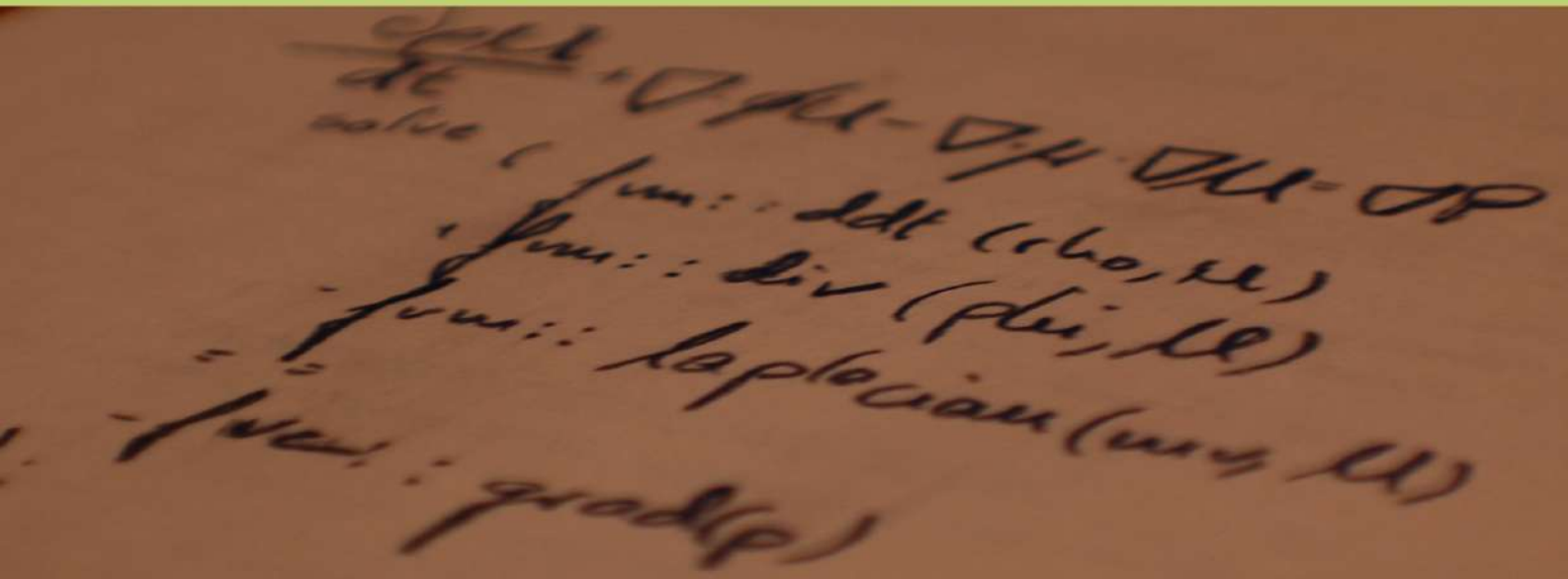


Zurrunbilo Sortzaileek Eraturiko Zurrunbiloen Ereduztapen Konputazionala

Doktorego tesia

Iosu Ibarra-Udaeta



Zuzendariak

Unai Fernandez-Gamiz dk.

Javier Sancho dk.

Jariakinen Mekanika Saila

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea



Euskal Herriko Unibertsitatea
Vitoria-Gasteizko Ingeniaritza Eskola
Jariakinen Mekanika Saila

Zurrunbilo Sortzaileek Eraturiko Zurrunbiloen Ereduztapen Konputazionala

Egilea

Iosu Ibarra Udaeta

Zuzendariak

Unai Fernandez-Gamiz dk.
Javier Sancho Saiz dk.

2022ko Martxoa

Laburpena

Haize energiaren eskaera handitzea haize turbinen tamainen hazkuntzarekin eta hauetan instalaturiko jarioaren kontrolerako eragileen garapenarekin zuzenki harremanetan dago, hala nola, zurrumbilo sortzaileekin. Zurrumbilo sortzaileak edo *Vortex Generators* (VG) jarioaren kontrolerako eragile pasiboak dira, mugako geruzaren banatzea atzeratu edo ekiditzeko erabili daitezkeenak. Orohar, VG jakin baten tamaina, leku horretan mugako geruzaren lodierarekin bat etortzeko diseinatua izan ohi dira. Baina, altuera konbentzionala duten VG horiek arraste karga handia eragin dezakete, hortaz, zurrumbilo sortzaileen diseinurako bestelako azterketa mota bat bideratu behar da. Zurrumbilo sortzaileen diseinurako simulazioen bidea hautatu egin da eta hiru urrats ezberdinetan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) teknikak erabiliz VGek sorrarazitako zurrumbiloak karakterizatuko dira. Lehendabizi plaka lau batean kokatutako VG batek sortutako zurrumbiloa ezaugarrituko da bost altuera ezberdinetarako (0.2δ , 0.4δ , 0.6δ , 0.8δ , 1.2δ , δ) eta lau eraso angeluetarako. Navier-Stokes ekuazioak $Re=27000$ baliorako ebatziz. Ondoren, presio gradiente arbuigarria duen plaka lau batean kokatutako VG baten simulazioak egin izan dira zelda sorta eredua erabiliaz alde batetik eta guztiz ebatzitako saretaren eredua erabiliz bai *Large Eddy Simulation* (LES) zein *Reynolds-Average Navier-Stokes* (RANS) simulazio eredueterako. Zelda sorta eredua erabiltzeak zelda kopurua txikitzea dakar baliabideen aurreztua suposatuz. Azkenik, DDU97W300 profil baten eraginkortasun aerodinamikoa ebaluatu da, VGarekin eta hau gabe. jBAY iturburu ereduan triangelu formako VG bat CFD tekniken bidez simulatu da, baita guztiz ebatzitako saretaren bereizmenerako ere. RANSean oinarrituriko simulazioak erabili dira egoera egonkorreko, eta *Detached Eddy Simulation* (DES) metodoa erabili da *stall* egoerarengandik gertu dauden eraso angeluetarako (AoA). Simulazio numeriko guztiak ($Re = 2 \times 10^6$) Reynolds zenbakiarekin egin ziren eta 0 eta 20° arteko eraso angeluak kontuan harturik. Orohar, simulazioek, altuera eta eraso angeluen aldaketen araberako joera berdina mantendu izan dira, ibilbide horizontal zein bertikalean aldaketa txikiak izanik. Lehenengo ikerketa parametrikotik jaso

daiteke 0.4H eta 0.6H altueretako eta $\beta = 18^\circ$ eta $\beta = 20^\circ$ kasuek eraginkortasun onena erakusten dutela zurrunbiloaren indarra kontuan hartuz. Bigarren urratsean, zelda sorta ereduaren eta guztiz ebatzitako sarearen arteko erkaketa ona eman da RANSein ikertutako aldagaietan. LES ereduaren asetasun nahikoa lortu da egitura koherenteetan, zurrunbiloaren ibilbidean eta hormaren ebakidura tentsioan baina, tamainan, indarrean eta abiadura profiletan ezberdintasun txiki batzuk atzeman izan dira. Azkenik, jBAY metodoaren bitartez ere, VGen instalazioak dakarren onura adierazgarria da eta hiru metodoen aplikazioek zurrunbilo sortzaileen diseinurako eraginkorrak direla erakutsi dute, fluido-dinamika konputazionala energia iturrien hobekuntzarako ezinbesteko tresna gisa azalduz.

Abstract

The increase in demand for wind energy is directly related to the increase in the size of wind turbines and the development of flow control devices installed in them, such as Vortex Generators (VG). The vortex generators (VG) are passive devices for flow control, which can be used to delay or prevent the separation of the boundary layer. In general, the size of a given VG is designed to match the thickness of the boundary layer at the point where it is installed. But that conventional VG height can cause drag loads, so a different approach is required for designing vortex generators. Three different steps were taken in order to characterize the turbulence produced by VGs using the Computer fluid dynamic (CFD) techniques. Firstly a vortex generated by a VG placed in a flat plate will be simulated at five different heights (0.2δ , 0.4δ , 0.6δ , 0.8δ , 1.2δ , δ) and 4 angles of attack. The Navier-Stokes number was set on $Re = 27000$. After that, simulations of a VG placed on a flat plate with negligible pressure gradient have been carried out using the cell set model and using the fully resolved using Large Eddy Simulation (LES) and Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS). The simulations of the cell-set model entailed a great reduction of the number of cells, saving time and resources. Finally, the aerodynamic efficiency of a DDU97W300 profile has been evaluated with an installed VG and without it. Simulations based on the RANS have been used for steady state conditions, and the Detached Eddy Simulation (DES) method has been used for angle attacks close to the stall angles of attack (AoA). These all numeric simulations were done with the Reynolds number $Re = 2 \times 10^5$. In general, simulations follow an equal tendency in size and angle of attack, with slight changes in horizontal or vertical trajectories. The first parametric study shows that $0.4H$ and $0.6H$ heights, and $\beta = 18^\circ$ and $\beta = 20^\circ$ are the most efficient in order to reach the higher vortex strength. In the second step, a satisfactory comparison has been given between the cell set model and the fully resolved mesh in the observed RANS cases. Satisfactory results have been obtained LES, in the coherent structures, the vortex path, and in wall shear stress, but in size, strength, and speed profiles, slight differences have

been detected. Lastly, with jBAY method, the VGs installation is significantly beneficial and the applications of the three methods have shown an effectiveness at the design of vortex generators, showing the computational fluid dynamics methods as an indispensable tool for the improvement of wind energy sources.

Aitorpena

Hurrengo lerroetan, 2017. urteko irailean hasi eta 2021eko abenduaren artean burutu den ikerketa aurrera eramatean, bidelagun izan ditudanei eskerronak eskaini nahiko nizkieke. Euskal Herriko Unibertsitatekoa den Gasteizeko ingeniari-tza Eskolaren baitan, Jariakinen Mekanikako Departamentuan bizi izandako proiektu honen egituratzaile diren horiek aipatuko ditut, zor diedanarengandik urrun geratuz.

Hasteko, ikerketa honen zuzendari izan diren Unai Fernandez-Gamiz eta Javier Sanchori eskerrak eman nahiko nizkieke, lan hau posible izatea egin baitute. Unai Fernandez-Gamizeri bereziki, alderdi akademikoetan eta formaletan eskainitako ezagutzaz gain, konfiantza eskaini duelako, lasaitasuna, gaiarekiko interesa eta pazioa kutsatuz. Bioi eskerrak horrelako proiektu baten aurrean eskatzen deneko profesionaltasuna eta gizatasuna izateagatik, bide luze honentzat zuen denbora eskaini izanagatik.

Zer esanik ez, Iñigo Errastiren lanari esker eta bere etengabeko ideien jarioari esker txertatu izan ditudan eguneratzeak. Arazoen aurrean hamaika konponbide posible bilatzean eta oztopoei aurre egiten irakastean erronka hau erakargarriago izatea lortu izan du. Ildo beretik Ekaitz Zulueta mila esker eman nahiko nizkieke arazo zailek ebatzen errazak dituztela erakutsi baitit, zubirik ez dagoen tokian eraikitzen, mundua matematikoki kudeatzen, umore ona beti, transmititzen.

