzia 7mm -koa izan da eta distantzia honekin lorturiko pixel/mm erlazioa 72.83 koa da. Beraz, partikula esferikoak direla kontsideratuz, $0.2 - 0.3\text{mm}$ arteko harea partikulen azalera, $167 - 375\text{pixel}^2$ tartekoa da. Hau dela eta, aurreko pausuan lorturiko partikulen azalera azalera-tarte batekin alderatu dira, eta tartean ez dauden eremuak baztertuak izan dira. Partikulen ertzak edo mugak lortzerako orduan, partikulak borobildu egin direnez, lorturiko eremuak partikula bera baino pixka bat handiagoak izan daitezke. Hori dela eta, tartearen goi muga 400pixel^2 -ko azalerara doitu da. Bestalde, grabaketa planotik pixka bat urrutiago (atzerago) pasatzen diren partikulak tamaina txikiagoarekin agertzen dira irudietan. Ondorioz, tartearen behe muga 40pixel^2 -ko azalerara mugatu da. Modu honetan, detektaturiko azalera handiko eremu itxiak (hala nola, irudi osoa edo hainbat partikulez osaturiko eremu itxiak) baztertu egin dira.

Hala, behin lehenengo irudiko partikulen edo eremu itxien zentroak kalkulatu direnean, hurrengo irudiko zentroak aurkitu dira partikulak parekatzeko eta abiadura bektorea kalkulatzeko. Horretarako, orain arte buruturiko pausu guztiak bigarren irudiari aplikatu zaizkio. 4.15. Irudian erakusten dira lehenengo eta bigarren irudian lorturiko eremu itxi guztiak.



4.15. Irudia. (a) Lehenengo eta (b) bigarren frame-etan lorturiko eremu itxiak.

4.15. Irudian erakusten den bezala, lehenengo iruditik bigarren irudira partikulek buruturiko desplazamendua oso txikia da. Izan ere, partikula bikoteak modu egokian sortzeko komenigarria da frame batetik besterako partikula desplazamendua txikia izatea, eta horretarako, grabaketa abiadura handiak izan. Bestalde, aurretik aipatu den bezala, gune diluituan partikulak indibidualki mugitzen dira eta errotazio mugimendua dute. Hau dela eta, partikula berak bi frame ezberdinetan forma ezberdina erakutsi dezake, eta ondorioz, ertzak zein eremuak ixterako orduan emaitza ezberdinak lortu daitezke. Honen adibide da 4.15.a eta 4.15.b Irudietan lorturiko eremu itxi kopurua. Izan ere, lehenengo irudian 11 eremu itxi lortu dira eta bigarreanean 13. Kasu honetan, lehenengo irudiko 4 eta 10 eremu itxietako partikula multzoetatik bigarren irudian eremu itxi bana gehiago detektatu da.

Behin lehenengo bi irudien eremu itxiak eta euren zentroak aurkitu ondoren, partikula berberak bi irudi ezberdinetan erlazionatu behar dira. Horretarako, distantzia minimoen teoria erabili da, hau da, bigarren irudiaren eremu itxi guztien zentro bakoitzak lehenengo irudiaren eremu itxi bakoitzaren zentroarekiko duen distantzia kalkulatu da hurrengo ekuazioa aplikatuz:

$$d_{ji} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4.34)$$

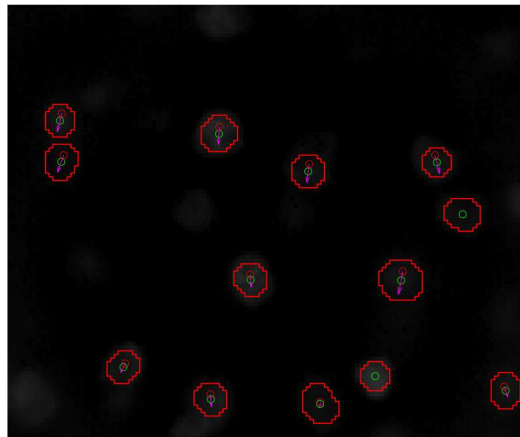
non i eta j azpindizeak lehenengo eta bigarren irudiaren zentro zenbakia irudizkoen.

Modu honetan, bigarren irudiko zentro bakoitzerako i distantzia kopurua kalkulatu da eta balio minimoa aukeratu. Hala ere, gerta daiteke bigarren irudian partikula berri bat agertzea edo beste bat desagertzea. Kasu hauetan sorturiko partikula

bikotea ez da egokia (nahiz eta distantzia minimokoa aukeratu) eta kalkulaturiko abiadura benetakoa baino handiagoa da. Hau ekiditeko distantzia minimo-maximo bat esleitzen da ($d_{min_1,max}$) eta zentro bakoitzean lorturiko distantzia $d_{min_1,max}$ minimoa baino handiagoa bada, ez da bikoterik sortzen. Hala ere, parametro honen balioa ezin da finkoa izan, partikulak desplazatzen diren abiaduraren arabera frame batetik bestera buruturiko desplazamendua ezberdina baita. Hortaz, hasierako irudietan partikulek duten abiadura eskuz neurtu da eta honen arabera ($d_{min_1,max}$) parametroari balio bat esleitu zaio pixel unitatetan.

Behin bigarren irudiko eremu itxi guztien distantzia minimoa neurtu eta bikoteak lortu direnean, abiadura bektorea kalkulatu da 4.35 Ekuazioa erabiliz:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \tag{4.35}$$



4.16. Irudia. Lehenengo bi frame-ren artean lorturiko abiadurak.

4.16. Irudian ikus daitekeen bezala, partikulek abiadura negatiboa dute eta beraz, beherantz doa (irudia iturriaren periferian lorturikoa da). Bestalde, 4.16. Irudian ikus daitekeenez, abiadura bektorea duten eremu itxi bakoitzaren barnean bi zirkulu daude. Zirkulu berdea bigarren irudiaren eremu itxiaren zentroari dagokio, eta gorria oster, aurreko irudiaren eremu itxiaren zentroari dagokio. Lehenengo bi irudietan 11 partikula parekatu dira, eta beraz, 11 abiadura bektore lortu dira. Jarraian hauen batez bestekoa kalkulatu da eta abiadura hau esleitu zaio bigarren irudiari, kasu honetan abiadura $-374.48 \text{ pixel/frame}$ delarik. Hurrengo azpiatalean azalduko da abiaduraren unitateak mm/s unitatera nola bihurtzen diren (kalibraketaren menpe baitago).

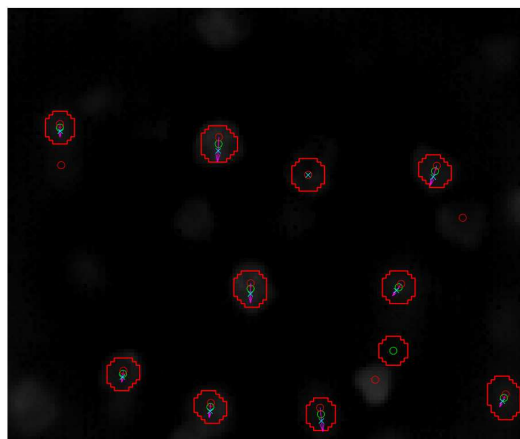
Hurrengo irudietan eremu itxien zentroak aurkitzeko pausu berdinak egin dira, baina hauek parekatzeko prozedura ezberdina da. Hirugarren iruditik aurrera, aurreko irudiko partikula edo eremu itxi bakoitzaren zentroaren posizioa eta abiadurak ezagunak direnez, posible da hurrengo irudian izango duten posizioa auresatea.

Izan ere, denbora tarteak jakina da (frame bat) eta azelerazioa nulua dela suposatuta da (grabaketa abiadura oso handia delako). Beraz, 4.5 Ekuaziotik 4.36 eta 4.37 Ekuazioak lortzen dira:

$$x_{i+1} = v_x \Delta t \quad (4.36)$$

$$y_{i+1} = v_y \Delta t \quad (4.37)$$

Beraz, 4.36 eta 4.37 Ekuazioak erabiliz, bigarren irudian detektaturiko eremu itxien posizioak aurrean dira hirugarren irudirako eta hauetariko bakoitzak hirugarren irudiko eremu itxi bakoitzaren zentroarekiko duen distantzia kalkulatu da. Aurreko kasuan bezala, bikoteak sortzeko distantzia minimoa aukeratu da, eta beraz, beste distantzia minimo-maximo bat definitzen da ($d_{min_2,max}$) parekatze ezegokiak ekiditeko (aurretik aipatu diren arrazoi berdinengatik). Kasu honetan, distantziaren balioa oso txikia da, hau da, auresandako eta detektaturikoaren artean oso ezberdintasun txikia dago, eta horregatik, $d_{min_2,max}$ -ren balioa oso txikia da. Hala ere, partikularen mugimenduan perturbazioa sortzen bada, (partikulen arteko talkak edo partikularen azelerazio handia adibidez) auresandako eta detektaturiko zentroyen artean desbideraketa handia sor daiteke eta partikula parekatu gabe geratu daiteke. Kasu honetan, parekatzea aurreko prozeduraren bidez egin da, hau da, oraingo irudia eta aurrekoaren zentroyen arteko distantziak kalkulatu. Modu honetan, parekatu ahal diren eremu itxi guztiak parekatu dira eta dagozkien abiadura bektoreak kalkulatu dira. 4.17. Irudian erakusten dira hirugarren irudirako lorturiko abiadura bektoreak.



4.17. Irudia. Hirugarren eta bigarren frame-en artean lorturiko abiadura bektoreak.

4.17. Irudian erakusten den bezala, auresandako zentroyen (“x” urdinak) eta detektaturiko zentroyen (zirkulu berdeak) posizioen artean ezberdintasun txikia lortzen

da. Aipatu behar da bigarren irudian (4.14.b Irudian) detektaturiko 5, 6 eta 12 eremu itxiak ez direla detektatu hirugarren irudian (4.17. Irudian), eta beraz, parekatu gabe geratu dira.

Bestalde, aurretik aipatu den bezala, gune diluituetan (gehien bat iturgunean) partikulen abiadura aldaketa bortitzak gertatzen dira denbora tarte txikietan eta honek eremu itxien parekatze arazoak sor ditzake, eremu itxi beraren distantzia irudi batetik bestera $d_{min_1,max}$ baino handiagoa delako. Beraz, arazo hau konpontzeko 10. iruditik aurrera partikulen azelerazioa kontuan hartu da. Izan ere, partikula indibidual bakoitzaren abiadura ezberdina denez, irudi bakoitzaren batez besteko abiadura ere ezberdina da, denborarekiko abiaduraren eboluzioa oszilatarioa delarik. Azelerazioa abiaduraren deribatua denez, oszilazio hauek azelerazioaren balio oso ezberdinak (positibo zein negatiboak) sortzea dakar, eta beraz, errore hau txikitzeko helburuarekin aurreko 10 irudien azelerazioaren batezbestekoa neurtu da. Behin azelerazioa kalkulaturik 4.38 Ekuazioaren bidez, hurrengo irudian erakusten den batez besteko desplazamendu netoa kalkulatu da.

$$\bar{d} = \bar{v}_{i-1}\Delta t + \bar{a}\Delta t^2 \quad (4.38)$$

non \bar{a} aurreko 10 irudien batezbesteko azelerazioa den.

Behin batezbesteko desplazamendu netoa kalkulaturik, $d_{min_1,max}$ eta $d_{min_2,max}$ birkalkulatu dira, $d_{min_1,max}$ 1.5 aldiz \bar{d} eta $d_{min_2,max} = \bar{d}$ direlarik. Hala ere, hainbat baldintza hartu dira kontuan birkalkulu hauetan:

- $\bar{d} = 0$ bada partikulak ia geldirik daudela esan nahi du eta distantzia ezberdinei balio txikiak esleitu zaizkie ($d_{min_1,max} = 3.5$ eta $d_{min_2,max} = 1.5$).
- $d_{min_2,max} < 10$.
- $d_{min_1,max} < \frac{d_{min_2,max}}{5}$ bada, $d_{min_1,max}$ ez da aldatzen.

Modu honetan, azelerazioaren eboluzioa jarraitu eta abiadura aldaketa bortitzak auresan daitezke, batezbestekoa kalkulatzeko harturiko datu kopurua ez baita handiegia.

Aurretik aipatu den bezala, bi partikula elkartu edo partikula bat bestearen atzetik abiadura handiagoarekin pasatzean, irudietan bi partikulak bat izango balira bezala agertzen dira. Modu honetan, detektaturiko ertzen arabera, partikulak elkartzen direnean sorturiko partikula handiaren zentroaren posizio aldaketa dela eta, aurkako noranzkoa duen abiadura bektorea lortzen da, eta honek batezbesteko abiaduraren

txikitzea dakar. Hori dela eta, abiadura bektoreen zeinu aldaketa ekiditeko, noranzko nagusienaren abiadura bektoreak hartu dira kontuan eta hauen batez bestekoa erabili da.

Bestalde, aipatu behar da posizio erradialaren arabera iturrian solidoek duten norabidea ezberdina dela: bilgailuaren paretatik gertu jaisten diren partikula guztiak beherantz egiten dute eta ardatzean oster, gora. Hortaz, aurrean aipaturiko arazoak ekiditeko, kasu hauetan norantza egokiko abiadurak baino ez dira hartu kontuan. Ostera, erradioan zeharreko beste puntuetan partikulak bi norantzatan mugi daitezke, eta hortaz, biak hartu dira kontuan.

4.5. SISTEMA OPTIKOAREN KALIBRAKETA

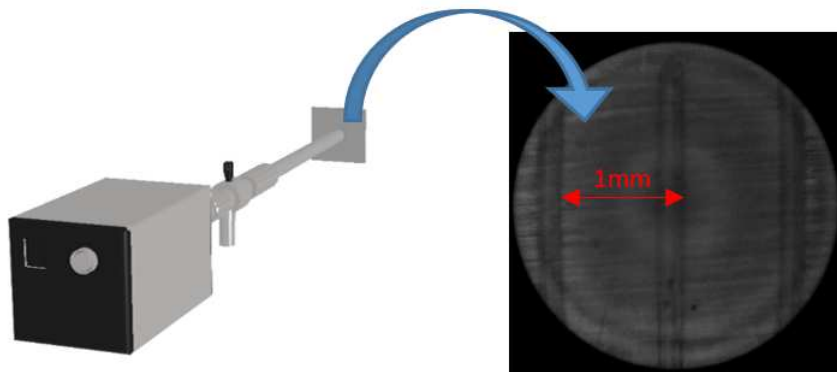
Kamera erabiliz lorturiko emaitzak guztiz fidagarriak eta baliagarriak izan daitezten hainbat kalibraketa ezberdin burutu behar izan dira. Izan ere, eraztungunean buruturiko grabaketetan solidoak zafiro lentearen parean mugitzen dira, baina gune diluituetan zafiro lentearen aurretik pasatzen diren solidoen distantzia ezezaguna da. Ondorioz, nahiz eta abiadura pixel/frame unitateetan neurtzen den, ezinezkoa da solido hauen pixel/mm erlazioa jakitea.

Arazo hau konpontzeko bi ekintza burutu dira: lehenengoa sakonera distantzia ezberdinetarako pixel/mm erlazioari dagokion kurba kalibraketa lortzea; eta bigarrena espaziagailua erabiliz grabaketa sakonera mugatzea. Behin partikulak zafirotik zein distantziara pasatzen diren jakinik, bi kode ezberdinen zehaztasuna neurtu da.

Hau guztia dela eta, jarraian azalduko dira egin diren kalibraketak.

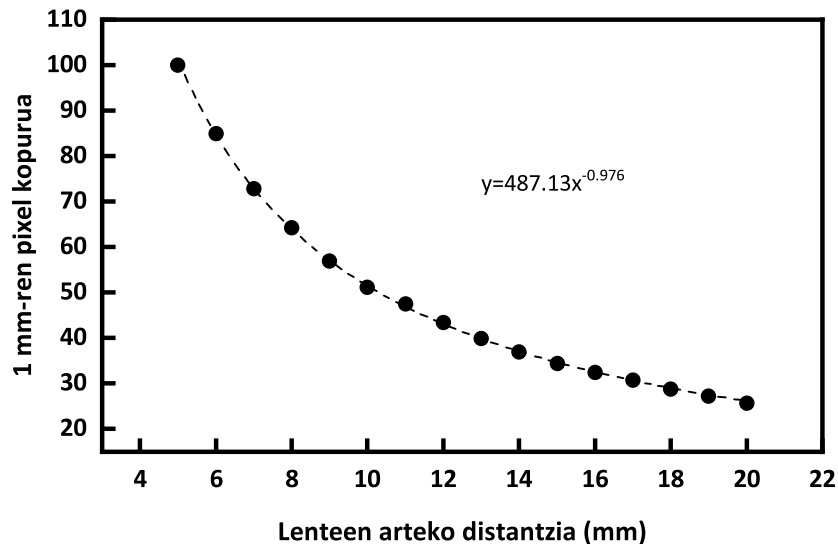
4.5.1. Distantzia optikoaren kalibraketa

Aurretik aipatu den bezala, beharrezkoa da jakitea partikulek irudietan burutzen duten distantzia benetan zenbatekoa den. Horretarako, zehaztasun handiko kalibraketa txartela erabili da. Txartel honetan hainbat zutabe daude markaturik ezagunak diren distantzia ezberdinetara (4.18. Irudia).



4.18. Irudia. Distantzia optikoa kalibratzeko erabilitako kalibraketa txartela.

Lehendabizi, endoskopiaoren eta babes hodiaren lenteen arteko distantzia ezberdinetarako burutu da kalibraketa. Kasu honetan zafirozko lentearen kanpoko aurpegia izan da grabaketa plano eta kalibraketa txartela zafiroaren parean kokatu da paraleloki. 4.19. Irudian erakusten da lenteen arteko distantzia ezberdinetarako milimetro batek pixeletan hartzen duen distantzia.

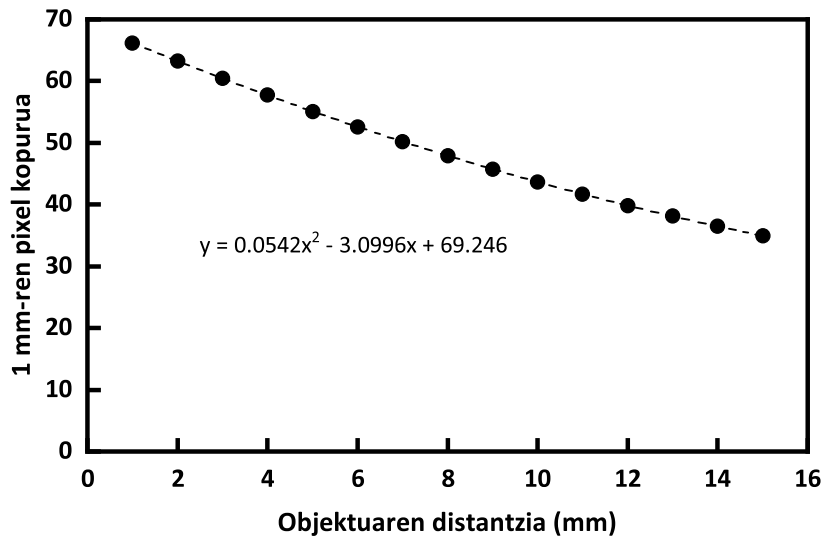


4.19. Irudia.

Distantzia optikoa kalibratzeko erabilitako kalibraketa txartela.

4.19. Irudian erakusten den bezala, bi parametro hauen (lenteen arteko distantzia eta 1 mm -ko pixel kopurua) arteko erlazioa parabolikoa da, eta zafirozko lentea endoskopiaoren lentetik urrundu ahala milimetro bat osatzen duen pixel kopurua gero eta txikiagoa da. Distantzia guzti hauek praktikan erabilgarriak dira, baina tesi honetarako 7 mm -ko distantzia erabili da eta 72.83 pixel/mm hartzen ditu. Balio hau argi haloa ekiditeko egokiena da. 2.13. Irudian erakutsi den bezala, lenteen arteko distantzia handitzean argi halo handiagoak lortzen dira eta, beraz, eraztunguneko partikulen jarraipena egiteko pixel kopurua txikiago behar da. Bestalde, beste edozein distantzia aukeratuz gero, irudiko solidoen tamaina aldatu egiten da, baina erabilitako bi kodeak moldakorrak direnez, hainbat parametroren balioak aldatuz partikula tamaina ezberdinak jarraitu daitezke.

Hala, tesi guztian zehar 7 mm -ko distantzia erabili da bi lenteen artean, baina gune diluituaren kasuan sakonera mugatu egiten da espaziagailua erabiliz. Beraz, lenteen arteko distantzia finkaturik, distantzia optikoa neurtu da zafirotik distantzia ezberdinetara kalibraketa txartela erabiliz. 4.20. Irudian erakusten dira lorturiko emaitzak.



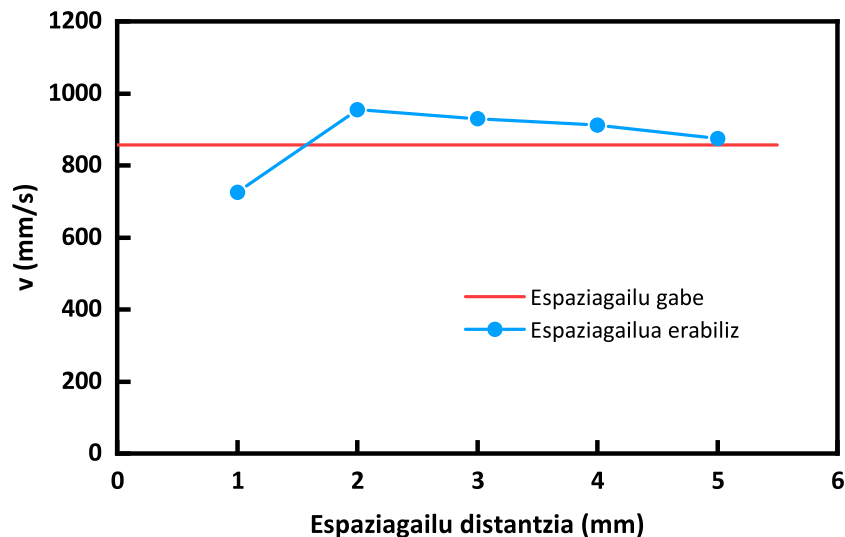
4.20. Irudia. Distantzia optikoaren kalibraketa lenteen arteko distantzia 7 mm denean.

Ikusten den bezala, 4.20. Irudiko kurbak 4.19. Irudiko kurbaren joera berdina du, eta zafirozko lenteak angelurik ez duenez, balioak antzekoak dira. Jarraian, 4.5.2 Atalean azalduko den bezala, espaziagailua gune diluituetan erabili denean, grabaketa plano sakonera osoaren erdian kokatzen da, baina sakonera zenbat eta handiagoa izan lortutako emaitzen errorea ere handiagoa da.

4.5.2. Espaziagailuaren posizioaren kalibraketa

Aurretik aipatu den bezala, iturri ohandze konikoan partikulak indibidualki desplazatzen direnez gune diluituetan, ez dira zafirozko lentearen kanpoko aurpegian zehar mugitzen. Hau dela eta, endoskopiaoren puntan mugitzen diren partikulen arteko distantzia ezezaguna da, eta ezinezkoa da hauen pixel/mm erlazioa jakitea. Partikula erregularrak erabiliz ordea posiblea da parametro hau jakitea. Izan ere, partikula erregularren tamaina jakina denez, endoskopiaorekiko duten distantzia kalkula daiteke. Hala ere, tesi honetan partikula irregularrak erabili dira eta, nahiz eta hauek irudietan duten tamaina jakina den, ezinezkoa da burutuko duten distantzia jakitea.

Arazo honek sortzen duen errorea murrizteko espaziagailua erabili da. Endoskopiaoren eta babes hodiaren arteko lenteen arteko distantzia 7 mm -an finkatu da eta espaziagailuaren barneko pareta zafirozko lentearekiko hainbat distantzia ezberdinetara kokatu da. Modu honetan, solidoen abiadura neurtu da iturgunean zehar espaziagailurik gabe eta espaziagailuaren distantzia ezberdinetarako. 4.21. Irudian erakusten dira lorturiko emaitzak.



4.21. Irudia. Distantzia optikoaren kalibraketa lenteen arteko distantzia 7 mm denean.

4.21. Irudian erakusten den bezala, gune diluituan espaziagailurik gabe eta espaziagailuaren distantzia ezberdinetarako solidoen abiadurak neurtu dira. Saiakuntza honetan, hodi ez-porotsudun sistema bat erabili da, eta $H = 0.03\text{ m}$ -ko altueran eta 0.016 m -ko distantzia erradialean egin da neurketa.

Sistema optikoa espaziagailurik gabe erabili denean 857 mm/s -ko abiadura lortu da, baina kontuan izan behar da kodeak grabaketa planotik urrunago dauden solidoen abiadura ere neurtzen duela. Neurketa guztietan, endoskopioaren punta grabaketa planoaren sakoneraren erdian kokatu da eta espaziagailurik gabe zafiro lentetik 2.5 mm -tara. Bestalde, espaziagailua 1 mm -tara kokatzean, lorturiko abiadura espaziagailurik gabe lorturikoa baino txikiagoa da (725 mm/s). Izan ere, espaziagailuaren distantzia horretan 3 eta 5 partikula artean sartzen dira. Hori dela eta, espaziagailuak solidoaren jariora perturbatu egiten du eta abiadura txikiagoak neurtarazi. Espaziagailua 2 mm -tara kokatzen denean neurturiko solidoen abiadura 954 mm/s -koa da, aurreko neurketan baino handiagoa. Kasu honetan, 7–10 partikula artean sartzen dira espaziagailuaren barnean eta ez da perturbazio adierazgarririk sortzen. Gainera, distantzia hau nahiko txikia da grabaketa planotik urrunago dauden solidoen abiadura neurtzeko. Azkenik, espaziagailuaren distantzia handiago egin ahala neurturiko batezbesteko abiadura txikiagoa da, espaziagailurik gabeko egoerara hurbilduz. Izan ere, sakonera handitzean grabaketa planotik urrunago pasatzen den solido kopurua handiagoa da eta desplazamenduak txikiagoak dira partikulak urrunago daudenean.

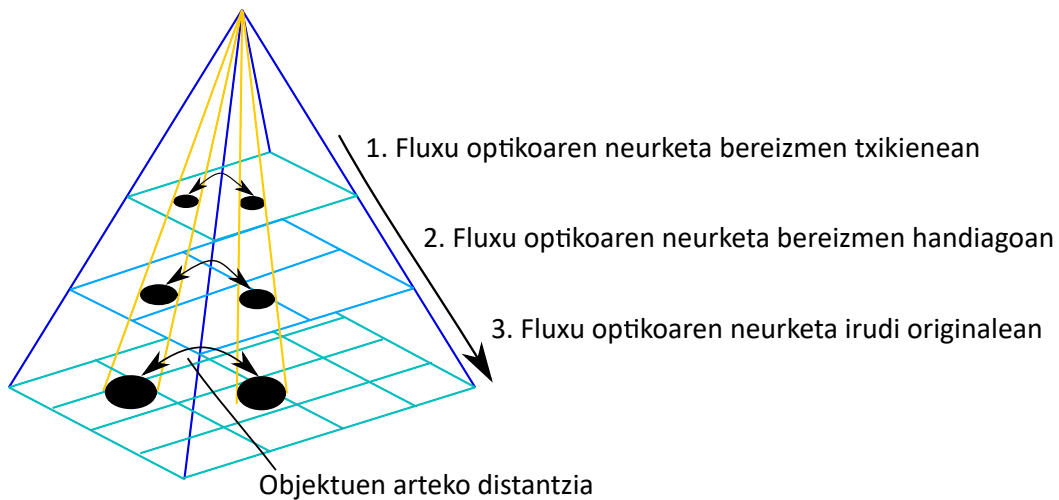
Beraz, espaziagailuaren distantzia optimoa 2 mm -koa da, eta aurretik aipatu den bezala, grabaketa plano zafirozko lentetik 1 mm -ra kokatu da. Aurretik erakutsi den 4.20. Irudiaren arabera, distantzia honi dagokion pixel/mm erlazioa 66.2 koa da

eta 1 mm-ko errorea du (2.93 pixel). Hortaz, espaziagailuaren distantzia hau erabiliz lortzen den errorea %4 da.

4.5.3. Gune dentsoko kodearen kalibraketa

4.4.1 Atalean aipatu den bezala, gune dentsoan lorturiko irudietatik solidoen abiadurak lortzeko Farneback-en metodo matematikoa erabili da, *Matlab*-ek barneratua duen algoritmoa. Software honek Farneback-en metodo piramidala erabiltzen du.

4.22. Irudian erakusten da metodoaren diagrama.



4.22. Irudia. *Matlab*-eko Farneback-en metodo piramidaren diagrama.

4.22. Irudian erakusten den bezala, Farneback-en metodoak irudi piramide bat sortzen du eta irudi bakoitzak aurreko irudikoa baino bereizmen txikiagoa du. Bi maila edo gehiagoko piramidea aukeratzen bada, algoritmoak bereizmen ezberdineko mailatan neurtzen ditu abiadura bektoreak, beti ere bereizmen txikieneko mailan hasiz. Piramidearen maila kopurua handitzeak irudiaren bereizmenaren murrizketa dakar, eta honek distantzia handiko mugimenduak hobeto neurtzen laguntzen du. Hala ere, konputazio denbora luzeagoa da.

Aurretik aipatu den bezala, objektuen jarraipena bereizmen baxueneko irudian hasten da eta bertan lorturiko abiadurak hurrengo mailako irudian erabiltzen dira abiadurak neurtzeko. Modu honetan, algoritmoak piramidean zehar behera eginez partikulen jarraipena hobetu egiten du. Piramidearen maila banatze honek pixel mugimendu handien jarraipena laguntzen du, pixel-auzoa baino handiagoak diren desplazamenduak hain zuzen. Izan ere, irudiaren bereizmena txikitzean desplazamendu handiak laburtu egiten dira, hortaz, bertan lorturiko abiadurak abiapuntu bezala erabiltzen dira bereizmen handieneko mailetako irudietan abiadurak neurtzeko.

Kalibraketa modu egokian burutu ahal izateko 4.23. Irudian erakusten den sistema erabili da. $0.830m$ altuera eta $0.025m$ -ko barne diametroa duen hodi bertikala solidoz bete da eta beheko irteera irekiz solidoen abiadura neurtu da irteera baino $0.02m$ gorago. Modu honetan, solidoen jaitiera abiadura konstantea lortu da eta grabaketa guztian zehar hainbat partikula jarraitu dira eskuz.



4.23. Irudia. Gune dentsoko kodearen kalibraketa egiteko erabilitako sistema.

4.6. Taulan erakusten dira lorturiko emaitzak.

4.6. Taulan azaltzen den bezala, 4.23. Irudiko sistemaren bidez lorturiko grabaketatik hainbat partikulek buruturiko distantzia eta hau egiteko behar izandako frame kopurua neurtu dira. Guztira 15 neurketa egin dira eta batezbesteko abiadura 2.75 pixel/frame -koa dela lortu da, 0.023 -ko desbideraketarekin.

Beraz, eskuz lorturiko emaitza gune dentsoko kodeak emandakoarekin alderatu da eta parametroen balio egokienak aukeratu dira. Farneback-en algoritmoak bost sarrera behar ditu: piramidearen maila, piramidearen eskala, iterazio kopurua, pixel-auzoaren tamaina eta filtroaren tamaina. Parametro hauen erabilera aukerazkoa da eta erabili ezean *Matlab*-ek balio automatikoak esleitzen ditu. Hala ere, abiaduraren kalkulua optimizatzeko aipaturiko parametro bakoitzaren kalibraketa egin da.

4.6. Taula. Gune dentsorako kalibraketa egiteko eskuz neurturiko abiaduren datuak.

t (frame)	Δy (pixel)	v (pixel/frame)
63	166.00	2.62
73	207.01	2.83
64	178.00	2.78
68	187.01	2.75
70	187.00	2.67
74	199.02	2.68
75	204.30	2.72
66	191.85	2.90
71	197.02	2.77
66	184.01	2.78
68	185.17	2.72
66	185.04	2.80
68	181.14	2.66
86	225.02	2.61
68	198.06	2.91

Bestalde, 4.11. Irudian erakutsi den bezala, endoskopioaren erabilera dela eta lorturiko irudietan “tunel efektua” sortzen da, hau da, partikulak irudiko zentroko mar-ko zirkular baten barnean baino ez dira ageri. Zirkuluaren perimetro osoan pixelaren intentsitate aldaketa handia gertatzen da eta, beraz, Farneback-en metodoaren bidez abiadura zirkularrak lortzen dira interfasearen inguruan. Gainera, honek eragin zuzena du inguruko pixeletan, hauen abiadura perturbatu egiten duelarik. Hortaz, zirkuluaren perimetrotik aldenduz perturbazioaren eragina murriztu egiten da, zirkuluaren zen- troa izanik eragin txikieneko gunea. Behin frame bateko abiadura bektoreak lortuta, tamaina bereko matrize batez biderkatzen da perturbazioaren eragina ekiditeko. Ma- trizeak gauss itxura duenez, lorturiko abiadurak ponderatuak geratzen dira, zentroko abiadurak indar handiago dutelarik batezbesteko abiadura kalkulatzeko orduan. Filtro edo kernelaren gauss kanpaiaren tamainaren arabera lorturiko emaitzak ezberdinak direnez, kalibratu den beste parametro bat kanpaiaren forma izan da.

Piramidearen maila: piramidearen maila geruza kantitatea da eta balio es- kalar positibo batez zehazten da. Irudi gordina beti izaten da piramidearen oinarria, eta nahiz eta edozein balio erabil daitekeen, 1 zenbakia erabiltzen denean mugimendu fluxua irudi gordinen soilik aplikatzen da, piramidearen deskonposizioa egin gabe. Go- mendaturiko balioak 1 eta 4 artekoak dira. 4.24.a Irudian erakusten dira kalibraketan

lorturiko emaitzak.

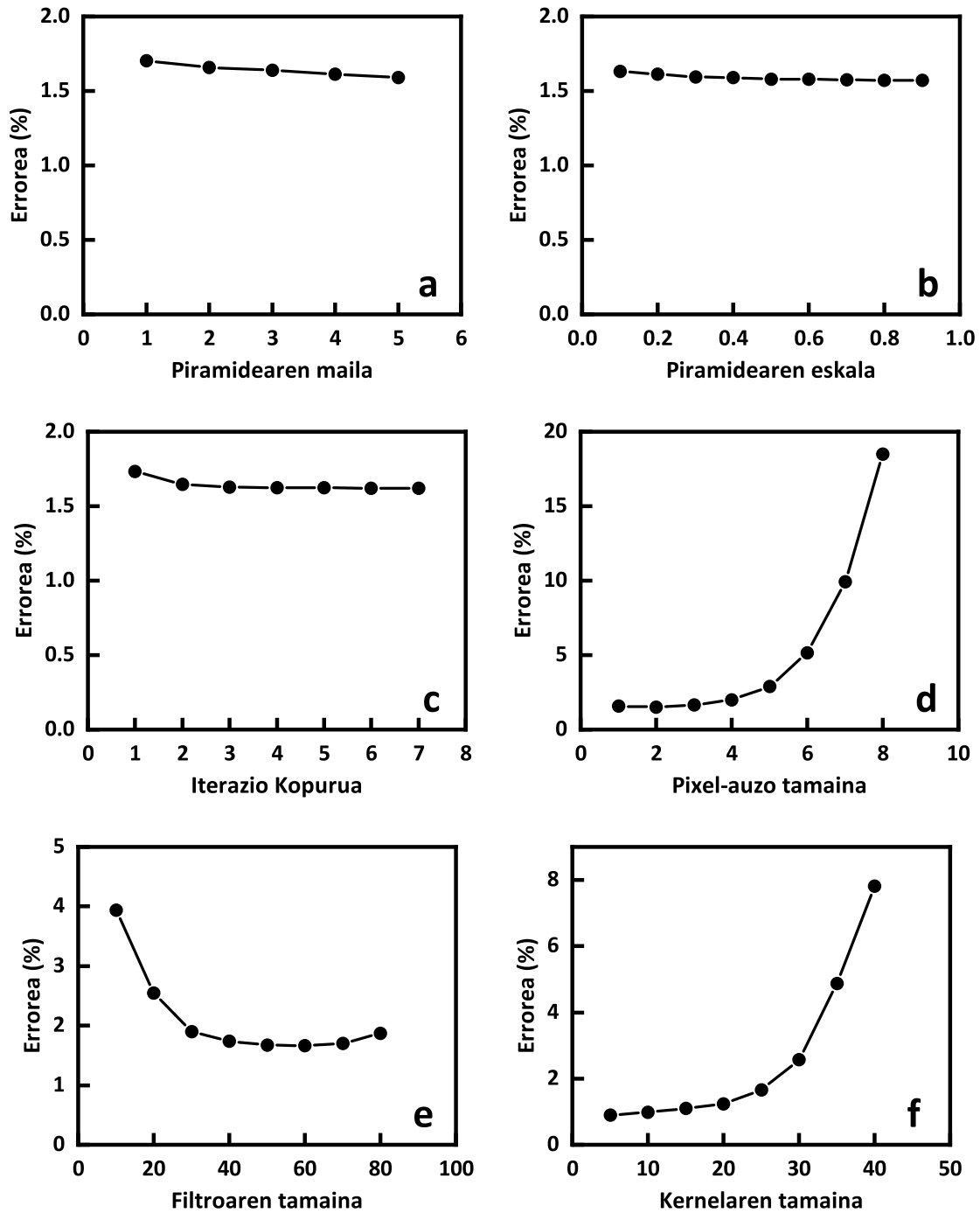
Irudiaren eskala: aurreko parametroari 1 baino balio handiagoa esleitzen bazaio irudiaren eskalak irudi batetik besterako bereizmenaren murrizketa indizea adierazten du. Irudiaren eskalak 0 eta 1 arteko balioak hartzen ditu, eta adibidez 0.5 balioa emanez gero, piramidearen bereizmena erdira murrizten da maila bakoitzean. Piramidearen maila txikienak bereizmen handiena du. 4.24.b Irudian erakusten dira kalibraketan lorturiko emaitzak.