Eskuzabaltasun osoz inguruan izan ditudan gainontzeko ikerlariak gogorarazi nahi ditut, Erica Macho-Stadler tutore gisa erraztasunak baino ez jartzeagatik, Iñigo Aramendia, Pablo Martinez-Filgueira, Sergio Chillón, Koldo Portal-Porras, Alejandro Ballesteros-Coll, lan honen urrats ezberdinetan lagundu didatelako eta Iñigori bereziki, urratutako bidetik errazago ibiltzen baita. Era berean eskerrak eman nahiko nizkieke jariakinen mekanikan aurretik egon diren ikerlari guztiei, tradizio zientifiko oso bati, ezagutza ortz-inugan izan duen giza taldeari.

Bukatzeko, zelan ez, eskerrak Iñaki, Izaro eta Mikeli, urratsik atzera ematen uzten ez didatelako. Etxekoei, hau, diren bezala izatearen ondorioa delako. Keltse eta Jareri, beraiei esker, dena gainditu dezakedalako.

Etxeko guztiei.

Hondar ale bakarrak ez du hondartza osatzen, baina hondartza, hondar ale bakanez da osatua.

Edukiak

Laburpena	i
Aitorpenak	v
1 Sarrera	1
1.1 Motibazioa	2
2 Testuingurua	5
2.1 Haize errotak	6
2.2 Zurrumbilo sortzaileak	9
2.3 Mugako Geruzaren Teoria	15
2.3.1 Sarrera	15
2.3.2 Desplazamendu Lodiera	18
2.3.3 Momentu Lodiera	19
2.3.4 Mugako Geruzaren Ekuazioak	19
2.3.5 Jariakin Konprimaezinak Plaka Lauan	21
2.3.6 Mugako Geruzaren Bereizketa	22

2.3.7	Autoantzekotasuna eta Simetria Helikoidala Zurrunbilo Sortzaileen Jarioan	23
2.3.8	VGaren Eraso Angeluaren Mendekotasuna Plaka Lauan	24
2.3.9	VGaren Altueraren Mendekotasuna Zurrunbiloan	24
3	Zurrunbilo Sortzaile Baten Karakterizazio Parametrikoa	27
3.1	Sarrera	28
3.2	Antolamendu numerikoa	28
3.2.1	Saretaren Kalitate Ikerketa	32
3.3	Emaitzak	33
3.3.1	Zurrunbiloaren Ibilbidea	34
3.3.2	Zurrunbiloaren Tamaina	38
3.3.3	Hormaren Ebakidura Tentsioa	44
3.3.4	Zurrunbiloaren Indarra	47
3.4	Sare Neuronal Artifiziala	48
3.5	Ondorioak	51
4	Zelda sorta ereduaren doitasuna LES eta RANS erduetarako	53
4.1	Laburpena	54
4.2	Antolamendu numerikoa	54
4.2.1	Domeinu konputazionala	54
4.2.2	Eredu fisikoak	55
4.2.3	Ebatzitako Sare Eredua	57

4.2.4	Zelda Sorta Eredua	59
4.3	Emaitzak	60
4.3.1	Egitura koherenteak	61
4.3.2	Zurrunbiloaren ibilbidea	63
4.3.3	Abiadura profilak	65
4.3.4	Zurrunbiloaren tamaina	66
4.3.5	Zurrunbiloaren Indarra	67
4.3.6	Hormaren ebakidura tentsioa	69
4.4	Ondorioak	70
5	Zurrunbilo sortzaileen jBAY ereduztatzea	73
5.1	Sarrera	74
5.2	Erabilitako tresna eta metodoak	76
5.2.1	jBAY Eredua	76
5.2.2	Domeinu konputazionala eta VGa	78
5.2.3	Antolamendu numerikoa	80
5.3	Emaitzak	81
5.3.1	Altzatze eta arraste koefizienteak	81
5.3.2	Zurrunbiloaren ibilbidea eta gainbehera	84
5.3.3	Hormaren ebakidura tentsioa	87
5.3.4	Presio koefizientearen distribuzioa	88
5.3.5	Zurrunbiloaren behaketa	89

5.4 Ondorioak	90
6 Ondorioak	93
Appendices	99
Eranskina A	101
A.1 Abiadura distribuzioa	102
Eranskina B	107
B.1 Presio eremua	108
Eranskina C	109
C.1 Abiadura axialaren alderaketa ereduka	110
Eranskina D	111
D.1 Abiadura axialaren distribuzioa	112
Eranskina E	113
E.1 R_{05} geruzak	114
Eranskina F	115
F.1 Turbulentzia eredua	116
F.1.1 $k - \omega$ eredua	116
Eranskina G	119
G.1 BAY eredua	120

Bibliografia	123
Laburdurak	133

Taulen Zerrenda

3.1	Saretaren kalitaterako parametroak, aztertutako VG bakoitzarentzat.. . . .	32
3.2	Sarrerako ezkutuko geruzen pisuak (ω_{ij}).	50
3.3	Irteerako geruzen pisuak (ω_i).	50
3.4	Ezkutuko geruzaren atariko aldagaiak θ	51
3.5	Irteera geruzaren atariko aldagaiak θ'_i	51
4.1	Saretaren onarpena RANSerako, alde batetik saretaren bereizmena eta bestetik Richardsonen estrapolazio balioak.	58
5.1	VGaren neurri geometrikoak.	79

Irudien Zerrenda

2.1	Haize turbina baten energia kurba.	8
2.2	Profil aerodinamiko baten sekzioa eta ezaugarriak.	9
2.3	C'L eta α n oinarriturik altzatze kurbaren aldaketa.	10
2.4	(a) Jatorrizko profila eta (b) altzatze bera duen VGa instalaturik duen profila.	11
2.5	Alderantzikatutako presio gradientea duen abiadura profila eta mugako geruzaren banaketa.	12
2.6	Zurrumbilo sortzaileak dituen plaka lau baten jario lerroak[25]	13
2.7	Mugako geruzaren garapena xafila lau batean.	16
2.8	Kontrako presio gradientedun jario aske baten mugimendua plaka lauan. . .	17
2.9	Mugako geruzaren lodieraren garapena eta haren abiadura profila.	18
2.10	Ezkerrean mugako geruzarik gabeko jario hipotetikoa, eskuman mugako geruzaren poderioz mugitutako benetako jarioaren lerroa.	19
2.11	Mugako geruzaren lodiera gainontzeko jariakinaren tamainarekin alderatuta.	20
2.12	Abiadura profilen antzekotasuna VGarekiko distantzia ezberdinetara, Fernandez-Gamiz [25].	23

2.13	VGaren altuera ezberdinak mugako geruzaren lodierarekin eta VGaren altuera konbentzionalarekin alderatuz.	25
3.1	Domeinu konputazionala.. . . .	30
3.2	Finagoak diren saretaren eremuak VGaren inguruan.. . . .	30
3.3	Simulazioen arintze prozesuan domeinu konputazionalaren banaketa zortzi zatitan.. . . .	32
3.4	$\frac{x}{\delta}$ distantzia axialarekiko zurrumbiloaren zentroaren posizio horizontal normalizatua VGaren irteera ertzetik behera sei VG altueratarako, 0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H, H, eta 1.2H, eta lau eraso angeluentzat β	34
3.5	$\frac{x}{\delta}$ distantzia axialarekiko zurrumbiloaren zentroaren posizio bertikal normalizatua VGaren irteera ertzetik behera sei VG altueratarako, 0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H, H, eta 1.2H, eta lau eraso angeluentzat β	37
3.6	Bortizitate distribuzioa VGaren irteera ertzetik behera x distantziara eta abiadura askearekiko perpendikularra den planoan. Abiadura askearekiko perpendikularra den plano perpendikularrean zurrumbilo nagusi eta bigarren mailakoaren bortizitate eremua. Lerro zuri horizontala z ardatzarekiko paraleloa da eta zurrumbiloaren zentrotik igarotzen da.	40
3.7	Bortizitatearen errepresentazio kumulatiboa VGaren irteera ertzetik jarioan behera 9δ distantziara kokatuta dagoen planoan.	40
3.8	Bortizitatearen distribuzio normala VGaren irteera ertzetik jarioan behera 9δ distantziara kokatuta dagoen planoan.	41
3.9	R_{05} ren CFD emaitzak lau eraso angeluentzat, (a) $\beta = 10^\circ$, (b) 15° , (c) 18° , eta (d) 20° . EXP Brayk[15] lortutako emaitza esperimentalei dagokie 0.9Hko VG batentzat. Balioak mugako geruzaren lodierarekiko (δ) normalizatua daude. y ardatzak $\frac{R_{05}}{\delta}$ erdi-bizitza radioa errepresentatzen du eta x ardatzak normalizatutako distantzia axiala $\frac{x}{\delta}$	43

3.10	Jarioaren noranzkoarekiko elkarzut diren eta VGaren irteera ertzetik δ mugako geruzaren lodiarekiko proportzionala diren distantzietara kokatutako planoetan jasotako hormaren ebakidura tentsioa sei zurrumbilo sortzaileen altueretarako (0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H, H, eta 1.2H). Lau eraso angelu errepresentatzen dira, (a) $\beta = 10^\circ$, (b) 15° , (c) 18° , eta (d) 20°	46
3.11	Bortizitate altuenak eta zirkulazioa VGaren irteera ertzetik 5δ distantziara VG tamaina ezberdinentzat (a) Bortizitate altuena; (b) Zirkulazio positiboa.	48
3.12	ANNan oinarrituriko diseinuaren barne egituraren irudikapena.	49
3.13	Sare Neuronalaren entrenamenduaren erregresioa.	51
4.1	Domeinu konputazionala (a) irudian eta zurrumbilo sortzailearen tamaina (b).	55
4.2	Sareta finagoa VGaren inguruan.	57
4.3	LESentzat sareta baieztatzea: (a) Autokorrelazio funtzioak; (b) Taylorren luzeera eskala eta sareta bereizmena.	59
4.4	VGaren zelda sorta eraikuntza. (a) $\alpha = 18^\circ$; (b) $\alpha = 25^\circ$	60
4.5	Isogainazalak abiaduraz koloreztaturik: (a) RANS guztiz eraturiko sareta ($\alpha = 18^\circ$); (b) RANS zelda sorta ereduan ($\alpha = 18^\circ$); (c) LES zelda sorta ereduan ($\alpha = 25^\circ$); (d) LES guztiz eraturiko sareta ($\alpha = 25^\circ$).	62
4.6	Zurrumbilo nagusiaren ibilbide adimentsionala: (a) Ibilbide bertikala; (b) Horizontala.	64
4.7	Abiadura axial (goian) eta azimutalaren (behean) abiadura profilak: (a) RANS VGaren sarrera ertzetik 5Hra; (b) LES 5Hra; (c) RANS 15Hra; (d) LES 15Hra; (e) RANS 25Hra; (f) LES 25Hra.	66
4.8	Zurrumbilo nagusiaren bizi-erdi gainazala: (a)RANS; (b) LES.	67

4.9	Zurrumbilo nagusiaren zirkulazio positiboaren batez bestekoa, (a) RANS; (b) LES.	68
4.10	VGaren irteera ertzetik (TE) haratagoko hormaren ebakidura tentsioa, (a) RANS; (b) LES.	69
5.1	Bi konfigurazio nagusien adierazpenak. (a) Kontrarrotazionalki kokatuak eta (b) Korrotazionalki kokatuak.	75
5.2	(a) DU97W300 profil aerodinamikoa; (b) 5MWeko NREL pala batean profil aerodinamikoaren banaketa.	77
5.3	Triangelu formako VG bateko indarren ikuspegia: (a) alboko ikuspegia eta (b) goitiko ikuspegia.	78
5.4	Indarrak aplikatu izan direneko VGaren zeldak: (a) goitiko ikuspegia eta (b) alboko ikuspegia.	78
5.5	VGekin hornitutako profil aerodinamikoak: (a) ilaran kokatutako VGak; (b) VG bikote baten xehetasuna neurri geometrikoekin.	79
5.6	$Re = 2 \times 10^6$ zenbakian DU97W300aren (a) aldatze eta (b) arraste koefizienteen alderaketa fluidodinamika konputazionala eta datu esperimentalen artean.	83
5.7	Bortizitate altuenaren ibilbide bertikalaren alderaketa eraso angelu ezberdinentzat.	85
5.8	Bortizitate altuenaren ibilbide horizontalaren alderaketa eraso angelu ezberdinentzat.	85
5.9	Bortizitate altuenaren balioen alderaketa eraso angelu ezberdinentzat.	86
5.10	Hormaren ebakidura tentsio balioak eraso angelu ezberdinentzat.	87

5.11 $Re = 2 \times 10^6$ zenbakian DU97W300aren presio koefizienteen alderaketa hurrengo eraso angeluetan: (a) 0° ; (b) 4° ; (c) 6° ; (d) 10.37° ; (e) 15.25° , eta (f) 18.18° 89

A.1 Abiadura axialaren distribuzioa $U_x \text{ ms}^{-1}$ VGare irteera ertzetik mugako geruzaren lodierarekiko δ distantzia proportzionalean kokaturiko plano elkarzutean, sei VG altuerentzat $0.2H$, $0.4H$, $0.6H$, $0.8H$, H eta $1.2H$. Eraso angelua 10° 102

A.2 Abiadura axialaren distribuzioa $U_x \text{ ms}^{-1}$ VGare irteera ertzetik mugako geruzaren lodierarekiko δ distantzia proportzionalean kokaturiko plano elkarzutean, sei VG altuerentzat $0.2H$, $0.4H$, $0.6H$, $0.8H$, H eta $1.2H$. Eraso angelua 15° 103

A.3 Abiadura axialaren distribuzioa $U_x \text{ ms}^{-1}$ VGare irteera ertzetik mugako geruzaren lodierarekiko δ distantzia proportzionalean kokaturiko plano elkarzutean, sei VG altuerentzat $0.2H$, $0.4H$, $0.6H$, $0.8H$, H eta $1.2H$. Eraso angelua 18° 104

A.4 Abiadura axialaren distribuzioa $U_x \text{ ms}^{-1}$ VGare irteera ertzetik mugako geruzaren lodierarekiko δ distantzia proportzionalean kokaturiko plano elkarzutean, sei VG altuerentzat $0.2H$, $0.4H$, $0.6H$, $0.8H$, H eta $1.2H$. Eraso angelua 20° 105

B.1 VGaren inguruko presio eremua VG altuera eta eraso angelu ezberdinentzat, ikuspegia XZ planoarekiko elkartzuta. Presioa airearen dentsitatearekin normalizatua dago m^2/s^2 108

C.1 Abiadura axiala 12 plano elkartzutetan. Zutabeka: 1.a Guztiz ebatzitako sareta RANSean, $\alpha = 18^\circ$; 2.a Zelda sorta RANSean, $\alpha = 18^\circ$; 3.a Guztiz ebatzitako sareta LESean, $\alpha = 25^\circ$; 4.a Zelda sorta LESean, $\alpha = 25^\circ$. . . 110

- D.1 Abiadura axialaren eremuak eraso angelu ezberdinentzat: (a) 0° , (b) 4° , (c) 6° , (d) 10.37° , (e) 15.25° eta (f) 18.18° neurturik, VGarengandik jarioan behera ohiko VGaren bost adina altuerako distantzian kokatutako plano elkartzutean. 112
- E.1 Zurrunbilo sortaile altuera ezberdinentzat sare neuronal artifizialen bidez lorturiko geruzak R_{05} , eraso angelu (AoA) eta irteera ertzetiko distantziaren arabera. (a) $0.2H$, (b) $0.4H$, (c) $0.6H$, (d) $0.8H$, (e) H , (f) $1.2H$ 114
- G.1 VG laukizuzen baten indarren 3Dtako ikuspegia 121

Argitalpenak

Ikerketa lan honen baitan garatutakoak hurrengo argitalpenak ekarri ditu.

Aldizkarietako Argitalpenak

- Ibarra-Udaeta I, Errasti I, Fernandez-Gamiz U, Zulueta E, Sancho J: **Computational Characterization of a Rectangular Vortex Generator on a Flat Plate for Different Vane Heights and Angles.** *Applied Sciences* 9, 5 (2019).
- Ibarra-Udaeta I, Portal-Porras K, Ballesteros-Coll A, Fernandez-Gamiz U, Sancho J: **Accuracy of the Cell-Set Model on a Single Vane-Type Vortex Generator in Negligible Streamwise Pressure Gradient Flow with RANS and LES.** *Journal of Marine Science and Engineering* 8, 12 (2020).
- Chillón S, Uriarte-Uriarte A, Aramendia I, Martínez-Filgueira P, Fernandez-Gamiz U, Ibarra-Udaeta I: **jBAY Modeling of Vane-Type Vortex Generators and Study on Airfoil Aerodynamic Performance.** *Energies* 13, 10 (2020).

Kongresuak

- Ibarra-Udaeta I, Errasti I, Fernandez-Gamiz U, Zulueta E, Diaz de Argandoña J: **Computational Characterization of Vortexes Generated by Low-Profile Vortex Generators.** *SOWE*, 2017ko Apirila, Pamplona-Iruña.

- Ibarra-Udaeta I, Fernandez-Gamiz U, Errasti I, Zulueta E, Sancho J: **Computational Characterization of a Rectangular Vortex Generator on a Flat Plate**. 7. *ECRES*, 2019ko Ekaina, Madril.
- Ibarra-Udaeta I, Portal-Porras K, Fernandez-Gamiz U, Aramendia I, Zulueta E, Sancho J, Lopez-Guede JM: **Large Eddy Simulation of a Rectangular Vortex Generator on a flat plate with an incident angle of 25°**. 8. *ECRES*, 2020ko Abuztua, Istanbul.

1. Atala

Sarrera

1.1 Motibazioa

Mugako geruzaren bereizketaren kontrolak jariakinen dinamikan garrantzia handia hartu izan du fenomeno honek esparru ezberdinetan eragiten dituen energia galerak direla eta. Mugako geruzaren bereizketa errota, hegal edo beste edozein profileko xurgatze esparruan gertatzen da. Banaketa hau jazo egiten den unean sistemak ezegonkortze orokor bat jasaten du oreka eta euste puntua galtzen du, stall izeneko egoeran murgilduz. Anitz esperimentuen bitartez eta ikerketa askok egoera hau ekiditzen saiatu izan dira nahi ez den egoera bat izanda.

Euste puntuaren galerak suposatzen du energiaren jasotzea gutxienekora egiten duela eta beraz, bukaeran egon daitekeen ekoizpenaren etekin galera nabarmena izan daiteke. Fenomeno honen aurka eta funtzionamenduaren hobekuntza sustatzeko pasiboki eragiten duten jario kontrolatzaile edo eragileak daude, zurrumbilo sortzaileen gisakoak.

Zurrumbilo sortzaileak edo ingelesez eta ohikoan Vortex generators (VG) jarioan eragina duten tamaina txikiko eragile pasiboak dira mugako geruzaren bereizketa ahalik eta gehiena atzeratu edo ekiditzen dutenak. Eragile hauek, zurrumbilo bat sortu egiten dute eta galduko litzatekeen energia berriro sartu egiten da gainazalera, altuago dauden geruzetatik jaso egiten ditu eta berriro sartu egiten du non eta geruzaren, jariakinaren geruzen eta gainazalaren arteko elkarreragina handiagoa den. Horrela mugako geruzatik kanpo dagoen momentua jaso egiten du berriro sartuz, horrela, galdu beharrean energiaren erabilera egingo da. Zurrumbilo hauek kanpo jarioa barnekoarekin nahasten dute eta horrela *stall* edo altzatze fenomenoak atzeratu egiten dute.

Zurrumbilo sortzaileen erabilera eremu askotara hedatu daitekeen arren, berebiziko garrantzia eta erabilera zabala izaten ari dira esparru aeronautikoan eta haize errotetan, kasu bietan, beraien eraginkortasunean bulkada ematearren. Aplikazio aeronautikoei dagokienez, aireratzekoan beharrezkoa den energia kopurua murriztean lagundu

dezakete. Bestalde, haize errotetan, hauen helburua energia elektrikoa ekoiztea izanik, pala tamaina berarekin eraginkortasuna handitu eta energia gehiago ekoiztea lortu liteke. Azken esparru hau bereziki interesgarria da, haize erroten edo berriztagarria den edozein energia iturrietako teknologiaren optimizazioaren auzia gakoa da erabilera sustatu eta erregai fosilen aurrean lehiakorragoa izateko.

Simulazio bat aurrera eramaterakoan gastu konputazional handia baldin badago ere, era arinago eta merkeagoa da beste esperimentazioen aurrean, energia zinetikoaren erabilera eta honen etekina handiagotze aldera. Ereduztapen eta tresna matematiko askoren bitartez eta ikerketa lerro askorengandik lortu daiteke prozesuaren optimizazioaren helburua baina fluido-dinamika konputazionala, CFD (Computational Fluid Dynamics), bereziki interesgarria den tresna bat dugu. Haize erroten tamaina geroz eta handiagoa da eta hauen kontrola geroz eta konplexuagoa, tamaina dela eta jasaten dituzten kargak handiagoak dira eta egiturazko indarrak ere areagotuz doaz, gain hartu egiten dituzten indar guzti horiek arintzeko gaitasunik izatekotan mantenu kostuak jaitsi litezke eta eragile pasiboen bitartez merkea den sistema batekin litzateke. Era berean, jario kontrolerako eragile ezberdinen gaineko ikerketek argi utzi izan dute mugako geruzaren bereizketa ekiditeko tresna eraginkorrak direla eta gertakari honek eragiten dituen energia galerak murrizten.