Iterazio kopurua: piramidearen maila bakoitzean buruturiko iterazio kopurua zenbaki positibo gisa zehazten da. Farneback-en algoritmoak piramidearen maila bakoitzean puntu kodeen bilaketa iteratiboa burutzen du, konbergentzia lortu arte. 4.24.c Irudian erakusten dira kalibraketan lorturiko emaitzak.

Pixel-auzoaren tamaina: pixel zehatz baten abiadura kalkulatzeko erabiltzen den pixel-auzoaren tamaina, zenbaki oso positibo gisa zehazten da. Pixel-auzoa handitzerakoan mugimendu lausoa handitzen da eta honek fluxu optikoaren estimazio sendoagoa lortzea ahalbidetzen du. Orokorrean, erabilitako balioak 5 edo 7 izan ohi dira. 4.24.d Irudian erakusten dira kalibraketan lorturiko emaitzak.

Filtroaren tamaina: batezbesteko filtroaren tamaina zenbaki positibo oso gisa zehazten da, balio minimoa 2 izanik. Algoritmoak desplazamendua (fluxua) kalkulatu ondoren, pixel-auzoaren batezbestekoa gauss formako filtroaren bidez egiten da. Gainera, ertzetatik hurbil dauden pixelek pisu txikia izaten dute, algoritmoak polinomioaren hedapen koefizienteek zehaztasun txikia dutela onartzen duelako. Filtroaren tamaina handitzean algoritmoaren sendotasuna irudiaren zaratarekin handitzen da eta mugimendu azkarrak hobeto neurtzen dira, algoritmoa sendoagoa bilakatuz. 4.24.e Irudian erakusten dira kalibraketan lorturiko emaitzak.

Kernelaren tamaina: aurretik aipatu den bezala, filtro hau ez da Farneback-en algoritmoaren parametro bat, tesi honetarako sorturiko parametroa baizik. Kernelaren tamaina zenbat eta handiagoa izan bazterreko abiadura bektoreen pisua handiagoa da, hauen eragina batezbesteko abiaduran nabarmenagoa izanik. Modu honetan, irudiaren marko zirkularrak eragindako abiadura tangenzialen perturbazioa handiagoa izango da, baina kernelaren tamaina asko txikitzean emaitzen adierazgarritasuna murrizten da, lorturiko abiadurak eremu txikiari baitagozkie. 4.24.f Irudian erakusten dira kalibraketan lorturiko emaitzak.

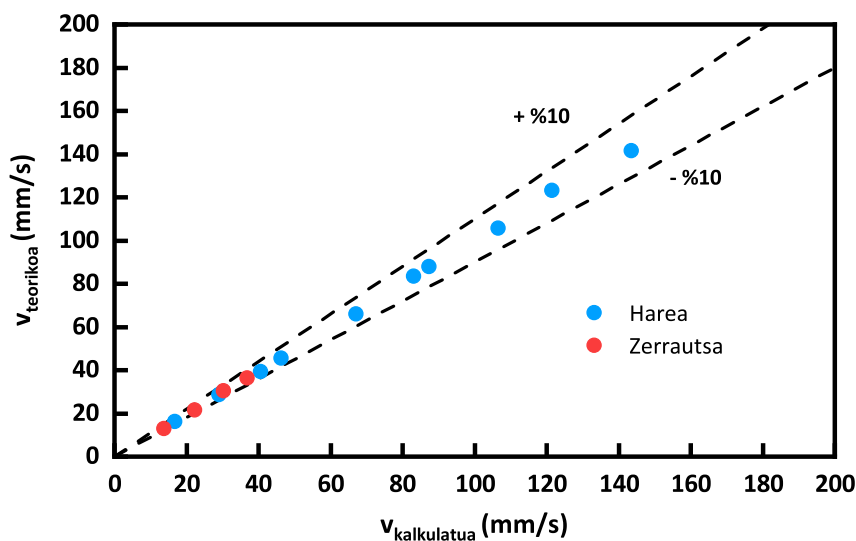


4.24. Irudia. Gune dentsoko kodearen erroreak zenbait parametro aldatzean: (a) piramidearen maila, (b) eskala, (c) iterazio kopurua, (d) pixel-auzo tamaina, (e) filtroaren tamaina eta (f) kernelaren tamaina.

4.24. Irudian ikus daitekeenez, abiaduraren kalkulu egokian gehien eragiten duten parametroak pixel-auzoa (4.24.d Irudia), filtroa (4.24.e Irudia) eta kernelaren tamaina (4.24.f Irudia) dira, besteetan ia ez dagoelarik aldaketarik errorearen balioetan (%1.73 eta %1.57 balioen artean aldatzen baitira). Hala ere, komenigarria da pirami-

dearen maila eta iterazio kopuruaren balio txikiak erabiltzea, konputazio denbora asko murrizten baita. Gune dentsuan partikulen abiadura oso txikia denez, frame batetik besterako solidoen mugimendua oso txikia da. Hori dela eta, inoiz ez da mugimendu lausorik lortzen eta pixel-auzoaren tamaina handietarako benetako abiadurak baino balio handiagoak lortzen dira. Bestalde, filtroaren tamaina txiki eta oso handietarako errore handiak lortzen dira, tarteko balioetan lortuz errore minimoa. Azkenik, kernelaren tamaina handietarako errorea asko handitzen da ertzeko abiaduren pisuak handiagoak direlako. Hala ere, ez da komenigarria kernelaren tamaina txikiak hartzea, izan ere neurturiko lagina partikula bat baino txikiagoa izan baitaiteke eta hau ez da sistema guztiaren adierazgarri. Beraz, aurreko guztia kontuan izanda, hurrengoak dira parametro bakoitzerako aukeraturiko balioak: piramidearen maila, 2, piramidearen eskala, 0.5, iterazio kopurua, 3, pixel-auzo tamaina, 3, filtroaren tamaina, 60, eta kernelaren tamaina, 25.

Ondorioz, behin Farneback-en algoritmoaren parametro optimoak aukeraturik, solidoen abiadura eta solido mota ezberdinetarako burutu da kalibraketa. 4.25. Irudian erakusten dira lorturiko emaitzak.



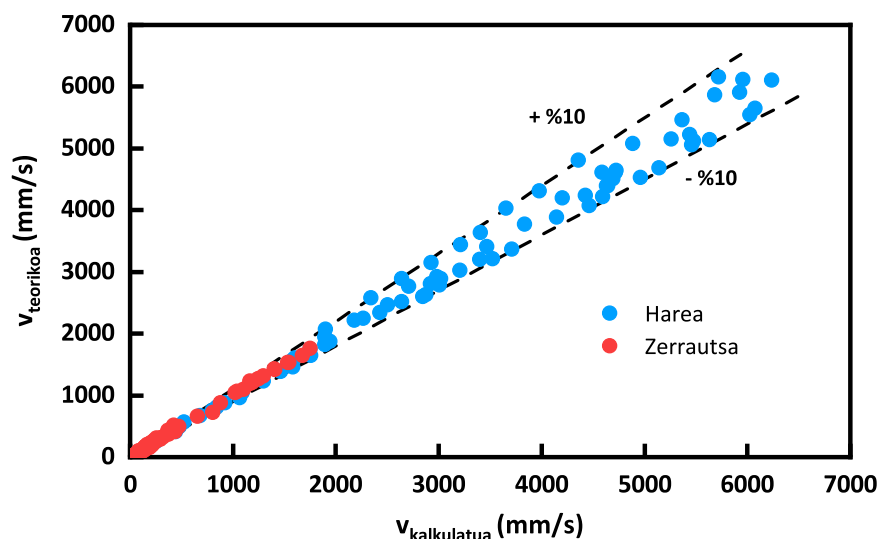
4.25. Irudia. Abiadura teorikoen eta kalkulaturikoen arteko alderaketa gune dentsoko kodea erabiliz.

4.25. Irudian erakusten den bezala, Farneback-en kodeak zehaztasun handiarekin neurtzen du gune dentsoko solidoen abiadura. Izan ere, neurturiko guztiek %10 baino errore txikiagoak dituzte (errore handiena %3.2 izan da). Beraz, gune dentsoko kodea egokia da abiadurak neurtzeko.

4.5.4. Gune diluituko kodearen kalibraketa

Gune dentsorako egin den bezala, gune diluiturako eraiki den kodea kalibratu da. Hala ere, kasu honetan ez da parametro garrantzitsurik doitu behar izan, eta horregatik zuzenean lorturiko emaitzak erakutsiko dira.

Gune diluituko kodea iturgune eta iturriko solidoen abiadurak neurtzeko erabili da. Gune hauetan partikulak abiadura handiarekin mugitzen dira (metro batzuk segundoko), eta beraz, ez da bideragarria 4.23. Irudiko sistema erabiltzea, ezinezkoa baita abiadura handiak lortzea grabitate indarra soilik erabiliz. Beraz, iturgunean eta iturrian lorturiko bi grabaketak erabiliz egin da kalibraketa. Kasu hauetan, hainbat frame ezberdin hartu dira eta bakoitzean detektaturiko partikulen abiadura neurtu da eskuz. Guztira 172 partikula jarraitu dira (75 harea partikula eta 97 zerrauts partikula) eta balio absolutuetan irudikatu dira (iturriko grabaketetako frame batzuetan partikulek abiadura negatiboa dutelako). 4.26. Irudian erakusten dira lorturiko emaitzak.



4.26. Irudia. Gune diluituko kodea erabiliz lorturiko abiadura teorikoen eta kalkulatuturikoen arteko alderaketa.

4.26. Irudian erakusten den bezala, eskuz lorturiko abiaduren eta kodeak neurturikoen artean ezberdintasunak txikiak dira. Aurreko atalean kurba karakteristikoak azaldu direnean aipatu den bezala, zerrautsaren operazio tartea harearena baino estuagoa da. Ondorioz, harea partikula batek har dezakeen abiadura zerrautsarena baino handiagoa da. Hori dela eta, zerrautsa erabiliz lorturiko abiadurak 2 m/s baino txikiagoak dira. Harearen kasuan, kodea erabiliz lorturiko abiadura guztiek $\%10$ baino errore txikiagoa dute. Zerrautsa erabiliz oster, neurturiko balio gehienek $\%10$ baino errore txikiagoa duten arren, abiadura txikietan errore hau $\%20$ ra igotzen da zenbait kasutan.

Zerrauts partikulak zuntz formakoak dira eta beraien batezbesteko partikula tamaina 0.344mm -koa den arren, tamaina banaketa zabala dute (2.17. Irudia). Hau dela eta, proiektzioaren arabera zerrauts partikula baten tamaina asko aldatzen da, eta partikulak errotatuz mugitzen ari direnean beraien tamaina aldatuz doa frame batetik bestera. Hau gertatzean partikularen zentroaren posizioa aldatuz doa eta honek errealak ez diren abiadurak sortzen ditu. Errore hauek gehien bat abiadura baxuetan gertatzen dira, hau da, zerrauts partikula batek abiadura handietan ez du errotazio mugimendurik.

Beraz, 4.26. Irudiaren arabera, gune diluituetan solido irregularren abiadura neurtzeko eraikitako kodea erabat baliogarria da.

4.6. IRUDIEN BIDEZKO PARTIKULEN JARRAIPENAREN EMAITZAK

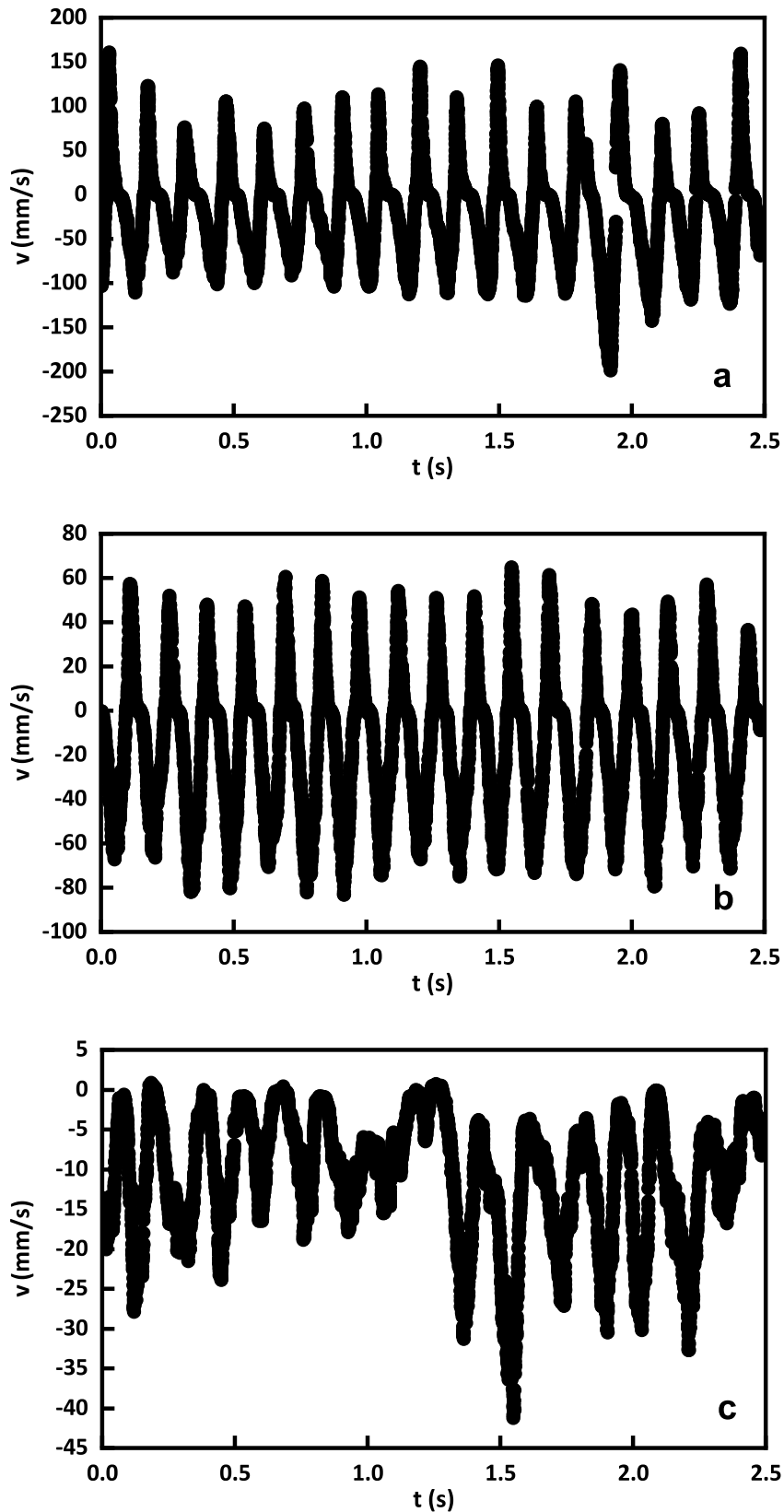
Behin kodeen balioztapena buruturik eta berauen errorea jakinda, 7 mm -ko lenteen arteko distantzia eta 2 mm -ko espaziagailu distantzia aukeratu dira neurketa guztiak egireko. Modu honetan, gune dentsoko neurketa guztiek %10eko gehienezko errorea dute eta gune diluitukoek oster, %15ekoa (zerrautsa erabili den neurketetan gehienezko errorea %25ekoa da).

4.2 Atalean aipatu den bezala, solido ezberdinen abiadura neurtu da kontaktorearen altuera eta konfigurazio ezberdinetarako, bakoitzean airearen abiadura edo konfigurazio erregimen ezberdinak erabiliz. Hala, jarraian azalduko dira sistema optikoa erabiliz lortu diren emaitza nagusienak.

4.6.1. Abiadura oszilazioak

Zenbait autoreren arabera [106, 133, 243, 246, 304, 367, 396], iturri ohan-tzeen funtzionamenduan edo mugimenduan fluktuazioak edo oszilazioak agertzen dira. Izan ere, kontaktorerara sartzen den airearen frakzio bat eraztungunean zehar igotzen da ohan-tzea laxatuz. Ohantzea zeharkatzen duen airearen frakzioa ohan-tzeko porositatearen menpekkoa da. Hortaz, zenbat eta solido gehiago iturgunera sartu ohan-tzearen karga galera handiagoa da. Modu honetan, airearen karga galeraren fluktuazioak edo oszilazioak gertatzen dira, hau da, iturri ohan-tzeek maiztasun batean funtzionatzen dute [106, 133, 243, 246, 304, 367, 396]. Sistemaren maiztasunak iturri ohan-tzearen erregimenaren berri ematen du eta oso baliagarria da hauen arteko aldaketak neurtzeko.

Beraz, harea edo zerrautsa bezalako partikula irregularrak erabiltzen direnean batez ere, eraztunguneko solidoak aldika sartzen dira iturgunera eta eraztungunean zehar hauen mugimendu beherakorra pausatua da. Abiadura handiko kamera erabiliz eraztunguneko solidoen abiadura puntakaria neurtu da denboran zehar eta 4.27. Irudian erakusten dira konfigurazio bakoitzerako lorturiko emaitzak.



4.27. Irudia. $H = 0.113\text{ m}$ eta $r = 0.053\text{ m}$ koordinatuak dituen puntuan (eraztungean) lorturiko partikulen abiadura (a) hodirik gabe, eta (b) irekiduradun hodia eta (c) hodi ez-porotsua duten sistemetan. Sistema: $\gamma = 36^\circ$, $D_0 = 0.04\text{ m}$, $H_0 = 0.20\text{ m}$, $D_F = 0.20\text{ m}$, $H_F = 0.06\text{ m}$, $IP = \%57$, $L_H = 0.07\text{ m}$, $d_p = 0.246\text{ mm}$ (harea), $u = u_{ms}$.

4.27. Irudian erakusten den bezala, eraztungunean zehar beherantz doazen solidoen abiadura jarraitua izan beharrean oszilakorra da. Gainera, hodirik gabeko (4.27.a Irudia) eta irekiduradun hodidun (4.27.b Irudia) sistemak erabiliz eraztunguneko solidoek behera egiteaz gain, gora ere egiten dute, abiadura netoa negatiboa izanik. Hortaz, eraztunguneko solidoen mugimendu honek eraztungunean zeharreko partikulen egoitza denbora handitzea dakar, hau da, solidoen ziklo denbora, eta honek bi faseen arteko kontaktua handitzea eragiten du. Mugimendu oszilakor horrek bero eta materia transferentzian ere onura nabarmena eragiten du.

Aurretik azaldu bezala, partikula finak erabiltzean ez da iturgune konstantea lortzen, hau da, iturria gelditu eta hasi egiten da denboran zehar. Iturria sortzean eraztunguneko solidoak iturgunera pasatzen dira eta hauek arrastatuak izaten dira iturgunean zehar. Orduan, gainontzeko eraztunguneko solidoek behera egiten dute, baina honen ostean, iturria berriz ere gelditu egiten da eta aireak lehentasunezko biderik (iturgunea) ez duenez ohantze guztia bultzatzen du gora, eraztunguneko solidoak gora eginez. Honen ostean, eraztunguneko solidoek geldialdi txiki bat egiten dute iturgunea berriro ireki arte. Modu honetan, 4.27.a eta 4.27.b Irudietako ziklo bat burutzen da. Beraz, solidoek gora egitearen arrazoia iturgunearen itxierari edo gelditzeari dagokio, eta hori dela eta, kontaktoreko paretan zehar jaisten diren solidoak dira efektu hau gutxien jasaten dutenak. Arrazoi honen arabera, erradioan zehar ardatzerantz hurbildu ahala eraztunguneko solidoen abiadura gorakorra handiagoa izango da, eta abiadura beherakorra ostera, txikiagoa. Honek erradioan zeharreko batez besteko abiaduran eragin zuzena dauka, baina hau 4.6.2 Atalean azalduko da zehaztasun handiagorekin.

Ondorioz, aipaturiko eraztunguneko solidoen ziklo hau eraztungunean zeharreko posizio guztietan eta solido fin guztietarako gertatzen da. Modu honetan, abiadurak denborarekiko duen eboluzioan oszilazioak gertatzen dira, maiztasun zehatzean. Maiztasun hau sistemaren puntu edo neurketa posizio ezberdinetan konstante mantentzen da, izan ere, sistemaren funtzionamenduaren menpe baitago.

Bestalde, hodi ez-porotsudun sistemak (4.27.c Irudia) aztertzen badira, eraztunguneko solidoek abiadura oszilazioak dituzten arren, kasu hauetan solidoen abiadurak negatiboak dira momentu oro. Izan ere, mota honetako hodiak erabiltzean eraztungunean zeharreko airearen perkolazioa murrizten baita, eta gainera, eraztunguneko solidoek iturgunera sartzeko duten sarbidea oso txikia da (soilik hodiaren hanketatik). Honek iturgunea eta iturri oso diluitua izatea dakar, eta ondorioz, sistema oso egonkorrak. Hortaz, kasu honetan momentu oro dago iturria eta, hori dela eta, eraztunguneko solidoek ez dute abiadura gorakorrik. Hala ere, konfigurazio honetan ere eraztunguneko solidoak aldika sartzten dira iturgunera eta ondorioz partikulak azeleratuz eta dezelaratuz doaz eraztungunean zehar beherantz. Aurreko konfigurazioetan bezala, sistemak

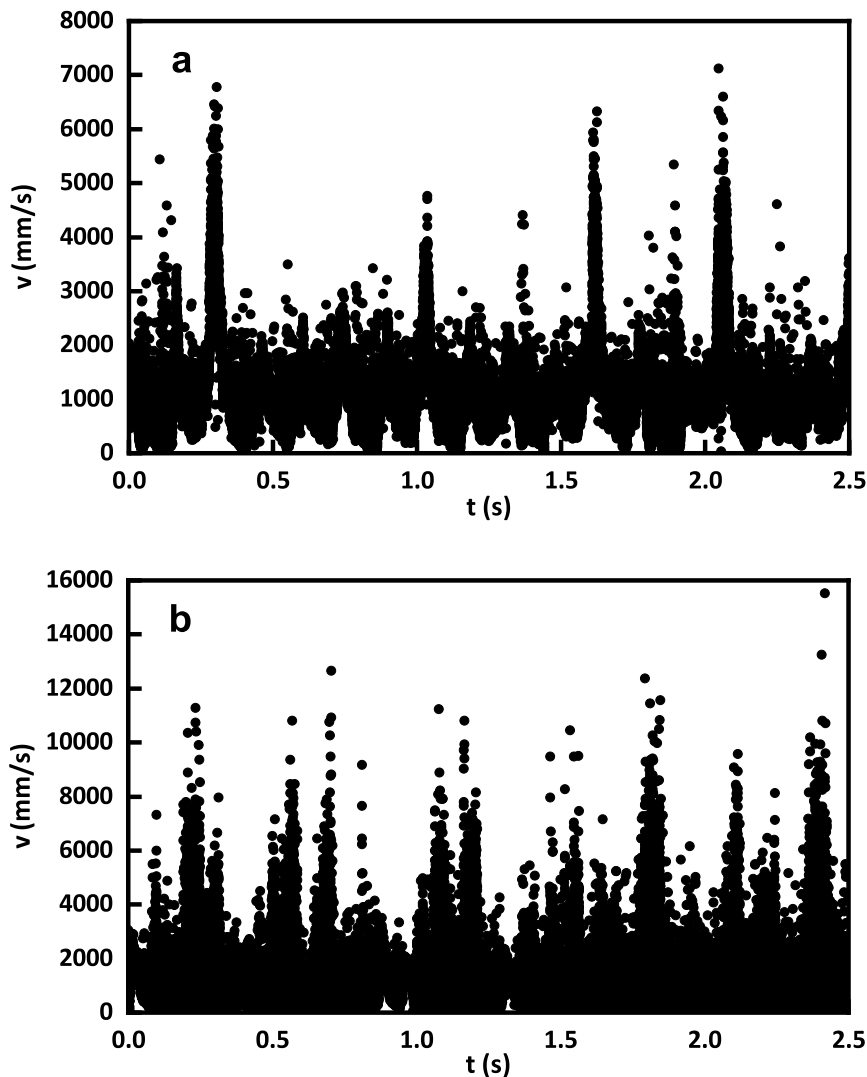
maiztasun batean funtzionatzen du, 4.27.c Irudian ageri den bezala.

Liu et al. [209] ere ohartu ziren eraztunguneko solidoek abiadura oszilazioak zituztela denborarekiko. Tesi honetan ez bezala, neurketak 2 dimentsiodun iturri ohan-tzean egin zituzten 2mm -ko beirazko bolak erabiliz eta, beraz, lorturiko sistema guztiz egonkorra zen. Hori dela eta, eraztunguneko solidoek azeleratuz eta dezeleratuz doaz baina beti beherantz. Aipaturiko joera hau hodi ez-porotsuak erabiliz (4.27.c Irudia) lorturikoaren antzerakoa da, izan ere, hodi mota honek egonkortasun handia ematen dio sistemari eta partikulek ez dute goranzko norantzarik. Ikertzaile hauen arabera, eraztungune guztiak maiztasun zehatz batean funtzionatzen du eta beraren balioa eraztungunetik iturgunera sartzen diren solidoen arabera da.

Azkenik, 4.27. Irudiko hiru grafikak alderatzen badira argi ikusten da hodi-rik gabeko sistemak (4.27.a Irudia) dutela abiaduraren balio handienak, $(-100) - 150\text{mm/s}$ -ko abiadura balioen artean baitabilza. Ostera, hodi ez-porotsudun sistemak dira abiadura txikiena dutenak, $(-40) - 0\text{mm/s}$ -ko tartean, hain zuzen. Azkenik, irekiduradun hodidun sistemak dira aurreko konfigurazioen tarteko balioak dituztenak, hots, $(-80) - 60\text{mm/s}$ -ko balioak. Honen arrazoa eraztungunean zeharreko gasaren perkolazioa da, hau da, zenbat eta gasaren frakzio handiagoa barneratu eraztungunean ohan-tzea gehiago laxatuko da, solidoaren mugimendu handiagoak lortuz. Izan ere, hodi-rik gabeko sistemak dira gasaren perkolazio handiena dutenak eta hodi ez-porotsudun sistemak ostera, txikien dutenak.

Aipatu den bezala, fluktuazioak sistema osoan gertatzen direnez, abiaduraren oszilazioak iturgunean zein iturrian gertatzen dira. 4.28. Irudian erakusten dira aipaturiko bi gune ezberdinetan lorturiko solidoen abiadura fluktuazioak.

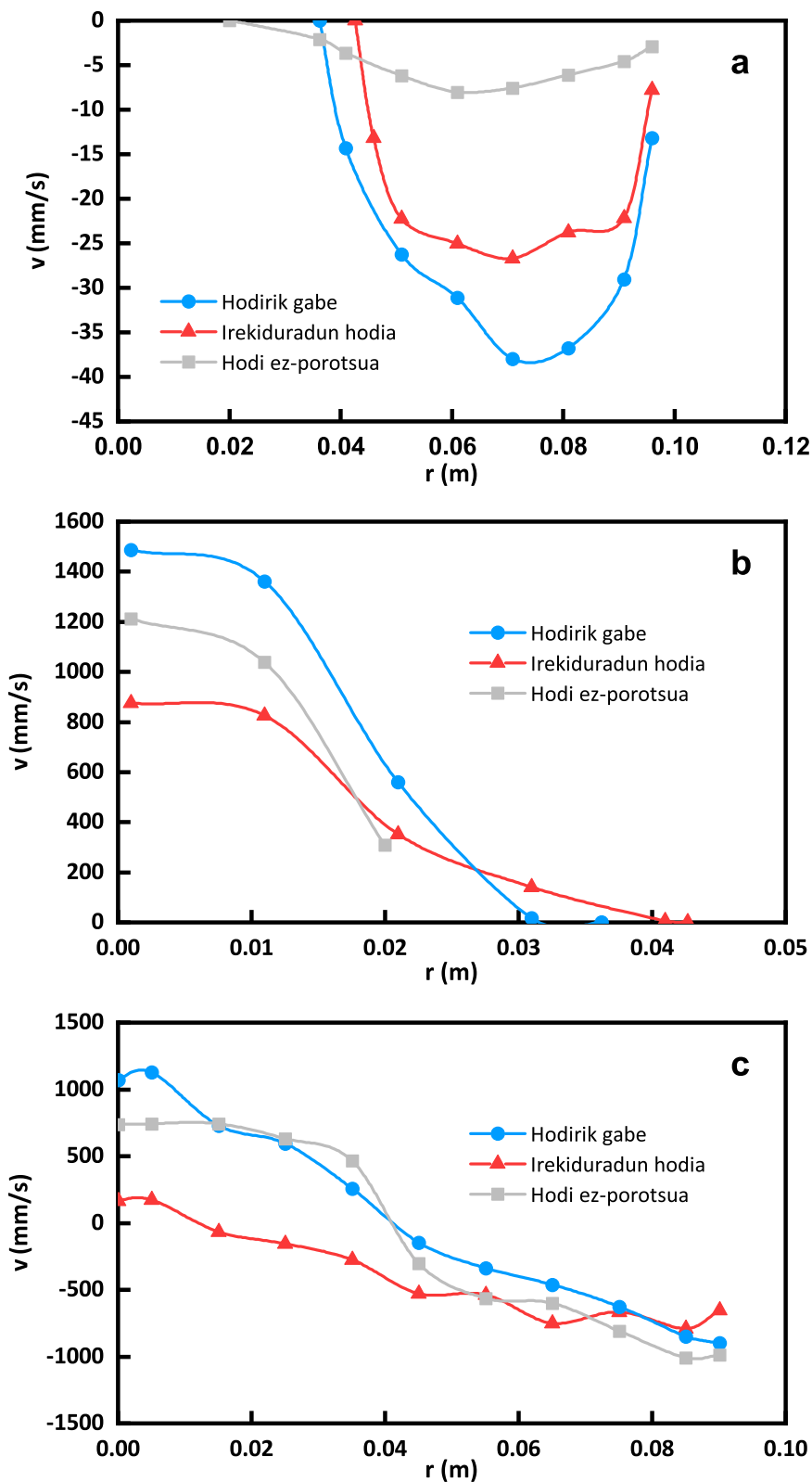
4.28. Irudian erakusten den bezala, iturri ohan-tzearen gune diluituetan (itur-gunea eta iturrian) ere lortzen dira solidoen abiadura oszilazioak. Hala ere, 4.27. Iru-diarekin alderatuz, 4.28. Irudian lorturiko oszilazioak ez dira hain nabariak, batez ere iturrian lorturiko emaitzetan (4.28.b Irudia). Alde batetik, kontuan izan behar da gune diluituetan solidoen abiadura eraztungunean baino handiagoa dela, eta hortaz graba-keta abiadura askoz handiagoa da gune hauetan. 4.28. Irudiko grafikoetan 16500 puntu daude segundoko, honek kurban zarata sortuz eta oszilazioen bereizmena murriztuz. Bestalde, aireak solidoari iturrian eragiten dion indarra beste bi guneetan baino txikia-goa da eta, beraz, partikulak askeago mugitzen dira, oszilazioak gutxiago nabarmenduz. Honetaz gain, operazio baldintzen arabera iturguneko solidoek abiadura negatiboak izan ditzakete, nahiz eta ez den egoerarik arruntena.



4.28. Irudia. (a) Ardatzeko solidoen abiadura iturgunean ($H = 0.113m$) eta (b) iturrian ($H = 0.24m$) hodirik gabeko sistemak erabiliz. Sistema: $\gamma = 36^\circ$, $D_0 = 0.04m$, $H_0 = 0.20m$, $D_F = 0.20m$, $H_F = 0.06m$, $d_p = 0.246mm$ (harea), $u = u_{ms}$.

4.6.2. Profil erradialak

Jarraian, konfigurazio ezberdinak erabiliz, iturri ohandze konikoaren gune ezberdinetan solidoen abiadura puntuala neurtu da erradioan zehar, 4.27. eta 4.28. Iru-dietan erakutsiriko emaitzen antzekoak lortuz. Erradioan zehar egindako neurketak posizio bakoitzean 2.5 segundoko lau grabaketaren ondorio dira, bakoitza momentu ezberdinean grabatua delarik. Honetaz gain, iturri ohandze konikoaren gune bakoitzaren altuera ezberdinetan ere egin dira neurketak. 4.29. Irudian erakusten dira iturri ohandze konikoaren gune ezberdinetan lortzen diren abiaduraren profil erradialak konfigurazio ezberdinetarako.



4.29. Irudia. Konfigurazio ezberdinekin lorturiko solidoen abiaduraren profil erradialak (a) eraztungunean ($H = 0.200\text{ m}$), (b) iturgunean ($H = 0.200\text{ m}$) eta (c) iturrian ($H = 0.305\text{ m}$). Sistema: $\gamma = 36^\circ$, $D_0 = 0.04\text{ m}$, $H_0 = 0.20\text{ m}$, $D_F = 0.20\text{ m}$, $H_F = 0.06\text{ m}$, $IP = \%57$, $L_H = 0.07\text{ m}$, $d_p = 0.246\text{ mm}$ (harea), $u = u_{ms}$.

4.29. Irudian erakusten den bezala, konfigurazio ezberdinekin iturri ohandze konikoaren gune ezberdinetan abiaduraren profil erradialaren joera berdintsua lortzen da.

Eraztungunearen erradio guztian zehar (4.29.a Irudian) lorturiko abiadura netoak negatiboak dira. Izan ere, gune hau bereizten duen ezaugarria bi faseak kontrakorrantean zirkulatzen dutela, hots, solidoa jaitsi eta gasa igo egiten da. Kontakto-arearen paretatik urrundu ahala solidoen abiadura handitu egiten da abiadura negatibo maximoa lortu arte, eta ardatzerantz hurbildu ahala abiadura negatiboa txikituz doa zero izan arte. Hodirik gabeko eta irekiduradun hodiak sistematan abiaduraren balio maximoa eraztungunearen erdian dago kokatuta. Ostera, hodi ez-porotsudun sistemetan abiaduraren balio maximoa ardatzerantz dago desplazatua, izan ere, konfigurazio honetan eraztungunera barneratzen den aire frakzioa oso txikia da eta hortaz, eraztunguneari gehien laxatzen den gunea erdiko hodiaren ingurukoa da.

Bibliografian hainbat lanek aztertzen dituzte eraztunguneko solidoen abiaduren profil erradialak, bai ohiko iturri ohandzeetan [101, 157, 300, 402] zein iturri ohandze konikoetan [267, 271, 332]. Lehenengoetan zuntz optikoa eta X izpien bidezko partikulen jarraipenaren tekniken bidez burutu dira neurketak. Kasu hauetan lorturiko profilak ez dira hain parabolikoak, baizik eta kontakto-arearen hormatik hurbil solidoen abiadura handiagoa da eta balio hori ia erradio guztian zehar konstante mantentzen da. Oro har, eraztungune/iturgune interfasetik gertu abiadura nabarmen handitzen da abiadura maximoa lortu arte, eta berriz ere bortizki txikitu egiten da zero izan arte. Bestalde, iturri ohandze konikoetan burutu diren neurketak zuntz optikoa erabiliz egin dira eta, tesi honetan bezala, lorturiko profilak paraboliko antzekoak dira.

Bestalde, hodi gabeko sistemetako solidoak dira abiadura negatibo handienak dituztenak, eta hodi ez-porotsudun sistemetako solidoak ostera, txikienak dituztenak. Kasu honetan ere airearen perkolazioa da arrazo nagusia. Hala ere, aipatu behar da 4.29. Irudian erakusten diren profilak iturkuntzarako abiadura minimoan lan eginez lorturikoak direla. Hala, hodi gabeko sistemak du iturkuntzarako abiadura minimo handiena (3.87 m/s), ondoren irekiduradun hodiak (3.42 m/s) eta azkenik hodi ez-porotsuak (2.54 m/s). Beraz, perkolazioaz gain, solidoen abiadurak iturkuntzarako abiadura minimoaren proportzionalak ere badira.