Karakterizazioaz gain, erreduztapenez gain alegia, giza zein ordenagailu baliabideak eta denbora aurreztuko lituzkeen eredu analitikoa garatzea helburua interesgarria izango da. Eragile hauek instalatzerako unean egin behar diren kalkulu konplexuak errazteko asmoz, eredu analitikoak aukeraketa prozesuan lagunduko luke ikerketaren emaitzen arabera aurreikusirik, egokiena den tamaina zein angelua instalatuz.

Ikerketa honetan, aurreko helburuak kontuan harturik, VGak sorturiko zurrunbiloaren karakterizazio kuantitatibo eta kualitatiboa eta bere izaeraren arabera aurreikuspen eredu analitikoaren garapena medio, simulazioak garatu eta bertan jasotako datuekin erabilgarria den eredu analitikoa sortu da. Lan guztiaren izaera CFD metodoen eraginkortasuna erakustean bildu daiteke, hiru urrats ezberdinetan non RANS, LES eta DES

metodoen bitartez alde batetik, eta guztiz eraturiko sareta, zelda sortaren eredua eta jBAY erabiliz bestetik, VGen ezaugarritze arrakastatsua egitean datza. Baliabide pertsonal, konputazional, ekonomiko eta denborari dagozkionak kontuan harturik, eskaintza nahikoa eta asegarria da *workstation* bidezko diseinurako.

2. Atala

Testuingurua

2.1 Haize errotak

Azken mendean zehar, batez ere Europak eta Ameriketako Estatu Batuek Industria Iraultzarekin alderatu egin daitekeen garapen industrial eta teknologiko handia izan dute, denbora gutxian ekoizpena handituz eta eskaria nabarmenki areagotuz. Energia kontsumoaren handitze honi aurre egiteko erabilitako energiak hasiera batean ikatza eta petrolioa izan ziren, alde batetik eskuragarritasuna zela eta, bestetik, hauetatik energia eskuratzeko prozesuen erraztasunarengatik. Hasierako urteetan prozesu hauek igortzen zituzten CO₂ kantitateak ezezagunak ziren edo behintzat atmosferan izan zezaketen eraginaren irismena ez zen aurreikusi. Klima aldaketaren eraginean errekuntza prozesu industrialek eta energia eskuratzekoek erantzukizun handia daukate eta honekin datozen fenomenoek giza eta gainontzeko bizidunen bizirautean oztopo bat suposatuko dute. Errealitate honen jabe egiten ari den gizartean errekuntza prozesuetatik isurtzen diren gasen kantitatea jaisten hasi den honetan eta hazkuntza teknologikoa eta zientifikoa ez gelditzeko, energia iturri ezberdinak bilatu behar dira energia eskaria asetzeko. Energia eskariak gora egiten jarraitzen duen heinen energia ekoizteko orduan jasangarriak diren iturriak erabiltzeak abantaila bat suposatuko du ingurunearen babesean eta garapen teknologikoan. Energia berriztagarriek jasangarritasun ekologikoa eskaintzeaz gain lehengaien ustiaketaren beharra alboratzen dute autonomia energetikoa ahalbideratuz. Ekoizpen energetikoaren sarean indar handiarekin sartutako sistemetako bat energia eolikoa izan da. Energia eolikoak mugimenduan dabilen aire masari esker ekoizten du sareratuko duen elektrizitatea. Haize turbinen palak mugitzerakoan sortutako energia zinetikoa izango da gero erabilgarria den energia elektriko bihurtuko dena ardatzaren birei esker. Ekoizpen metodo hau izanik energia berriztagarrietan gehien sareratzen duena, interes zientifiko, tekniko eta ekonomiko nabarmena du hauen funtzionamenduaren optimizazioak.

Bi multzo handitan banatu daitezke haize errotak, gehienbat ardatz horizontala duten errotak erabiltzen badira ere ardatz bertikala duteak ere badira. Ardatz horizontaleko

erroten zatiak errotorea dira (haizearen energia jasotzen duten palak barne), *nacellea* non besteak beste sorgailua bera duen eta dorrea, aurreko biak lurrarekin elkartzen dituen.

Ardatz horizontala duten haize-turbinen egiturazko eiteak baina, sortu nahiko litzatekeen momentua eskuratzeko beharko zen forma aerodinamikoa izatea galarazten du. Hori, palaren eraso angelua nahiko altua bada, gainazalaren inguruko jariakina gainazalari itsatsirik ez mantentzean gertatzen da. Fluxu kontrolatzaileak, zurrumbilo sortzaileen (VG) gisa, gainazalean lerro batean jartzen badira, jariakinaren banatzea saihestu egin daiteke ardatzaren eraginkortasuna hobetuz, [14]. Gailu hauek instalazioa egin osteko konponbide bat dira, turbina batek espero zeneko eraginkortasuna eskuratzen ez denean, hau hobetzen lagun dezaketena. Errendimenduaren hobekuntza hau altzatze kurbaren luzapenaren ondorio da. VGaren kokapena eta instalazioa modu ezberdinetan egin daiteke eta tamaina zein forma ezberdinetan. Jarioaren kontrolerako gailu mota hau martxan jartzea oso merkea eta erraza da sistema haize turbina baten eraginkortasuna handitzeko.

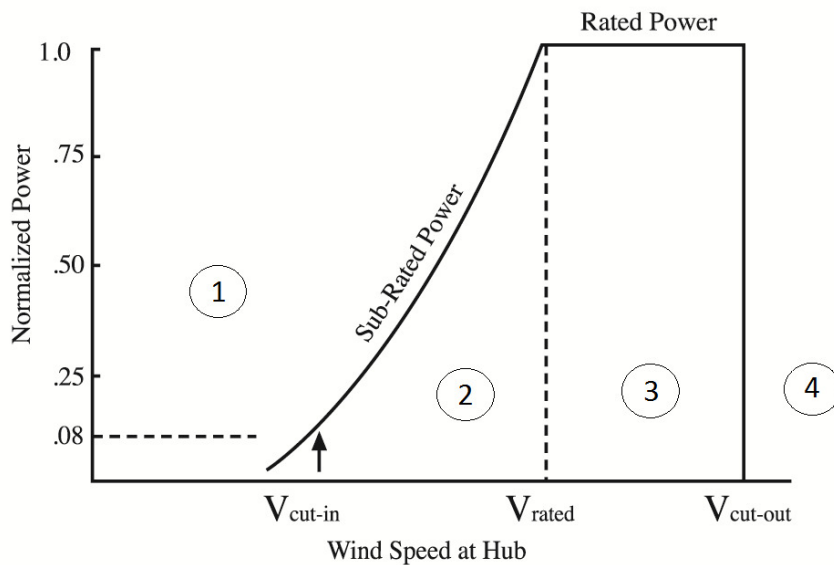
Haize turbinen hobekuntzaren auziak hiru puntu giltzarri ditu. Alde batetik, ardatzak jasan dezakeen indarra, abiadura eta momentua mugatzea. Bestetik, haize aldaketek, gelditze eta abiatze prozesuek, abiadura eta turbulentziek egituraren eta batez ere ardatzean eragiten duten neke kargak murriztea lan bizitza luzatzeko. Azkenik eta aurreko biak bilduz, energia ekoizpenaren eraginkortasuna eta kantitatea handitu.

Energiaren kostuak paper garrantzitsua hartzen du gakoa den azken puntu honen barruan, energia mota hau, energia eolikoa, alternatiba bideragarri gisa termino ekonomikoetan, mantendu ahal izateko energia tradizional edo gainontzeko berriztagarrien aurrean. Hiru aldagai independente daude bere baliagarritasuna kalkulatzeko, hurrengo ekuazioan ikus dezakegun bezala. Turbinak bere bizitza osoan zehar xurgatutako energia, turbinaren kostua, eta eragiketa eta mantentze-kostuak (OM) kontuan hartzen direnekoan.

$$COE = \frac{\text{Bizitzan xurgatutako energia}}{\text{Turbinaren kostua} + OM} \quad (2.1)$$

Kargak, aipatutako bigarren puntuarekin erlazonaturik daudenak, bi eremu ezberdinetan bereizi daitezke, aerodinamika kargetan alde batetik eta egitura kargetan bestetik. Zeharkako haize bertikal edo horizontalak eragindako palaren inguruko azaleretan dabilen abiadura erlatiboak, turbulentsiak eta balantzaldi edo makurdura desbideraketek, ardatzean karga aerodinamikoak eragiten dituzte. Indar grabitazionalak ere, eraikuntza beraren pisuaren jabe izanik ere eragin handia izan dezake, ardatzean aldizkako kargak eratuz. Guzti hau txikitzeko asmoz kontrol sistemek karga aerodinamikoek eragindako aldaketak murriztu behar dituzte edo egitura nodoei moteltzea gehitu.

Lehenik eta behin, ezinbestekoa da haize-turbina batean haizearen abiaduraren eta energia normalizatuaren arteko harremana zein den jakitea. Lau lan eskualde ezberdin daude, hurrengo irudiak energia kurbak definitzen duen bezala.



Irudia 2.1: Haize turbina baten energia kurba.

Lehenengo eskualdean, haizearen abiadura ez da nahikoa energia sortzeko. Bigarrengoan, cut-in abiaduraren (V_{cut-in}) eta zehaztutako abiaduraren (V_{rated}) artean dagoena, energia ekoizlea zehaztutako indarraren azpian lan egiten du. Hirugarren eskualdean, energia irteera turbina batek mugatzen du, hau turbinak irteera energia lortzeko adina haize

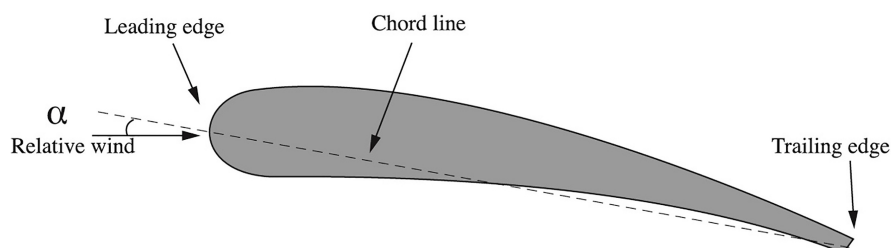
intentsitatea duenean jazotzen da. bere energia sarera iristeko. Laugarren eta azkena den eskualdean, haize abiadura altuagoarekin bat datorrena da, turbina itzali eta haize turbinaren egituran kalteak eragin baititzake, mantentze kostuetan eragin nabarmena izanik. Lehenengo bi eskualdeak banatzen dituen kurbak. 1. eta 2. eskualdeak bereizten dituen kurbak energia ekoizpenari buruzko oinarritzko lege bat erakusten du, non energia ekoizpena zuzenean harremantzen den haizearen abiadurarekin.

2.2 Zurrunbilo sortzaileak

Azken hamarkadetan jariakinen kontrolerako gailu ezberdin asko garatu dira. Gehienak aplikazio aeronautikoetarako sortu ziren eta hau zen beraien hasierako ikerketa eremua. Gaur egun ikertzaileak kontroladoreen optimizazioan eta haize turbinetan duten eraginkortasunean lan egiten ari dira.