Bestalde, 1. kapituluari aipatu bezala, eraztungunea eta iturguneari bereizgarri den ezaugarria (porositateaz gain) solidoen abiaduraren norantza da. Eraztunguneko solidoak beheantze mugitzen diren bitartean, iturguneko solidoak gorantz mugitzen baitira. Beraz, azken ezaugarri hau hartu da aipaturiko bi guneak bereizteko parametro gisa. Hala, eraztunguneari zehar ardatzerantz mugitzean solidoen abiadura zero deneko distantzia izango da bi guneen arteko interfasea. Hodi ez-porotsudun sis-

temetan hodiak berak zehazten du bi guneen arteko muga. Beraz, iturgunearen profil erradiala eraztungunekoa amaitzen den distantziatik ardatzeraino luzatzen da.

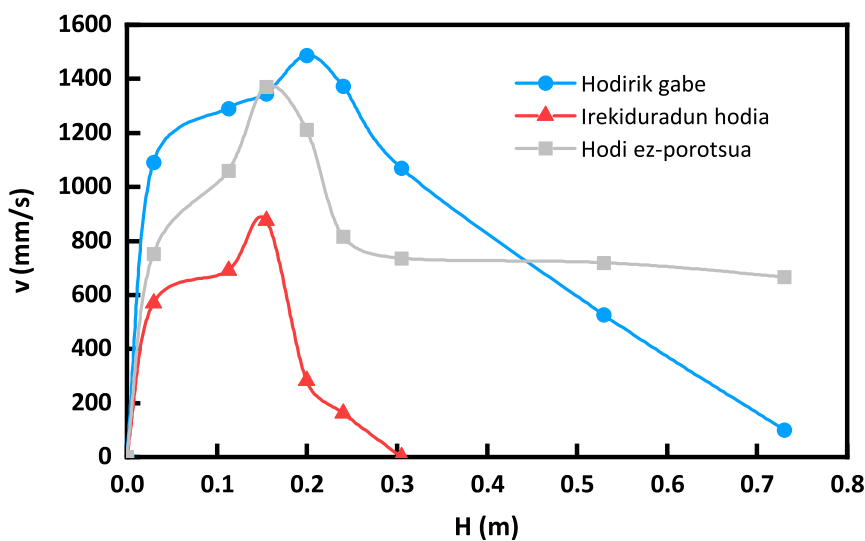
4.29.b Irudian erakusten dira konfigurazio ezberdinetarako lorturiko iturguneko profil erradialak. Konfigurazio guztietan ardatzerantz hurbildu ahala solidoen abiadura handitu egiten da malda handiarekin, baina ardatzera hurbiltzerakoan abiadurak ez dira asko aldatzen. Izan ere, airea kontaktorean sartu eta iturgunean zein iturrian gora igotzean hedatu egiten da. Ardatzeko partikularen abiaduraren joera hau bibliografiako beste hainbat lanetan ere aurkitu da [60, 101, 157, 300] ohiko iturri ohantzeak erabiliz. He et al.en arabera [157], partikulen mugimendu erradial eta partikulen talken ondorioz ematen da joera hau. Aipagarria da, iturri ohantze konikoak erabiliz bibliografian aurki daitezkeen lanetan [271, 332] ez dela aipaturiko joera lortzen, hau da, ardatzerantz hurbildu ahala solidoaren abiadura ere handiagoa da. Bestalde, eraztungunean bezala, hodirik gabeko sistemetan lortzen dira abiaduraren balio handienak, baina kasu honetan irekiduradun hodidun sistemak dira balio txikiak dituztenak. Izan ere, hodirik gabeko zein hodi ez-porotsudun sistemetan iturri altuak lortzen diren bitartean, irekiduradun hodiak erabiltzean lorturiko iturriak txikiagoak eta zabalagoak dira. Erdiko hodiak solidoa eutsi egiten du (hein batean) eta hodiaren aurpegi irekietatik iturgunetik igotzen den airea hedatu egiten da. Hori dela eta, airea solido gehiagorekin jartzen da kontaktuan, iturri dentsoagoak baina txikiagoak eta zabalakgoak lortuz. Beraz, iturgune zabalenak irekiduradun hodidun sistemak sortzen dituzte.

Azkenik, 4.29.c Irudian konfigurazio ezberdinetarako iturrian lorturiko abiadura profil erradialak erakusten dira. Kasu honetan bilgailuaren barnean burutu dira neurketak, hortaz, profilak bilgailuaren paretatik ardatzeraino luzatu dira. Aurreko bi guneetan ez bezala, solidoak bi norabide ezberdinetan mugitzen dira. Bilgailuaren paretan beherantz desplazatzen dira eta bertan dute abiadura negatibo handiena. Ardatzerantz gerturatu ahala, iturriaren periferiatik jaisten diren solidoen abiadura negatiboa txikituz doa zero izan arte, eta tarte honek mugatzen du iturriaren periferia eta nukleoa. Ardatzerantz hurbiltzen jarraituz gero, solidoen norabidea goranzkoa da eta abiadura positiboa handituz doa. Hodirik gabe eta irekiduradun hodiak erabiliz solidoen abiadura positibo maximoa ez dago ardatzean, hodi ez-porotsudun sistemetan bezala. Lehenengo bi konfigurazioetan airea hedatuz doa iturrian gora eta solido gutxi dira arrastatuak ardatzean zehar. Gainera, iturgunean zehar solidoak zuzen igotzeko probabilitatea oso txikia da. Joera berdina azaltzen duten hainbat lan daude argitaratuak bibliografian ohiko iturri ohantzeak erabiliz [60, 101, 157, 402]. Hala ere, iturgunearen kasuan bezala, iturri ohantze konikoak erabiliz [267, 271, 332] malda konstanteko profilak lortu dira. Ostera, hodi ez-porotsudun sistemetan, iturgunean airea ezin da beste konfigurazioetan beste zabaldu, eta horregatik hedapen bortitza

erakusten du iturriaren hasieran. Hori dela eta, airearen hedapena ez da hain garrantzitsua iturrian gora. Zhao et al.ek [406] ere joera berdina aurkitu zuten, hau da, hodi ez-porotsudun sistemak erabiltzerakoan lorturiko abiadura profil erradialak leunagoak dira hodirik gabekoenak baino. Azkenik, iturgunean ikusi den bezala, hodirik gabeko sistemak ditu abiadura handienak eta hodi ez-porotsudun sistemak berriz txikienak. Honen arrazoia iturgunean azaldu den berdintsua da.

4.6.3. Profil Axialak

Profil erradialekin egin bezala, profil axialak eraiki ahal izan dira altuera ezberdinetan neurtu diren balioak erabiliz. Profil axialak erradio guztian zeharreko balioak erabiliz irudikatu daitezke, baina bibliografian aurki daitezkeen argitalpen gehienetan ardatzeko balioak erabiltzen dira. Hortaz, 4.29. Irudian bezala, konfigurazio ezberdinetarako solidoen abiaduraren profil axialak eraiki dira airearen iturkuntzarako abiadura minimoan lan eginez. 4.30. Irudian erakusten dira lorturiko emaitzak.



4.30. Irudia. Konfigurazio ezberdinetarako ardatzeko partikulen abiaduraren profil axiala. Sistema: $\gamma = 36^\circ$, $D_0 = 0.04\text{ m}$, $H_0 = 0.20\text{ m}$, $D_F = 0.20\text{ m}$, $H_F = 0.06\text{ m}$, $IP = \%57$, $L_H = 0.07\text{ m}$, $d_p = 0.246\text{ mm}$ (harea), $u = u_{ms}$.

4.30. Irudian erakusten den bezala, solidoak iturgunean zehar azeleratuz doaz eta ondoren iturrian dezeleratu egiten dira. Hala ere, hodirik gabeko sistema da kasu bakarra iturgune osoan zehar solidoak azeleratuz doazenak, beste bi konfigurazioetan 0.15 m arte baino ez baitira azeleratzen. 4.29. Irudian azaldu den bezala, hodirik gabeko sistemak dira operaziorako iturkuntzarako abiadura minimo handiena dutenak eta iturgunean gora igotzen den airea ez da neurri handi batean hedatzen. Bestalde, bibliografian aurki daitezkeen lanetan [73, 157, 267, 271, 332] solidoek iturgunearen altuera

txikian uzten diete azeleratzeari, baina kasu gehienetan trazaturiko partikulak lodiak dira eta hauen masa handia dela eta, airea ez da gai solidoak iturgune guztian azele-
ratzeko. Izan ere, Djeridane et al.ek ere [101] aipatu zuten autore ezberdinek lorturiko
abiadura profil axialek forma edo itxura bera dutela, baina abiadura maximoa lor-
tzen den posizioa ez dela berdina izaten. Hauen arabera, abiadura maximoaren altuera
edo posizioa ohantze estatikoaren altuera (H_0), iturkuntzarako abiadura eta solidoaren
propietateen (d_p eta ρ_s) menpekoa da. Ohantze estatikoaren altuera, solidoaren dentsi-
tatea zein partikula tamaina handitzerakoan abiadura maximoa altuera txikiagoetan
gertatzen da. Ostera, iturkuntzarako abiadurak abiadura maximoaren intentsitatean
eragiten du soilik. Hala ere, Stocker et al.ek [359] $d_p = 1.03\text{ mm}$ -ko partikulak erabiliz
simulaturiko sisteman iturgune guztian zeharreko partikulen azelerazioa lortu zuten,
tesi honetan lortu diren emaitzetan bezala.

Behin iturrian, solidoak dezeleratuz doaz euren abiadura zero izan arte. Ho-
dirik gabeko eta irekiduradun sistemen kasuan dezelerazioa oso bortitza den bitartean,
hodi ez-porotsudun kasuan dezelerazioa besteetan baino leunagoa da. Izan ere, azken
kasu honetan airearen frakzio gehiena iturgunetik igotzen da eta beraren abiadura bes-
te konfigurazioetan baino konstanteagoa da. Modu honetan, solidoen abiadura aldaketa
besteetan baino leunagoa da.

4.6.4. Iturgune/iturriaren forma

1. Kapituluian aipatu bezala, aireak kontaktorean sartzean ohantzearen erdian
lehentasunezko bide bertikala sortzen du, non partikulak arrastatuak diren. Hauek
iturria sortzen dute eta iturriaren nukleotik gora egiten dute grabitate indarrak arraste
indarrak baino handiagoak izan arte. Hortaz, ohantzearen zein iturriaren nukleoan
partikulak gorantz mugitzen dira eta periferian ostera, beherantz. Garrantzitsua da
hauen arteko interfasea ezagutzea, izan ere, gasaren eta solidoen arteko kontaktuari
buruzko informazioa ematen baitu.

Hortaz, konfigurazio bakoitzeko altuera guztietan buruturiko profil erradialen
bidez solidoen abiadura zero den posizioa neurtu da eta solido gorakor eta behera-
korren arteko gunea definitu da, hau da, iturgunea eta iturriaren nukleoa. Bestalde,
hodirik gabeko eta hodi ez-porotsudun sistemetan iturgunearen forma homogenea da,
hau da, zirkularra. Irekiduradun hodiak erabiltzerakoan ostera, hodiaren aurpegi ire-
kietatik airea eraztungunera zabaltzen da eta, beraz, lorturiko iturgunearen forma ez
da homogenea. Hala, iturgune zein iturriaren formaren bilakaera aztertuko da altuera
eta erradioarekiko, baita ohantzearen zeharreko iturgunearen eboluzioa ere.

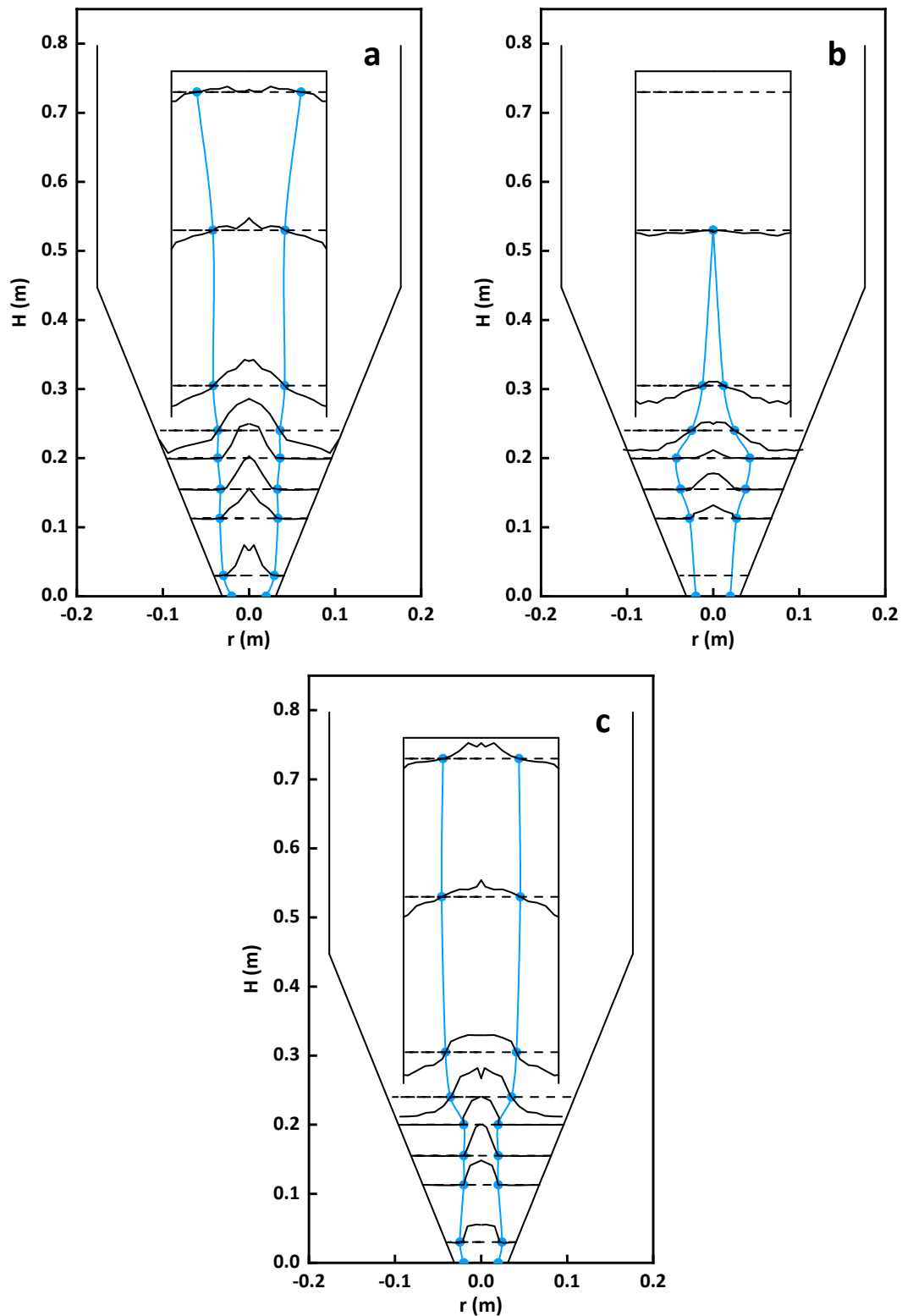
4.6.4.1 Iturgune/iturriaren bilakaera

Sistema optikoa erabiliz, iturri ohandze konikoaren altuera guztian zehar solidoen abiadura zero egiten den erradioaren posizioa neurtu da eta 4.31. Irudian erakusten dira lorturiko emaitzak konfigurazio ezberdinetarako.

Aurretik aipatu bezala, iturkuntzarako abiadura minimoan lan egitean, hoderik gabeko eta hodi ez-porotsudun sistemetan lorturiko iturria irekiduradun hodia duten sistemetan lorturikoa baino altuagoa da. Hala ere, neurketa posizio gorenean lorturiko profil erradialeko abiadurak oso baxuak direla aipatu behar da.

Bestalde, hoderik gabeko (4.31.a Irudia) eta irekiduradun hodiadun (4.31.b Irudia) sistemen kasuan, ohandzean gora igotzean iturgunea zabalduz doa ohandzearen gainazalera. Lehenengo kasuan, zabalkuntzaren bilakaera nahiko proportzionala da ohandzearen oinarritik gora, baina irekiduradun hodiak erabiltzean, ohandzearen altueraren erditik gora iturgunearen zabalkuntzaren bilakaera nabarmen handitzen da. Aipagarria da irekiduradun hodiak erabiltzerakoan, neurketak burutzerako orduan sistema optikoa hodiaren alde irekian kokatu dela eta hodiaren aurpegi hauetatik iturguneko airea zabaldu egiten dela. Hala ere, 4.31.b Irudian erakusten den bezala, airearen hedapen bortitza ohandzearen altueraren erdian baino ez da gertatzen. Hodi ez-porotsuaren kasuan, iturgunearen beheko gunean zabalkuntza txiki bat gertatzen da (hodiaren hanken altueran), baina airea hodiaren paretaraino heltzen denean honen diametroa mugatuta da. Hortaz, konfigurazio honetan ez da hedapen garrantzitsurik gertatzen.

Airea iturgunetik atera eta iturrira sartzen denean, hodi ez-porotsudun sisteman gertatzen da iturriaren nukleoaren hedapen handiena. Izan ere, oso distantzia laburrean hedapen bortitza gertatzen da, baina iturrian gora ez da asko zabaltzen. Hoderik gabeko sistemetan (4.31.a Irudia) oster, iturriaren nukleoa iturgunea baino pixka bat zabalagoa da, baina bilgailuaren goiko gunean gertatzen da hedapen handiena. Azkenik, irekiduradun hodia erabiltzerakoan (4.31.b Irudia) iturriaren nukleoa nabarmen estutzen da. Izan ere, sistema honetan solidoaren emari handiak lortzen dira eta honek iturri txiki eta zabalak sortzea dakar (iturriaren bolumen gehiena periferiak hartzen du).



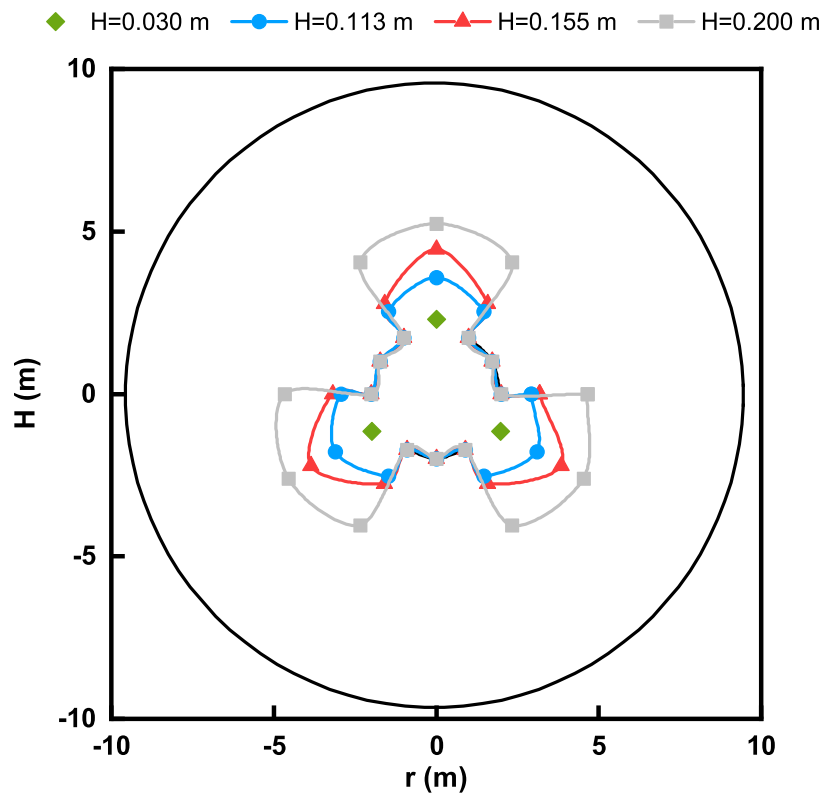
4.31. Irudia. Iturgune/iturriaren bilakaera (a) hodirik gabeko, (b) irekiduradun hodia eta (c) hodi ez-porotsudun sistemak erabiliz. Sistema: $\gamma = 36^\circ$, $D_0 = 0.04\text{ m}$, $H_0 = 0.20\text{ m}$, $D_F = 0.20\text{ m}$, $H_F = 0.06\text{ m}$, $IP = \%57$, $L_H = 0.07\text{ m}$, $d_p = 0.246\text{ mm}$ (harea), $u = u_{ms}$.

Bestalde, 4.31. Irudiko profil erradialak aztertuz gero, ikus daiteke altuera baxuan neurturikoak ($H = 0.03\text{ m}$) ez dutela balio handiena ardatzean. Izan ere, orokorrean, iturgunearen beheko aldean ematen da gehienbat iturgunerako solidoen sarrera, eta hortaz, ia solidorik ez da heltzen ardatzera (partikulak sartu bezain laster aireak arrastatuak dira). Honetaz gain, solidoak iturgunean gora doazen heinean, lorturiko profil erradialak zapalagoak dira, hau da, airea zabaldu egiten da iturrian gora, eta ardatzeko solidoen abiadura txikitu eta ingurukoena handitu egiten da. Iturrian ere airearen hedapena ematen denez, profilak oraindik eta zapalagoak dira eta abiadura positiboan balioak txikituz doaz iturrian gora. Bestalde, iturriaren periferian behera jaisten diren partikulen bolumena beherago eta handiago da baita solidoen abiadura ere.

Bibliografian aurki daitezkeen lanetan [157, 159, 267, 270, 276, 300, 318, 329, 334, 336, 337, 341, 402] hodirik gabeko sistemen itugune/iturrien formak baino ez dira aztertu. Bibliografian aurkitutako lanetan iturguneak forma orokorra duela aipatzen da, nahiz eta zenbait kasutan [157, 159, 267, 318, 336] zabalgunea ere deskribatu den iturgunearen altuera baxuetan. Izan ere, iturgunea nabarmen zabaltzen da gasaren sarreran eta ostean estugune txiki bat du, eta berriz ere zabaldu egiten da poliki-poliki ohantzearen gainazalera heldu arte. Hala ere, tesi honetan ez da zabalgunerik lortu hodirik gabeko sistemen beheko partean (4.31.a Irudia), Pianarosa et al.ek [300] bezala. Yurong et al.en [402] arabera, beheko aldeko zabalgunea kontaktorearen angelu handietan ($> 45^\circ$) soilik lortzen da.

4.6.4.2 Iturgunearen forma

Hodirik gabe eta hodi ez-porotsudun sistemetan solidoaren abiadura profilak ardatz axialarekiko simetrikoak direla kontsideratzen da [159], eta hortaz, bibliografian argitaratutako lanetan ez zaio garrantzirik ematen ohantzearen bira guztian neuurtzea. Ostera, irekiduradun hodiak erabiltzean, iturgunetik igotzen den airea hodiaren aurpegi irekietatik hedatzen da eta eragin zuzena du eraztunguneko gune horretatik jaisten diren solidoen gainean. Hortaz, irekiduradun hodia erabiliz lortzen diren profil erradialak ezin dira ardatz axialarekiko simetrikotzat hartu. Efektu hau hobeto aztertzeko asmoz, solidoen abiadura ohantzearen hiru posizio ezberdinetan neurtu da: aurpegiaren frakzio irekian, aurpegiaren frakzio itxian eta bien arteko muga. Nahiz eta kasu bakoitzean abiaduraren profil erradialak lortu diren, jarraian profil honetatik abiatuta lorturiko iturgunearen forma aztertuko da. 4.32. Irudian erakusten dira lorturiko emaitzak.



4.32. Irudia. Ohantzearen altuera ezberdinetarako lorturiko iturgunearen forma irekiduradun hodia erabiliz. Sistema: $\gamma = 36^\circ$, $D_0 = 0.04\text{ m}$, $H_0 = 0.20\text{ m}$, $D_F = 0.20\text{ m}$, $H_F = 0.06\text{ m}$, $IP = \%57$, $d_p = 0.246\text{ mm}$ (harea), $u = 6.4u_{ms}$.

Irekiduradun hodian aurpegi irekien efektua aztertzeko asmoz iturkuntzarako abiadura handia erabili da, 6.4 aldiz iturkuntzarako abiadura minimoa, hain zuzen. 4.32. Irudian azaltzen den bezala, dagoeneko iturgunea hedatzen hasia da ohantzearen altuera oso txikietan ($H = 0.003\text{ m}$) eta aurpegi irekian zehar hedatuz doa iturgunean gora. Hala ere, aurpegi itxian zehar partikulek abiadura negatiboa dute erradioaren puntu guztietan (hodiaren eta kontaktorearen paretan arteko zatian), eta hortaz, iturgunea ez da ohantzearen gune honetara hedatzen. Bestalde, aurpegi itxi eta irekiaren arteko mugan solidoek abiadura positiboa dute posizio jakin batean eta ohantzean gora egin ahala puntu hau hedatuz doa kontaktorearen paretarantz. Beraz, beste bi konfigurazioetan ez bezala, kasu honetan lorturiko iturguneak ez du forma zirkularra, baizik eta hirusta forma.

4.6.5. Irekiduradun hodian irekidura portzentaiaren eragina

4.6.4 Atalean azaldu den bezala, irekiduradun hodiak erabiltzean lortzen diren abiadura profilak ez dira ardatz axialarekiko simetrikoak eta hodiaren irekidura

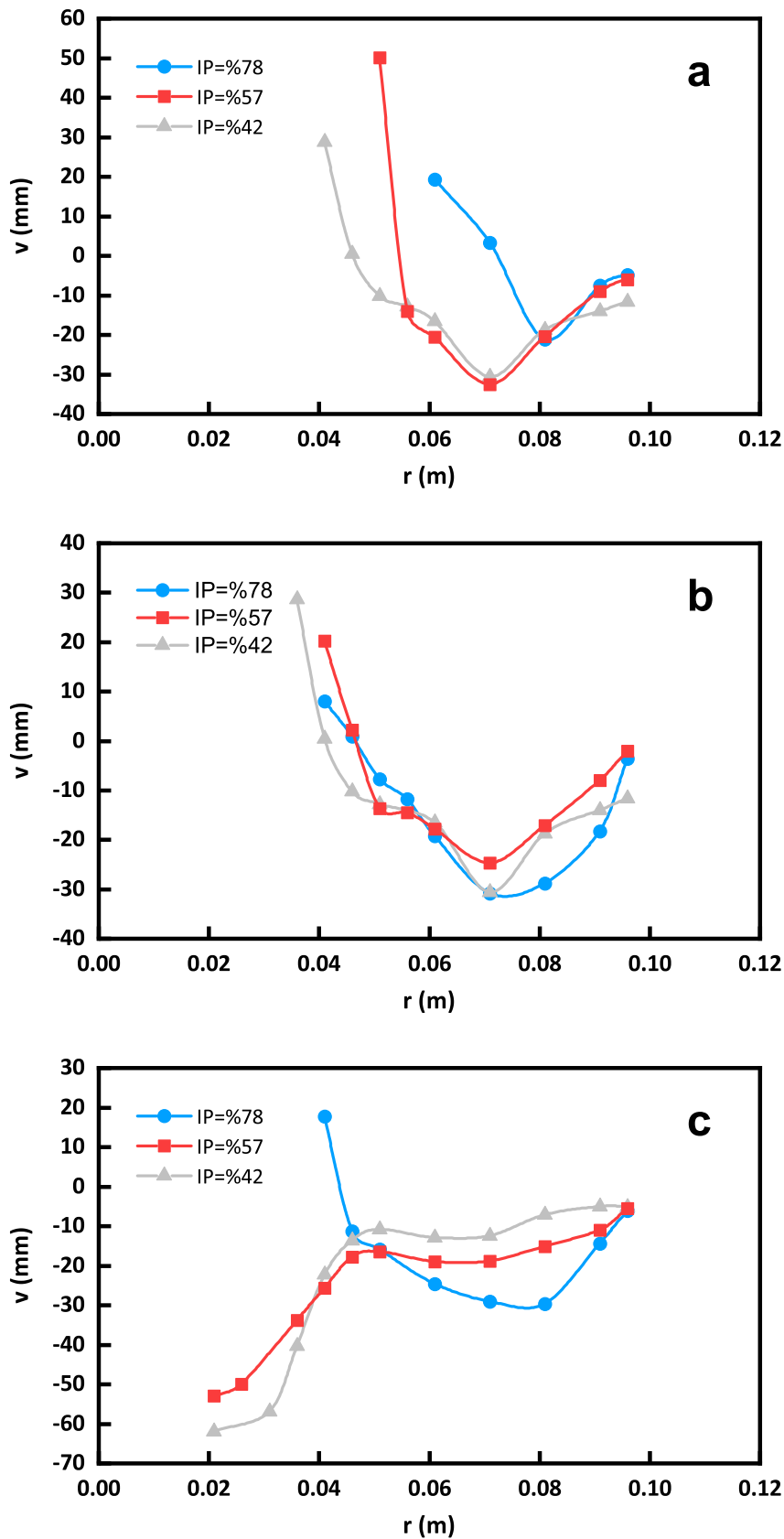
portzentaiak solidoen abiaduran zuzeneko eragina duela ondoriozta daiteke. Efektu hau aztertzeke asmoz, irekidura portzentaia ezberdina duten hodietan abiadura profil erradialak neurtu dira ohandzearen altuera eta posizio ezberdinetan (aurpegi irekian, itxian eta bien arteko mugan). 4.33. Irudian erakusten dira lorturiko emaitzak.

Hiru sistemak konparagarriak izan daitezen airearen emari handia ($Q = 100 \text{ m}^3/h$) erabili da hiru hodi ezberdinetarako. 4.33.a Irudian erakusten den bezala, irekidura portzentaia zenbat eta handiagoa izan iturgunea gehiago hedatzen da hodiaren aurpegi irekitik. Bestalde, abiadura profiletan ez da ezberdintasun handirik nabari ohandzearen gune honetan, hots, erradioaren balio handietan, hots $IP = \%78$ eta 57ko hodiekin balio antzekoak eta %42koak baino txikiagoak dituzte. Ostera, erradioaren balio txikiagoetan $IP = \%42$ eta 57ko irekiduretarako antzeko abidarurak lortzen dira. Azkenik erradioaren tarteko balioetan antzeko abidarurak lortzen dira hiru hodietarako.

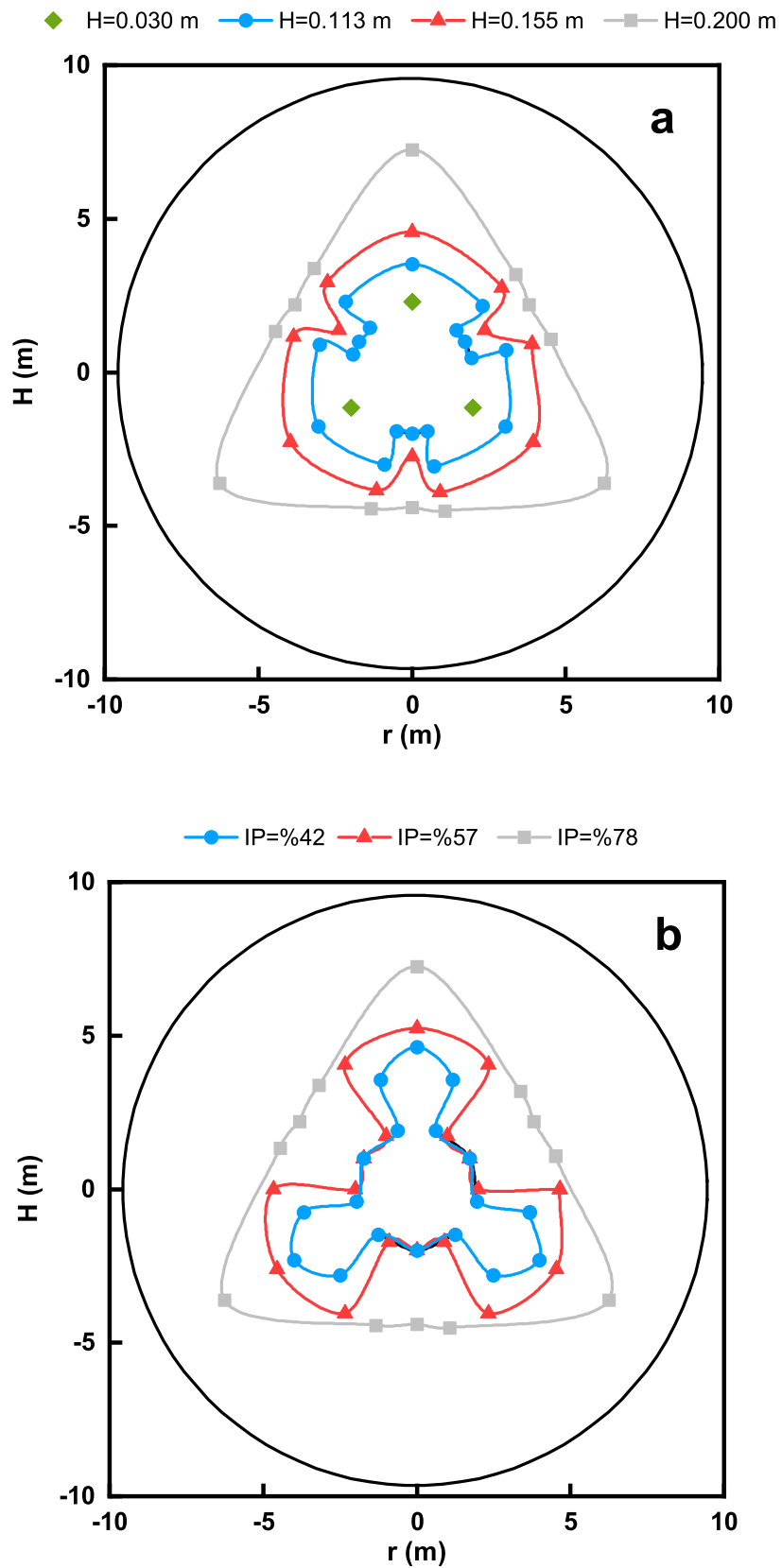
Bestalde, hodiaren aurpegi ireki eta itxiaren arteko mugan ezberdintasun nabariagoak agertzen dira, 4.33.b Irudian ikus daitekeen bezala. Kasu honetan ere, irekidura portzentaia handituzerakoan iturgunea hedatu egiten da, baina %57 eta 78ko irekiduren kasuetan hedapena ia ez da aldatzen. Aipatu behar da, irekidura portzentaia handieneko kasua dela eraztungunean aire frakzio gehien barneratzen duena. Izan ere, hodi honek laxatzen du gehien ohandzea eta eraztunguneko solidoen abiadura negatibo handienak lortzen dira, hau da, solido zirkulazio handiena lortzen den sistema da. Beraz, irekidura portzentaia (IP) txikitu ahala, iturgunearen hedapena murriztu egiten da eta baita eraztunguneko solidoen jaitsiera abiadura ere.

Azkenik, 4.33.c Irudian hiru hodi ezberdinen aurpegi itxian neurturiko abiaduraren profil erradialak erakusten dira. 4.33.b Irudian bezala, kontaktorearen paretatik ardatzerantz mugitu ahala eraztunguneko solidoen abiadura negatiboa handituz doa eta zenbar eta irekidura portzentaia (IP) handiago den solidoen abiadura handiagoa da. Hala ere, IP handieneko kasuan abidurak nabarmen egiten dute gora hodirantz hurbilduz, hots, abiduraren balioak positibo bihurtuz, hau da, $IP = \%78$ ko kasuan erdiko hodiaren bira osora zabaltzen da iturgunea. Gainerako kasuetan ostera, hodiaren aurpegi itxira hurbildu ahala solidoaren abiadura negatiboa nabarmen handitzen da. Nahiz eta $IP = \%42$ ko sistemak hodi ez-porotsudun konfigurazioen antza duen, erdiko hodiaren inguruan lorturiko abiduraren joera ez da berdina (4.29.a eta 4.33.c Irudiak). Izan ere, hodiak aurpegi irekiak izatean inguruko ohandzea laxatzen du eta bertako solidoen mugimenduan lagundu.

Beraz, 4.33. Irudiko profilekin sistema ezberdinen iturgunearen formaren ideia bat egin daitekeen arren, 4.34. Irudian erakusten dira irekidura portzentaia handieneko sistemaren altuerarekiko iturgunearen hedapena eta hiru sistema ezberdinetarako iturgunearen geometria $H = 0.200 \text{ m}$ -ko altueran.



4.33. Irudia. Irekiduradun hodiaren irekidura portzentaiak eraztunguneko solidoen abiadura profil erradialean duen eragina hodiaren (a) aurpegi irekian, (b) mugan eta (c) aurpegi itxian neurtua. Sistema: $\gamma = 36^\circ$, $D_0 = 0.04\text{ m}$, $H_0 = 0.20\text{ m}$, $D_F = 0.20\text{ m}$, $H_F = 0.06\text{ m}$, $d_p = 0.246\text{ mm}$ (harea), $u = 22\text{ m/s}$.



4.34. Irudia. (a) Iturgunearen forma %78ko irekidura portzentaiaadun hodia erabiliz eta (b) $H = 0.200$ m-ko altueran irekidura portzentaia ezberdinekin.

4.34.a Irudia 4.32. Irudiarekin alderatuz gero, ikus daiteke erdiko hodiaren irekidura portzentaia handitzerakoan iturgunearen hedapena nabarmen handitzen dela. 4.34.a Irudian erakusten den bezala, iturgunea hodiaren aurpegi ireki osoan zehar zabal-tzen da, baina ohantze altueraren erdiraino airea ez da aurpegi itxian zehar hedatzen. Hortaz, ohantzean gora egin ahala iturgunearen geometria hirusta izatetik triangulu forma izatera pasatzen da.

Bestalde, hiru hodiak erabiliz lorturiko iturgunearen forma aztertzeraz pasa ezker, 4.34.b Irudian erakusten denez, aldaketa nabarmenena hodiaren aurpegi itxian dago. Izan ere, irekidura portzentaia altueneko hodia erabiliz lortzen da soilik iturgunea bira osora hedatzea, hau da, gainontzeko hodietan aurpegiaren frazazio itxian partikulak beherantz mugitzen dira.

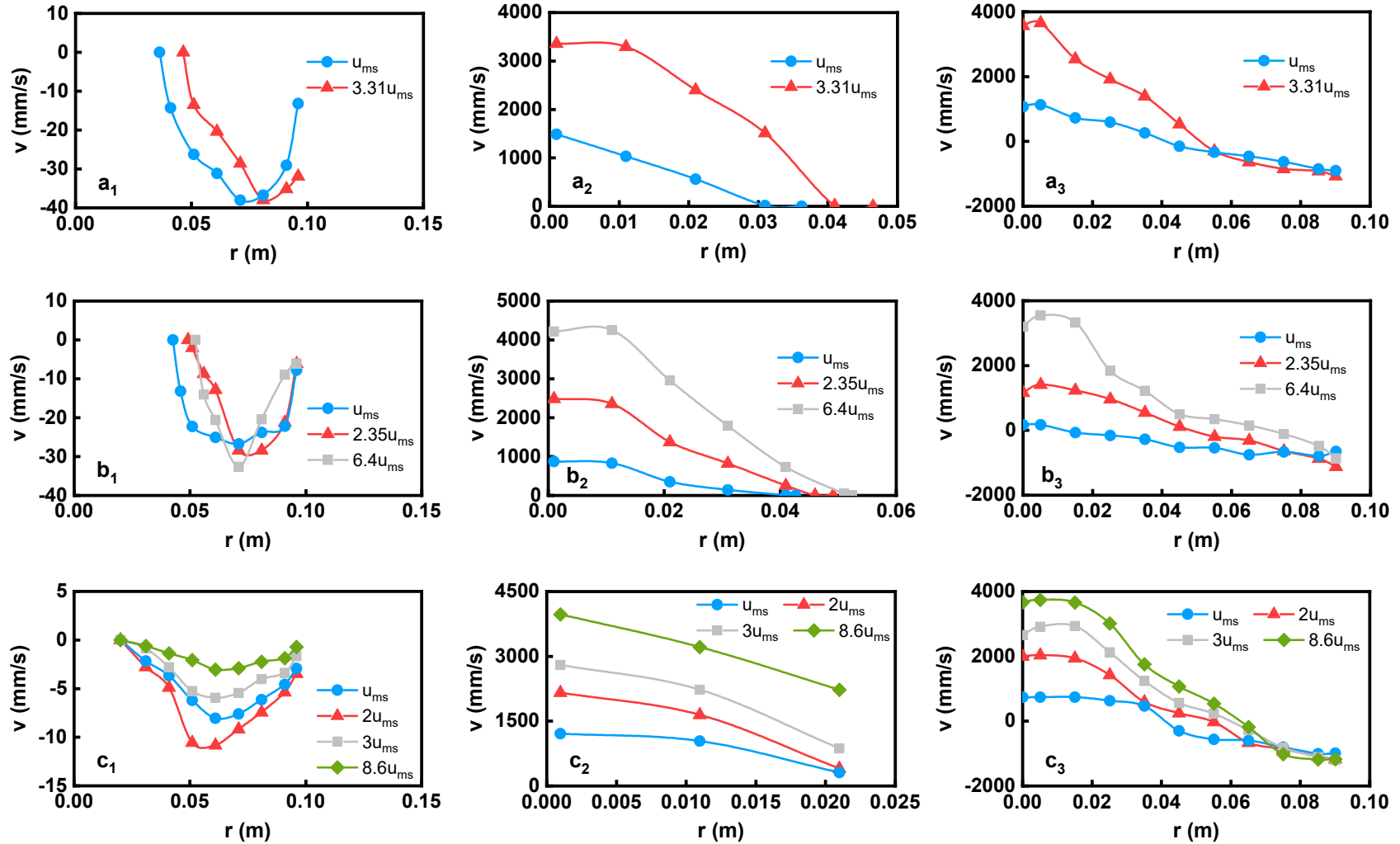
4.6.6. Airearen abiaduraren eragina

Irekiduradun hodiaren irekidura portzentaia solidoen abiaduran eragina duen bezala, airearen abiadura ere eragin zuzena dauka. 3.1 Atalean azaldu den bezala, konfigurazio bakoitzean airearen abiadura edo emari ezberdinetan burutu dira neurketak. Hala ere, aipatu behar da konfigurazio bakoitzean erabilitako abiadura ez direla zorizkoak izan. Hodirik gabeko kasuan, iturkuntzarako abiadura minimoa aukeratzeaz gain, 3.31 aldiz iturkuntzarako abiadura minimoa erabili da. Izan ere, airearen abiadura honetan sistemak erabateko iturkuntza erregimenean operatzen baitu. Irekiduradun hodiak erabiltzean, u_{ms} eta u_{fs} abiadura aukeratu dira, eta hauetaz gain, burbuilezko iturkuntza lortu aurreko abiadura balioa ere aukeratu da ($6.4u_{ms}$). Azkenik, hodi ez-porotsudun sistemetan erabateko iturkuntza erregimena soilik lortzen denez, aukeraturiko abiadura u_{ms} , $2u_{ms}$, $3u_{ms}$ eta $8.6u_{ms}$ izan dira.

Beraz, iturri ohantze konikoaren gune guztietan solidoen abiadura puntuala neurtu da aipaturiko airearen abiadura guzti hauek erabiliz eta profil erradialak, axialak eta iturgune/iturriaren bilakaera kurbak lortu dira. Jarraian, airearen abiadura aipaturiko kurbetan duen eragina aztertuko da.

4.6.6.1 Abiadura profil erradialak

4.35. Irudian erakusten dira aipaturiko airearen abiadura ezberdinetan egindako saikuntzetan lorturiko abiadura profil erradialak iturri ohantze konikoaren gune eta konfigurazio ezberdinetarako



4.35. Irudia. Airearen abiaduraren eragina (a_1, a_2, a_3) hodirik gabeko, (b_1, b_2, b_3) irekiduradun hodiko eta (c_1, c_2, c_3) hodi ezporotsudun sistemetan, (a_1, b_1, c_1) eraztunguneko ($H = 0.200m$), (a_2, b_2, c_2) iturguneko ($H = 0.200m$) eta (a_3, b_3, c_3) iturriko ($H = 0.305m$) abiadura profil erradialean.

4.35.a₁ Irudian erakusten den bezala, hendirik gabeko sistemetan airearen abiadura handitzerakoan eraztunguneko solidoen abiadura negatiboa nabarmen handitzen da kontaktoreko paretatik hurbil. Ohiko iturri ohantzeetan [101, 157] ere antzeko joera ikusi da, hau da, airearen abiadura handitzean partikulen jaitsiera abiadura handiagoa da eraztungunean zehar. Bestalde, airearen abiadura handitzean eraztunguneko solidoek iturgunean duten eragina handiagoa da, eta hortaz, abiadura negatibo maximoa ardatzetik urrunago dago. Irekiduradun holidun sistemetan (4.35.b₁ Irudia) antzeko joera antzematen da u_{ms} tik $2.35u_{ms}$ ra igotzean, baina airearen abiadura handiago joera leundu egiten da. Azkenik, hodi ez-porotsudun sistemetan (4.35.c₁ Irudia) aireren abiadura ezberdinetan kurba edo joera antzekoa lortzen da. Hala ere, aireren abiadura $2u_{ms}$ ra igotzean solidoen abiadura negatiboa handitu egiten da, baina airearen abiadura handiagoak erabiltzean solidoak motelduz doaz. Izan ere, airearen abiadura txikietan eraztunguneko solidoak multzoka sartzen dira iturgunera, baina abiadura handitzerakoan iturgunera sartzen den solido kopurua txikiagoa da, eta hortaz, eraztunguneko solidoen abiadura ere bai.

Bestalde, iturgunean lorturiko profil erradial guztiek joera berdina erakusten dute (4.35.a₂, 4.35.b₂ eta 4.35.c₂ Irudiak), hau da, airearen abiadura handitzerakoan solidoen igoera abiadura handiagoa da [101, 157, 271]. Hala ere, hendirik gabeko (4.35.a₂ Irudia) eta irekiduradun holidun (4.35.b₂ Irudia) kasuetan, airearen abiadura handitu ahala ardatzeko abiaduraren gehikuntza moteldu egiten da, hau da, abiadura maximoa ardatzetik urrundu egiten da. Izan ere, bi konfigurazio hauetan airea hedatuz doa iturgunearen altuera guztian zehar, eta hortaz, baita iturgunea bera ere. Honek solidoen (baita airearen) abiadura maximoa ardatzean ez izatea eragiten du. Hala ere, aurkako joera lortzen da bibliografiako lanetan [101, 157, 271], hau da, airearen abiadura handitzerakoan iturguneko profil erradialak zorrotzagoak bihurtzen dira, bai ohiko iturri ohantzeetan zein konikoetan. Hodi ez-porotsuen kasuan ordea, aire gehiena hodi barnetik bideratzen da eta hodiaren paretetik ez dute airearen hedapena baimentzen iturgunean zehar. Horregatik, konfigurazio honetan (4.35.c₂ Irudia) solidoaren abiadura maximoa ardatzean lortzen da [406].

Azkenik, iturriaren kasuan ere, profil erradial guztiek joera berbera dute. Hendirik gabe (4.35.a₃ Irudia) eta hodi ez-porotsudun (4.35.c₃ Irudia) kasuetan, periferiatik jaisten diren solidoek joera berdina dute, hau da, airearen abiadura handitzean solidoak abiadura handiagoan jaisten dira [101]. Irekiduradun hodiak (4.35.b₃ Irudia) erabiltzean osteratzen, aurkako joera lortzen da. Izan ere, 4.32. Irudian azaldu den bezala, airearen abiadura handitzean iturgunea nabarmen zabaltzen da, eta hortaz, iturritik igotzen diren solidoek periferiatik jaisten direnei eragiten diete, eta zenbat eta handiagoa izan airearen abiadura orduan eta handiagoa izango da eragina. Honekin batera,

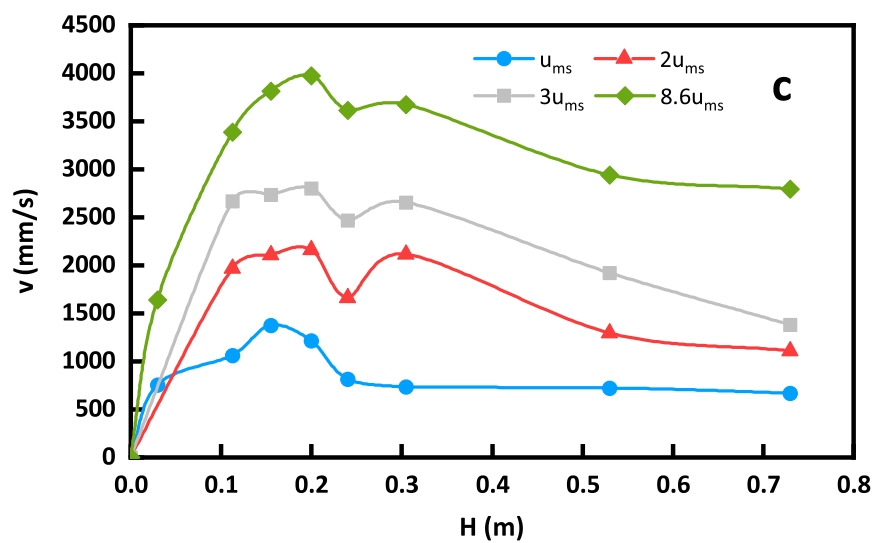
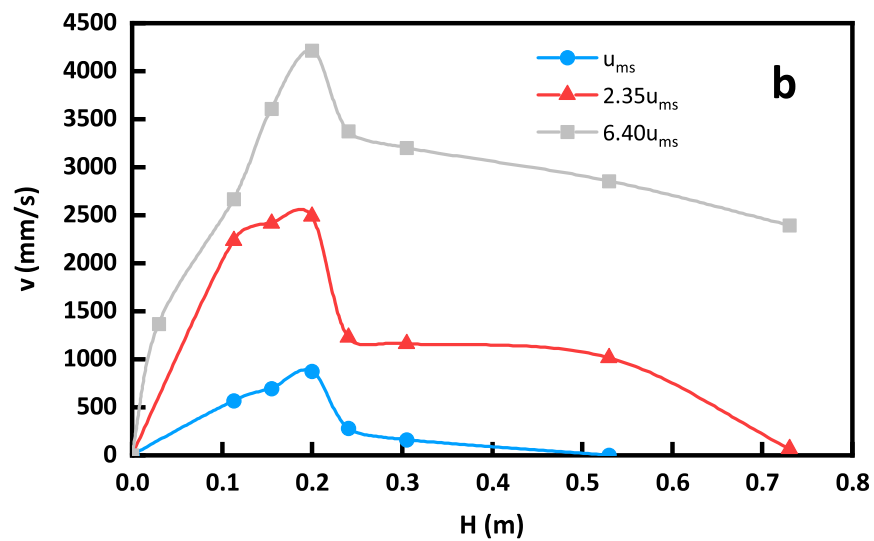
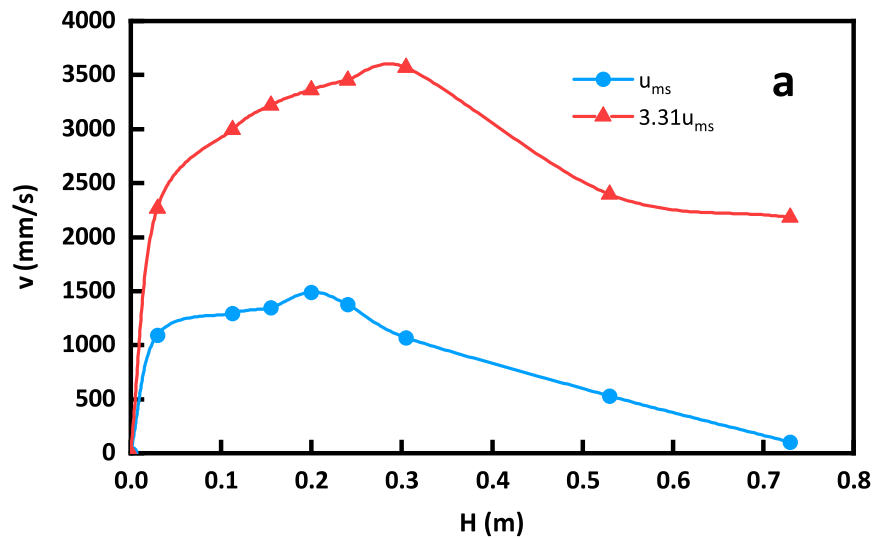
airearen abiadura handitzerakoan periferiaren bolumena txikiagoa da. Bestalde, iturguneko zenbait profil erradial bezala, iturrian lorturiko abiadura profil erradial guztietan abiadura maximoa ez dago ardatzean kokatuta, baizik eta ardatzetik gertu. Aire iturgunetik ateratzean nabarmen hedatzen da, eta hortaz, ardatzeko solidoek ez dute abiadura handiena. Joera hau gehienbat hodirik gabe (4.35.a₃ Irudia) eta irekiduradun (4.35.b₃ Irudia) hodiedetan gertatzen da da, baina hodi ez porotsudun sistemetan (4.35.c₃ Irudia) ere gertatzen da airearen abiadura handietan.

4.6.6.2 Abiadura profil axialak

Profil erradialak bezala, airearen abiadurak ardatzeko profil axialean duen eragina aztertu da konfigurazio bakoitzerako eta 4.36. Irudian erakusten dira lorturiko emaitzak.

4.36. Irudian erakusten den bezala, airearen abiadura handitzean ardatzeko partikulen abiadura ere handitu egiten da [101, 157, 271]. Bestalde, konfigurazio guztietan lorturiko profil axialek joera berdina dute, hau da, iturgunean zehar solidoak azeleratu egiten dira eta iturrian ostera, dezeleratu. Hala ere, aipagarria da 4.36. Irudiko kurba ia guztietan partikulak iturgune osoan zehar azeleratu direla bi kasutan izan ezik. Alde batetik, hodirik gabeko sistemetan erabateko iturkuntzan (airearen abiadura handiaz) operatzen denean partikulak bilgailuaren hasiera arte dira azeleratuak eta bilgailuan igo ahala dezeleratu egiten dira. Hala ere, bilgailuaren goiko aldera abiadura handiarekin heltzen dira (2 m/s inguru). Bestetik, hodi ez-porotsudun sistemetan iturkuntzarako abiadura minimoan lan egitean iturgunearen zati handi batean azeleratu egiten dira, baina 0.155 m -tik gora dezeleratzen hasten dira. Izan ere, aipatutako aire emaria oso baxua da eta soilik hodi ez-porotsuaren laguntzarekin lortzen da egoera egonkorra izatea. Hala ere, nahikoa da iturri oso altuak lortzeko.

Bestalde, 4.36. Irudian ikus daitekeenez, orokorrean partikulen azelerazio handiena iturgunearen hasieran edo beheko gunean gertatzen da, ohandzearen altueraren beheko erdiarekin alderatuz goiko erdian partikulek duten azelerazioa oso txikia baita. Hala ere, airearen abiadura oso altuetan (irekiduradun hodian $6.40u_{ms}$ eta hodi ez-porotsuan $8.6u_{ms}$ erabiliz) iturgunean zeharreko azelerazioa konstante samarra da, baina bi kasuetan partikulen dezelerazioa iturrian hasten da.



4.36. Irudia. Aireren abiaduraren eragina (a) hodirik gabe, (b) irekiduradun hodia eta (c) hodi ez-porotsudun sistemen abiadura profil axialetan.

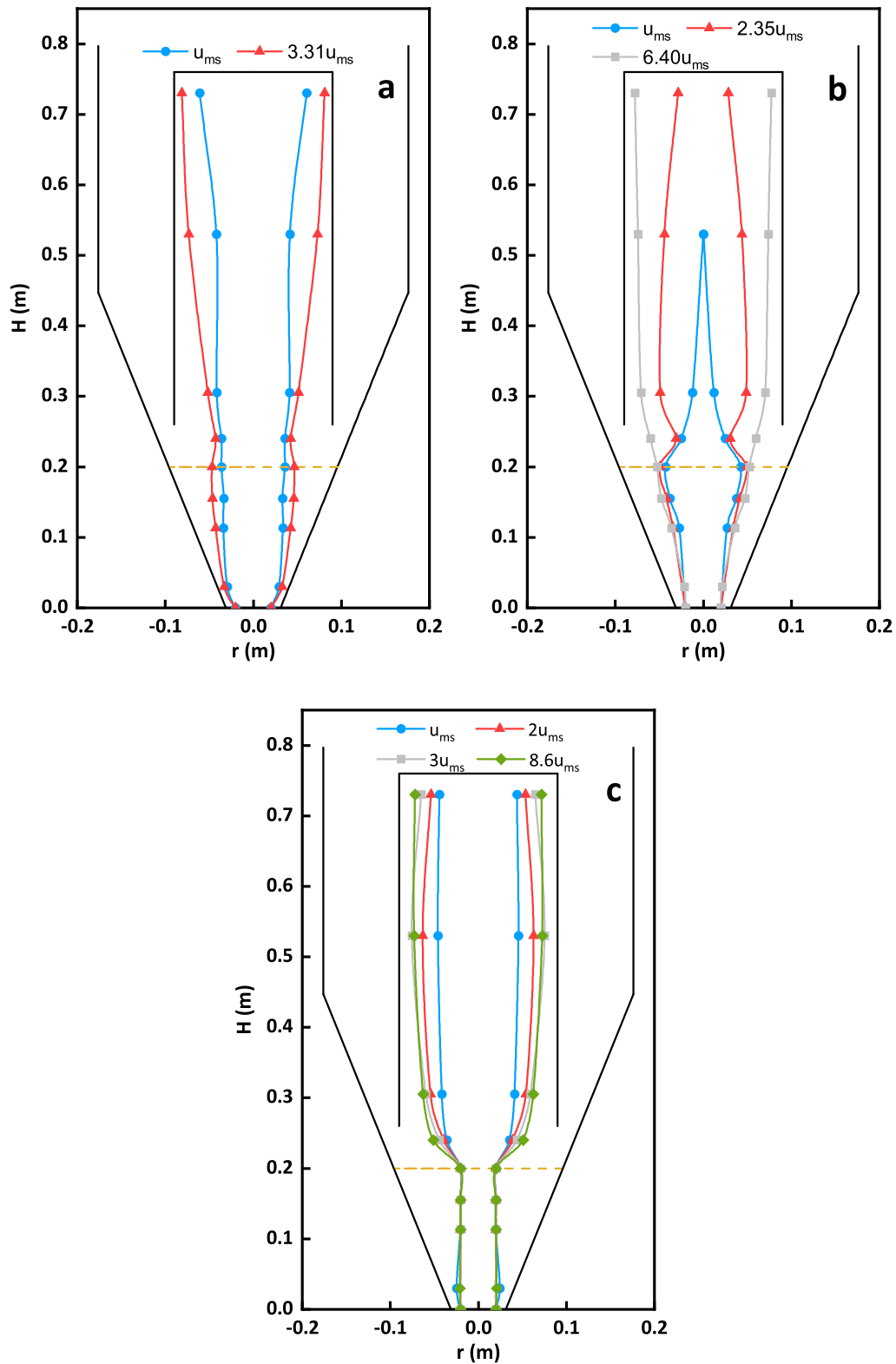
Azkenik, 4.36.c Irudian ikus daitekeenez, hodi ez-porotsudun sistemetan iturkuntzarako abiadura minimoa baino abiadura handiagoak erabiltzean, iturriaren hasieran partikulek dezelerazio lokal bat dutela eta bilgailuan sartzean azeleratuak dira, baina berriz ere iturrian gora dezeleratu egiten dira. Izan ere, joera hau erabili diren airearen hiru abiadura ezberdinetan lortu da. Aurretik aipatu bezala, mota honetako hodiak erabiltzean, kontaktorerara sartzen den airearen frakzio gehiena iturgunean gora doa eta hoditik ateratzerakoan airearen sekzioa asko handitzen da, airearen hedapena eta partikulen dezelerazioa gertatuz. Gune hau ohantzearen gainazala eta bilgailuaren arteko gunea litzateke. Hala ere, bilgailuan sartzeraan berriz ere sekzioa txikitu egiten da eta airearen konpresioa gertatzen da partikulen abiadura handituz. Gainerako konfigurazioetan ostera, kontaktorerara sartzen den airearen frakzio garrantzitsu bat eraztungunean zehar igotzen da eta, gainera, iturgunearen sekzioa handiago da. Beraz, aireak iturgunearen ostean duen hedapena ez da hain nabarmena.

4.6.6.3 Iturgune/iturriaren bilakaera

Azkenik, airearen abiaduraren eragina aztertzeko, iturgune eta iturriaren bilakaera neurtu da konfigurazio bakoitzerako eta airearen abiadura ezberdinetan. 4.37. Irudian erakusten dira lorturiko emaitzak.

4.37. Irudiaren arabera, konfigurazio guztietan airearen abiadura handitzerakoan iturgunea eta iturriaren nukleoa zabaldu egiten dira, nahiz eta, aldaketa nagusienak iturrian bereiz daitezkeen. Hodirik gabeko sisteman (4.37.a Irudia) ematen da iturgunearen hedapen garrantzitsuena airearen abiadura handitzerakoan, nahiz eta irekiduradun hodia (4.37.b Irudia) erabiltzean iturgune zabalak lortzen diren, baina ez da ezberdintasun nabarmenik antzematen aireren abiadura ezberdinetarako. Hodi ez-porotsudun sisteman (4.37.c Irudia) ostera, hodiaren paretek mugatzen dute iturgunea eta hau ez da aldatzen airearen abiadurarekin. Hala ere, L_H -ren altueran zehar iturgunea pixka bat zabaltzen da, baina hedapen hau ez da nabarmena eta ez da aldatzen airearen abiadurarekin. Ohiko iturri ohantzeetan [157, 159] eta konikoetan [336] ere iturgunearen hedapena ematen da airearen abiadura handitzerakoan.

Hodirik gabeko sisteman (4.37.a Irudia), iturriaren hasieran (ohantzearen gainazala eta bilgailuaren artean) airearen abiaduraren igoerak iturriaren nukleoaren estutzea dakar iturgunearekiko, baina iturrian gora nukleoa asko zabaltzen da, gehienbat bilgailuaren goiko erdian. Izan ere, bilgailuaren goiko aldean ia bilgailu guztia iturriaren nukleoak hartzen du, hau da, soilik bilgailuaren paretetan ematen da iturriaren periferia eta solidoen jaitsiera.



4.37. Irudia. Airearen abiaduraren eragina (a) hodirik gabeko, (b) irekiduradun hodi-dun eta (c) hodi ez-porotsudun sistemen iturgune/iturriaren bilakaeran.

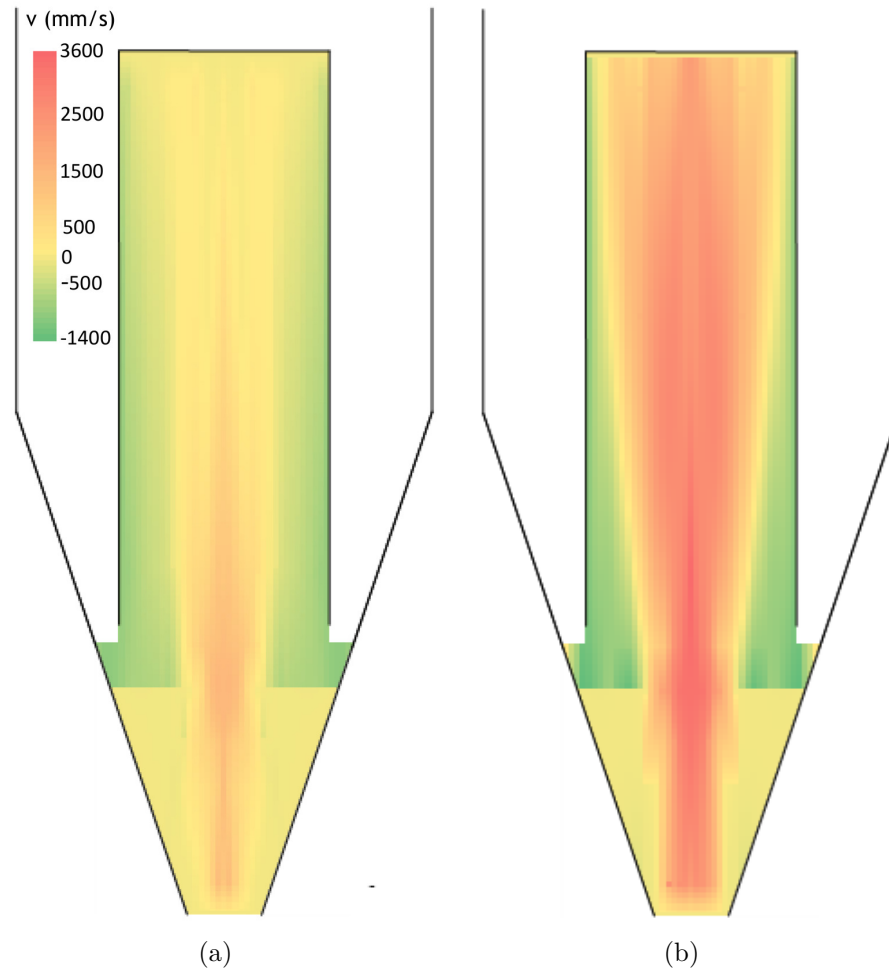
Irekiduradun hodia erabiltzean (4.37.b Irudia), airearen abiadura u_{fs} -ra, hau

da, $2.35u_{ms}$ -ra handitzean hodirik gabeko sisteman bezala iturriaren hasieran iturriaren nukleoa estutu egiten da iturgunearekiko, baina ondoren iturrian gora nukleoa hedatuz doa, nahiz eta bilgailuaren goiko aldean berriz ere pixka bat estutu. Aipagarria da, u_{ms} eta u_{fs} -an lorturiko iturriaren bilakaerak itxura berdina dutela, hau da, iturkuntzarako abiadura minimoan lan egiten iturri baxua lortzen da (4.37.b Irudian erakusten den bezala) eta airearen abiadura u_{fs} -ra handitu ahala iturriaren altuera handituz doa. Behin u_{fs} -ra helduta, iturria bilgailuaren goiko aldera heltzen da eta horregatik, bi abiaduren kurbetan nukleoa estutuz doa iturrian gora [336]. Airearen abiadura handiak erabiltzean oster, iturgune/iturria nabarmen zabaltzen da bilgailuan sartu arte, eta bertan ere gertatzen da hedapena baina neurri txikiagoan. Izan ere, nukleoak ia bilgailuaren bolumen osoa hartzen du bilgailuaren beheko gunean.

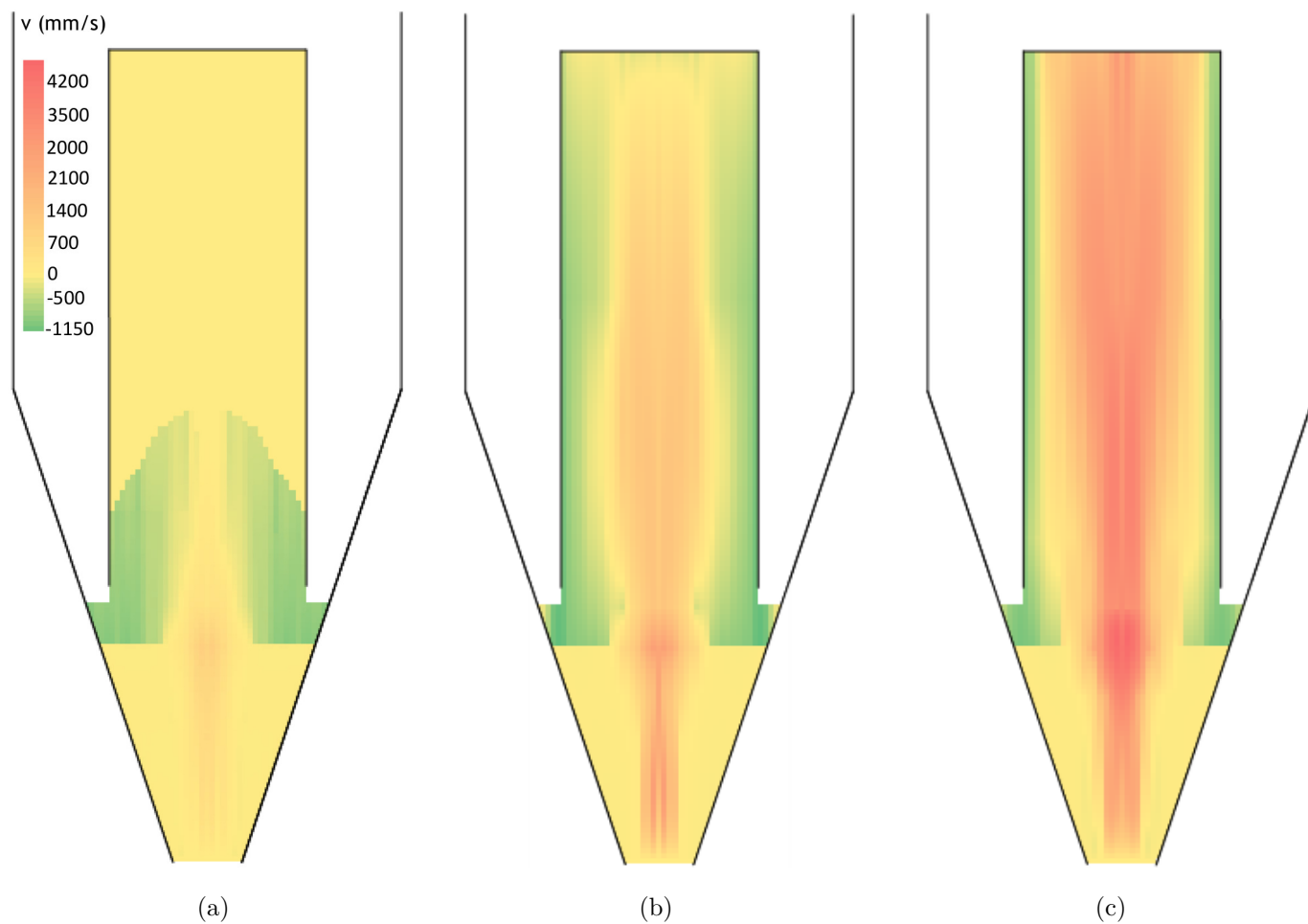
Azkenik, hodi ez-porotsudun (4.37.c Irudia) sistema da ezberdintasun txikieneko konfigurazioa. Iturria hastean nukleoa nabarmen zabaltzen da ohantzearen gainazala eta bilgailuaren artean, baina bilgailuan sartzeran hedapenaren bilakaera murriztu egiten da. Iturkuntzarako abiadura minimotik $3u_{ms}$ -ra nukleoaren hedapena handia da, baina $8.6u_{ms}$ erabiltzean ez da hedapen garrantzitsurik antzematen, soilik bilgailuaren goiko aldean.

4.6.7. Iturri ohantze konikoaren abiadura mapak

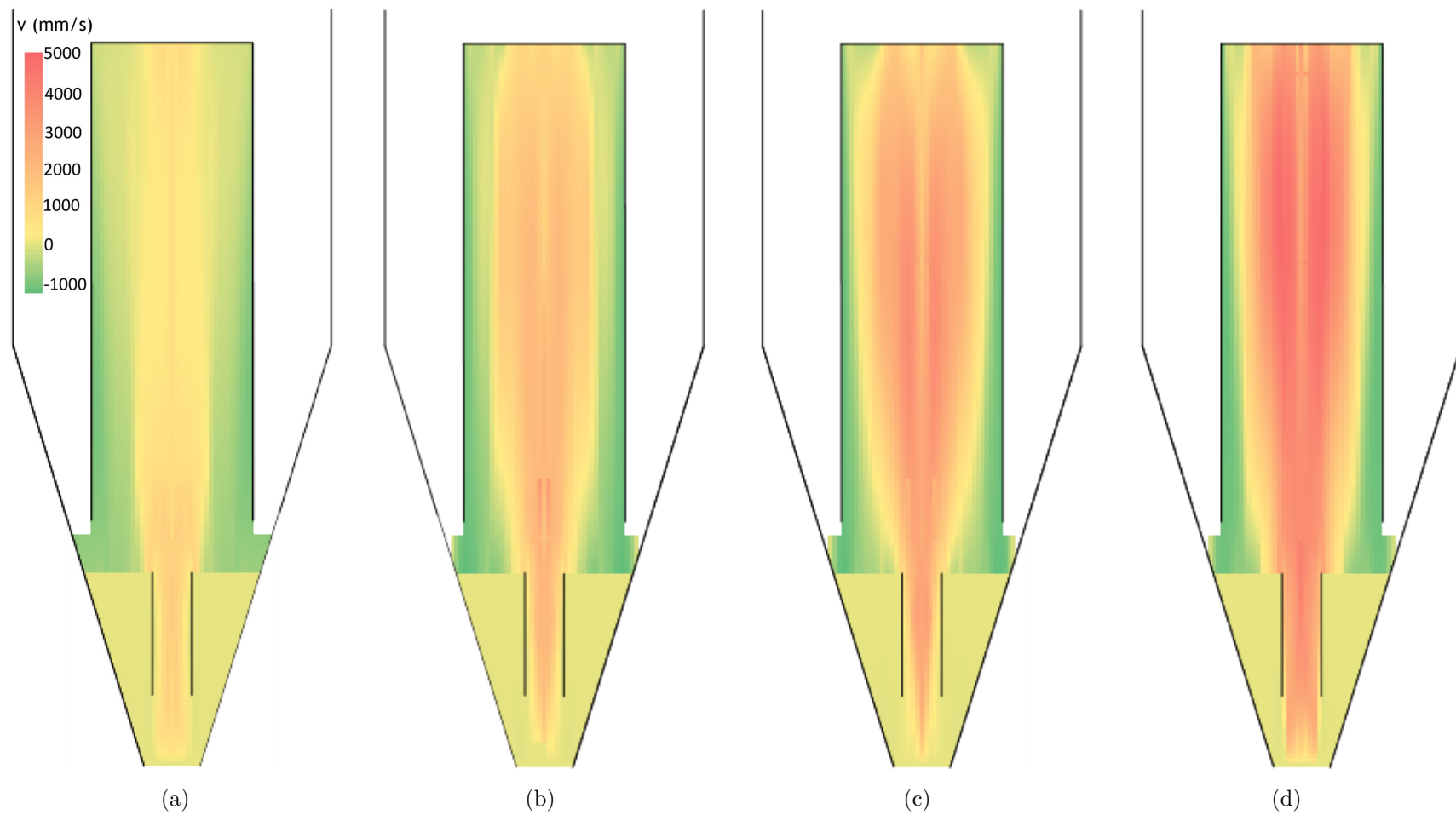
4.2 Atalean azaldu den bezala, sistema optikoa erabiliz partikulen abiadura puntuala neurtu da iturri ohantze konikoaren altuera ezberdinetan. Neurketa esperimental bakoitzak suposatzen duen gehiegizko lanagatik ez dira kontaktorearen altuera osoan egin neurketak. Hau dela eta, sistema osoan lortzen den solidoen abiaduraren ideia bat izateko, konfigurazio bakoitzean lorturiko emaitzak erabiliz interpolazioak burutu dira sistema osoko solidoen abiaduraren hurbilketa lortzeko. Jarraian, aurkeztu dira konfigurazio bakoitzeko airearen abiadura ezberdinetako neurketetan lorturiko profil erradial eta axial guztiekin eraikitako abiadura mapak.