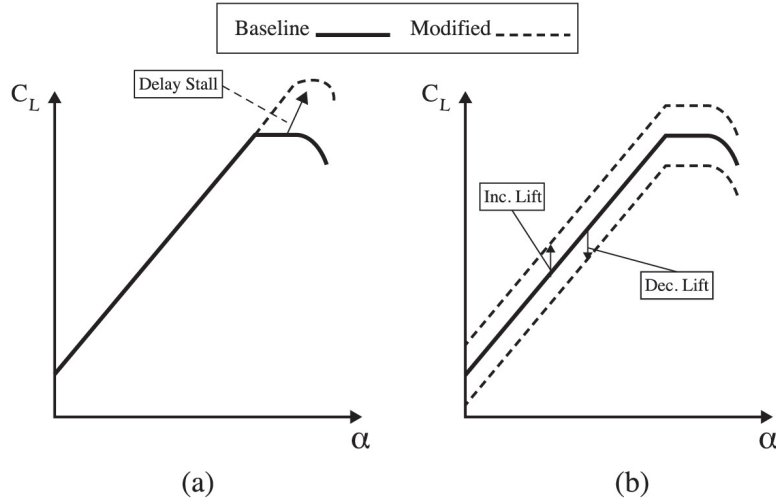
Woodek [70] lau geruzako eskema bat garatu zuen zeinaren bitartez, fluidoaren kontrolerako gailu ezberdinekin loturiko kontzeptuak sailkatzeko aukera ematen den. Lehenengo geruza, teknikaren arabera da gailu geometrikoa (G) denean, profilaren geometria aldatzen dituen eta horrekin jarria. Jarioaren arabera gailua (F), jarioa aldatzen da barneko jariakina ateraz edo kanpoko sartuz.

Bigarren geruzak kontrolatzailearen kokapenari egiten dio erreferentzia, sarrera ertzetik (LE) gertu, irteera ertzetik (TE) eta kordaren erdi partean (MC).



Irudia 2.2: Profil aerodinamiko baten sekzioa eta ezaugarriak.

Hirugarren geruzan kontrolatzaileak altzatze koefizientearen balioetan duen eraginean oinarritzen da, altzatze balioetan bi modu ezberdinetan eragin baitezakete. Alde batetik, kurba goraka edo beheraka eraldatu dezakete, altzatze handitu edo txikitzen badute. Bestalde, kurba *stall* egoerara luzatuz jokatu dezakete, ikus hurrengo irudian 2.3.



Irudia 2.3: C_L eta α n oinarriturik altzatze kurbaren aldaketa.

Kargak arrakastaz arindu ahal izateko, ezinbestekoa da gailu batek altzatze orokorra murritztu ahal izatea. Lehen begiradan 2.3 irudian ikus daitekeenez, *stall* egoera atzeratzen duten gailuek (DS) eraso-angelu altuetan soilik handitzen duela altzatzea. Horregatik, DS kontzeptuan oinarritutako horiek ez lirateke karga arintzearen alternatiba egokitzat hartuko. Hala ere, Cortenek [20] aurkeztutako proposamen batek modu ezberdin bat eskaintzen du turbina kargak gailu mota honen bitartez arintzeko.

DS gailuen aplikazio nagusia dagoeneko eraikita dagoen profil batean kokatzean datza C_{Lmax} handitzeko eta, ondorioz, *stall* egoera atzeratuz. Altzatze indarra hurrengo ekuazioak definitzen du:

$$FL = C_{Lmax} \frac{1}{2} A v^2 \quad (2.2)$$

Airearen dentsitatea kg/m^3 tan neurturik, profil aerodinamikoaren azalera (A) m^2 tan eta

abiadura (V) m/s. C_{Lmax} gehieneko altzatze koefizientea da. ek aurkeztutako ideia profila berreraikitzean zetzan, berdiseinatzean alegia, DS gailu bat duen profil baten gehieneko zeharkako altzatzeak, DS gailurik gabeko jatorrizko profilarekin bat egiteko. 2.4ek azaltzen du bi diseinuen arteko aldea. Dentsitatea eta abiadura bi kasuetan berdin lirateke baldintza antzekoetan. Beraz, C_{Lmax} DS dispositiboaren eraginarengatik handitzen denez, (C) kordearen luzeera altzatze indarraren ekuazioaren arabera murrizketa bat jasango luke, 2.3 eta 2.4 ekuazioetan ikusten den bezala:

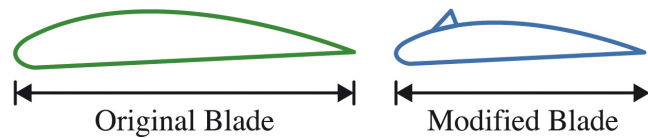
DS gailurik gabe:

$$FL = C_{Lmax} \frac{1}{2} \rho A v^2 = C_{Lmax} \frac{1}{2} \rho (cb) v^2 \quad (2.3)$$

DS gailuarekin

$$FL = C_{Lmax} \uparrow \frac{1}{2} \rho A \downarrow v^2 = C_{Lmax} \frac{1}{2} \rho (c \downarrow b) v^2 \quad (2.4)$$

Non (c) palaren korda den metroetan neurturik, eta (b) zabalera metroetan.



Irudia 2.4: (a) Jatorrizko profila eta (b) altzatze bera duen VGa instalaturik duen profila.

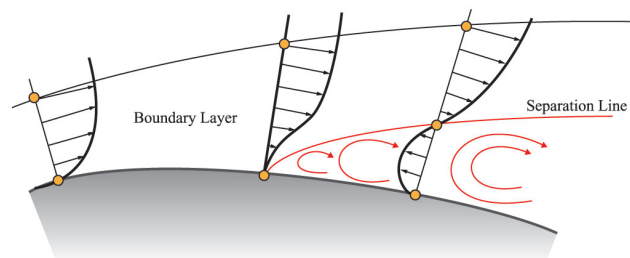
Azkenik, Wooden laugarren geruzak kontrolatzailearen lan baldintzen arabera klasifikazioa dago, egoera egonkor edo ez egonkorrean lan egiten dutenaren arabera, hau gailuaren posizioa denboran zehar aldatzen denaren arabera. Adibidez, TE flap bat egonkorra den kontrolatzaile gisa klasifikatzen da bere mugimenduen arabera jario egonkorra denbora zehar mantentzea duelako helburu.

Printzipio operatiboaren arabera, jarioaren kontrolatzaileak aktibo edo pasibo gisa sailka daitezke, ikus Aramendia et al.[5, 4] eta Barlas et al. [10]. Jarioaren kontrol teknika pasiboek turbinaren eraginkortasuna hobetzen dute edota kargak eta galerak murriztu, kan-

poko energia kontsumorik gabe. Kontrol aktiboko teknikek, ordea, kanpoko energia behar dute kontrola aurrera eramateko edo behintzat, bigarren mailako energia iturburu bat. Kontroladore aktiboen kasuan, ikerketa gehiago egin behar dira energia irteeran eskuratu-tako handitzeak, beharrezkoa den kanpoko energia orekatzen duen eta horrela abantaila bat suposatzen duen jakiteko, baita turbina eraikitzean beharrezko gastu ekonomiko handiagoa eta kapitalaren eta mantenu eta funtzionamendu kostuen handitzea ere orekatzen duen ebazteko. Kontroladore aktiboek edonola ere, etekinean hobekuntza bat izateko konplexuak diren algoritmoen implementazioa eskatzen dute, ikus Becker et al. [11]. Sakonagoa den kontrolatzaileen konparaketa Johnsonek et al. [40] aurrera eramandako ikerketan ikus daiteke.

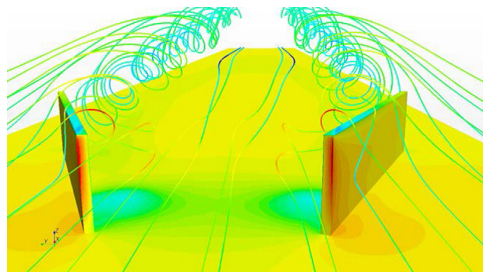
Zurrumbilo sortzaile bat, ingelesez Vortex Generator (VG), jario kontrolatzaile pasibo bat da, mugako geruzaren mugimendua aldatzen duena, kanpoaldean dagoen jariakinaren momentua eta mugatutako isuriaren barneko isurialdea aldatzen dituen. Helburu nagusia da jariakinaren banaketa atzeratzea eta gehienezko altzatzeko koefizientea handitzea. VG geruza berriz barneratze diseinatuta daude, korrante askeko abiaduraren eta gertuko hormaren arteko momentu transferentzia berriro sartuz.

Mugako geruzaren banaketa, mugako geruzaren zatia hormatik gertuen dagoenean edota sarrera ertzean atzeraka ibiltzen hastean ematen da. Ikus 2.5 irudia. Bereizketa, ebakidura tentsioa zero denean edo *stall* egoerarengandik gertu ematen da.



Irudia 2.5: Alderantzikatutako presio gradientea duen abiadura profila eta mugako geruzaren banaketa.

Hasiera batean Taylorrek aurkeztua, [64] VGek berrogeita hamar urtez baino gehiago daramatzate aerodinamika eta hego hegazkinetako aplikazio gisa ikertuak izaten. Plaka txikiak dira, normalean triangelu edo laukizuzen formakoak, sarrera jarioarekiko eraso angelu batez ezarriak eta profilaren sarrera ertzetik ahalik eta hurbilen kokatuak. Normalean, gainazalaren zabalean paraleloki instalatzen dira eta abantaila gisa, behar bezala lan egiten ari ez diren instalazioetan eraiki ostean gehigarri bezala jarri daitezkeen elementuak dira. Beraien altuera uneko muga geruzaren lodieraren antzekoa izan ohi da. Fernandez-Gamizek et al. [25] VG laukizuzen batek plaka lauan duen portaera aztertutuz, baita VGak berak sortutako zurrunbiloen izaera ere eta hauen lortzaren nondik norakoak, betiere presio gradiente arbuigarri batean zelan, CFD simulazioetan agertzen diren eta hauen zehaztasuna behaketa esperimentalekin alderatuz, 2.6.



Irudia 2.6: Zurrunbilo sortzaileak dituen plaka lau baten jario lerroak[25]

Pearceyk [56] adierazi zuen VGak oinarritzko bi modutan ezar daitezkeela, Korrotazionalki lerrokatuta guztiak noranzko berean eta zurrunbiloek horrela noranzko bera hartuz. Bestetik kontrarrotazionalki kokatu daitezke non zurrunbiloek horrela, tarteka noranzko ezberdinak hartuko dituzte. Godardek eta Stanislasek[30], VGek kontrarrotazionalki kokatzerakoan indar handiagoz funtzionatzen dutela frogatu zuten, eta haien geometria triangeluarra denean.

VGek haize-turbinetan duten eragina aztertzeko, kokapena eta banaketa optimizatzeke, CFD teknikak erabil daitezke. Izan ere, VGekin hornitutako profil aerodinamiko oso bat modelatzea oso garestia izan daiteke konputazionalki eta denborari dagokionean. Horrelako sareta batek zelda kopuru handia izan beharko luke eta bertan simulatu nahi deneko

fenomenoa oso txikia den esparruan ematen da, mugako geruzaren banaketa alegia.