4.38. Irudia. (a) Iturkuntzarako abiadura minimoan eta (b) 3.31 aldiz iturkuntza minimoan lan egitean hodirik gabeko sistemetan lorturiko solidoen abiadura mapak.



4.39. Irudia. (a) Iturkuntzarako abiadura minimoan, (b) 2.35 eta (c) 6.40 aldiz iturkuntza minimoan lan egitean irekiduradun hodidun sistemetan lorturiko solidoen abiadura mapak.



4.40. Irudia. (a) Iturkuntzarako abiadura minimoan, (b) 2, (c) 3 eta (d) 8.6 aldiz iturkuntza minimoan lan egitean hodi ez-porotsudun sistemetan lorturiko solidoen abiadura mapak

4.38., 4.39. eta 4.40. Irudietan erakusten den bezala, iturgunean eta batez ere iturrian gertatzen dira solidoen abiadura aldaketa bortitzenak, eta sarrerako gasaren abiadura handitu ahala handiagoak dira aldaketa hauek. Ostera, eraztungunean lortzen diren abiadurak oso txikiak dira beste bi guneetan lortutakoekin alderatuz, eta ondorioz, aipaturiko irudietan ez da abiadura aldaketa nabarmenik antzematen eraztungune guztian zehar.

Bestalde, 4.39.a Irudian izan ezik, gainerako irudietan argi geratzen da zein den solidoaren eta airearen ibilbidea iturri bilgailuaren barnean. Airean iturgunetik ateratzerakoan bilgailuaren erditik igotzen da eta airearen abiaduraren arabera bilgailuaren erradioan zehar gehiago edo gutxiago hedatzen da. Behin bilgailuaren goiko aldera helduta, bilgailuaren paretetara zabaltzen da eta hauen horma kontrari zehar jaisten da. Azkenik, airea bilgailutik ateratzerakoan honen eta kontaktorearen arteko tartetik pasatzen da eta bilgailuaren kanpoko aldean zehar gora egiten du. Irekiduradun hodie-tan iturkuntzarako abiadura minimoa erabiltzen denean ostera (4.39.a Irudia), lortzen den iturria oso baxua da eta iturriaren bolumen gehiena periferiak hartzen du.

Bestalde, hodirik gabe (4.38. Irudia) eta hodi ez-porotsuak (4.40. Irudia) erabiltzean, iturriko nukleoaren eta periferiaren arteko trantsizioa oso txikia da, hau da, erradioan zehar solidoen abiadura positibo handietatik abiadura negatibo handietara erradioaren desplazamendu txikian gertatzen da. Irekiduradun hodiak erabiltzean ostera, iturriko periferia eta nukleoaren arteko trantsizioa pausatuagoa da. 4.39. Irudian ikus daitekeenez, kolore gorriaren eta berdearen artean kolore horidun gune handia dago, hau da, zero inguruko solidoen abiadura gune handian gertatzen da.

4.35. Irudian ikusi ahal izan den bezala, sistemaren gune diluituetan (gehienbat iturrian) airearen hedapena gertatzen da eta honek solidoen abiadura maximoa ardatzean ez izatea dakar. Efektu hau argi eta garbi antzeman daiteke 4.38., 4.39. eta 4.40. Irudietan. Izan ere, iturriaren ardatzean ez dago kolore gorri biziena, baizik eta ardatzetik gertu. Gasaren abiadura handitu ahala nabariagoa bilakatzen da joera hau, eta gehienbat bilgailuaren erdiko gunean hantzean daiteke.

Azkenik, hodirik gabeko sistemak (4.39.a Irudia) baino ez dira bilgailuan gora iturriaren nukleoa hedatuz doazenak, goiko aldean nukleoak ia bolumen guztia hartzen duelarik. Gainerako konfigurazioetan ia bilgailuaren altuera guztian zehar iturriaren nukleoa ia ez da hedatzen eta konstante samar mantentzen da. Izan ere, erdiko hodiak erabiltzerakoan iturgunetik gora igotzen den airea partzialki (irekiduradun hodiak erabiliz) edo osotasunean (hodi ez-porotsuak erabiliz) bideratua dago, eta hortaz, aireak iturriaren hasieran hedapen bortitza du.

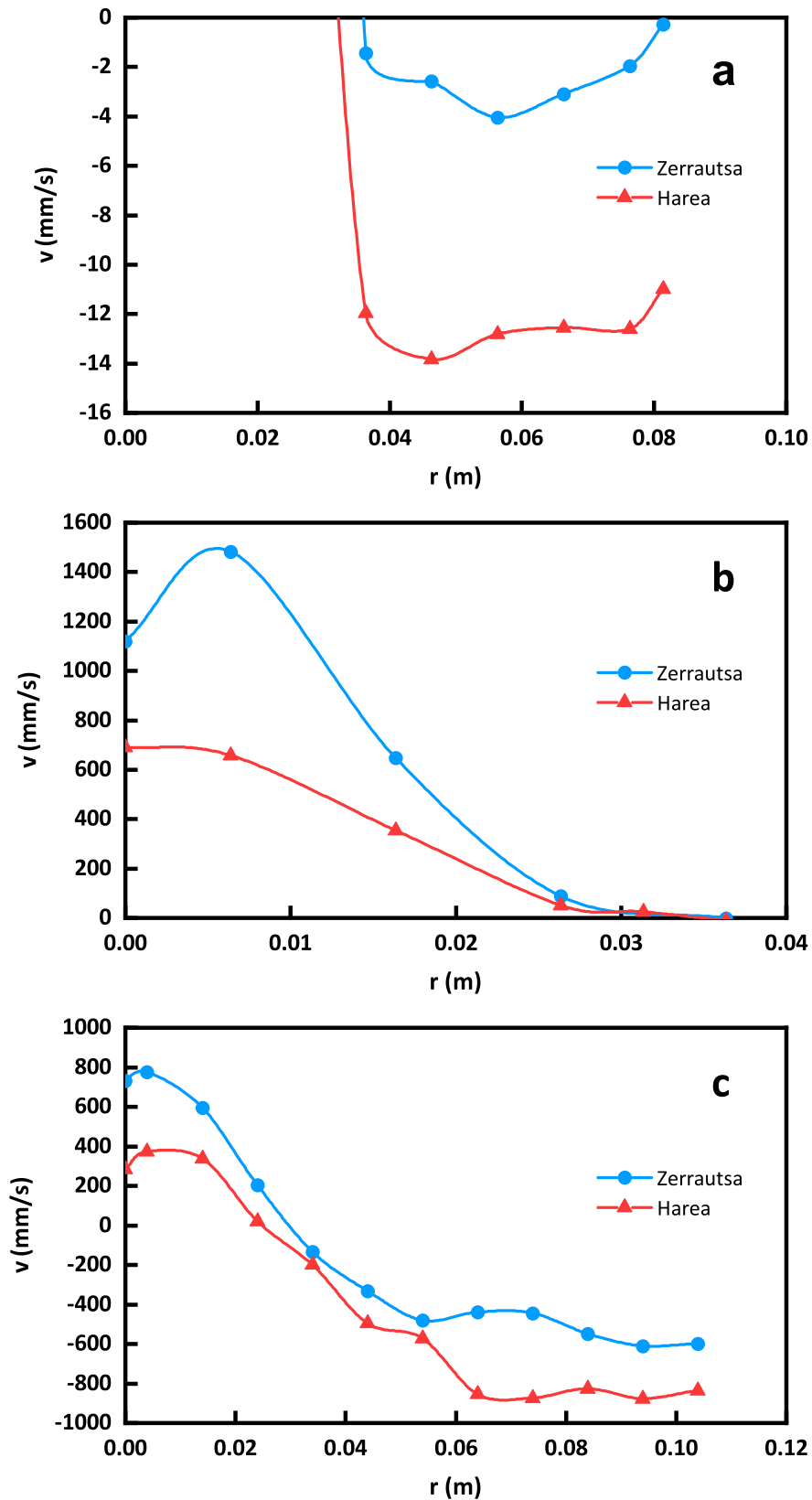
4.6.8. Solidoaren eragina abiaduran

Azkenik, kapitulu honekin bukatzeko solido motaren eragina aztertu da bi solido ezberdin erabiliz, pinu zerrautsa eta harea. Zerrautsa erabiliz solidoaren dentsitatearen eragina aztertu nahi izan da eta harearekin partikula tamainaren eragina, horretarako batez besteko partikula tamaina ezberdina duten bi harea frakzio ezberdin erabili direlarik. Bi faktore hauen eragina aztertzeko partikula ezberdinak erabiliz lorturiko profil erradial eta axialak alderatu dira. Alderaketa hau baliagarria izan dadin, neurketak operazio baldintza berdinean burutu dira (iturkuntzarako abiadura minimoan).

4.6.8.1 Solidoaren dentsitatearen eragina

4.41. Irudian erakusten dira bi solido ezberdin erabiliz lorturiko abiadura profil erradialak.

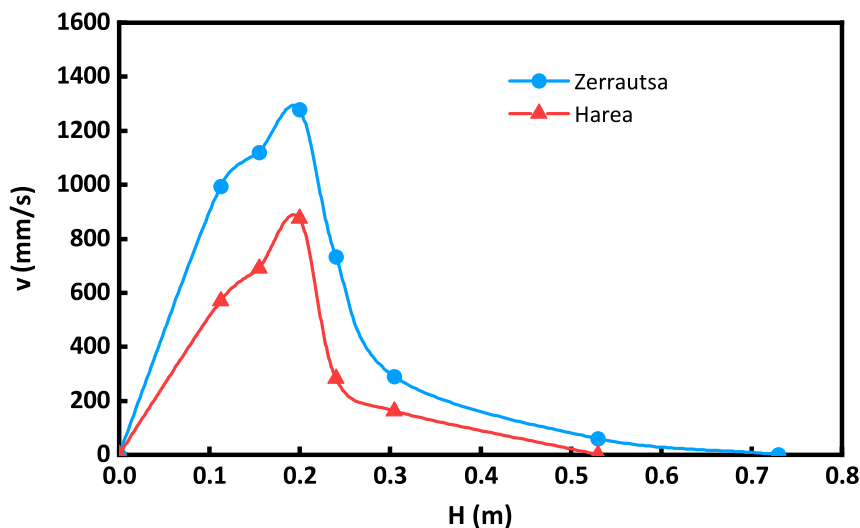
4.41.a Irudian erakusten den bezala, nahiz eta solidoaren dentsitatea aldatu eraztungunean lortzen den profil erradiala antzeko joera du bi solido mota ezberdinetarako. Hau da, kontaktorearen paretatik urrundu ahala solidoaren abiadura handitu egiten da maximo negatibora heldu arte, eta ostean, abiadura negatiboak txikituz doaz ardatzerantz hurbildu ahala. Hala ere, bi solidoek ez dute maximoa erradioaren posizio berberean, hots, harea erabiliz lorturiko profila ardatzerantz dago desplazatua. Bestalde, hareak eraztungunean duen abiadura zerrautsarena baino ia 4 aldiz handiagoa da, hau da, solidoaren dentsitatearekiko proportzionala da. Izan ere, eraztunguneko solidoen jaitsiera abiadura baldintzatzen duen faktoreetariko bat grabitate indarra da, eta hareak dentsitate handiagoa izatean abiadura handiagoan mugitzen da. Hala ere, aipagarria da arrazoi berberengatik sistemak duen iturkuntzarako abiadura minimoa handiagoa dela, honek solidoen zirkulazio handiagoa sortzen duelarik. Azkenik, 4.41.a Irudian ikus daitekeenez, dentsitate baxuko solidoak erabiliz lortzen den iturgunea zabalagoa da. Izan ere, zerrautsaren dentsitate baxua dela eta, aireak erresistentzia txikiagoa jasaten du iturgunean zehar hedatzeko.



4.41. Irudia. Solidoaren dentsitatearen alderaketa (a) eraztunguneko ($H = 0.155\text{ m}$), (b) iturguneko ($H = 0.155\text{ m}$) eta (c) iturriko ($H = 0.24\text{ m}$) profil erradialetan. Sistema: $\gamma = 36^\circ$, $D_0 = 0.04\text{ m}$, $H_0 = 0.20\text{ m}$, $D_F = 0.20\text{ m}$, $H_F = 0.06\text{ m}$, $IP = \%57$, $u = u_{ms}$.

Bestalde, gune diluituetako (4.41.b eta 4.41.c Irudiak) profiei erreparatuz, eraztungunean lorturikoaren aurkako joera lortzen da, hau da, dentsitate baxuko solidoek abiadura handiagoak dituzte. Hala ere, zehaztu behar da joera hau soilik abiadura gorakorra duten solidoek dutela, hots, iturguneko eta iturriko nukleoko solidoek. Honen arrazoia aurrekoarekin erlazionatua dago, hau da, zerrautsak dentsitate txikiagoa duenez solidoen grabitate indarra txikiagoa da, eta hortaz, goranzko indar netoa handiagoa da. Gainera, zerrauts partikulak irregularragoak dira eta airearen eta partikulen arteko kontaktu azalera handiagoa da, hots, energia transferentzia handiagoa. Bestalde, lehen aipatu bezala airea gehiago hedatzen da iturgunean zehar solidoen dentsitatea txikiagoa denean, eta 4.41.b Irudian lorturiko abiadura maximoaren posizioak erakusten dira. Hau da, harearen kasuan abiadura maximoa ardatzean dagoen bitartean, zerrautsa erabiliz ardatzetik zentimetro erdira dago. Iturriaren kasuan ostera (4.41.c Irudia), bi solidoek dute abiadura maximoa ardatzetik desplazatua. Izan ere, iturrian airearen hedapen handiagoa gertatzen da. Azkenik, eraztungunean bezala, iturriaren periferiako solidoek abiadura handiagoa dute solidoaren dentsitatea handitu ahala, periferia ere handiagoa delarik.

Jarraian, solido ezberdinek duten ardatzeko abiadura profil axialak erakusten dira 4.42. Irudian. Horretarako, profil erradialetatik lorturiko ardatzeko abiadurak hartu dira oinarri gisa.



4.42. Irudia. Solidoaren dentsitatearen alderaketa abiadura profil axialean. Sistema: $\gamma = 36^\circ$, $D_0 = 0.04\text{ m}$, $H_0 = 0.20\text{ m}$, $D_F = 0.20\text{ m}$, $H_F = 0.06\text{ m}$, $IP = \%57$, $u = u_{ms}$.

4.42. Irudian erakusten den bezala, bi solido mota ezberdinek antzeko joera dute abiadura profil axialean, hau da, iturguneko solidoak azeleratu egiten dira iturgune osoan zehar eta behin iturrian dezeleratu egiten dira jaisten hasten diren arte. Gainera, iturri altuagoa zerrautsak sortzen du. Bestalde, zerrautsak du abiadura han-

diagoa kurba osoan, izan ere, aurretik aipatu bezala zerrautsak dentsitate txikiagoa dauka eta honek grabitate indar baxuagoak izatea dakar.

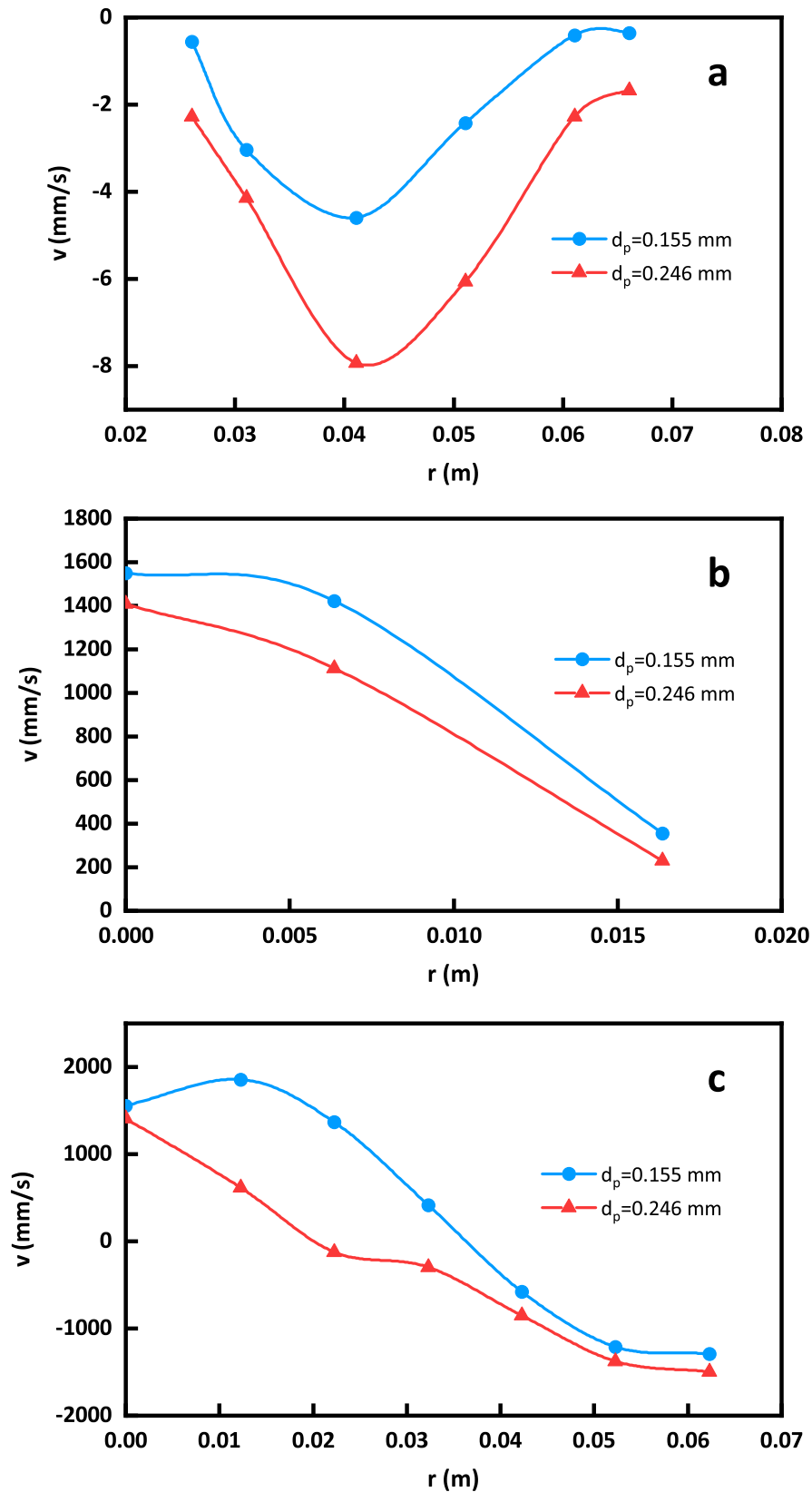
4.6.8.2 Partikula tamainaren eragina

Solidoaren dentsitatearekin egin bezala, partikula tamainaren eragina ere aztertu da. Horretarako, harearen bi frakzio ezberdin erabili dira, hots, 0.155 eta 0.246 *mm*-ko partikula tamaina duten harea frakzioak. Kasu honetan hodi ez-porotsudun sistematik erabili dira soilik, eta 4.43. Irudian erakusten dira sistemaren gune ezberdinetan lorturiko profil erradialak.

Kasu honetan, partikula tamainaren eragina aztertzeko hodi ez-porotsudun sistema erabili da, eta 4.43. Irudian erakusten dira lorturiko profil erradialak iturri ohandze konikoaren gune guztietan.

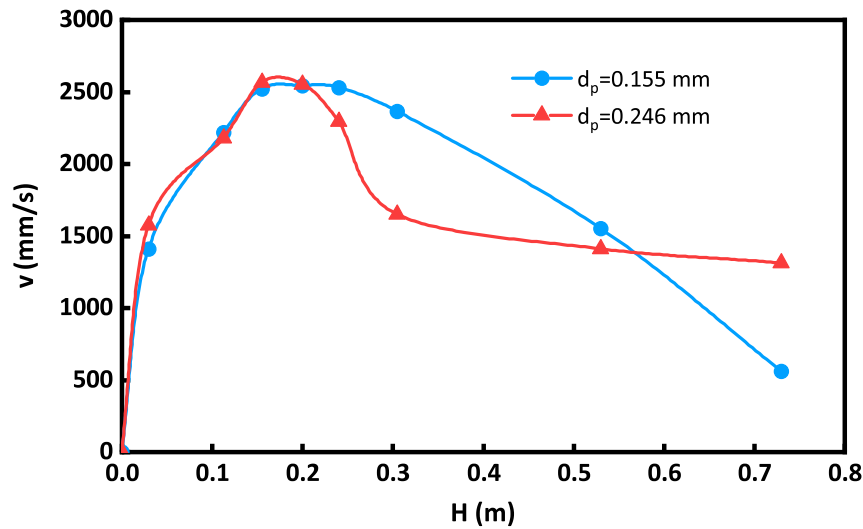
4.43.a Irudian erakusten den bezala, harearen bi frakzio ezberdinek abiaduraren joera berbera dute eraztungunean zehar. Hala ere, partikula tamaina handitzerakoan eraztunguneko solidoak abiadura handiagoan jaisten dira. Honen arrazoia 4.41.a Irudian esandako berdina da, hau da, solidoaren grabitate indarra. Bestalde, kasu honetan bi solido ezberdinek erradioaren posizio berdinean dute abiadura negatibo maximoa eta eraztungunearen zentroan egon beharrean erdiko hodiaren paretarantz dago desplazatua. Izan ere, 4.29.a Irudian azaldu den bezala, hodi ez-porotsuak erabiltzean erdiko hoditik gertu barneratzen da airea eraztungunean zehar eta gune honetako solidoak dira mugimendu handiena dutenak.

Gune diluituetan oster, tamaina txikieneko solidoak dira abiadura balio handienak dituztenak [271]. Iturriaren kasuan (4.43.b Irudia), bi solido ezberdinek antzeko joera dute, baina partikula tamaina txikiko profilean ardatzaren inguruko solidoek antzeko abiadurak dituzte, airearen hedapenaren seinale. Efektu berdina lortzen da iturriaren lorturiko profilean, baina kasu honetan abiadura maximoa ardatzetik hurbil dagoelarik. Nahiz eta bi solido ezberdinetarako ardatzeko abiadura oso antzekoa izan, partikula tamaina handiko solidoen abiadurak joera gorakorra du ardatzera arte. Bestalde, iturriaren periferiatik jaisten diren partikula tamaina ezberdineko solidoek antzeko abiadura dute, baina nukleoan gora igotzen direnen artean ezberdintasun handiagoa da.



4.43. Irudia. Partikula tamainaren alderaketa (a) eraztunguneko ($H = 0.155\text{ m}$), (b) iturguneko ($H = 0.155\text{ m}$) eta (c) iturriko ($H = 0.53\text{ m}$) profil erradialetan. Sistema: $\gamma = 28^\circ$, $D_0 = 0.04\text{ m}$, $H_0 = 0.20\text{ m}$, $D_F = 0.15\text{ m}$, $H_F = 0.06\text{ m}$, $L_H = 0.07\text{ m}$, $u = u_{ms}$.

Jarraian, partikula tamaina ezberdinetarako lorturiko profil axialak erakusten dira 4.44. Irudian.



4.44. Irudia. Partikula tamainaren alderaketa abiadura profil axialean. Sistema: $\gamma = 28^\circ$, $D_0 = 0.04\text{ m}$, $H_0 = 0.20\text{ m}$, $D_F = 0.15\text{ m}$, $H_F = 0.06\text{ m}$, $L_H = 0.07\text{ m}$, $u = u_{ms}$.

4.44. Irudian erakusten den bezala, ardatzean zehar lorturiko profil axialak orain artekoen (4.30., 4.36. eta 4.42. Irudiak) joera berdina dute, hau da, solidoak iturgunean zehar azeleratu egiten dira eta iturrian oster, dezeleratu egiten dira. Aipagarria da bi solido ezberdinek abiadura oso antzekoak dituztela iturguneko ardatzean zehar. Hau solidoen eta sistemen arteko antzekotasunei atxiki dakioke. Izan ere, bi solidoek propietate berberak dituzte partikula tamaina izan ezik, eta hodi ez-porotsuak erabiliz lortzen den egonkortasuna dela eta, antzeko portaera dute. Olazar et al.ek argitaratutako lanean [271] oster, partikula tamaina txikitzerakoan solidoek abiadura handiagoak dituzte ardatzean zehar. Hala ere, zehaztu beharra dago Olazar et al.ek 2 – 5 mm-ko partikulak erabili zituten bitartean lan honetan 0.155 eta 0.246 mm-ko partikulak erabili direla.

Hala ere, solidoak iturrian sartzean, partikula tamaina handiko solidoek bat-bateko dezelerazioa dute, nahiz eta bilgailuan zehar abiadura asko ez aldatu. Tamaina txikiko solidoek oster, bilgailuan sartu arte ez dute abiadura aldaketa handirik, baina bilgailuan gora nabarmentzen da solidoaren dezelerazio handia.

5. KAPITULUA

LABURPENA

Nahiz eta iturri ohantzeen teknologia oso erakargarria den aplikazio ugarrirako, muga garrantzitsuak ditu eskala handitzean. Azken hogeita hamar urtean zehar, gure ikerketa taldeak azterketa ugari egin ditu pilotu eredu eskalan, gehienbat solido handiak erabiliz ($d_p = 1 - 8\text{mm}$). Beraz, tesi honen helburu nagusia teknologia honen eskala handitzean aurrera pausuak ematea izan da.

Iturri ohantze konikoaren eskala handitzea simulatzeko asmoz, partikula finekin lan egin da planta pilotuan (D_0/d_p erlazioaren 125 – 500 arteko balioak). Partikula mota hauek portaera oso ezegonkorra dute iturri ohantzeetan, izan ere, iturkuntza erregimena galdu eta slugging efektua lortzen da uneoro. Arazo honen ohiko konponbidea erdiko hodiak erabiltzea da partikula finekin egonkorrago operatu baitaiteke. Hala ere, erdiko hodiekin sorturiko iturriak altuagoak dira eta partikula finekin lan egitean finen arrastea gertatzen da airearen abiadura handietan. Hau dela eta, erdiko hodidun iturri ohantze konikoak iturkuntzarako abiadura minimoaren antzeko aire abiaduretan operatzera mugatuak daude.

Muga hau gainditzeko ikerketa taldean garatu eta patentatu den iturri bilgailuak erabiltzen dira. Iturri bilgailuak finen erregimen egonkorra ahalbidetzen du eta finen arrastea ekiditen du inolako erdiko hodirik gabe ere. Bestalde, gailu honekin lorturiko iturkuntza erregimena ez da ohiko iturri ohantze konikoen bezalakoa, hau da, iturria altua eta dentsoa izateaz gain, burbuilez osaturiko erregimen egonkorretan operatzen dute. Hori dela eta, tesi honen helburu nagusia partikula finen hidrodinamika iturri bilgailudun iturri ohantze konikoetan aztertzea izan da.

Lan honetan, partikula finen hidrodinamika aztertu da konfigurazio eta tamaina ezberdineko erdiko hodiak (irekiduradunak eta ez-porotsuak), kontaktoreen faktore geometrikoak eta operazio baldintza ezberdinak erabilita. Gainera, tamaina banaketa ezberdineko hiru harea frakzio eta zerrautsa frakzio bat ere erabili dira.

Harea finarekin buruturiko saiakuntzak konfigurazioaren arabera sailkatu dira, hau da, erdiko hodirik gabe, irekiduradun hodia eta hodi ez-porotsua erabiltzen dituzten sistemen arabera banatu dira. Konfigurazio mota bakoitzarekin kurba karakteristiko ezberdinak lortu dira baita erregimen ezberdinak bereiztu ere. Honetaz gain, erregimen hauen arteko trantsizio puntu karakteristikoak identifikatu eta aztertu dira. Horretarako, erdiko hodien (erabilitako kasuetan) eta bilgailuaren parametro geometriko ezberdinetarako lortu dira kurba karakteristikoak. Guztira lau puntu karakteristiko ezberdin determinatu dira: iturkuntzarako abiadura minimoa, erabateko iturkuntzarako abiadura, burbuilazko iturkuntzarako abiadura eta iturri-jariorako abiadura minimoa.

Partikula finekin lorturiko kurba hidrodinamikoak karakterizatu ondoren, bilgailuaren posizio optimoaren azterketa egin da konfigurazio bakoitzerako, hau da, ohan-

tzearen gainazalaren eta bilgailuaren beheko muturraren arteko distantzia optimoa determinatu da. Behin faktore honen balio optimoa neurtu ondoren, faktore geometriko garrantzitsuenen eragina aztertu da bilgailuaren distantzia optimoan.

Jarraian, lorturiko puntu karakteristiko ezberdinei buruzko analisi estatistikoa egin da. Horretarako, erabilitako aldagaiek iturkuntzarako abiadura minimoan, erabateko iturkuntzarako abiaduran, burbuilazko iturkuntzarako abiaduran eta iturri-jariorako abiadura minimoan duten eragina aztertu da. Ondoren, faktore esanguratsuenak identifikatu eta bereizi dira. Aldagai bakoitzak bakarka duen eragina aztertzeaz gain, bi aldagaien arteko elkarrekintzek duten eragina ere ikertu da.

Bestalde, iturkuntzarako abiadura minimoaren kalkulurako bibliografian dauden korrelazio enpirikoak bildu dira, eta tesi honetan ikertu diren sistemetan lorturiko emaitzen doiketa aztertu da. Gainera, lorturiko egokitasun maila egokia izan ez denean, korrelazio berriak garatu dira. Horretarako, faktore esanguratsuenei π -ren teorema aplikatu zaie eta modulu adimentsionalak eraiki dira. Era honetan, iturkuntzarako abiadura minimorako hiru korrelazio enpiriko berri proposatu dira, hots, korrelazio bana konfigurazio bakoitzerako.

Konfigurazio motaren eragina aztertzeko asmoz, puntu karakteristiko komunak dituzten konfigurazioak aztertu dira. Horretarako, puntu karakteristiko bakoitzean gehien eragiten duten faktoreak identifikatu egin dira eta garrantziaren arabera ordenatu azterketa estatistikoen bidez. Azkenik, operazio egonkorreko mugak ezarri dira hoderik gabeko eta irekiduradun hodi-dun sistemetan, hodi ez-porotsudun sistemetan ez baita ezegonkortasunik lortu.

Bestalde, nahiz eta kurba karakteristikoek informazio baliagarria ematen duten, zaila da kurba hauetatik partikula finekin gertatzen diren zenbait fenomenoren informazioa lortzea. Hau dela eta, partikula finekin lorturiko hidrodinamika hobeto ulertzeko asmoz, sistema optikoa erabili da. Sistema hau endoskopioz hornituriko abiadura handiko kamera bat da eta oso baliagarria da iturri ohantzearen gune ezberdinetan solidoen jarraipena egiteko. Teknika honen oinarria irudien bidezko partikulen jarraipenean datza (“Particle Image Velocimetry”, PIV metodoa), hau da, partikula ezberdinek irudi batetik bestera burutzen duten distantziaren neurketan. Iturri ohantzearen barnean solidoak abiadura handian desplazatzen direnez, beharrezkoa da grabaketak abiadura handian egitea. Era honetan, lortzen den irudi kopurua oso handia denez, PIV kodeak erabili behar dira irudien bidezko partikulen jarraipena egiteko.

Bibliografian aurkituriko PIV teknikarako kode ezberdinak ez direnez egokiak izan, partikula irregularren jarraipena egiteko bi kode proposatu dira tesi honetan: bata iturri ohantzearen gune dentsorako (eraztungunerako) eta bestea gune diluituetarako (iturri eta iturgunerako). Gune dentsoan partikulak multzo handietan jaisten direnez,

gune dentsoko mugimendu optikoa neurtzeko Farneback metodoa hobatu eta tesi honetan lorturiko irudietara doitu da. Bestalde, gune diluituetako partikulen jarraipena burutzeko kode originala eraiki eta proposatu da.

Kodeek itzultzen dituzten abiaduraren emaitzak fidagarriak izan daitezzen hainbat kalibraketa ezberdin egin dira. Alde batetik, kameraren distantzia optikoa kalibratu da, hau da, irudiko pixel batek duen distantzia erreala. Bestalde, gune diluituetako grabaketa planoaren sakonera ezberdinek partikulen perturbazioan eta batezbesteko abiaduraren neurketan duten eragina aztertu da. Azkenik, aurreko bi kalibraketak kontuan izanik, kodeek itzuliriko emaitzak eskuz neurturikoekin alderatu dira solido mota ezberdinak erabilia, hau da, kodeek duten errorea neurtu da.

Kodeak balioztatuta, solidoen abiaduraren profil erradialak neurtu dira altuera ezberdinetan eta iturri ohandze konikoen gune ezberdinetan. Era honetan, denboran zeharreko solidoaren abiaduraren bilakaera lortzeaz gain, profil erradial zein axialak neurtu dira. Gainera, buruturiko neurketetan oinarrituta, iturgunearen eta eraztun-gunearen arteko interfasea determinatu eta aztertu da, baita iturriko nukleoaren eta periferiaren arteko interfasea ere. Hau guztia irekiduradun hodiaren irekidura portzentaiata eta airearen abiadura ezberdinetarako egin da. Azkenik, solidoaren dentsitateak eta partikula tamainak solidoaren abiaduran duen eragina ikertu da.

6. KAPITULUA

ONDORIOAK

Jarraian, tesi honetan erakutsi eta azaldu diren emaitza garrantzitsuenetan oinarrituta atera daitezkeen ondorio nagusienak laburbilduko dira gai bakoitzaren arabera sailkatuta.

Partikula finen kurba hidrodinamiko karakteristikoak

Partikula finak erabiliz (batezbesteko partikula tamaina ezberdineko hiru harea frakzio eta zerrauts frakzio bat), konfigurazio ezberdinen kurba karakteristikoak lortu dira iturri bilgailudun iturri ohantze konikoetan.

- 1.1. Hodirik gabeko sistemetako kurba karakteristikoan bi erregimen egonkor bereiz daitezke, hala nola, iturkuntza eta erabateko iturkuntza erregimenak, baita erregimen ezegonkorra ere, hots, burbuilazko iturkuntza. Gasaren abiadurak gora egin ahala iturkuntza erregimena izateetik erabateko iturkuntza erregimena izatera pasatzen da, baina abiaduraren balio handieetan erregimen ezegonkorra nagusitzen da. Erregimen egonkorretan presio galeraren balioa konstante mantentzen da, baina erregimen ezegonkorrean gora egiten du airearen emariarekin batera. Erabateko iturkuntza erregimenean, ohiko iturkuntza erregimenean baino presio galera handiagoa eta solidoaren zirkulazioa indartsuagoa lortzen dira.
- 1.2. Irekiduradun hodia duten sistemetako erregimenak hodirik gabekoen berdintsuak dira, baina burbuilazko erregimena sistemaren arabera agertzen da edo ez. Iturkuntza erregimenean, presio galeraren balioak gora egiten du airearen emariak gora egin ahala, baina erabateko iturkuntza erregimena hastean behera egiten du. Hortaz, bi erregimenen artean, presio galeraren balio maximoa lortzen da.
- 1.3. Hodi ez-porotsudun sistemak egonkorak dira uneoro eta, beraz, erregimen hidrodinamiko bakarra dute, erabateko erregimena hain zuzen. Airearen abiaduraren tarte zabalean presio galeraren balioa konstantea da baina airearen abiaduraren balio handietan presio galerak gora egiten du. Bestalde, sistemaren arabera, karga galerak behera egin dezake airearen abiadura txikietan (iturkuntzarako abiadura minimoaren inguruko balioetan).

Konfigurazio bakoitzeko erregimenak puntu karakteristiko ezberdinenez mugaturik daude, hau da, erregimenen arteko trantsizioari dagokion abiadura sistemaren ezaugarrien araberakoa da, eta presio galeraren aldaketen bidez antzeman daitezke.

- 1.4. Hodirik gabeko eta irekiduradun hodia duten sistematan, hiru puntu karakteristiko ezberdintzen daitezke: iturkuntzarako abiadura minimoa (u_{ms}), erabateko iturkuntzarako abiadura (u_{fs}) eta burbuilazko iturkuntzarako abiadura (u_{bs}).

Iturkuntza erregimena iturkuntzarako abiadura minimoak eta erabateko iturkuntzarako abiadurak mugatzen dute, eta erabateko iturkuntza erregimena, aldiz, erabateko iturkuntzaren eta burbuilazko iturkuntzaren abiadurek. Burbuilazko iturkuntzaren erregimena burbuilazko abiaduran hasten da, baina erregimen honek ez du goi-mugako abiadurarik.

- 1.5. Hodi ez-porotsudun sistemetan, erabateko iturkuntza erregimena da nagusi, baina presio galerak gora egiten du abiaduren balio zehatz batetik aurrera. Puntu honetatik aurrera, aireak burbuila moduan zeharkatzen eraztungunea. Hortaz, konfigurazio mota honetan bi puntu karakteristikoko ezberdintzen dira: iturkuntzarako abiadura minimoa eta iturri-jariorako abiadura minimoa. Kasu honetan, ez dago erregimen ezegonkorrik.

Iturri bilgailuaren posizio optimoa jakiteko, ohantzearen gainazalaren eta bilgailuaren beheko zatiaren arteko distantzia (H_F) ezberdinen kurba karakteristikoa aztertu da.

- 1.6. H_F -ren mugako balioek baino ez dute eragiten iturkuntzarako abiadura minimoan. H_F -ren balio oso txikietan u_{ms} -k behera egiten du, eta H_F -ren balio handietan bilgailuak ez du iturria guztiz biltzen eta airearen abiadura handiagoa erabili behar da iturria biltzeko. Hodi ez-porotsudun sistemen kasuan, H_F -k ia ez du inolako eraginik, hodiak berak egonkortzen baitu sistema.
- 1.7. Airearen abiadura handitzean ohantzea hedatu egiten da, batez ere hoderik gabeko eta irekiduradun sistemetan. Hori dela eta, H_F -ren balio txikietan ohantzearen gainazala bilgailuraino igo daiteke eta sistema ezegonkortu (burbuilak sortzen baitira). H_F -ren balio handietan oster, airearen frakzio onargarriak bilgailua saihestu egiten du eta zuzenean irteten da erreaktoretik.
- 1.8. Aurreko bi puntuak kontuan izanik, H_F -ren balio optimoa $0.06 - 0.08 m$ artean dago hoderik gabeko eta irekiduradun sistemetan, eta hodi ez-porotsudun sistemetan oster, $0.04 - 0.06 m$ artean.

Faktore garrantzitsuenek (γ , H_0 eta D_F) konfigurazio bakoitzaren kurba karakteristikokoan duten eragina aztertu da F -ren balio optimoan ($0.06 m$).

- 1.9. Kurba karakteristikokoan gehien eragiten duen faktorea ohantze estatikoaren altuera (H_0) da. Aldagai honen balioa handitzean presio galeraren balioak gora egiten du airearen abiaduraren balio guztietarako, eta iturkuntzarako abiadura minimoa zein beste puntu karakteristikoko guztien balioak ere handiagoak dira. Hortaz,

airearen abiaduraren eta presio galeraren balio handiagoetara desplazatzen da kurba karakteristikoa.

- 1.10. Kontaktorearen angeluak (γ) eta bilgailuaren diametroak (D_F) antzeko eragina dute. Hau da, kontaktorearen angelua handitzean eta bilgailuaren diametroa txikitzean, presio galeraren eta abiaduraren balioak gora egiten dute.

Faktore esanguratsuen eragina

Analisi estatistikoa egin da puntu karakteristikoetan gehien eragiten duten faktoreak ateratzeko. Analisiak partikula tamainaren, solidoaren dentsitatearen eta konfigurazioaren arabera sailkatu egin dira.

- 2.1. Oro har, iturkuntzarako abiadura minimoan (u_{ms}) gehien eragiten duten faktoreak ohandze estatikoaren altuera (H_0), partikula tamaina (d_p) eta sarrerako diametroa (D_0) dira. Gainera, zenbat eta H_0 eta d_p handiago diren eta D_0 txikiago den, u_{ms} abiadura handiagoa da.
- 2.1.1. Hodirik gabeko sistemetan bilgailuaren diametroa (D_F) da faktore esanguratsua eta bere balioa handitzean u_{ms} -ren balioa txikiagoa da.
- 2.1.2. Irekiduradun hodiadun sistemetan hodiaren faktore geometrikoak (IP eta D_T) dute eraginik handiena iturkuntzarako abiadura minimoan, eta azken honek gora egiten du aipaturako faktoreen balioa handitzean.
- 2.1.3. Hodi ez-porotsudun sistemetan kontaktorearen angelua (γ) eta hanken altuera (L_H) dira faktore esanguratsuak, eta behar den u_{ms} abiadura handiagoa da γ txikitzean eta L_H handitzean.
- 2.2. Erabateko iturkuntzarako abiaduraren (u_{fs}) balioa handiagoa da irekiduradun hodia duten sistemetan eta hodorik gabekoetan sarrerako diametroaren (D_0) balioa txikiagoa eta hodiaren faktore geometrikoen (IP eta D_T) balioak handiagoak direnean.
- 2.3. Burbuilazko iturkuntzarako behar den abiadura (u_{bs}) handiagoa da kontaktorearen angeluaren (γ) balioa txikitzean eta ohandzearen altuera (H_0) eta partikula tamaina (d_p) handitzean hodorik gabeko sistemetan.
- 2.4. Orain arte aipaturiko faktore esanguratsuen balioa aldatzean, iturkuntzarako abiadura minimoan, erabateko iturkuntzarako abiaduran eta burbuilazko iturkuntzarako abiaduran eragiten dituzten aldaketek joera berdina dute konfigurazio ezberdinetan.

- 2.5. Hodi ez-porotsudun sistemetan, iturri-jariorako behar den abiadura minimoa (u_{sf}) handiagoa da kontaktorearen angelua (γ), hodiaren hanken altuera (L_H), bilgailuaren diametroa (D_F) eta sarrerako diametroa (D_0) handiago direnean.
- 2.6. Solidoen analisi estatistiko bateratuan, solidoaren dentsitatea (ρ_s) da faktore esanguratsuena, eta honen balioa handitzean lau puntu karakteristikoen abiaduren baltioak handiagoak dira.

Konfigurazioen arteko alderaketa operazio egonkorreko mugak

Konfigurazioa (erdiko hodi mota edo erdiko hoderik gabe) faktore bezala kontsideratuz, puntu karakteristikoen (u_{ms} , u_{fs} eta u_{bs}) azterketa estatistikoa egin da.

- 3.1. Iturkuntzarako abiadura minimoan gehien eragiten duten faktoreak erdiko hodi mota, ohandze estatikoaren altuera (H_0) eta partikula tamaina (d_p) dira. Faktore hauen balioa handitzean iturkuntzarako behar den abiadura minimoa handiagoa da. Bestalde, konfigurazio motak alderatuz, hoderik gabeko sistemek dute iturkuntzarako abiadura minimo handiena eta hodi ez-porotsudunek txikiena, irekiduradun sistemak izanik tarteko baltioak dituztenak.
- 3.2. Sarrerako diametroa (D_0) izan da erabateko iturkuntzarako abiaduran gehien eragiten duen faktorea. Faktore honen balioa handitzean, abiaduraren balioa txikiagoa da. Bestalde, hoderik gabeko sistemek irekidura dutenak baino abiadura handiagoa behar dute erabateko iturkuntzarako.
- 3.3. Burbuilazko iturkuntzarako abiadura handiagoa behar da kontaktorearen angelua (γ) eta ohandze estatikoaren altuera (H_0) handiagoa denean. Bestalde, irekiduradun sistemek hoderik gabekoek baino burbuilazko iturkuntzarako abiadura handiagoa behar dute.
- 3.4. Solido ezberdinen azterketa estatistiko bateratuan, solidoaren dentsitatea (ρ_s) da faktore esanguratsuena, eta hiru puntu karakteristikoei dagozkien abiaduren baltioak handiago dira solidoa dentsuagoa denean.

Azkenik, ikerketa hidrodinamikoan eta sistemen funtzionamenduan oinarriturik, iturri bilgailuak eta erdiko hodiak hidrodinamikan eta funtzionamenduan duten eragina aztertu da eta operazio mugak ezarri dira.

- 3.5. Hoderik gabeko sistemak dira operazio egonkorreko tarte estuenak dituztenak. Aldiz, hodi ez-porotsudun sistemek dute operazio egonkorren tarte zabalena,

azterturiko aire abiaduraren tarte osoan opera baitaiteke beraiekin. Azkenik, irekiduradun hodia duten sistemek tarteko joera dute, hots, airearen abiadura tarte zabalean operatzen daiteke beraiekin erregimena egonkorra eta zurrunbilotsua dela.

- 3.6. Hodirik gabeko sistemak harearekin erabiliz, partikula handienez osoturiko frakzioarekin baino ez da lortu ohantze sakonak egonkortzea. Zerrautsa erabiliz ere egoera egonkorrean opera daiteke, partikula tamaina harearena baino handiagoa baita. Kasu hauetaz gain, hodirik gabeko sistemetan ezin izan da egoera egonkorrean operatu angelu txikiko kontaktoreetan (28°), ez baita iturgune egonkorrik eratu.
- 3.7. Irekiduradun hodia duten sistemak egonkorrago dira zenbat eta kontaktorearen angelua eta bilgailuaren diametroa handiago den. Ohantze estatikoaren altueraren kasuan, faktore honen balioa handitzean kurba karakteristikoa airearen abiaduraren eta presio galeraren balio handiagoetara lerratzen da. Azkenik, irekidura portzentaiaren eragina ez da oso garrantzitsua iturkuntzarako abiadura minimoan, baina zenbat eta IP ren balioa txikiagoa den sistema egonkorrago da.
- 3.8. Iturri bilgailua erabiliz, konfigurazio guztiak eskalatu daitezke. Eraikuntza aldetik sinpleena hodirik gabeko sistemak dira, baina iturkuntzarako abiadura handiena eta operazio tarte txikieneko konfigurazioak dira. Beraz, materia eta bero transferentzia handia behar den operazioetarako, hots, lehorketarako, irekiduradun sistemak dira egokienak, gas-solido kontaktu indartsua baimentzeaz gain, operazio tarte egonkor zabala ziurtatzen baitute. Hala ere, erreakzio azkarretarako edo egoitza denbora laburra behar duten aplikazioetarako (ultrapirolysa esaterako) hodi ez-porotsua duten sistemak dira egokiagoenak.

Iturkuntzarako abiadura monimoaren kalkulurako korrelazio empirikoak

Azterketa estatistikoa eta dimentsionala (π -ren teorema) aplikatuz, konfigurazio bakoitzerako iturkuntzarako abiadura minimoa aurreratu duen korrelazio empirikoa proposatu da.

- 4.1. Bibliografian iturri ohantzeetarako garaturiko korrelazio empirikoak ez dira egokiak tesi honetan lorturiko emaitzak aurreratzeko, D_0/d_p erlazioa askoz handiagoa delako eta iturri bilgailua erabili delako.
- 4.2. Konfigurazio guztietan, iturkuntzarako abiadura minimoan gehien eragiten duten faktoreak solidoaren propietateak (d_p eta ρ_s), ohantze estatikoaren altuera (H_0) eta sarrerako diametroa (D_0) dira. Hortaz, faktore hauek erlazionatzen dituzten

dimentsiorik gabeko moduluak (Ar , H_0/D_0) erabili dira proposaturiko korrelazio guztietan. Modu berean, H_F -k sortu dezakeen estratifikazio efektua murrizteko, iturri bilgailuaren faktore geometrikoak erlazionatzen dituen modulua (H_F/D_F) sartu da hoderik gabe eta irekiduradun hodia duten sistemetarako proposaturiko korrelazioetan.

- 4.3. Hodirik gabeko sistemetan, bilgailuaren diametroak (D_F) du eragin handia iturkuntzarako abiadura minimoan, eta ohandze estatikoaren altuerarekin erlazionatutako modulua (H_0/D_F) erabili da korrelazioa osatzeko:

$$(Re_0)_{ms} = 0.25Ar^{0.5} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{1.15} \left(\frac{H_0}{D_F}\right) \left(\frac{H_F}{D_F}\right)^{0.04} \quad (6.1)$$

- 4.4. Irekiduradun hodia duten sistemetan aldiz, hodiaren faktore geometrikoek (IP eta D_T) eragin handia dute iturkuntzarako abiadura minimoan eta, hortaz, hodiaren faktore geometrikoak erlazionatzen dituen (A_0/A_T) dimentsiorik gabeko modulua erabili da korrelazioa eraikitzeke:

$$(Re_0)_{ms} = 0.43Ar^{0.5} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{0.9} \left(\frac{H_F}{D_F}\right)^{0.03} \left(\frac{A_0}{A_T}\right)^{0.2} \quad (6.2)$$

- 4.5. Azkenik, hodi ez-porotsudun sistemetan, kontaktorearen angelua (γ) eta hodiaren hanken altuerak (L_H) dute eragin handia iturkuntzarako abiadura minimoan. Baina kasu honetan H_F -k eragin txikia duenez, L_H/D_F modulua erabili da ekuaizioa eraikitzeke:

$$(Re_0)_{ms} = 0.23Ar^{0.5} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{0.8} \left(\frac{L_H}{D_F}\right)^{0.05} \left(\tan\frac{\gamma}{2}\right)^{-0.5} \quad (6.3)$$

Abiadura handiko sistema optikoa erabiliz lorturiko emaitzak

Abiadura handiko kamera erabiliz, irudien bidezko partikulen jarraipena egin da iturri ohandzearen gune ezberdinetan partikulen abiadura neurtzeko. Hala, PIV metodo intrusiboa erabili da.

- 5.1. Iturri ohandzearen gune guztietan partikulek mugimendu oszilakorra dute, hau da, sistemak pultsoen bidezko funtzionamendu jarraian operatzen du. Hau da, iturgunean partikulak gora eta behera egiten dute, baina mugimendu netoa goranzkoa da. Hala ere, eraztunguneko solidoek dute mugimendu oszilakor bereizgarriena. Hodirik gabeko eta irekiduradun hodia duten sistemetako solidoek mugimendu gorakorra (abiadura positiboa) eta beherakorra (abiadura negatiboa)

- dute eraztunguneko puntu guztietan, baina hodi ez-porotsudun sistemakoek osterera, beherakorra baino ez.
- 5.2. Eraztunguneko profil erradialean, solidoaren abiadura neto negatiboa handiagoa da kontaktorearen paretatik urruntzean eta maximoa da eraztunguneko erdi aldean. Ardatz axialera hurbildu ahala txikiagoa da harik eta faseartean zero izan arte. Hodirik gabeko sistemek dituzte abiaduraren balio handienak eta hodi ez-porotsudun sistemek osterera, txikienak. Eragin hau iturgunetik eraztungunera barneratzen den aire emariari lotuta dago.
 - 5.3. Konfigurazio guztietan, ardatz axialera hurbildu ahala iturguneko profil erradialeko solidoen abiadura neto positiboak gora egiten du. Kasu honetan, hodirik gabeko sistemetako partikulek dute abiadurarik handiena, eta irekiduradun hodia duten sistemakoek txikiena. Izan ere, hodirik gabeko zein hodi ez-porotsudun sistemek iturri altuak dituzten bitartean, irekiduradun sistemek baxuagoak eta zabalagoak dituzte. Hori dela eta, azken sistema hauek dituzte solidoen abiadura txikienak, baina baita profil zabalena ere.
 - 5.4. Iturrian lorturiko profil erradialen zabalera bilgailuaren diametroak mugatzen du, eta abiadura txikiagoa da periferian (abiadura neto negatiboa) eta handiagoa nukleoan (abiadura neto positiboa). Oro har, periferiako solidoek antzeko abiadura dute hiru konfigurazioetan, baina, aurreko puntuan aipatu bezala, irekiduradun hodia duten sistemek duten iturri zabala dela eta, nukleoan abiadura txikiena dute.
 - 5.5. Gune diluituetako profil erradialetan, solidoaren abiadura maximoa ez dago ardatz axialean, ardatzaren inguruan baizik. Joera hau airearen hedapenarekin lotuta dago.
 - 5.6. Oro har, iturri ohantzeko partikulak azeleratu egiten dira iturgunean zehar eta goiko iturrian sartu ostean dezeleratu egiten dira abiadura nulua izan arte. Zenbait baldintzetan, dezelerazioa iturgunearen bukaeran (iturkuntzarako abiadura minimoko operazioetan) edo iturriaren hasieratik zentimetro batzuetara (airearen abiadura handietan) gertatzen da. Bestalde, azelerazio handiena iturgunearen lehenengo zentimetroetan gertatzen da. Kasu honetan ere, hodirik gabeko sistemetako partikulek dute abiadura handiena eta irekiduradun sistemakoek osterera, txikiena.
 - 5.7. Hodirik gabeko sistemetan, iturgune/eraztungune eta iturriaren nukleo/periferia interfasea zabalagoa da zenbat eta ohantzean altuago, zabalkuntza alturaren

proporzionala baita. Irekiduradun hodia duten sistemetan osterera, iturgune/eraztungune interfaseak hedapen txikia du ohantzearen beheko erdialdean, baina goiko erdialdean hedapen handia du. Azkenik, hodi ez-porotsudun sistemetan, hodiak berak mugatzen du iturgune/eraztungune interfasea, baina iturriaren hasieran hedapena handia da.

- 5.8. Hodirik gabeko eta hodi ez-porotsudun sistemetan iturgunearen geometria zirkularra da, hau da, solidoaren abiaduraren profil erradiala ardatz axialarekiko simetrikoa da. Irekiduradun sistemetan osterera, iturgunea hodiaren aurpegi irekietatik hedatzen da eta iturgunearen geometria hirusta itxurakoa da. Gainera, irekiduradun hodian irekidura portzentaiaren edo airearen abiaduraren arabera, iturguneak geometria triangeluarra ere hartzen du.
- 5.9. Airearen abiadura handiak erabiliz, gune diluituetako solidoen abiadura handia da, baina iturriaren periferiako solidoen abiaduran ez dago aldaketa handirik. Kontaktorearen paretatik hurbil jaisten diren eraztunguneko partikulen abiadura ere handiagoa da airearen abiadura handiagoa denean. Iturguneari dagokionez, zabalagoa da zenbat eta abiadura handiago den.
- 5.10. Partikula tamaina edo solidoaren dentsitatea handitzean, solidoen abiadura handiagoa da gune dentsoan eta txikiagoa gune diluituetan. Hala ere, ezberdintasuna ez da nabarmena partikula tamaina ezberdinen profil axialean.

NOMENKLATURA

\bar{a}	Batezbesteko partikulen azelerazioa, LT^{-2} .
A_0, A_T	Hodiaren gainazalera irekia eta gainazalera totala, L^2 .
Ar	Arquimedes-en zenbakia.
C	Korrelazio gurutzatuaren parametro estatistikoa.
CFD	Ordenagailu bidezko jariakinen dinamika.
CT	Ordenagailu bidezko tomografia.
d, \bar{d}	Distantzia eta batezbesteko distantzia, L .
D_b, D_C, D_i, D_0	Ohantzearen gainazaleko diametroa, zati zilindrikoaren diametroa, kontaktorearean oinarriaren diametroa eta gasaren sarrerako diametroa, L .
D_F	Iturri bilgailuaren diametroa, L .
d_p	Partikularen diametroa, L .
D_T	Erdiko hodiaren diametroa, L .
$ECVT$	Kapazitantzia elektrikoaren tomografia.
EH	Erdiko hodia.
EHF	Minimizatu behar den errorearen helburu funtzioa.
F	Fisher-Snedecor-en F banaketa.
FFT	Fourier-en transformatu azkarra.
g	Azelerazio grabitazionala, $L^2 T$.
gl_T, gl_E, gl_F, gl_I	Askatasun graduen kopuru totala, errorearen, faktore bakoitzaren eta interakzioen askatasun graduak.
H	Azterturiko altuera, L .
H_0	Ohantze estatikoaren altuera, L .
H_C	Kontaktorearen zati konikoaren altuera, L .
H_F	Ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren arteko distantzia, L .

h_{r0}	Erdiaren goiko zatiaren eta kontaktorearen oinarriaren arteko distantzia, L .
HS, HEP	Hodirik gabe eta hodi ez-porotsuz osaturiko sistemak.
I	Galdera-leihoaren argi intentsitatearen distribuzioa.
IH	Irekiduradun hodiz osaturiko sistemak.
IP	Irekiduradun hodien irekidura portzentaia, %.
k_1, k_2	Proporzionaltasun konstanteak, T^{-1} .
l_d	Hodi ez-porotsuen gorputzaren luzera, L .
L_F	Iturri bilgailuaren luzera, L .
L_H, L_T	Hodi ez-porotsuen hanken luzera eta hodien luzera totala, L .
MS, MS_E, MS_F	Karratuen batesbestekoa, errorearen karratuen batezbestekoa eta faktoreen karratuen batezbestekoa.
MSE	Karratuen batezbestekoa.
N	Datu kopurua.
$PEPT$	Positroi igorpena.
PIV	Irudi bidezko partikulen abiaduraren neurketa.
Q, Q_{ms}	Emaria eta iturkuntzarako emari minimoa, $L^3 T^{-1}$.
R	Erregresio koefizientea.
$Re, (Re_0)_{ms}$	Reynolds-en zenbakia eta gasaren sarrerako diametroari erreferituriko iturkuntzarako abiadura minimorako Reynolds-en zenbakia.
RGB	Koloredun kamera.
Se	Disko itxurako filtro matrizea.
SS_E, SS_F, SS_I, SS_T	Erroreen karratuen batura, faktore bakoitzari dagokion karratuen batura, faktoreen arteko interakzioen karratuen batura eta karratuen batura totala.
SSE	Errore karratuen batura.

T	Matrize simetriko positibo erdi definitua.
t	Denbora, T .
$u, u_0, u_{ms}, u_{fs}, u_{bs}, u_{sf}, u_{mf}, u_t$	Airearen abiadura, gasaren sarrerako diametroari erreferituriko abiadura, gasaren sarrerako diametroari erreferituriko iturkuntzarako abiadura minimoa, erabateko iturkuntzarako abiadura, burbuilazko iturkuntzarako abiadura, iturri-jario iturkuntzarako abiadura, fluidizazio abiadura minimoa eta abiadura terminala, LT^{-1} .
v, \bar{v}	Partikularen abiadura eta batezbesteko partikularen abiadura, LT^{-1} .
V_0, V_r	Ohantze estatikoaren eta erdiko hodiaren bolumena, L^3 .
z	Zutabe karratuaren aldearen luzera, L .
Hizki grekoak	
β	Seinalearen alde positibo eta negatiboaren arteko negatiboa ez den pisua.
$\Delta P_O, \Delta P_T, \Delta P_H, \Delta P_M, \Delta P_S$	Ohantzearen, sistema osoaren, kontaktore hutseko presio galera, presio galera maximoa eta egonkorra, $ML^{-1}T^{-1}$.
Δt	Denbora aldaketa, T .
$\Delta x, \Delta y$	Irudiko posizio horizontal eta bertikaleko aldaketa, L .
γ	Kontaktorearen konoaren angelua, $^\circ$.
μ_g	Gasaren biskositatea, MLT^{-1} .
ϕ	Esferizitatea.
ρ_g, ρ_s	Gasaren eta solidoaren dentsitateak, ML^{-3} .
σ	Gauss filtroaren desbideraketa estandarra.
$\varepsilon, \varepsilon_{ms}$	Ohantzearen porotasuna eta iturkuntza minimorako porotasuna.
φ	$\varphi = \frac{(h_{r0} - H_0)}{L_T}$.

BIBLIOGRAFIA

- [1] I. D. Abdelrazek. *An analysis of thermo-chemical deposition in spouted beds*. Doktorego tesia, Univ. of Tennessee, Knoxville, 1969.
- [2] P. Abdul Salam, S. Bhattacharya. A comparative study of charcoal gasification in two types of spouted bed reactors. *Energy*, 31(2-3):228–243, feb 2006.
- [3] A. Adegoroye, N. Paterson, X. Li, T. Morgan, A. Herod, D. Dugwell, R. Kandiyoti. The characterisation of tars produced during the gasification of sewage sludge in a spouted bed reactor. *Fuel*, 83(14-15):1949–1960, oct 2004.
- [4] R. Aguado, S. Alvarez, M. J. San José, M. Olazar, J. Bilbao. Gas flow distribution modelling in conical spouted beds. *Computer Aided Chemical Engineering*, 20(C):613–618, 2005.
- [5] R. Aguado, G. Elordi, A. Arrizabalaga, M. Artetxe, J. Bilbao, M. Olazar. Principal component analysis for kinetic scheme proposal in the thermal pyrolysis of waste HDPE plastics. *Chemical Engineering Journal*, 254:357–364, 2014.
- [6] M. Al-Dahhan, S. Aradhya, F. Zaid, N. Ali, T. Aljuwaya. Scale up and on-line monitoring of gas-solid systems using advanced and non invasive measurement techniques. *Procedia Engineering*, 83:469–476, 2014.
- [7] M. Al-Dahhan, S. Aradhya, H. Taofeeq. Prediction of spout diameter in gas-solid spouted beds using factorial design of experiments approach with the aid of advanced optical fibre probe. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 95(8):1463–1470, 2017.
- [8] T. Al-Juwaya, N. Ali, M. Al-Dahhan. Investigation of cross-sectional gas-solid distributions in spouted beds using advanced non-invasive gamma-ray computed tomography (CT). *Experimental Thermal and Fluid Science*, 86:37–53, sep 2017.
- [9] T. Al-Juwaya, N. Ali, M. Al-Dahhan. Investigation of hydrodynamics of binary solids mixture spouted beds using radioactive particle tracking (RPT) technique. *Chemical Engineering Research and Design*, 148:21–44, 2019.
- [10] D. Albina. Emissions from multiple-spouted and spout-fluid fluidized beds using rice husks as fuel. *Renewable Energy*, 31(13):2152–2163, 2006.
- [11] I. K. Alghurabie, B. O. Hasan, B. Jackson, A. Kosminski, P. J. Ashman. Fluidized bed gasification of Kingston coal and marine microalgae in a spouted bed reactor. *Chemical Engineering Research and Design*, 91(9):1614–1624, sep 2013.

- [12] N. Ali, T. Al-Juwaya, M. Al-Dahhan. Demonstrating the non-similarity in local holdups of spouted beds obtained by CT with scale-up methodology based on dimensionless groups. *Journal of Mathematical Psychology*, 59:129–141, 2016.
- [13] N. Ali, T. Al-Juwaya, M. Al-Dahhan. An advanced evaluation of spouted beds scale-up for coating TRISO nuclear fuel particles using Radioactive Particle Tracking (RPT). *Experimental Thermal and Fluid Science*, 80:90–104, 2017.
- [14] N. Ali, T. Al-Juwaya, M. Al-Dahhan. An advanced evaluation of the mechanistic scale-up methodology of gas–solid spouted beds using radioactive particle tracking. *Particuology*, 34:48–60, 2017.
- [15] N. Ali, T. Aljuwaya, M. Al-Dahhan. Evaluating the new mechanistic scale-up methodology of gas-solid spouted beds using gamma ray computed tomography (CT). *Experimental Thermal and Fluid Science*, 104(January 2018):186–198, 2019.
- [16] A. R. F. Almeida, F. B. Freire, J. T. Freire. Transient Analysis of Pasty Material Drying in a Spouted Bed of Inert Particles. *Drying Technology*, 28(3):330–340, 2010.
- [17] H. Altzibar. *Ikasketa amaierako proiektua*. Doktorego tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea EHU/UPV, 2004.
- [18] H. Altzibar, G. Lopez, S. Alvarez, M. J. San José, A. Barona, M. Olazar. A draft-tube conical spouted bed for drying fine particles. *Drying Technology*, 26(3):308–314, 2008.
- [19] H. Altzibar, G. Lopez, R. Aguado, S. Alvarez, M. J. San José, M. Olazar. Hydrodynamics of conical spouted beds using different types of internal devices. *Chemical Engineering and Technology*, 32(3):463–469, 2009.
- [20] H. Altzibar. *Erdiko hodi ezberdinez hornituriko iturri ohandze konikoen ikerketa hidrodinamikoa eta beraien aplikazioa lehorketan*. Doktorego tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea EHU/UPV, 2011.
- [21] H. Altzibar, I. Estiati, M. Olazar. Influence of the geometric factors of conical contactors and draft tubes on the performance of draft tube conical spouted beds. *Chemical Engineering Transactions*, 32(2003):1543–1548, 2013.
- [22] H. Altzibar, G. Lopez, J. Bilbao, M. Olazar. Effect of draft tube geometry on pressure drop in draft tube conical spouted beds. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 91(11):1865–1870, 2013.

- [23] H. Altzibar, G. Lopez, J. Bilbao, M. Olazar. Minimum Spouting Velocity of Conical Spouted Beds Equipped with Draft Tubes of Different Configuration. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52:2995–3006, 2013.
- [24] H. Altzibar, G. Lopez, I. Estiati, J. Bilbao, M. Olazar. Particle cycle times and solid circulation rates in conical spouted beds with draft tubes of different configuration. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(45):15959–15967, 2013.
- [25] H. Altzibar, G. Lopez, J. Bilbao, M. Olazar. Operating and peak pressure drops in conical spouted beds equipped with draft tubes of different configuration. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53(1):415–427, 2014.
- [26] H. Altzibar, M. Tellabide, I. Estiati, M. Olazar. Effect of a device for retaining solids on the fountain height in the nonporous draft tube conical spouted bed. *Chemical Engineering Transactions*, 57, 2017.
- [27] H. Altzibar, I. Estiati, G. Lopez, J. F. Saldarriaga, R. Aguado, J. Bilbao, M. Olazar. Fountain confined conical spouted beds. *Powder Technology*, 312:334–346, 2017.
- [28] J. Alvarez, S. Kumagai, C. Wu, T. Yoshioka, J. Bilbao, M. Olazar, P. T. Williams. Hydrogen production from biomass and plastic mixtures by pyrolysis-gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(21):10883–10891, jul 2014.
- [29] J. Alvarez, G. Lopez, M. Amutio, J. Bilbao, M. Olazar. Bio-oil production from rice husk fast pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Fuel*, 128:162–169, jul 2014.
- [30] J. Alvarez, G. Lopez, M. Amutio, J. Bilbao, M. Olazar. Upgrading the rice husk char obtained by flash pyrolysis for the production of amorphous silica and high quality activated carbon. *Bioresource Technology*, 170:132–137, oct 2014.
- [31] J. Alvarez, G. Lopez, M. Amutio, J. Bilbao, M. Olazar. Kinetic study of carbon dioxide gasification of rice husk fast pyrolysis char. *Energy and Fuels*, 29(5):3198–3207, 2015.
- [32] J. Alvarez, G. Lopez, M. Amutio, M. Artetxe, I. Barbarias, A. Arregi, J. Bilbao, M. Olazar. Characterization of the bio-oil obtained by fast pyrolysis of sewage sludge in a conical spouted bed reactor. *Fuel Processing Technology*, 149:169–175, aug 2016.

- [33] S. Alvarez. *Flujo del Sólido en Spouted Beds Cónicos*. Doktorego tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU, 1997.
- [34] A. Amasorrain. *Ikasketa amaierako proiektua*. Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU, 2005.
- [35] M. Amutio, G. Lopez, R. Aguado, J. Bilbao, M. Olazar. Biomass oxidative flash pyrolysis: Autothermal operation, yields and product properties. *Energy and Fuels*, 26(2):1353–1362, 2012.
- [36] M. Z. Anabtawi. Minimum spouting velocity for binary mixture of particles in rectangular spouted beds. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 76(1):132–136, 1998.
- [37] S. Ando, T. Maki, T. Mizutani, N. Namiki, H. Emi, Y. Otani. Coating of Pharmaceutical Particles by Spouted Bed with a Draft Tube. Relationship between Coating Efficiency and Operating Conditions. *Journal of the Society of Powder Technology, Japan*, 37:572–579, 2000.
- [38] S. Ando, T. Maki, Y. Nakagawa. Analysis of the drying process of seed particles in a spouted. *Advanced Powder Technology*, 13(1):73–91, 2002.
- [39] M. Arabiourrutia, G. Lopez, G. Elordi, M. Olazar, R. Aguado, J. Bilbao. Characterization of the liquid obtained in tyre pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 5, 2007.
- [40] M. Arabiourrutia, M. Olazar, R. Aguado, G. López, A. Barona, J. Bilbao. HZSM-5 and HY zeolite catalyst performance in the pyrolysis of tires in a conical spouted bed reactor. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47(20):7600–7609, 2008.
- [41] M. Arabiourrutia, G. Elordi, G. Lopez, E. Borsella, J. Bilbao, M. Olazar. Characterization of the waxes obtained by the pyrolysis of polyolefin plastics in a conical spouted bed reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94:230–237, 2012.
- [42] S. Aradhya, H. Taofeeq, M. Al-Dahhan. A new mechanistic scale-up methodology for gas-solid spouted beds. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 110:146–159, 2016.
- [43] S. Aradhya, H. Taofeeq, M. Al-Dahhan. Flow regime identification in spouted beds using gamma-ray densitometry. *Flow Measurement and Instrumentation*, 55:67–72, 2017.

- [44] S. Aravinth, T. Murugesan. A general correlation for the minimum spouting velocity. *Bioprocess Engineering*, 16(5):289–293, 1997.
- [45] A. Arregi, I. Barbarias, J. Alvarez, A. Erkiaga, M. Artetxe, M. Amutio, M. Olazar. Hydrogen production from biomass pyrolysis and in-line catalytic steam reforming. *Chemical Engineering Transactions*, 43:547–552, 2015.
- [46] A. Arregi, G. Lopez, M. Amutio, I. Barbarias, J. Bilbao, M. Olazar. Hydrogen production from biomass by continuous fast pyrolysis and in-line steam reforming. *RSC Adv.*, 6(31):25975–25985, 2016.
- [47] Z. L. J. Arsenijevic, Z. B. Grbavčić, R. V. Garić-Grulović. Drying of Suspensions in the Draft Tube Spouted Bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 82(3):450–464, 2004.
- [48] M. Artetxe, G. Lopez, G. Elordi, M. Amutio, J. Bilbao, M. Olazar. Production of light olefins from polyethylene in a two-step process: Pyrolysis in a conical spouted bed and downstream high-temperature thermal cracking. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51(43):13915–13923, 2012.
- [49] M. Artetxe, G. Lopez, M. Amutio, G. Elordi, J. Bilbao, M. Olazar. Cracking of high density polyethylene pyrolysis waxes on HZSM-5 catalysts of different acidity. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(31):10637–10645, 2013.
- [50] M. Artetxe, G. Lopez, M. Amutio, J. Bilbao, M. Olazar. Kinetic modelling of the cracking of HDPE pyrolysis volatiles on a HZSM-5 zeolite based catalyst. *Chemical Engineering Science*, 116:635–644, 2014.
- [51] A. Atutxa, R. Aguado, A. G. Gayubo, M. Olazar, J. Bilbao. Kinetic description of the catalytic pyrolysis of biomass in a conical spouted bed reactor. *Energy and Fuels*, 19(3):765–774, 2005.
- [52] A. Atxutegi, M. Tellabide, G. Lopez, R. Aguado, J. Bilbao, M. Olazar. Implementation of a borescopic technique in a conical spouted bed for tracking spherical and irregular particles. *Chemical Engineering Journal*, 374(February):39–48, 2019.
- [53] M. Balasubramanian, A. Meisen, K. B. Mathur. Spouted bed collection of solid aerosols in the presence of electrical effects. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 56(3):297–303, 1978.