CFD bitartez VGak modelatzeko modu alternatibo bat, zurrumbilo sortzaileak mugako geruzan duen eragina erduztatzean datza, gorputzen indarrek eta hauek sortutako muga baldintzak kontuan hartuz. Horrela, Benderrek et al. [12] BAY eredua aurkeztu zuen, zurrumbilo sortzaileak hauen geometria zehaztu gabe simulatzeko. Gerora, Jirasek [37] eredu honen bertsio berria aurkeztu zuen, jBAY izeneko eredua, altzatze indarraren teoriar oinarritua.

Fernandez-Gamiz et al. [26] ikerketan plano lauan lau VG eredu ezberdinen arteko konparazio zehatza aurkeztu zen. Lehena guztiz ebatzitako sareta tradizionalan oinarritzen da. Bigarrenak, Actuator Vortex Generator Model (AcVG) izenekoak, VGak daudeneko jariakinen portaera CFD bitartez simulatzeko metodo eraginkorrago bat eskaintzen du. Hirugarrena eredu esperimental da, Velte et al. [67] laneko datu esperimentaletan oinarrituta, neurketak abiadura baxuan egin ziren, zirkuituko itxiko haize tunel batean. Lau garren eredua egitura helikoidalean oinarritutako zurrumbilo nagusiaren erduztatze analitikoa da. Ideia honi jarraituz, Zamorano G. et al.[73] VGaren irteera ertzetik beherako lorratzaren eboluzioa aztertu zuen eraso angelu ezberdinentzat. Øye [55] eta Miller[52], 1 MWko eta 2.5 MWeko haize errota banan, VGarekin eta VGrik gabeko potentzien grafikoaren neurketa egin zuten eta bi kasu hauen alderatzean nabarmenki VGdun palak potentzia gehiago sortzen duela ondorioztatu. Are gehiago, palaren elementu momentuan (blade element momentum, BEM) oinarritutako konputazioetan Fernandez-Gamizek et al.[28] batez besteko energiaren %3tik %9rako igoera ondorioztatu zituzten fluxu kontrolatzaile pasiboen instalazioak eraginda. Konparaketa zabalagoa egin zuten Skrzypinski et al.[61] sei pala ezberdin alderatzean non energia etekin handiagoa jasotzen den adierazi zuten. Era berean, *shock*ez eragindako mugako geruzaren banaketa arrakastaz atzeratu zen zurrumbilo sortzaileak instalatu ondoren, Ashill et al.[6, 7]n erakutsi zen bezala. Berriki, presio gradiente arbuigarria eta alderantzizko presio gradienteko bi ikerketa ezberdinen arabera, RANSen oinarritutako simulazioek zurrumbilo sortzaile batek

eratutako zurrunbilo bat asetasunez karakterizatu eta iragarri zuten, Gutierrez-Amo et al. [32] eta Fernandez-Gamiz et al. [24]ek burututako ikerketek zenbakizko simulazioen eta EBko AVATAR proiektuaren haize-tunelarekin konparazio bat egin zuten. Datuen adostasun nahikoa aurkitu zen simulazioen eta esperimientuen artean, bai koalitatiboki zein koantitatiboki. Ondorio gisa, RANSen oinarritutako simulazioak gai dira zurrunbiloek jarioan izandako eskala handiko eraginak atzemateko, ikusi ere, Fernandez-Gamiz et al.[26].

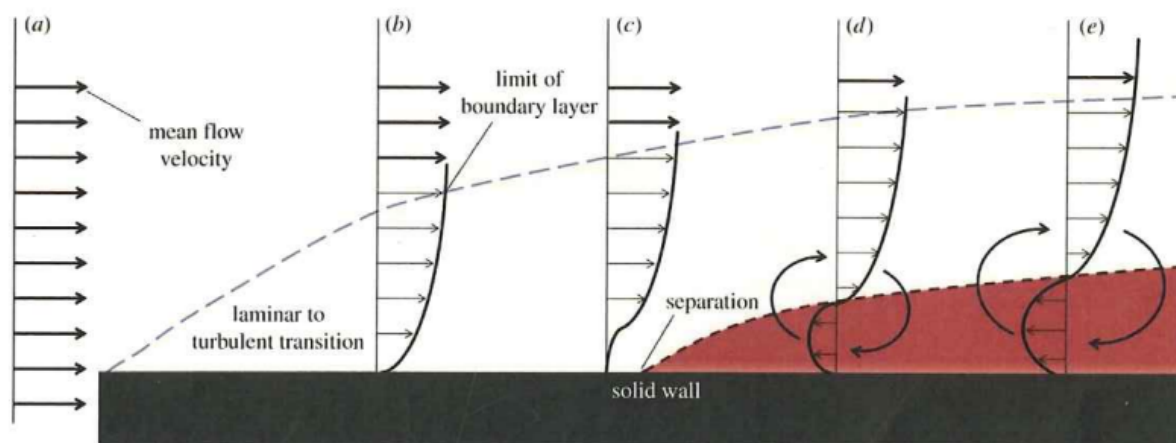
Gailu hauek abantaila garrantzitsu ezberdinak erakusten dituzte, hala nola, tamaina txikia dela eta, kopuru handi bat barreiatu daitekeela profilean zehar. Era berean, arazorik gabe ordeztzen dira modu merke eta errazean, eta aukera eskaintzen dute behin profila eraiki ostean eta behar besteko eraginkortasuna izaten ez duenean, profil aerodinamiko hortan eransteko. Bestalde, zurrunbilo sortzaileen inplementazioak dakarren desabantaila nagusia, barne hartzen duen arrastearen handitzea (CD) da, batere desiragarria ez den ezaugarria honen moduko instalazioetan. Halaber, beren integrazioaren eraginez, haize-turbinaren errendimenduan edota baldintza aerolastikoetan ez eragiteko arreta berezia jarri behar da.

2.3 Mugako Geruzaren Teoria

2.3.1 Sarrera

Mugako geruza etengabe mugituz doan jariakin likatsu baten jarioaren baitan solidoa den hormaren gainazaletik gertu dagoen eta honekin ukipenezko harremanean dagoen geruza mehe bat da. Jarioaren abiadura aldatuz doa zerotik hormaren parean non biskositatea dea eta itsatsita geratzen den, jarioaren abiadura askeraino (u_e), mugan ematen dena %1eko akatsarekin.

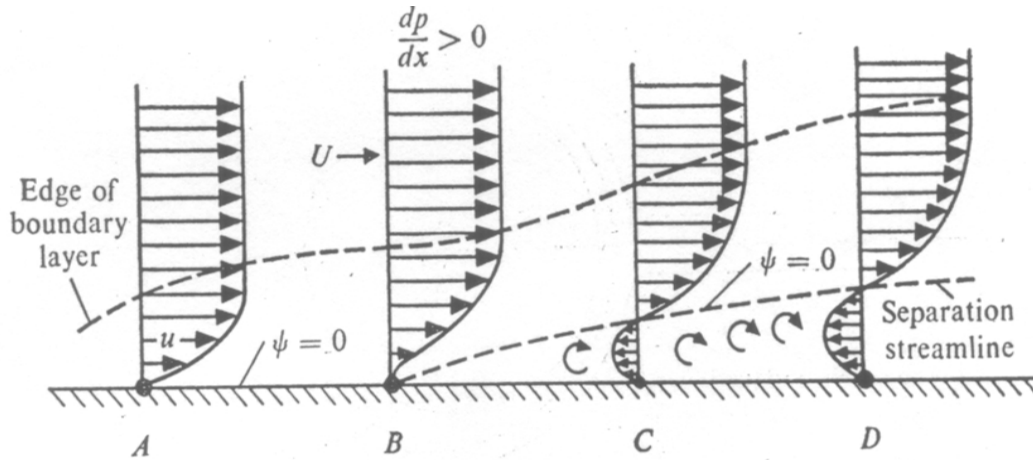
Mugako geruzaren mugimenduak aurreran egin ahala distantzia nahiko batean zehar eta kontrako noranzkoan presio gradiente bat jasaten badu orduan ematen da abiadura ezberdintasun nabarmen hori, behin alderatuta gainazala eta jario askearen arteko abiadura. Handituz doanean, zizailadura tentsioaren aurka, jariakinaren zati batek kontrako noranzkoa hartu dezake eta atzeraka egin, horrela, geruza hori gainazaletik banatu egiten da eta turbulentzia zein kontrolatu gabeko zurrunbiloak eragiten dituen ezaugarri aerodinamikoek galera bat izateaz gain mugimendurako geroz eta erresistentzia handiago izanda. 2.8 irudian aurkitu dezakegu honako prozesua errepresentatzen duen adierazpen grafikoa.



Irudia 2.8: Kontrako presio gradientedun jario aske baten mugimendua plaka lauan.

Plaka lau batean jariakin likatsu bat kontsideratu egiten badugu 2.8 irudian adierazten den bezala, biskositatearen eragina gainazaletik gertu dagoen geruzan atzematen da. Jariakinaren geruzen eta hauen barruan mugitzen diren gorputzen artean bero transferentzia bat egon badagoen arren, abiadurarekin loturiko auziak kontuan hartuko dira soilik honako ikerketan. Ez-irristatzeko (no-slip) baldintzek adierazten duten bezala gainazalean jariakinaren abiadura zero da, Anderson[3]. Gainazaletik abiatuta abiadura geroz eta handiagoa da profil bertikalean zehar, plakatik elkartzut abiadura askearen balioa hartzen duenerate. Gertakari hau gainazaletik δ distantziara emango da non $u = 0.99u_\infty$ den. Aipaturiko δ distantziaren balioak mugako geruzaren lodiera adierazten du. Jarioaren noranzkoan edozein x puntuan, abiaduraren ezberdintasunak, gainazala eta δ ren artean,

mugako geruzaren abiadura profila zehazten du.



Irudia 2.9: Mugako geruzaren lodieraren garapena eta haren abiadura profila.

Sortutako abiadura gradiente dela eta ebakidura tentsio bat agertu egiten da gainazalean,

$$\tau_w = \mu(\partial u / \partial z)_w \quad (2.5)$$

Non $(\partial u / \partial z)_w$ abiadura gradientearen den gainazalean..