- [54] I. Barbarias, M. Artetxe, A. Arregi, J. Alvarez, G. Lopez, M. Amutio, M. Olazar. Catalytic cracking of HDPE pyrolysis volatiles over a spent FCC catalyst. *Chemical Engineering Transactions*, 43:2029–2034, 2015.
- [55] I. Barbarias, G. Lopez, J. Alvarez, M. Artetxe, A. Arregi, J. Bilbao, M. Olazar. A sequential process for hydrogen production based on continuous HDPE fast pyrolysis and in-line steam reforming. *Chemical Engineering Journal*, 296:191–198, jul 2016.
- [56] M. A. Barrozo, C. R. Duarte, N. Epstein, J. R. Grace, C. J. Lim. Experimental and computational fluid dynamics study of dense-phase, transition region, and dilute-phase spouting. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 49(11):5102–5109, 2010.
- [57] C. Beltramo, G. Rovero, G. Cavaglia. Hydrodynamic and thermal experimentation on square-based spouted beds for polymer upgrading and unit scale-up. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 87(3):394–402, 2009.
- [58] A. A. Belyaev. Gasification of low-grade fuels in a spouted bed for power generation. *Solid Fuel Chemistry*, 42(6):335–341, 2008.
- [59] M. Benali, M. Amazouz. Drying of vegetable starch solutions on inert particles: Quality and energy aspects. *Journal of Food Engineering*, 74(4):484–489, 2006.
- [60] A. Benkrid, H. S. Caram. Solid flow in the annular region of a spouted bed. *AIChE Journal*, 35(8):1328–1336, aug 1989.
- [61] J. Berghel. The Gas-to-Particle Heat Transfer and Hydrodynamics in Spouted Bed Drying of Sawdust. *Drying Technology*, 23(5):1027–1041, 2005.
- [62] J. Berghel, L. Nilsson, R. Renström. Particle mixing and residence time when drying sawdust in a continuous spouted bed. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(8):1252–1257, 2008.
- [63] D. Bernocco, B. Bosio, E. Arato. Feasibility study of a spouted bed gasification plant. *Chemical Engineering Research and Design*, 91(5):843–855, may 2013.
- [64] Y. F. Berquin. A new granulation process and its application in the field of fertilizer manufacture. *Genie Chim.*, 86:45, 1961.
- [65] Y. F. Berquin. Method and apparatus for granulating melted solid and hardenable fluid products, 1966.

- [66] R. Béttega, R. G. Corrêa, J. T. Freire. Scale up study of spouted beds using computational fluid dynamics. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 87(2):193–203, 2009.
- [67] H. T. Bi, A. Macchi, J. Chaouki, R. Legros. Minimum spouting velocity of conical spouted beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 75(2):460–465, apr 1997.
- [68] H. T. Bi. A Discussion on Minimum Spout Velocity and Jet Penetration Length. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 82(1):4–10, 2004.
- [69] M. Bieberle, F. Barthel. Combined phase distribution and particle velocity measurement in spout fluidized beds by ultrafast X-ray computed tomography. *Chemical Engineering Journal*, 285:218–227, 2016.
- [70] J. Bilbao, M. Olazar, A. Romero, J. M. Arandes. Design and operation of a jet spouted bed reactor with continuous catalyst feed in the benzyl alcohol polymerization. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 26(7):1297–1304, 1987.
- [71] J. Bilbao, M. Olazar, J. M. Arandes, A. Romero. Optimization of the operation in a reaction with continuous catalyst circulation in the gaseous benzyl alcohol polymerization. *Chemical Engineering Communications*, 75(1):121–134, 1989.
- [72] G. B. Borini, T. C. Andrade, L. A. P. Freitas. Hot melt granulation of coarse pharmaceutical powders in a spouted bed. *Powder Technology*, 189:520–527, 2009.
- [73] M. I. Boulos, B. Waldie. High Resolution Measurement of Particle Velocities in a Spouted Bed Using Laser-Doppler Anemometry. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 64(December):939–943, 1986.
- [74] M. Braga, S. Rocha. Secagem de pasta alimentícia em leito de jorro: Avaliação dos aspectos energéticos e produção. *Drying Technol*, pages 1454–1463, 2015.
- [75] J. Bridgwater. Spouted beds. In J. F. Davidson, R. Clift, and D. Harrison, editors, *Fluidization*, page 201. Academic Press, London, 1985.
- [76] R. L. Brown, J. C. Richards. *Principles of Powder Mechanics: Essays on the Packing and Flow of Powders and Bulk Solids*. International series of monographs on chemical engineering. Elsevier Science, 1970.

- [77] G. Brunello, G. D. Nina, F. C. S. Nunes, C. A. O. Nascimento. Minimum air requirement for spouting mixed particles. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 52(2):170–173, 1974.
- [78] R. H. Buchanan, B. Wilson. The Fluid-Lift Solids Recirculator. *Mech. Chem. Eng. Trans.*, 1:117–124, 1965.
- [79] M. Cassanello, F. Larachi, R. Legros, J. Chaouki. Solids dynamics from experimental trajectory time-series of a single particle motion in gas-spouted beds. *Chemical Engineering Science*, 54(13-14):2545–2554, 1999.
- [80] F. S. Castellana, B. A. Dudley. Imaging of particle motion in fluid-solid systems using a gamma camera. *Chemical Engineering Communications*, 29(1-6):113–123, 1984.
- [81] P. Chandnani, N. Epstein. Spoutability and spout destabilization of fine particles with a gas, 1986.
- [82] J. J. J. Chen, Y. W. Lam. On jet flow in porous media as related to the spouted bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 63(3):361–367, 1985.
- [83] W. Y. Chen, H. P. Kuo. Surface coating of group B iron powders in a spouted bed. *Procedia Engineering*, 102:1144–1149, 2015.
- [84] X. Chen, B. Ren, Y. Chen, W. Zhong, D. Chen, Y. Lu, B. Jin. Distribution of particle velocity in a conical cylindrical spouted bed. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 91(11):1762–1767, 2013.
- [85] Z. W. Chen. *Hydrodynamics, stability and scale-up of slot-rectangular spouted beds*. Doktorego tesia, University of British Columbia, 2007.
- [86] D. P. Chielle, D. A. Bertuol, L. Meili, E. H. Tanabe, G. L. Dotto. Spouted bed drying of papaya seeds for oil production. *LWT - Food Science and Technology*, 65:852–860, 2016.
- [87] M. Choi, A. Meisen. Shallow, Conical Spouted Beds. *Can. J. Chem. Eng.*, 70:916, 1992.
- [88] J. K. Claffin, A. G. Fane. Spouting with a porous draft-tube. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 61(3):356–363, 1983.
- [89] J. K. Claffin, A. G. Fane. Fluid mechanics, heat transfer and drying in spouted beds with draft tubes. In *Drying'84*, page 137, Washington, 1984. Hemisphere Publishing Corp.

- [90] N. A. Corrêa, F. B. Freire, R. G. Corrêa, J. T. F. Industrial Trials of Paste Drying in Spouted Beds Under QDMC. *Drying Technology*, 22(5):1087–1105, 2004.
- [91] M. Cortazar, J. Alvarez, G. Lopez, M. Amutio, L. Santamaria, J. Bilbao, M. Olazar. Role of temperature on gasification performance and tar composition in a fountain enhanced conical spouted bed reactor. *Energy Conversion and Management*, 171:1589–1597, 2018.
- [92] M. Cortazar, G. Lopez, J. Alvarez, M. Amutio, J. Bilbao, M. Olazar. Advantages of confining the fountain in a conical spouted bed reactor for biomass steam gasification. *Energy*, 153:455–463, 2018.
- [93] M. Cortazar, G. Lopez, J. Alvarez, M. Amutio, J. Bilbao, M. Olazar. Behaviour of primary catalysts in the biomass steam gasification in a fountain confined spouted bed. *Fuel*, 253:1446–1456, 2019.
- [94] F. G. Cunha, K. G. Santos, C. H. Ataíde, N. Epstein, M. A. S. Barrozo. Annatto powder production in a spouted bed: An experimental and CFD study. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 48(2):976–982, 2009.
- [95] R. L. Cunha, K. G. Maialle, F. C. Menegalli. Evaluation of the drying process in spouted bed and spout fluidized bed of xanthan gum: focus on product quality. *Powder Technology*, 107(3):234–242, feb 2000.
- [96] C. A. Da Rosa, J. T. Freire. Fluid dynamics analysis of a draft-tube continuous spouted bed with particles bottom feed using CFD. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 48(16):7813–7820, 2009.
- [97] G. S. da Rosa, S. C. dos Santos Rocha. Effect of process conditions on particle growth for spouted bed coating of urea. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(8):836–842, 2010.
- [98] O. L. S. de Alsina, M. M. de Almeida, J. M. Da Silva, L. F. Monteiro. Drying of fruits pieces in fixed and spouted bed. In M. P. Q. Delgado and A. G. Barbosa de Lima, editors, *Transport Phenomena and Drying of Solids and Particulate Material*, chapter 7, page 203. Springer, 2014.
- [99] S. Devahastin, A. S. Mujumdar. Some hydrodynamic and mixing characteristics of a pulsed spouted bed dryer. *Powder Technology*, 117(3):189–197, jun 2001.
- [100] M. A. Díaz. Doktorego tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU, 2017.

- [101] T. Djeridane, F. Larachi, D. Roy, J. Chaovki, R. Legros. Investigation of the mean and turbulent particle velocity fields in a spouted bed using radioactive particle tracking. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 76(2):190–195, apr 1998.
- [102] A. J. Dobson. *An Introduction to Generalized Linear Models*. Chapman & Hall/CRC Texts in Statistical Science. Taylor & Francis, 2. edizioa edition, 1991.
- [103] S. Du, Y. Sun, D. P. Gamliel, J. A. Valla, G. M. Bollas. Catalytic pyrolysis of miscanthus \times giganteus in a spouted bed reactor. *Bioresource Technology*, 169:188–197, oct 2014.
- [104] W. Du, X. Bao, J. Xu, W. Wei. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: Assessment of drag coefficient correlations. *Chemical Engineering Science*, 61(5):1401–1420, 2006.
- [105] W. Du, J. Xu, Y. Ji, W. Wei, X. Bao. Scale up relationships of spouted beds by solid stress analyses. *Powder Technology*, 192(3):273–278, 2009.
- [106] W. Du, L. Zhang, B. Zhang, S. Bao, J. Xu, W. Wei. Pressure drop and pressure fluctuations in spouted beds with binary mixtures of particles. *Powder Technology*, 276:134–143, 2015.
- [107] C. R. Duarte, M. Olazar, V. V. Murata, M. A. S. Barrozo. Numerical simulation and experimental study of fluid-particle flows in a spouted bed. *Powder Technology*, 188(3):195–205, 2009.
- [108] G. Elordi, M. Olazar, G. Lopez, M. Artetxe, J. Bilbao. Continuous polyolefin cracking on an HZSM-5 zeolite catalyst in a conical spouted bed reactor. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50(10):6061–6070, 2011.
- [109] G. Elordi, M. Olazar, P. Castaño, M. Artetxe, J. Bilbao. Polyethylene cracking on a spent FCC catalyst in a conical spouted bed. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51(43):14008–14017, 2012.
- [110] N. Epstein, J. R. Grace. *Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press, 2010.
- [111] A. Erkiaga, G. Lopez, M. Amutio, J. Bilbao, M. Olazar. Steam gasification of biomass in a conical spouted bed reactor with olivine and γ -alumina as primary catalysts. *Fuel Processing Technology*, 116:292–299, dec 2013.

- [112] A. Erkiaga, G. Lopez, M. Amutio, J. Bilbao, M. Olazar. Influence of operating conditions on the steam gasification of biomass in a conical spouted bed reactor. *Chemical Engineering Journal*, 237:259–267, feb 2014.
- [113] A. Erkiaga, G. Lopez, I. Barbarias, M. Artetxe, M. Amutio, J. Bilbao, M. Olazar. HDPE pyrolysis-steam reforming in a tandem spouted bed-fixed bed reactor for H_2 production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 116:34–41, 2015.
- [114] I. Estiati, M. Tellabide, H. Altzibar, M. Olazar. Cycle times study of different solids in draft tube conical spouted beds. *Chemical Engineering Transactions*, 39:48080, 2011.
- [115] I. Estiati, H. Altzibar, M. Olazar. Particle Cycle Times in Draft Tube Conical Spouted Beds. *Chemical Engineering Transactions*, 39:1669–1674, 2014.
- [116] I. Estiati, H. Altzibar, M. Tellabide, M. Olazar. Solid Cycle Times of Chickpeas in Draft Tube Conical Spouted Beds. *Chemical Engineering Transactions*, 43:787–792, 2015.
- [117] I. Estiati. *Ohantzea egonkortzeko gailuz hornituriko iturri ohantze konikoen hidrodinamika*. Doktorego tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU, 2017.
- [118] I. Estiati, H. Altzibar, M. Tellabide, M. Olazar. A new method to measure fine particle circulation rates in draft tube conical spouted beds. *Powder Technology*, 316, 2017.
- [119] I. Estiati, M. Tellabide, J. Saldarriaga, H. Altzibar, M. Olazar. Influence of the fountain confiner in a conical spouted bed dryer. *Powder Technology*, 356:193–199, aug 2019.
- [120] I. Estiati, M. Tellabide, J. F. Saldarriaga, H. Altzibar, M. Olazar. Fine particle entrainment in fountain confined conical spouted beds. *Powder Technology*, 344:278–285, 2019.
- [121] D. Evin, H. Gul, V. Tanyiildizi. Grain drying in a paraboloid-based spouted bed with and without draft tube. *Drying Technology*, 26(12):1577–1583, 2008.
- [122] S. Fakhimi, S. Sohrabi, D. Harrison. Entrance effects at a multi orifice distributor in gas fluidised beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 61(3):364–369, 1983.
- [123] A. G. Fane, R. A. Mitchell. Minimum spouting velocity of scaled up beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 62(3):437–439, 1984.

- [124] G. Farneback. *Polynomial expansion for orientation and motion estimation*. Doktorego tesia, Linkopings Universitet, 2002.
- [125] A. Fernandez-Akarregi, J. Makibar, G. Lopez, M. Amutio, M. Olazar. Design and operation of a conical spouted bed reactor pilot plant (25 kg/h) for biomass fast pyrolysis. *Fuel Processing Technology*, 112:48–56, 2013.
- [126] M. C. Ferreira, J. T. Freire. Fluid dynamics characterization of a pneumatic bed using a spouted bed type solid feeding system. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 70(5):905–909, 1992.
- [127] S. K. Foong, R. K. Barton, J. S. Ratcliffe. Characteristics of multiple spouted beds. *Chem. Eng. in Australia Insts. Engrs.*, 1:7–12, 1975.
- [128] F. B. Freire, A. Atxutegi, F. B. Freire, J. T. Freire, R. Aguado, M. Olazar. An adaptive lumped parameter cascade model for orange juice solid waste drying in spouted bed. *Drying Technology*, 35(5):577–584, 2017.
- [129] J. T. Freire, F. B. Freire, M. C. Ferreira, B. S. Nascimento. A Hybrid Lumped Parameter / Neural Network Model for Spouted Bed Drying of Pastes with Inert Particles A Hybrid Lumped Parameter / Neural Network Model for Spouted Bed Drying of Pastes with Inert Particles. *Drying Technology*, 30:1342–1353, 2012.
- [130] L. A. P. Freitas, O. M. Dogan, C. J. Lim, J. R. Grace, B. Luo. Hydrodynamics and stability of slot-rectangular spouted beds. Part II: Increasing bed thickness. *Chemical Engineering Communications*, 181(October 2014):243–258, 2000.
- [131] L. A. P. Freitas, J. T. Freire. Gas-to-particle heat transfer in the draft tube of a spouted bed. *Drying Technology*, 19(6):1065–1082, jun 2001.
- [132] L. A. P. Freitas, J. T. Freire. Heat transfer in a draft tube spouted bed with bottom solids feed. *Powder Technology*, 114(1-3):152–162, 2001.
- [133] H. Gao, X. Gong, G. Hu. Statistical and frequency analysis of pressure fluctuation in an annular spouted bed of coarse particles. *Powder Technology*, 317:216–223, 2017.
- [134] P. Gao, B. Yang, M. Gong, X. Ma. PIV measurement of the fluidized particles' velocity field in a cylindrical spouted bed. *Advanced Materials Research*, 560-561:632–636, 2012.
- [135] D. Geldart. Types of gas fluidization. *Powder Technology*, 7(5):285–292, 1973.
- [136] B. Ghosh. *Indian Chem. Engr.*, 7:16, 1965.

- [137] L. Godfroy, F. Larachi, G. Kennedy, B. Grandjean, J. Chaouki. On-line flow visualization in multiphase reactors using neural networks. *Applied Radiation and Isotopes*, 48(2):225–235, 1997.
- [138] S. Golshan, O. Yaman, M. Koksall, G. Kulah, R. Zarghami, N. Mostoufi. A new correlation for minimum spouting velocity for conical spouted beds operating with high density particles. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 96(October 2017):358–370, 2018.
- [139] A. Goltsiker. Doktorego tesia, Lensovet Techology Institute, Leningrad, Errusia, 1967.
- [140] A. E. Gorshtein, I. P. Mukhlenov. Critical Speed of Gas Corresponding to the Beginning of Spouting. *Zh. Prikl. Khim.*, 37(9):1887–1893, 1964.
- [141] B. Grbavčić, D. V. Vuković, F. K. Zdanski, H. Littman. Fluid flow pattern, minimum spouting velocity and pressure drop in spouted beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 54(1-2):33–42, 1976.
- [142] O. Gryczka, S. Heinrich, V. Miteva, N. G. Deen, J. A. M. Kuipers, M. Jacob, L. Morl. Characterization of the pneumatic behavior of a novel spouted bed apparatus with two adjustable gas inlets. *Chemical Engineering Science*, 63(3):791–814, 2008.
- [143] H. Hao, H. Guoxin, W. Fengchao. Experimental study on particles mixing in an annular spouted bed. *Energy Conversion and Management*, 49(2):257–266, 2008.
- [144] S. Hatano, N. Nakamura, N. Kobayashi, Y. Itaya. *J. Chin. Inst. Chem. Eng.*, 36:61, 2005.
- [145] Y. Hatate, H. Mihara, M. Ijichi, T. Yoshimi, S. Arimizu, Y. Uemura, D. King. Catalytic coal gasification using a draft tube spouted bed gasifier. *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 22(5), 1996.
- [146] Y. Hatate, K. Ijichi, Y. Uemura. Flow Characteristics of Draft Tube Spouted Bed and Its Application. *Soc. Powder Technol.*, 34:343, 1997.
- [147] H. Hattori, K. Takeda. Modified spouted-beds-with the gas outlet located in the side wall surrounding the annular dense bed. *Journal of the Faculty of Textile Science and Technology*, 70:1–13, 1976.
- [148] H. Hattori, K. Takeda. Side-outlet spouted bed with inner draft- tube for small-sized solid particles. *Journal of Chemical engineering of Japan*, 11(2):125–129, 1978.

- [149] H. Hattori, K. Tanaka, K. Takeda. Minimum spoutable gas flow rate in side-outlet spouted bed with inner. *Journal of Chemical engineering of Japan*, 14:462–466, 1981.
- [150] H. Hattori, A. Kobayashii, I. Aiba, T. Koda. Modification of the gas outlet structure on the spouted bed with inner draft-tube. *Journal of Chemical engineering of Japan*, 17:102–103, 1984.
- [151] H. Hattori, T. Nagai. Spouted bed with a draft-tube without gas inlet nozzle or orifice. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 29(3):484–487, 1996.
- [152] H. Hattori, T. Nagai, Y. Ohshima, M. Yoshida, A. Nagata. Solids circulation rate in screen-bottomed spouted bed with draft-tube. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 31(4):633–635, 1998.
- [153] H. Hattori, T. Morimoto, M. Yamaguchi, T. Onezawa, C. Arai. Drying of porous solid particles in various-shaped spouted bed with a draft-tube. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 34(12):1549–1552, 2001.
- [154] H. Hattori, S. Ito, T. Onezawa, K. Yamada, S. Yanai. Fluid and Solids Flow Affecting the Solids Circulation Rate in Spouted Beds with a Draft-Tube. *Journal of chemical engineering of Japan*, 37(9):1085–1091, 2004.
- [155] Y. L. He, C. J. Lim, J. R. Grace. Spouted bed and spout-fluid bed behaviour in a column of diameter 0.91 m. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 70(5):848–857, 1992.
- [156] Y. L. He, C. J. Lim, J. R. Grace, J. X. Zhu, S. Z. Qzn. Measurements of voidage profiles in spouted beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 72(2):229–234, 1994.
- [157] Y. L. He, S. Z. Qin, C. J. Lim, J. R. Grace. Particle velocity profiles and solid flow patterns in spouted beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 72(4):561–568, aug 1994.
- [158] Y. L. He, C. J. Lim, J. R. Grace. Scale up studies of spouted beds. *Chemical Engineering Science*, 52(2):329–339, 1997.
- [159] A. L. He, C. J. Lim, J. R. Grace, S.-Z. Qin. Spout diameters in full and half spouted beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 76(4):702–706, aug 1998.

- [160] Y. L. He, C. Lim, J. Grace. Pressure gradients, voidage and gas flow in the annulus of spouted beds. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 78(1):161–167, 2000.
- [161] P. M. Heertjes, G. K. Khoe. Advances in Spouted Bed Technology. *Chemie Ingenieur Technik*, 52(4):333–336, 1980.
- [162] S. H. Hosseini, G. Ahmadi, B. Saeedi Razavi, W. Zhong. Computational Fluid Dynamic Simulation of Hydrodynamic Behavior in a Two-Dimensional Conical Spouted Bed. *Energy & Fuels*, 24(11):6086–6098, nov 2010.
- [163] S. H. Hosseini, G. Ahmadi, M. Olazar. CFD study of particle velocity profiles inside a draft tube in a cylindrical spouted bed with conical base. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45(5):2140–2149, 2014.
- [164] S. H. Hosseini, M. Zivdar, R. Rahimi. CFD simulation of gas-solid flow in a spouted bed with a non-porous draft tube. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48(11-12):1539–1548, 2009.
- [165] G. Hu, X. Gong, B. Wei, Y. Li. Flow patterns and transitions of a novel annular spouted bed with multiple air nozzles. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47(23):9759–9766, 2008.
- [166] C. C. Huang, C. S. Chyang. Multiple Spouts in a Two-Dimensional Bed with a Perforated-Plate Distributor. *Journal of chemical engineering of Japan*, 26(6):607–614, 1993.
- [167] L. Huilin, H. Yurong, L. Wentie, J. Ding, D. Gidaspow, J. Bouillard. Computer simulations of gas–solid flow in spouted beds using kinetic–frictional stress model of granular flow. *Chemical Engineering Science*, 59(4):865–878, feb 2004.
- [168] A. V. Iammartino. Cement’s changing scene. *Chem. Eng.*, 81:102–104, 1974.
- [169] K. Ijichi, M. Miyauchi, Y. Uemura, Y. Hatate. Characteristics of Flow Behavior in Semi-Cylindrical Spouted Bed with Draft Tube. *Journal of chemical engineering of Japan*, 31(5):677–682, 1998.
- [170] K. Ijichi, Y. Uemura, Y. Hatate. *Chem. Eng. Jpn.*, 33:526, 2000.
- [171] T. Ishikura, H. Nagashima, M. Ide. Hydrodynamics of a Spouted Bed with a Porous Draft Tube. *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 22(3):615–621, 1996.
- [172] T. Ishikura, H. Nagashima, M. Ide. Hydrodynamics of a spouted bed with a porous draft tube containing a small amount of finer particles. *Powder Technology*, 131(1):56–65, 2003.

- [173] M. A. Izquierdo. *Caracterización del Lecho y Trayectorias del Sólido en Spouted Beds Cilíndricos*. Doktorego tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU, 1998.
- [174] M. Jacob, E. Piskova, L. Mörl, G. Krueger, S. Heinrich, M. Peglow, K. H. Ruempler. Spouted Bed Technology: Characterization of the Fluidization Behaviour and Studies for Coating Granulation and Agglomeration. *World Congress of Chemical Engineering, 7th*, 7:10–14, 2005.
- [175] R. S. Jeng, E. R. Altwicker, M. H. Morgan III, R. D. Wilk. Propane combustion in a spouted bed combustor II: a modeling study in the bed region. *Combustion science and technol*, 170:119–149, 2001.
- [176] H. Ji, A. Tsutsumi, K. Yoshida. Characteristics of Particle Circulation in a Spouted Bed With a Draft Tube. *AIChE J.*, 137:131–135, 1997.
- [177] H. Ji, A. Tsutsumi, K. Yoshida. Solid Circulation in a Spouted Bed With a Draft Tube. *Chem. Eng. Jpn.*, 31:842–845, 1998.
- [178] W. Jittanit, G. Srzednicki, R. H. Driscoll. Comparison Between Fluidized Bed and Spouted Bed Drying for Seeds. *Drying Technology*, 31(1):52–56, 2013.
- [179] K. Jono, H. Ichikawa, M. Miyamoto, Y. Fukumori. A review of particulate design for pharmaceutical powders and their production by spouted bed coating. *Powder Technology*, 113(3):269–277, 2000.
- [180] R. Jumah, E. Al-Kteimat, A. Al-Hamad, E. Telfah. Constant and Intermittent Drying Characteristics of Olive Cake. *Drying Technology*, 25:1417–1422, 2007.
- [181] R. Y. Jurnah, A. S. Mujumdar, G. S. V. Raghavan. A Mathematical Model for Constant and Intermittent Batch Drying of Grains in a Novel Rotating Jet Spouted bed. *Drying Technology*, 14(3-4):765–802, 1996.
- [182] M. I. Kalwar, G. S. V. Raghavan, A. S. Mujumdar. Circulation of particles in two-dimensional spouted beds with draft plates. *Powder Technology*, 77(3):233–242, 1993.
- [183] S. Karlsson, I. Niklasson Bjorn, S. Folestad, and A. Rasmuson. Measurement of the particle movement in the fountain region of a Wurster type bed. *Powder Technology*, 165(1):22–29, 2006.
- [184] T. Kawaguchi. MRI measurement of granular flows and fluid-particle flows. *Advanced Powder Technology*, 21(3):235–241, 2010.

- [185] P. N. Kechagiopoulos, S. S. Voutetakis, I. A. Vasalos. Sustainable hydrogen production via reforming of ethylene glycol using a novel spouted bed reactor. *Catalysis Today*, 127(1-4):246–255, sep 2007.
- [186] P. N. Kechagiopoulos, S. S. Voutetakis, A. A. Lemonidou, I. A. Vasalos. Hydrogen Production via Reforming of the Aqueous Phase of Bio-Oil over Ni/Olivine Catalysts in a Spouted Bed Reactor. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(3):1400–1408, feb 2009.
- [187] C. R. Kfuri, L. A. P. Freitas. A comparative study of spouted and spout-fluid beds for tablet coating. *Drying Technology*, 23(12):2369–2387, 2005.
- [188] A. Khintchine. Korrelationstheorie der stationären stochastischen Prozesse. *Mathematische Annalen*, 109(1):604–615, 1934.
- [189] G. K. Khoe, J. Van Brakel. Drying characteristics of a draft tube spouted bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 61(3):411–418, 1983.
- [190] G. K. Khoe, S. L. Sun, C. J. Lim, N. Epstein. *10th Int. Conf. Chem. Eng. (CHISA)*, E5(17), 1990.
- [191] M. Kiani, M. R. Rahimi, S. H. Hosseini, G. Ahmadi. Mixing and segregation of solid particles in a conical spouted bed: Effect of particle size and density. *Particuology*, 32:132–140, 2017.
- [192] A. Kmiec. Expansion of solid-gas spouted beds. *The Chemical Engineering Journal*, 13(2):143–147, 1977.
- [193] A. Kmiec. The minimum spouting velocity in conical beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 61(3):274–280, 1983.
- [194] A. Kmiec, W. Ludwig, R. Szafran. Minimum circulation velocity in a spouted bed apparatus with draft tube. *Chemical Engineering and Technology*, 32(3):450–453, 2009.
- [195] R. K. Konduri, E. R. Altwicker, M. H. Morgan. Atmospheric spouted bed combustion: The role of hydrodynamics in emissions generation and control. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 73(5):744–754, oct 1995.
- [196] R. K. Konduri, E. R. Altwicker, M. H. Morgan. Design and scale up of a spouted bed combustor. *Chemical Engineering Science*, 54(2):185–204, 1999.
- [197] I. Konopka, M. Markowski, M. Tańska, M. Żmojda, M. Małkowski, I. Białobrzewski. Image analysis and quality attributes of malting barley grain dried with

- infrared radiation and in a spouted bed. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(11):2047–2055, 2008.
- [198] W. Krambrock. Mixing and homogenizing of granular bulk material in a pneumatic mixer unit. *Powder Technology*, 15(2):199–206, nov 1976.
- [199] J. Kucharski, A. Kmiec. Hydrodynamics, heat and mass transfer during coating of tablets in a spouted bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 61(3):435–439, 1983.
- [200] G. Kulah, S. Sari, M. Koksal. Particle Velocity, Solids Hold-Up, and Solids Flux Distributions in Conical Spouted Beds Operating with Heavy Particles. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 55(11):3131–3138, 2016.
- [201] V. Kvasha. *Multiple-spouted gas-fluidized beds and cyclic fluidization: operation and stability*. Academic Press, London, 1985.
- [202] F. Larachi, B. P. A. Grandjean, J. Chaouki. Mixing and circulation of solids in spouted beds: particle tracking and Monte Carlo emulation of the gross flow pattern. *Chemical Engineering Science*, 58(8):1497–1507, 2003.
- [203] M. Leva. *Fluidization*. Chemical engineering series. McGraw-Hill, 1959.
- [204] C. J. Lim, K. B. Mathur. Residence time distribution of gas in spouted beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 52(2):150–155, 1974.
- [205] C. J. Lim, K. B. Mathur. A flow model for gas movement in spouted beds. *AIChE Journal*, 22(4):674–680, 1976.
- [206] A. C. C. Lima, S. C. S. Rocha. Bean drying in fixed, spouted and spout fluid beds: A comparison and empirical modeling. *Drying Technology*, 16(9-10):1881–1901, 1998.
- [207] H. Littman, M. H. Morgan III, D. V. Vuković, F. K. Zdanski, Ž. B. Grbavčić. A theory for predicting the maximum spoutable height in a spouted bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 55(5):497–501, 1977.
- [208] H. Littman, M. H. Morgan. A general correlation for the minimum spouting velocity. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 61(3):269–273, 1983.
- [209] G. Q. Liu, S. Q. Li, X. L. Zhao, Q. Yao. Experimental studies of particle flow dynamics in a two-dimensional spouted bed. *Chemical Engineering Science*, 63(4):1131–1141, 2008.

- [210] J. Liu, J. R. Grace, X. Bi. Novel multifunctional optical-fiber probe: I. Development and validation. *AIChE Journal*, 49(6):1405–1420, 2003.
- [211] X. Liu, W. Zhong, Y. Shao, B. Ren, B. Jin. Evaluation on the effect of conical geometry on flow behaviours in spouted beds. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 92(4):768–774, 2014.
- [212] R. LLamosas. *Estudio de Propiedades Locales en Spouted Beds. Aplicación al Tratamiento de Serrín y Residuos de Madera*. Doktorego tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea, EHU/UPV, 1996.
- [213] N. E. C. Lopes, V. A. S. Moris, O. P. Taranto. Analysis of spouted bed pressure fluctuations during particle coating. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48(6):1129–1134, 2009.
- [214] G. López, M. Olazar, M. Amutio, R. Aguado, J. Bilbao. Influence of tire formulation on the products of continuous pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Energy and Fuels*, 23(11):5423–5431, 2009.
- [215] G. López, M. Olazar, R. Aguado, J. Bilbao. Continuous pyrolysis of waste tyres in a conical spouted bed reactor. *Fuel*, 89(8):1946–1952, 2010.
- [216] G. López, M. Olazar, R. Aguado, G. Elordi, M. Amutio, M. Artetxe, J. Bilbao. Vacuum pyrolysis of waste tires by continuously feeding into a conical spouted bed reactor. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 49(19):8990–8997, 2010.
- [217] G. López, M. Artetxe, M. Amutio, G. Elordi, R. Aguado, M. Olazar, J. Bilbao. Recycling poly-(methyl methacrylate) by pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(10):1089–1094, 2010.
- [218] G. López, A. Erkiaga, M. Artetxe, M. Amutio, J. Bilbao, M. Olazar. Hydrogen Production by High Density Polyethylene Steam Gasification and In-Line Volatile Reforming. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(39):9536–9544, 2015.
- [219] G. López, M. Cortazar, J. Alvarez, M. Amutio, J. Bilbao, M. Olazar. Assessment of a conical spouted with an enhanced fountain bed for biomass gasification. *Fuel*, 203:825–831, 2017.
- [220] B. L. Luo, C. J. Lim, L. A. P. Freitas, J. R. Grace. Flow characteristics in slot-rectangular spouted beds with draft plates. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 82(1):83–88, 2004.

- [221] L. A. Madonna, R. F. Lama. The derivation of an equation for predicting minimum spouting velocity. *AIChE Journal*, 4(4):497, 1958.
- [222] A. Magalhães, C. Pinho. Spouted bed drying of cork stoppers. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(12):2395–2401, 2008.
- [223] J. Makibar, A. R. Fernandez-Akarregi, I. Alava, F. Cueva, G. Lopez, M. Olazar. Investigations on heat transfer and hydrodynamics under pyrolysis conditions of a pilot-plant draft tube conical spouted bed reactor. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 50(8):790–798, 2011.
- [224] J. Makibar, A. Fernandez-Akarregi, L. Díaz, G. Lopez, M. Olazar. Pilot scale conical spouted bed pyrolysis reactor: Draft tube selection and hydrodynamic performance. *Powder Technology*, 219:49–58, 2012.
- [225] J. Makibar, A. R. Fernandez-Akarregi, M. Amutio, G. Lopez, M. Olazar. Performance of a conical spouted bed pilot plant for bio-oil production by poplar flash pyrolysis. *Fuel Processing Technology*, 137:283–289, sep 2015.
- [226] V. Mann, E. J. Crosby. Cycle time distribution measurements in spouted beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 53(5):579–581, 1975.
- [227] A. Markowski, W. Kaminski. Hydrodynamic characteristics of jet spouted beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 61(3):377–381, 1983.
- [228] M. Markowski, W. Sobieski, I. Konopka, M. Tanska, I. Białobrzewski. Drying characteristics of barley grain dried in a spouted-bed and combined IR-convection dryers. *Drying Technology*, 25(10):1621–1632, 2007.
- [229] M. Markowski, I. Białobrzewski, A. Modrzewska. Kinetics of spouted-bed drying of barley: Diffusivities for sphere and ellipsoid. *Journal of Food Engineering*, 96(3):380–387, feb 2010.
- [230] L. Marmo. Low temperature drying of pomace in spout and spout-fluid beds. *Journal of Food Engineering*, 79(4):1179–1190, 2007.
- [231] G. Z. Martins, C. R. F. Souza, T. J. Shankar, W. P. Oliveira. Effect of process variables on fluid dynamics and adhesion efficiency during spouted bed coating of hard gelatine capsules. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(12):2238–2246, 2008.
- [232] K. B. Mathur, P. E. Gishler. A study of the application of the spouted bed technique to wheat drying. *Journal of Applied Chemistry*, 5(11):624–636, 1955.

- [233] K. B. Mathur, P. E. Gishler. A technique for contacting gases with coarse solid particles. *A.I.Ch.E. Journal*, 1(2):157–164, 1955.
- [234] K. B. Mathur, N. Epstein. Spouted Beds. page 304, 1974.
- [235] K. B. Mathur, N. Epstein. Dynamics of Spouted Beds. *Advances in Chemical Engineering*, 9:111–191, 1974.
- [236] M. Matthew, M. Morgan, H. Littman. Study of the hydrodynamics within a draft tube spouted bed system. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 66(6):908–918, 1988.
- [237] D. P. McCullough, P. J. van Eyk, P. J. Ashman, P. J. Mullinger. Impact of Sodium and Sulfur Species on Agglomeration and Defluidization during Spouted Bed Gasification of South Australian Lignite. *Energy & Fuels*, 29(6):3922–3932, jun 2015.
- [238] G. S. McNab. Predictions of spout diameter. *Br. Chem. Eng. Proc. Tech.*, 17:532, 1972.
- [239] J. Melo, M. Bacelos, F. Pereira, T. Lira, D. Gidaspow. CFD modeling of conical spouted beds for processing LDPE/Al composite. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 108:93–108, oct 2016.
- [240] B. J. Milne, F. Berruti, L. A. Behie, T. J. W. De Bruijn. The internally circulating fluidized bed (ICFB): A novel solution to gas bypassing in spouted beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 70(5):910–915, 1992.
- [241] G. Mohs, O. Gryczka, S. Heinrich, L. Mörl. Magnetic monitoring of a single particle in a prismatic spouted bed. *Chemical Engineering Science*, 64(23):4811–4825, 2009.
- [242] P. K. Mollick, D. Sathiyamoorthy, P. T. Rao, V. G. Rao. Modeling of Chemical Vapor Deposition of Pyrolytic Carbon in a Gas-Spouted Bed Reactor. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(23):13313–13321, dec 2011.
- [243] P. K. Mollick, D. Sathiyamoorthy. Assessment of stability of spouted bed using pressure fluctuation analysis. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51(37):12117–12125, 2012.
- [244] P. K. Mollick, R. Venugopalan, M. Roy, P. Rao, D. Sathiyamoorthy, P. Sengupta, G. Sharma, C. Basak, J. Chakravartty. Deposition of diversely textured buffer pyrolytic carbon layer in TRISO coated particle by controlled manipulation of spouted bed hydrodynamics. *Chemical Engineering Science*, 128:44–53, 2015.