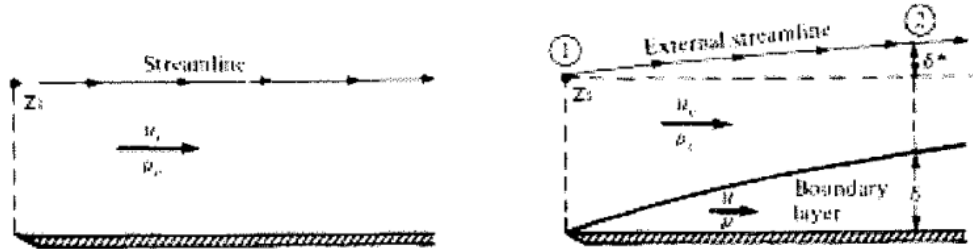
2.3.2 Desplazamendu Lodiera

Ezaugarri honek erraztasun handiak ematen ditu mugako geruzekin lan egin behar denean eta honela definitu egiten da.

$$\delta^* = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{\rho u}{\rho_e u_e}\right) dz \quad \delta \leq z_1 \rightarrow \infty \quad (2.6)$$

2.10 irudian ikus bezala, gainazal batean jario bat kontsideratuz, ezkerreko irudian biskositate indarrek gainazalean eraginik ez daukaten jariakin ideal bat adierazten zaigu. Gainazalarekiko edozein z_i distantzian dagoen geruza harekiko paraleloa da. Hala ere, eskuineko irudikapenean non biskositate indarrek eragina duten mugako geruza bat agertzen da eta mugako

geruza honetan zehar jarioaren abiaduraren gutxitze bat emango da ezin duelako jarioaren abiadura askean jardun.



Irudia 2.10: Ezkerrean mugako geruzarik gabeko jario hipotetikoaren irudia ageri da, non jarioa zuzenki mugako geruzaren gainean zehar jartzen den. Eskuinean, mugako geruzaren benetako jarioaren irudia ageri da, non mugako geruzaren gainean jarioaren abiadura gutxitzen den eta mugako geruzaren gainean jarioaren abiadura askean jardun.

Horrela mugako geruzaren kanpoko korrante lerroa mugitua izango da bere paralelotik δ^* distantzia batera 2.2 ekuazioan definiturik agertzen den bezala.

2.3.3 Momentu Lodiera

Momentu lodiera mugako geruzaren ezaugarri garrantzitsua izango da ikerketa honetan VGen helburu nagusia jariakinen korranteak gainazalera itsasteko aukerak ematen dituen momentu bat sortzea delako. Momentuaren lodiera, jario askearen momentua eta zeharkako momentu sekzionalaren arteko kenketaren emaitza da, berdintze honetatik jaso egiten den erduztapen matematikoa 2.3. ekuazioan ikus daiteke.

$$\theta = \int_0^{z_1} -\frac{\rho u}{\rho_e u_e} \left(\frac{1-u}{u_e} \right) dz \quad \delta \leq z_1 \rightarrow \infty \quad (2.7)$$

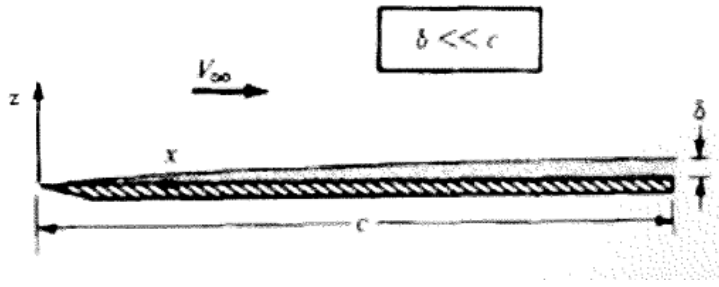
2.3.4 Mugako Geruzaren Ekuazioak

Mugako geruzarekin lan egin ahal izateko garapen matematikoak bi oinarri hartzen ditu bere baitan. Lehendabizi, bi-dimentsionala eta egoera egonkorrean higitzen den jario

bat kontuan hartuz gero, x n ematen den dimentsiorik gabeko momentuaren adierazpena horrela jasotzen da,

$$\rho' u' \frac{\partial u'}{\partial x'} + \rho' v' \frac{\partial u'}{\partial z'} = -\frac{1}{\gamma M_\infty^2} \frac{\partial p'}{\partial x'} + \frac{1}{Re_\infty} \frac{\partial}{\partial z'} \left[\mu' \left(\frac{\partial v'}{\partial x'} + \frac{\partial u'}{\partial z'} \right) \right] \quad (2.8)$$

Hau, Navier-Stokesen ekuazioetako baten sinplifikazioa da eta bigarren printzipioa kontuan harturik, mugako geruzarekiko gerturatze arrakastatsua eta egokia da. Aipaturiko bigarren printzipioa zentzu orokor batean, mugako geruzaren lodiera benetan meharra da mugitzen dabilen fluxu guztiaren tamainarekin alderatuz gero, are gehiago, hurrengo irudian ikus daitekeen bezala Reynolds zenbakia $1/\delta$ baino handiagoa da.



Irudia 2.11: Mugako geruzaren lodiera gainontzeko jariakinaren tamainarekin alderatuta.

Behin hurbilketa guzti hauek onartu egiten badira, Navier-Stokes ekuazioek itxura erabilgarriagoa hartuko dute erraztasun handiagoaz aplikatzeko aukera emanik.

$$\text{Jarraipena : } \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = 0 \quad (2.9)$$

$$\text{momentua in } x : \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p_e}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.10)$$

$$\text{momentua in } z : \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2.11)$$

$$Energia : \rho u \frac{\partial h}{\partial x} + \rho v \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + u \frac{\partial \rho_e}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (2.12)$$

2.3.5 Jariakin Konprimaekin Plaka Lauan

Konprimaekina eta bi-dimentsionala den jario bat kontsideratuko da, plaka lauan eta 0°dituen eraso angeluarekin 2.11 irudian agertzen den bezala, ontzat harturik ere jariakinaren dentsitatea eta biskositate dinamikoa konstanteak direla, eta horrezaz gain gainazalaren gainean presioa konstantea dela, $dp_e/dx = 0$. Beraz, 2.9, 2.10, 2.11 eta 2.12 ekuazioak honela sinplifikatzen dira.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (2.13)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2.15)$$

ν biskositate zinematikoa dela kontuan izanda $\nu = \mu/\rho$ ren gisa definitzen da. (x, z) Aldagaiak aldaturik hurrengoengatik, (ξ, η) 2.16n agertzen bezala eta aurreko ekuazioen garapen matematikoa eginez ohikoa eta ez lineala den ekuazio diferentziala izango dugu emaitza bezala, zeina ebatzia izateko teknika numerikoak erabili behar diren 2.17 ekuazioan mugako aldagaia direla ikusita.

$$\xi = x \quad \eta = z \sqrt{\frac{V_{infty}}{\nu x}} \quad (2.16)$$

$$f = 0; \quad f' = 0, \quad 2f''' + ff'' = 0 \quad (2.17)$$

Ekuazio diferentzialak hauek behin ebatzita daudela abiaduren profila eskuratu egiten da eta era berean Blasiusen ekuazioaren eta mugako gainazalaren lodieraren emaitza bat. Emaitza hau jarioaren noranzkoan dagoen distantziaren araberkoa eta baita Reynolds zenbakiaren araberkoa 2.18 ekuazioan ageri den bezala, turbulentzia jasaten duten mugako geruzen kasuan ordea, 2.19 ekuazioan jasotako espresioa erabiliko genuke, ikerketa honetan egin behar den bezala.

$$\delta = \frac{5.0x}{\sqrt{Re_x}} \quad (2.18)$$

$$\delta = \frac{0.37x}{\sqrt[5]{Re_x}} \quad (2.19)$$

2.3.6 Mugako Geruzaren Bereizketa

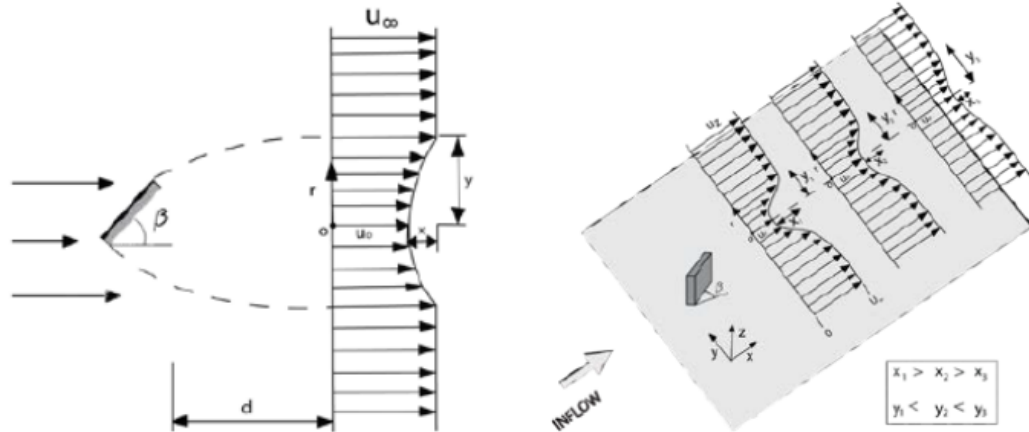
Jarioaren bereizketa edo hobeto adierazita dagoena, mugako geruzaren bereizketa gainazal batetik jazotzean aplikazio praktikoei dagokienean berebiziko garrantzia hartzen duen fenomeno da. Hori horrela da jarioa eta harremanetan dagoen gorputzarekin duen interakzioarekin duen elkarreragina definitu egiten baitu. Bereizketa hau ematen den lekua eta unea gainazaletik gertu dauden fluxuaren molekulak gelditu egiten direnekoa da eta jarioaren noranzkoan jarraitu beharrean kontrakoan ibiltzen hasten direnekoa. Bereizketa jazo egiterakoan jariakinaren ebakidura indarrak gorputzaren gainazalean zero dira.

Mugako geruzaren bereizketa lehendabizikoz Prandtlek proposatu egin zuen mugako geruzaren teoriaren baitan, gorago aipatu dugun bezala. Azpimarratu egin behar da Prandtlen teoria jariakin bi-dimentsionalei begira proposatu egin zela eta ontzat harturiko bi printzipio

kontuan harturik. Alde batetik jarioaren noranzkoan presioaren handitze bat eman beharra da, aurkako presio gradiente bezala ezagutzen dena. Bestalde, beharrezkoa da bai jario turbulentu zein laminarretarako indar biskosoak egotea.

2.3.7 Autoantzekotasuna eta Simetria Helikoidala Zurrunbilo Sortzaileen Jarioan

Zurrunbilo sortzaile batek sorturiko zurrunbiloa helikoidalki simetrikoa dela esateak, jarioaren noranzkoan eta ardatz longitudinalean sortzen den u_z profila eta u_θ jario erroztazionala, bortizitatearen fluxu lerroen forma helikoidalean oinarriturik zuzenki harremanduak direla esan nahi du, Fernandez-Gamiz[26]. Are gehiago, autoantzekotasuna eskalan aldaketak egon badaitezkeela onartuta ere, VGarengandik beherago abiadura profila antzeko mantentzen direla dioskun ezaugarria da, Crespo[21].



Irudia 2.12: Abiadura profilen antzekotasuna VGarekiko distantzia ezberdinetara, Fernandez-Gamiz [25].