- [245] A. Morales. *Fludodinámica y Modelado del Flujo del Sólido en Spouted Beds Cónicos para Sólidos de Diferente Densidad*. Doktorego tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU, 2002.
- [246] N. Mostou, G. Kulah, M. Koksai. Flow structure characterization in conical spouted beds using pressure fluctuation signals. *Powder Technology*, 269:392–400, 2015.
- [247] J. R. Muir, F. Berrutit, L. A. Behle. Solids Circulation in Spouted and Spout-Fluid Beds with Draft-Tubes. *Chemical Engineering Communications*, 88(1):153–171, 1990.
- [248] A. Mujumdar. Spouted bed technology-a brief review. *Drying'84*, 1984.
- [249] I. P. Mukhlenov, A. E. Gorstein. Investigation of a spouted bed. *Kim. Prom.*, 41:443–446, 1965.
- [250] C. R. Müller, D. J. Holland, A. J. Sederman, J. S. Dennis, L. F. Gladden. Magnetic resonance measurements of high-velocity particle motion in a three-dimensional gas-solid spouted bed. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 82(5):1–4, 2010.
- [251] R. Munz, O. Mersereau. A plasma spout-fluid bed for the recovery of vanadium from vanadium ore. *Chemical Engineering Science*, 45(8):2489–2495, jan 1990.
- [252] D. V. Murthy, P. N. Singh. Minimum spouting velocity in multiple spouted beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 72(2):235–239, 1994.
- [253] L. P. Mussi, A. O. Guimarães, K. S. Ferreira, N. R. Pereira. Spouted bed drying of jambolão (*Syzygium cumini*) residue: Drying kinetics and effect on the antioxidant activity, anthocyanins and nutrients contents. *LWT - Food Science and Technology*, 61(1):80–88, apr 2015.
- [254] H. Nagashima, T. Ishikura, M. Ide. Hydrodynamics of a spouted bed with an impermeable draft tube for binary particle systems. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 16(5):688–693, sep 1999.
- [255] H. Nagashima, T. Ishikura, M. Ide. Effect of the tube shape on gas and particle flow in spouted beds with a porous draft tube. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 87(2):228–236, 2009.
- [256] H. Nagashima, Y. Kawashiri, K. Suzukawa, T. Ishikura. Effects of operating parameters on hydrodynamic behavior of spout-fluid beds without and with a draft tube. *Procedia Engineering*, 102:952–958, 2015.

- [257] J. Németh, E. Pallai, E. Aradi. Scale up examination of spouted bed dryers. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 61(3):419–425, 1983.
- [258] A. M. Nikolaev, L. G. Golubev. Basic hydrodynamic characteristics of a spouted bed. (*Basic Hydrodynamic Characteristic of a Spouted Bed*), *Izv. Vysch. Ucheb. Zaved, Khim. Tekhnol.*, 7:855–857, 1964.
- [259] A. Niksiar, A. H. Faramarzi, M. Sohrabi. Kinetic study of polyethylene terephthalate (PET) pyrolysis in a spouted bed reactor. *J Anal Applied Pyrol*, 113:419–425, 2015.
- [260] B. Nitta, M. Morgan III. Particle circulation and liquid bypassing in three phase draft tubed spouted beds. *Chemical Engineering Science*, 47(13-14):3459–3466, 1992.
- [261] M. Olazar, M. J. San José, A. T. Aguayo, J. M. Arandes, J. Bilbao. Stable operation conditions for gas-solid contact regimes in conical spouted beds. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 31(7):1784–1792, 1992.
- [262] M. Olazar, M. J. San José, A. T. Aguayo, J. M. Arandes, J. Bilbao. Pressure drop in conical spouted beds. *The Chemical Engineering Journal*, 51(1):53–60, 1993.
- [263] M. Olazar, M. J. San José, F. J. Peñas, A. T. Aguayo, J. Bilbao. Stability and hydrodynamics of conical spouted beds with binary mixtures. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 32(11):2826–2834, 1993.
- [264] M. Olazar, M. J. San José, A. T. Aguayo, J. M. Arandes, J. Bilbao. Hydrodynamics of nearly flat base spouted beds. *The Chemical Engineering Journal and The Biochemical Engineering Journal*, 55(1-2):27–37, 1994.
- [265] M. Olazar, M. J. San José, G. Zabala, J. Bilbao. New reactor in jet spouted bed regime for catalytic polymerizations. *Chemical Engineering Science*, 49(24):4579–4588, jan 1994.
- [266] M. Olazar, M. J. San José, R. Llamosas, J. Bilbao. Hydrodynamics of Sawdust and Mixtures of Wood Residues in Conical Spouted Beds. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 33(4):993–1000, 1994.
- [267] M. Olazar, M. J. San José, R. Llamosas, S. Alvarez, J. Bilbao. Study of Local Properties in Conical Spouted Beds Using an Optical Fiber Probe. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 34:4033–4039, 1995.

- [268] M. Olazar, M. J. San José, F. J. Pefias, A. T. Aguayo, J. M. Arandes, J. Bilbao. A simplified model for gas flow in conical spouted beds. *The Chemical Engineering Journal*, 55:19–26, 1995.
- [269] M. Olazar, M. J. San José, E. Cepeda, R. Ortiz de la Tierro, J. Bilbao. Hydrodynamics of fine solids in conical spouted beds. In J.-F. Large and C. Laguerie, editors, *Fluidization VIII*, pages 197–205, New York, 1996. AIChE.
- [270] M. Olazar, M. J. San José, R. Aguado, J. Bilbao. Solid Flow in Jet Spouted Beds. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 35:2716–2724, 1996.
- [271] M. Olazar, M. J. San José, S. Alvarez, A. Morales, J. Bilbao. Measurement of Particle Velocities in Conical Spouted Beds Using an Optical Fiber Probe. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 37(4):4520–4527, 1998.
- [272] M. Olazar, M. J. San José, R. Aguado, B. Gaisa. Bed Voidage in Conical Sawdust Beds in the Transition Regime between Spouting and Jet Spouting. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 38:4120–4122, 1999.
- [273] M. Olazar, R. Aguado, J. Bilbao, A. Barona. Pyrolysis of sawdust in a conical spouted-bed reactor with a HZSM-5 catalyst. *AIChE Journal*, 46(5):1025–1033, 2000.
- [274] M. Olazar, R. Aguado, M. San José, J. Bilbao. Kinetic study of fast pyrolysis of sawdust in a conical spouted bed reactor in the range 400–500 °C. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 76(5):469–476, 2001.
- [275] M. Olazar, M. J. San José, M. A. Izquierdo, S. Alvarez, J. Bilbao. Local Bed Voidage in Spouted Beds. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 40(97):427–433, 2001.
- [276] M. Olazar, M. J. San José, M. A. Izquierdo, S. Alvarez, J. Bilbao. Fountain geometry in shallow spouted beds. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 40(1):420–426, 2004.
- [277] M. Olazar, M. J. San José, S. Alvarez, A. Morales, J. Bilbao. Design of Conical Spouted Beds for the Handling of Low-Density. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 43(2):655–661, 2004.
- [278] M. Olazar, R. Aguado, D. Vélez, M. Arabiourrutia, J. Bilbao. Kinetics of scrap tire pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44(11):3918–3924, 2005.

- [279] M. Olazar, G. Lopez, M. Arabiourrutia, G. Elordi, R. Aguado, J. Bilbao. Kinetic modelling of tyre pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 81(1):127–132, 2008.
- [280] M. Olazar, G. López, H. Altzibar, R. Aguado, J. Bilbao. Minimum spouting velocity under vacuum and high temperature in conical spouted beds. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 87(4):541–546, 2009.
- [281] M. Olazar, G. Lopez, H. Altzibar, M. Amutio, J. Bilbao. Drying of Biomass in a Conical Spouted Bed with Different Types of Internal Devices. *Drying Technology*, 30(2):207–216, 2012.
- [282] W. P. Oliveira, C. J. Lim, J. R. Grace. Evaluation of flow regimes in a semi cylindrical spouted bed through statistical, mutual information, spectral and Hurst’s analysis. *The Canadian Journal of Chemical Engineering Chemical Engineering*, 86(June):582–597, 2008.
- [283] A. Pablos. *Diseño de un contactor spouted bed para el secado de arenas finas y ultrafinas*. Doktorego tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea, EHU/UPV, 2017.
- [284] A. Pablos, R. Aguado, M. Tellabide, H. Altzibar, F. B. Freire, J. Bilbao, M. Olazar. A new fountain confinement device for fluidizing fine and ultrafine sands in conical spouted beds. *Powder Technology*, 328:38–46, 2018.
- [285] A. Pablos, R. Aguado, J. Vicente, H. Altzibar, J. Bilbao, M. Olazar. Effect of operating conditions on the drying of fine and ultrafine sand in a fountain confined conical spouted bed. *Drying Technology*, pages 1–16, aug 2019.
- [286] E. Pallai, J. Nemeth. Spoutability and spout destabilization of fine particles with a gas. In *Proceedings of the fourth international congress on chemical engineering (CHISA)*, page C3.11, Prague, Csechoslovakia, 1972.
- [287] E. Pallai-Varsányi, J. Tóth, J. Gyenis. Drying of suspensions and solutions on inert particle surface in mechanically spouted bed dryer. *China Particuology*, 5(5):337–344, 2007.
- [288] S. Pannala, C. Daw, C. Finney, D. Boyalakuntla, M. Syamlal, T. O’Brien. Simulating the dynamics of spouted-bed nuclear fuel coaters. *Chemical Vapor Deposition*, 13(9):481–490, 2007.
- [289] H. C. Park, H. S. Choi. Visualization of flow structures inside a conical spouted bed by electrical capacitance volume tomography. *Particuology*, 42:15–25, 2019.

- [290] M. L. Passos, A. S. Mujumdar, V. G. Raghavan. Spouted beds for drying: principles and design considerations. In A. S. Mujumdar, editor, *Advances in drying*, chapter 7, pages 359–398. Hemisphere Pub. Corp., New York, 1987.
- [291] M. L. Passos, A. S. Mujumdar, G. S. V. Raghavan. Pressure drop in slotted spouted beds of grains: Comparison of data with models. *Powder Technology*, 52(2):131–137, sep 1987.
- [292] M. L. Passos, A. S. Mujumdar, V. S. G. Raghavan. Prediction of the maximum spoutable bed height in two-dimensional spouted beds. *Powder Technology*, 74(2):97–105, 1993.
- [293] M. L. Passos, A. L. G. Trindade, J. V. H. D'Angelo, M. Cardoso. Drying of Black Liquor in Spouted Bed of Inert Particles. *Drying Technology*, 22(5):1041–1067, 2004.
- [294] B. Patrose, H. S. Caram. *AIChE Journal Symposium Series*, 80:48, 1984.
- [295] E. E. Patterson, J. Halow, S. Daw. Innovative Method Using Magnetic Particle Tracking to Measure Solids Circulation in a Spouted Fluidized Bed. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(11):5037–5043, jun 2010.
- [296] M. Paulo Filho, S. C. S. Rocha, A. C. L. Lisboa. Modeling and experimental analysis of polydispersed particles coating in spouted bed. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 45(11):965–972, 2006.
- [297] F. J. Peñas. *Contribución al Modelado del Flujo en "Spouted Bed" Cónicos. Aplicación al Tratamiento de Mezclas y Estudio de la Segregación*. Doktorego tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea, EHU/UPV, 1993.
- [298] J. T. Perazzini, F.B. Freire, J. T. Freire. Influence of bed geometry on the drying of skimmed milk in a Spouted Bed. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 5:447–460, 2015.
- [299] Q. T. Pham. Behaviour of a conical spouted-bed dryer for animal blood. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 61(3):426–434, 1983.
- [300] D. L. Pianarosa, L. A. P. Freitas, C. J. Lim, J. R. Grace, O. M. Dogan. Voidage and particle velocity profiles in a spout-fluid bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 78(1):132–142, feb 2000.
- [301] N. Piccinini, J. Gracet, K. Mathur. Vapour phase chemical reaction in spouted beds: Verification of theory. *Chemical Engineering Science*, 34(10):1257–1263, jan 1979.

- [302] N. Piccinini, G. Rovero. Thick coatings by thermo chemical deposition in spouted beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 61(3):448–453, 1983.
- [303] S. Pietsch, P. Kieckhefen, M. Müller, M. Schönherr, F. Kleine Jager, S. Heinrich. Novel production method of tracer particles for residence time measurements in gas-solid processes. *Powder Technology*, 338:1–6, 2018.
- [304] E. Piskova, L. Mörl. Characterization of spouted bed regimes using pressure fluctuation signals. *Chemical Engineering Science*, 63(9):2307–2316, 2008.
- [305] R. Pissinati, W. P. Oliveira. Enteric coating of soft gelatin capsules by spouted bed: effect of operating conditions on coating efficiency and on product quality. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 55(3):313–321, may 2003.
- [306] S. Prachayawarakorn, S. Ruengnarong, S. Soponronnarit. Characteristics of heat transfer in two-dimensional spouted bed. *Journal of Food Engineering*, 76(3):327–333, 2006.
- [307] T. S. Pugsley, F. Berruti. A predictive hydrodynamic model for circulating fluidized bed risers. *Powder Technology*, 89(1):57–69, oct 1996.
- [308] I. Puspasari, S. M. Tasirin, N. Pin Pin, Z. Yaakob. Hydrodynamic characteristics of group D particles (paddy grains) in a conical-based spouted bed with and without draft tube. *World Applied Sciences Journal*, 29(11):1350–1356, 2014.
- [309] L. Qian, Y. Lu, W. Zhong, X. Chen, B. Ren, B. Jin. Developing a novel fibre high speed photography method for investigating solid volume fraction in a 3D spouted bed. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 91(11):1793–1799, 2013.
- [310] L. Qian, Y. Lu, W. Zhong, X. Chen, B. Ren, B. Jin. Investigating particle phase velocity in a 3D spouted bed by a novel fiber high speed photography method. *AIP Conference Proceedings*, 1547:289–293, 2013.
- [311] L. Qian, Y. Lu, W. Zhong, B. Jin. Developing a High Speed Fiber-optic Endoscopic Technique for Statistical Analysis of Particle Phase Velocity. *Procedia Engineering*, 102(423):423, 2015.
- [312] M. G. Rasul. Spouted bed combustion of wood charcoal: Performance comparison of three different designs. *Fuel*, 80(15):2189–2191, 2001.
- [313] T. Robinson, B. Waldie. Dependency of growth on granule size in a spouted bed granulator. *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, 57:121–127, 1979.

- [314] P. G. Romankov, N. B. Rashkovskaya. *Drying in a Suspended State*. Chem. Publ. House, Leningrad, 1968.
- [315] L. W. Rong, J. M. Zhan. Improved DEM-CFD Model and Validation: A Conical-Base Spouted Bed Simulation Study. *Journal of Hydrodynamics*, 22(3):351–359, jun 2010.
- [316] N. M. Rooney, D. Harrison. Spouted Beds of Fine Particles. *Powder Technology*, 9(5-6):227–230, 1974.
- [317] G. Rovero, N. Piccinini, J. Grace, N. Epstein, C. Brereton. Gas phase solid-catalysed chemical reaction in spouted beds. *Chemical Engineering Science*, 38(4):557–566, jan 1983.
- [318] D. Roy, F. Larachi, R. Legros, J. Chaouki. Study of solid behavior in spouted beds using 3-D particle tracking. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 72(6):945–952, 1994.
- [319] M. Saidi, Z. Wang, J. R. Grace, C. J. Lim. Numerical and experimental investigation of hydrodynamic characteristics of a slot-rectangular spouted bed. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 94(2):332–339, 2016.
- [320] J. F. Saldarriaga. *Avances en el modelado de la combustión de biomasa en spouted bed cónico*. Doktorego tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU, 2015.
- [321] J. F. Saldarriaga, A. Atxutegi, R. Aguado, H. Alzibar, J. Bilbao, M. Olazar. Influence of contactor geometry and draft tube configuration on the cycle time distribution in sawdust conical spouted beds. *Chemical Engineering Research and Design*, 102:80–89, 2015.
- [322] J. F. Saldarriaga, J. Grace, C. J. Lim, Z. Wang, N. Xu, A. Atxutegi, R. Aguado, M. Olazar. Bed-to-surface heat transfer in conical spouted beds of biomass-sand mixtures. *Powder Technology*, 283:447–454, 2015.
- [323] J. F. Saldarriaga, R. Aguado, H. Alzibar, A. Atxutegi, J. Bilbao, M. Olazar. Minimum spouting velocity for conical spouted beds of vegetable waste biomasses. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 60:509–519, 2016.
- [324] J. F. Saldarriaga, I. Estiati, A. Atxutegi, R. Aguado, J. Bilbao, M. Olazar. Distribution of Cycle Times in Sawdust Conical Spouted Bed Equipped with Fountain Confiner and Draft Tube. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 58(5):1932–1940, 2019.

- [325] M. J. San José. *Régimenes de operación en spouted beds cónicos. Condiciones de estabilidad y fluidodinámica*. Doktorego tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea, EHU/UPV, 1991.
- [326] M. J. San José, M. Olazar, A. T. Aguayo, J. M. Arandes, J. Bilbao. Expansion of spouted beds in conical contactors. *The Chemical Engineering Journal*, 51(1):45–52, 1993.
- [327] M. J. San José, M. Olazar, F. J. Peñas, J. Bilbao. Segregation in conical spouted beds with binary and ternary mixtures of equidensity spherical particles. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 33(7):1838–1844, 1994.
- [328] M. J. San José, M. Olazar, F. J. Peñas, J. M. Arandes, J. Bilbao. Correlation for calculation of the gas dispersion coefficient in conical spouted beds. *Chemical Engineering Science*, 50(13):2161–2172, 1995.
- [329] M. J. San José, M. Olazar, R. Llamosas, M. A. Izquierdo, J. Bilbao. Study of dead zone and spout diameter in shallow spouted beds of cylindrical geometry. *Chemical Engineering Journal*, 64(3):353–359, 1996.
- [330] M. J. San José, M. Olazar, R. Aguado, J. Bilbao. Influence of the conical section geometry on the hydrodynamics of shallow spouted beds. *The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal*, 62(2):113–120, 1996.
- [331] M. J. San José, M. Olazar, S. Alvarez, J. Bilbao. Local bed voidage in conical spouted beds. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 37(6):2553–2558, 1998.
- [332] M. J. San José, M. Olazar, S. Alvarez, M. A. Izquierdo, J. Bilbao. Solid cross-flow into the spout and particle trajectories in conical spouted beds. *Chemical Engineering Science*, 53(20):3561–3570, 1998.
- [333] M. J. San José, M. Olazar, M. A. Izquierdo, S. Alvarez, J. Bilbao. Spout geometry in shallow spouted beds. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 40(1):420–426, 2001.
- [334] M. J. San José, M. Olazar, M. A. Izquierdo, S. Alvarez, J. Bilbao. Solid Trajectories and Cycle Times in Spouted Beds. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43(1):3433–3438, 2004.
- [335] M. J. San José, M. Olazar, S. Alvarez, A. Morales, J. Bilbao. Local porosity in conical spouted beds consisting of solids of varying density. *Chemical Engineering Science*, 60(7):2017–2025, 2005.

- [336] M. J. San José, M. Olazar, S. Alvarez, A. Morales, J. Bilbao. Spout and Fountain Geometry in Conical Spouted Beds Consisting of Solids of Varying Density. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44(1):193–200, 2005.
- [337] M. J. San José, S. Alvarez, A. O. De Salazar, M. Olazar, J. Bilbao. Spout geometry in shallow spouted beds with solids of different density and different sphericity. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44(22):8393–8400, 2005.
- [338] M. J. San José, S. Alvarez, A. O. De Salazar, M. Olazar, J. Bilbao. Influence of the particle diameter and density in the gas velocity in jet spouted beds. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44(2):153–157, 2005.
- [339] M. J. San José, S. Alvarez, A. Morales, M. Olazar, J. Bilbao. Solid cross-flow into the spout and particle trajectories in conical spouted beds consisting of solids of different density and shape. *Chemical Engineering Research and Design*, 84(6 A):487–494, 2006.
- [340] M. J. San José, S. Alvarez, A. O. De Salazar, M. Olazar, J. Bilbao. Operating conditions of conical spouted beds with a draft tube. Effect of the diameter of the draft Tube and of the height of entrainment zone. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 46(9):2877–2884, 2007.
- [341] M. J. San José, S. Alvarez, A. Morales, M. Olazar, J. Bilbao. Fountain geometry of beds consisting of plastic wastes in shallow spouted beds. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47(16):6228–6238, 2008.
- [342] M. J. San José, S. Alvarez, F. J. Peñas, I. García. Cycle time in draft tube conical spouted bed dryer for sludge from paper industry. *Chemical Engineering Science*, 100:413–420, 2013.
- [343] M. J. San José, S. Alvarez, R. López. Catalytic combustion of vineyard pruning waste in a conical spouted bed combustor. *Catalysis Today*, 305:13–18, 2018.
- [344] D. A. Santos, I. P. Jr, M. A. S. Barrozo, C. R. Duarte. Mixture of particles' influence in computer simulations of a spouted bed. *Materials Science Forum*, 661:448–453, 2010.
- [345] D. A. Santos, G. C. Alves, M. A. S. Barrozo, C. R. Duarte. Study of measurement methods of particle velocity in a spouted bed. *Materials Science Forum*, 727-728:1842–1847, 2012.

- [346] D. A. Santos, G. C. Alves, C. R. Duarte, M. A. S. Barrozo. Disturbances in the hydrodynamic behavior of a spouted bed caused by an optical fiber probe: Experimental and CFD study. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 51(9):3801–3810, 2012.
- [347] D. A. Santos, I. J. Petri, C. R. Duarte, M. A. S. Barrozo. Study of hybrid drag models for predicting hydrodynamic behaviour in a spouted bed. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 91(11):1776–1785, 2013.
- [348] J. Schwedes, J. Otterbach. Sizing pneumatic pellet mixers. *Verfahrenstechnik*, 8(2):42–47, 1974.
- [349] C. Seiler, P. J. Fryer, J. P. Seville. Statistical modelling of the spouted bed coating process using positron emission particle tracking (PEPT) data. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 86(3):571–581, 2008.
- [350] P. A. Shirvanian, J. M. Calo. Hydrodynamic scaling of a rectangular spouted vessel with a draft duct. *Chemical Engineering Journal*, 103(1-3):29–34, 2004.
- [351] W. Shuyan, H. Zhenghua, S. Dan, L. Yikun, W. Lixin, W. Shuai. Hydrodynamic simulations of gas-solid spouted bed with a draft tube. *Chemical Engineering Science*, 65(4):1322–1333, 2010.
- [352] D. O. Silva, L. M. Tamiozzo, C. R. Duarte, V. V. Murata, M. A. S. Barrozo. Modeling of seed coating in a spouted bed. *Drying Technology*, 29(3):286–294, 2011.
- [353] J. W. Smith, K. V. S. Reddy. Spouting of mixed particle size beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 42(5):206–210, 1964.
- [354] C. Souza, W. Oliveira. Drying of herbal extract in a draft tube spouted bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 87:279–288, 2009.
- [355] L. Spreutels, B. Haut, R. Legros, F. Bertrand, J. Chaouki. Experimental investigation of solid particles flow in a conical spouted bed using radioactive particle tracking. *AIChE Journal*, 62(1):26–37, 2015.
- [356] L. Spreutels, J. Chaouki, F. Bertrand, B. Haut, R. Legros. Gas residence time distribution in a conical spouted bed. *Powder Technology*, 290:62–71, 2016.
- [357] G. Srzednicki, R. H. Driscoll. Implementation of a Two-stage Drying System for Grains in Asia. In G. L. Robertson and J. R. Lupien, editors, *Using Food Science*

- and Technology to Improve Nutrition and Promote National Development*, chapter 7. International Union of Food Science & Technology (IUFOST), Oakville, Canada, 2009.
- [358] R. K. Stocker, J. H. Eng, W. Y. Svrcek, L. A. Behie. Ultraprolysis of propane in a spouted-bed reactor with a draft tube. *AIChE Journal*, 35(10):1617–1624, 1989.
- [359] R. K. Stocker, J. H. Eng, L. A. Behie. Hydrodynamic and thermal modelling of a high temperature spouted bed reactor with a draft tube. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 68(2):302–311, apr 1990.
- [360] G. Subramanian, R. Turton, S. Shelukar, L. Flemmer. Effect of Tablet Deflectors in the Draft Tube of Fluidized/Spouted Bed Coaters. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42:2470–2478, 2003.
- [361] V. S. Sutkar, N. G. Deen, B. Mohan, V. Salikov, S. Antonyuk, S. Heinrich, J. A. Kuipers. Numerical investigations of a pseudo-2D spout fluidized bed with draft plates using a scaled discrete particle model. *Chemical Engineering Science*, 104:790–807, 2013.
- [362] V. S. Sutkar, N. G. Deen, V. Salikov, S. Antonyuk, S. Heinrich, J. A. Kuipers. Experimental and numerical investigations of a pseudo-2D spout fluidized bed with draft plates. *Powder Technology*, 270(PB):537–547, 2015.
- [363] T. Swasdisevi, W. Tanthapanichakoon, T. Charinpanitkul, T. Kawaguchi, T. Tanaka, Y. Tsuji. Investigation of fluid and coarse-particle dynamics in a two-dimensional spouted bed. *Chemical Engineering and Technology*, 27(9):971–981, 2004.
- [364] T. Swasdisevi, W. Tanthapanichakoon, T. Charinpanitkul, T. Kawaguchi, T. Tanaka, Y. Tsuji. Prediction of gas-particle dynamics and heat transfer in a two-dimensional spouted bed. *Advanced Powder Technology*, 16:275–293, 2005.
- [365] R. G. Szafran, A. Kmiec. CFD Modeling of Heat and Mass Transfer in a Spouted Bed Dryer. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43(4):1113–1124, 2004.
- [366] R. G. Szafran. CFD modelling of kinetics of drying in a spouted bed apparatus | Modelowanie CFD kinetyki suszenia ziarna w aparacie fontannowym. *Inzynieria Chemiczna i Procesowa*, 26(2):289–307, 2005.
- [367] R. G. Szafran, A. Kmiec. Periodic fluctuations of flow and porosity in spouted beds. *Transport in Porous Media*, 66(1-2):187–200, 2007.

- [368] K. Takeda, H. Hattori. Modified Types of Spouted Beds—with the Gas Outlet Located in the Side Wall Surrounding the Annular Dense Bed—. *Kagaku kogaku ronbunshu*, 1(2):149–154, 1975.
- [369] K. Takeda, H. Hattori. Calculation of Gas Conversion for Top-Outlet Type and Side-Outlet Type Spouted Beds-First order solid-catalyzed reaction. *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 2:507, 1976.
- [370] H. Taofeeq, S. Aradhya, J. Shao, M. Al-Dahhan. Advance optical fiber probe for simultaneous measurements of solids holdup and particles velocity using simple calibration methods for gas-solid fluidization systems. *Flow Measurement and Instrumentation*, 63(January):18–32, 2018.
- [371] I. Taruna, V. Jindal. Drying of soy pulp (Okara) in a bed of inert particles. *Drying Technology*, 20(4-5):1035–1051, 2002.
- [372] M. Tellabide, I. Estiati, A. Pablos, H. Altzibar, R. Aguado, M. Olazar. New operation regimes in fountain confined conical spouted beds. *Chemical Engineering Science*, 211, 2020.
- [373] M. Z. Tsvik, M. N. Nabiev, N. U. Risaev, K. V. Merenkov. The velocity for external spouting in the combined process for production of granulated fertilizers. *Uzb. Khim. Zh.*, 11:50, 967.
- [374] O. Uemaki, K. B. Mathur, L. Cited. Granulation of Ammonium Sulfate Fertilizer in a Spouted Bed. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 15(4):504–508, 1976.
- [375] O. Uemaki, R. Yamada, M. Kugo. Particle segregation in a spouted bed of binary mixtures of particles. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 61(3):303–307, 1983.
- [376] Y. Uemura, M. Miyauchi, S. Tanaka, K. Ijichi, Y. Tanaka, D. King, Y. Hatate. *Abstr. Pap. Am. Chem. S.*, 204:132, 1992.
- [377] S. Venkatachalam, R. Sridhar, V. P. Immanuel. Prediction of minimum spouting velocity in spouted bed. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 5(5):811–814, 2010.
- [378] A. Verma, J. Salas-Morales, J. Evans. Spouted bed electrowinning of zinc: Part II. Investigations of the dynamics of particles in large thin spouted beds. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 28(1):69–79, 1997.

- [379] J. L. Vieira Neto, C. R. Duarte, V. V. Murata, M. A. S. Barrozo. Effect of a draft tube on the fluid dynamics of a spouted bed: Experimental and CFD studies. *Drying Technology*, 26(3):299–307, 2008.
- [380] L. Virgen-Navarro, E. J. Herrera-López, R. I. Corona-González, E. Arriola-Guevara, G. M. Guatemala-Morales. Neuro-fuzzy model based on digital images for the monitoring of coffee bean color during roasting in a spouted bed. *Expert Systems with Applications*, 54:162–169, 2016.
- [381] A. Vogiatzis, S. Afara, C. Briens, M. Bergougnou. UltrapYROLYSIS of cold lake bitumen. *Circulating Fluidized Bed Technology*, pages 483–490, jan 1988.
- [382] E. H. Voice. Coating of pyrocarbon and silicon carbide by chemical vapour deposition. *Chem. Eng.*, 785, 1974.
- [383] D. V. Vukovic, F. K. Zdanski, H. Littman. Present status of the Theory and application of spouted bed technique. *5th CHISA*, 5:50, 1975.
- [384] H. B. Vuthaluru, D. K. Zhang. Effect of coal Blending on Particle Agglomeration and Defluidisation During Spouted-Bed Combustion of Low-Rank Coals. *Fuel Processing Technology*, 70:41–51, 2001.
- [385] B. Waldie, D. Wilkinson. Measurement of particle movement in a spouted bed using a new microprocessor based technique. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 64(6):944–949, 1986.
- [386] Q. Wang, K. Zhang, S. Brandani, J. Jiang. Scale up strategy for the jetting fluidized bed using a CFD model based on two fluid theory. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 87:204–210, 2009.
- [387] S. Wang, Y. Liu, L. Wei, Q. Dong, C. Wang. Simulations of flow behavior of gas and particles in spouted bed with a porous draft tube. *Powder Technology*, 199(3):238–247, 2010.
- [388] Z. Wang, H. T. Bi, C. J. Lim. Measurements of local Flow Structures of conical spouted beds by optical fibre probes. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 87(2):264–273, 2009.
- [389] Z. Wang, H. T. Bi, C. J. Lim. CFD Simulation of Spouted Beds Using a Pressure Source Term. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(11):5053–5060, jun 2010.

- [390] Z. Wang, M. Saidi, C. J. Lim, J. R. Grace, H. Basirat Tabrizi, Z. Chen, Y. Li. Comparison of DEM simulation and experiments in a dual-column slot-rectangular spouted bed with a suspended partition. *Chemical Engineering Journal*, 290:63–73, 2016.
- [391] A. P. Watkinson, G. Cheng, C. B. Prakash. Comparison of coal gasification in fluidized and spouted beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 61(3):468–477, 1983.
- [392] N. Wiener. Generalized harmonic analysis. *Acta Mathematica*, 55(1):117–258, 1930.
- [393] B. Wu, A. Orta, A. Kantzas. Experimental flow measurements of a spouted bed using pressure transducer and X-ray CT scanner. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 9, 2011.
- [394] F. Wu, L. Shang, Z. Yu, X. Ma, W. Zhou. Experimental investigation on hydrodynamic behavior in a spouted bed with longitudinal vortex generators. *Advanced Powder Technology*, 30(July):2178–2187, 2019.
- [395] T. P. Xavier, B. P. Libardi, T. S. Lira, M. A. S. Barrozo. Fluid dynamic analysis for pyrolysis of macadamia shell in a conical spouted bed. *Powder Technology*, 299:210–216, 2016.
- [396] J. Xu, X. Bao, W. Wei, G. Shi, S. Shen, H. T. Bi, J. R. Grace, C. J. Lim. Statistical and frequency analysis of pressure fluctuations in spouted beds. *Powder Technology*, 140(1-2):141–154, 2004.
- [397] J. Xu, Y. Ji, W. Wei, X. Bao, W. Du. Scaling Relationships of Gas-Solid Spouted Beds. In *Fluidization XII*, pages 537–544, 2007.
- [398] X. Yang, J. R. van Ommen, E. Wagner, R. F. Mudde. Time-resolved characterization of a flat-base spouted bed with a high speed X-ray system. *Chemical Engineering Journal*, 254:143–152, 2014.
- [399] J. Yang, R. W. Breault, S. L. Rowan. Applying image processing methods to study hydrodynamic characteristics in a rectangular spouted bed. *Chemical Engineering Science*, 188:238–251, 2018.
- [400] J. Yang, R. W. Breault, J. M. Weber, S. L. Rowan. Determination of flow patterns by a novel image analysis technique in a rectangular spouted bed. *Powder Technology*, 334:151–162, 2018.

- [401] J. Yang, R. W. Breault, S. L. Rowan. Experimental investigation of fountain height in a shallow rectangular spouted bed using digital image analysis. *Chemical Engineering Journal*, 380(April 2019):122467, 2020.
- [402] H. Yurong, Z. Guangbo, J. Bouillard, L. Huilin. Numerical Simulations of the Effect of Conical Dimension on the Hydrodynamic Behaviour in Spouted Beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 82(1):20–29, 2008.
- [403] G. Zabala. *Polimerización Catalítica en Spouted Beds Cónicos*. Doktorego tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU, 1997.
- [404] S. S. Zabrotsky. *Hydrodynamics and Heat Transfer in Fluidized Beds*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1966.
- [405] Y. Zhang, W. Zhong, X. Rui, B. Jin H. Liu. Evaluation of Mixing and Mixing Rate in a Multiple Spouted Bed by Image Processing Technique. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 15(1):103–115, 2016.
- [406] X. L. Zhao, Q. Yao, S. Q. Li. Effects of draft tubes on particle velocity profiles in spouted beds. *Chemical Engineering and Technology*, 29(7):875–881, 2006.
- [407] X. L. Zhao, S. Q. Li, G. Q. Liu, Q. Yao, J. S. Marshall. DEM simulation of the particle dynamics in two-dimensional spouted beds. *Powder Technology*, 184(2):205–213, 2007.
- [408] X. L. Zhao, S. Q. Li, G. Q. Liu, Q. Song, Q. Yao. Flow patterns of solids in a two-dimensional spouted bed with draft plates: PIV measurement and DEM simulations. *Powder Technology*, 183(1):79–87, 2008.
- [409] W. Zhong, M. Zhang, B. Jin, X. Chen. Flow pattern and transition of rectangular spout – fluid bed. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 45(9):734–746, 2006.
- [410] W. Zhong, X. Liu, J. R. Grace, N. Epstein, B. Ren, B. Jin. Prediction of minimum spouting velocity of spouted bed by CFD-TFM: Scale-up. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 91(11):1809–1814, 2013.
- [411] W. Zhonghua, A. S. Mujumdar. CFD modeling of the gas-particle flow behavior in spouted beds. *Powder Technology*, 183(2):260–272, 2008.
- [412] J. Zhou. Doktorego tesia, Tennessee Unibertsitatea, Knoxville, 2008.
- [413] R. Zhu, S. Li, Q. Yao. Effect of cohesion on granular-fluid flows in spouted beds: PIV measurement and DEM simulations. *AIP Conference Proceedings*, 1542:979–982, 2013.

-
- [414] R. Zhu, S. Li, Q. Yao. Effects of cohesion on the flow patterns of granular materials in spouted beds. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 87(2):1–10, 2013.