Aipaturiko simetria helikoidalaz gain Velte[66] eta Velte[67]n luzeetarako abiadura eta erroztazionala zuzenki harremanduak direla ondorioztatu daiteke hurrengo ekuazioari soz non u_z luzeetarako abiadura den, u_0 abiadura konbektiboa, u_θ abiadura azimutala, r erradio bektorea eta l urrats helikoidala. Ekuazio hau koordenatu polarren bitartez adierazten

da:

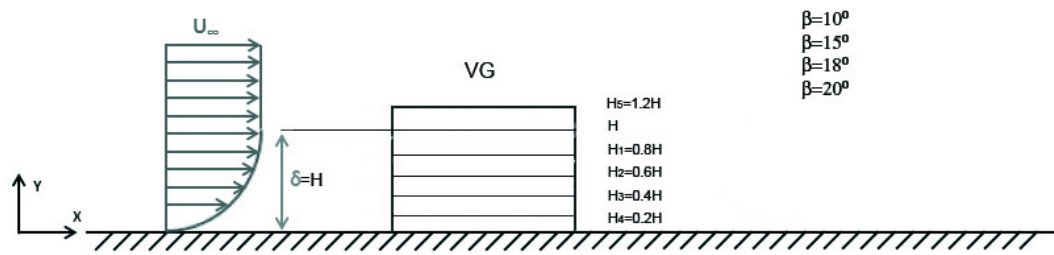
$$u_z = u_0 - \frac{r}{l}u_\theta \quad (2.20)$$

2.3.8 VGaren Eraso Angeluaren Mendekotasuna Plaka Lauan

Kontuan hartu beharreko VGaren beste ezaugarrietako bat eraso angeluarekiko baldintzapena da. Ikerketa ezberdinei esker, Fernandez-Gamiz[25], Zamorano[73], VGak sar-
rera isuriarekiko duen angeluaren araberako jarioaren aldaketa bat eragiten duela jakin
daiteke. Hori dela eta, zurrunbilo sortzailearen angeluaren aldakuntza bat egongo da
zurrunbilo sortzaileek eraturiko zurrunbiloen parametrizazioetan.

2.3.9 VGaren Altueraren Mendekotasuna Zurrunbiloan

Zurrunbilo sortzaileak, normalean, bere altuerak muga geruzaren altuerarekin bat egiteko
kokatuak izaten dira. Jario askearekiko ezberdina den eraso angelu jakin batekin, plaka
lau batean kokatu ohi dira, jarioan behera zurrunbilo bat sortzeko. Gailu hauek kanpoko
geruzetan dagoen jariakina harrapatu eta horrekin daukan momentua, eta gainazalaren
inguruko jarioa sartu egiten badute bertan momentua txertatuz, jario kontrolatu egin
daiteke eta behintzat azterketaren emaitzak, gailu horren tamaina onena aukeratzeko la-
gungarriak izan daitezke, dagokion aplikazioaren arabera. Hori dela eta, ikerketa parametrikoetan
altuera ezberdinak kontuan hartu dira, guztiz ebatzitako sarearen ikerketan nagusiki,
zeinetan hurrengo irudian agertzen diren altuerak jaso izan dira.



Irudia 2.13: VGaren altuera ezberdinak mugako geruzaren lodierarekin eta VGaren altuera konbentzionalarekin alderatuz.

3. Atala

Zurrunbilo Sortzaile Baten

Karakterizazio Parametrikoa

3.1 Sarrera

Hasten den atal honetan garatuta helburu nagusia, teknika konputazionalen bitartez, zurrumbilo sortzaile batek sortutako zurrumbilo nagusiaren karakterizazio parametrikoa egitea da. Horrela, hegazkin hegaletan eta haize turbinen paletan kokatzeko tamaina eta noranzko egokia zein den ondorioztatzeko. Ikerketa parametriko bat egiteko beharrezkoa da kasu kopuru handi bat numerikoki simulatzea, alde batetik lau eraso angelu (AoA) ezberdin planteatu izan dira, $\beta = 10^\circ$, $\beta = 15^\circ$, $\beta = 18^\circ$, eta $\beta = 20^\circ$. Bestetik, sei VG altuera ezberdin simulatu dira 0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H, H eta 1.2H.

Ikerketa honetako 24 CFD simulazioak OpenFOAM[54] kode irekian egin dira, ikus Weller et al.[69], zurrumbilo nagusiaren tamaina eta ezaugarriak kasu guztietarako kalkulatu.

3.2 Antolamendu numerikoa

Zurrumbilo sortzaileek eraturiko zurrumbilo nagusia ikertu eta ulertu ahal izateko fluido-dinamika konputazionalaren bitartez garaturiko simulazioak egin dira. VGek sorturiko zurrumbilo nagusia ikertu ahal izateko simulazio hauek kode irekidun OpenFOAM softwarearekin egin izan dira. OpenFOAM C++-ean idatzitako liburutegi bat da zeinak mekanika jarraiaaren auziak garatu eta moldatzeko teknika numerikoetan oinarrituriko kalkulatzeko tresnak eskaintzen dituen. Kode irekia duen honako softwarearen erabilerak, interes ezberdinetara eta fenomeno partikularretara egokitu daitekeenaren abantaila eskaintzen du, erabiltzailearen mesedetara zuzenduz.

Batez besteko Reynolsen Navier-Stokes (RANS) ekuazioak turbulenta, egoera egonkorrekoa eta konprima ezina den jariatzean ebazteko, presioarekin loturiko metodo semi-implizitua den algoritmoa, SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations), erabili izan da. Prozesuaren bateratzea azkartzeko asmoz eremuak hasieratu egiten dituen

potentialFOAM tresna erabili da. Tresna honek, aurrerago erabili izango den ebazte metodo konplexuago baten aurretik aplikatu egiten da hasierako baldintzak ezartzeko helburuarekin. Aplikatu ostean, simpleFOAM kalkulatzeko sistema erabili izan da RANS ekuazioak ebazteko, ikerketa honetan Menterrek [51] proposaturiko $k-\omega$ ebakidura tentsio SST (shear stress transport) turbulenzia ereduak izan da erabilitakoa. Turbulenzia eredu honen bitartez bi ekuazio ebatzi egiten dira, alde batetik, energia zinematikoa dagokiona k , eta bestetik, berariazko disipazioa ω . Erabilitako teknika konputazionala RANS egonkorreko Allane et al.[1] egindako simulazioetan oinarriturik geratzen da justifikaturik, simulazio hauek plaka lauan kokaturiko VG batentzat egindakoak dira bi eraso angelu ezberdinentzat, erabilitako softwarea NASAk (National Aeronautics and Space Administration) sorturiko OVERFLOW kodea izanik. VGarengandik gertuko distantzietako datuak alde batera utzirik, CFD bitartez egindako simulazioek esperimentalki jasotako datuekin hertsitasuna dute. Ikerketa hortan, Spalart-Allmaras (SA) turbulenzia ereduarekin baino, SST ereduarekin aurreikusi egin ziren zilegitasun handiagoarekin jarioaren noranzkoan neurturiko bortizitatea eta zurrunbiloaren norabidea. Eskema numerikoak zeintzuk diren kontuan izanik bigarren mailako diskretizazio eskemak erabili izan dira antzeko ikerketan horrela egin izan den lez, Urkiola et al.[65].

Antolamendu konputazionala plaka lau batean kokaturiko VG bakar batean datza, VGaren sarrerako ertza (LE) sarbideko mugatik 10.25mtara kokaturik dago, ikus 3.1. Fluxuaren kontrolerako elementu hau laukizuzena den xafra bat da konbentzioz, luzean bere altueraren (H) bikoitza dena, altuera hau ikerketa parametrikoa egiteko aldatu egin izan da. Domeinuaren normalizazioa aipaturiko VGaren altuera konbentzionalarekiko (H) egin izan da, neurri horrek bat egiten du mugako geruzaren lodieran VGaren sarrerako ertzan non $\delta = 0.25\text{m}$ den. Domeinuaren mugetarako bestelako baldintzak ezarri izan dira. Gutierrez-Amo et al.[32] kontuan harturik, sabaia eta alboetako hormek irrista baldintzak dituzte, VGaren gainazalean eta oinarria den plakan ordea, ez irristatze baldintzak ezarri dira. Sarrera esparruari jarioaren sarrera baldintzak ezartzerakoan abiadura zehaztu egin

$\frac{\Delta y}{\delta} = 1.5 \times 10^{-6}$. Sareta biek blokeetan eta esparruetan bananduriko egitura daukate sare egitura horretan erresoluzio ezberdinak eskainiz. Saretaren garapenerako Urkiola et al.[65]n jarraituriko estrategia antzekoa erabili izan da, doitasun handia eskaintzen duen domeinua garatuz, horretarako OpenFOAMen blockmesh tresna erabili izan da, puntuak, aurpegiak, zeldak eta mugako baldintzak irakurtzen dituelarik sareta sortuz.

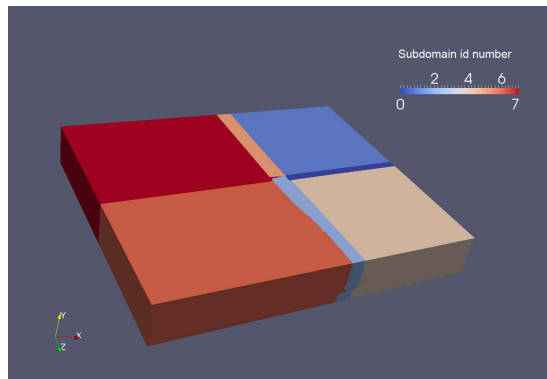
Domeinu konputazionala H altuera konbentzionala duen VGarekiko normalizatua izan da, gorago aipatu bezala, VGaren sarrera ertzean mugako geruzaren lodieraren tamaina duena. Horrela, domeinuaren zabalera altuera konbentzional hori 64 bider izango da, altuera 10 eta luzeera 75, ikusi 3.1.

Ikerketa honetan lau eraso angelu kalkulatu egin dira, $\beta = 10^\circ, 15^\circ, 18^\circ$, eta 20° . Era berean VGaren sei altuera hartu dira kontutan, 0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H, H eta 1.2H. Kasu orotarako VGaren luzeera ohiko altueraren bikoitza da. Mugituz doan jariakinaren abiadura askea $U_\infty = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ da, biskositate zinematikoa $\nu = 1.85185 \times 10^{-04} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, eta Reynolds zenbakia $Re = 27000$. Reynolds zenbakiaren definizioa 1. ekuazioan ikus daiteke non U_∞ jariakinaren abiadura askea da, δ VGaren sarrera ertzean mugako geruzaren lodieraren balioa da eta ν biskositate zinematikoa.

$$Re = \frac{U_\infty \delta}{\nu} \quad (3.1)$$

Domeinua automatikoki deskonposatu izan da zortzi azpidomeinuetan hurrengo 3.3 irudian ikus daitekeen bezala, modu honetan langune bakar batekin nukleo bakoitzak paraleloki lan egin dezake ebazpenaren bila, horrela prozesua arinduz eta eraginkorrago bihurtuz. Simulazioa Intel[®] Xeon[®] E5-2630 v3 CPU 2.40GHzx16 nukleodun eta 64bitsdun 32 Gb RAM zerbitzari-taladedun lantoki pertsonal batean egin izan da, Linuxean oinarriturik. Simulazioen bukaera abiaduraren, presioaren eta turbulentzia eremuen hondar balioek aurrez zehazturiko atalase balioetara ailegatzean eman da. Simulazioaren konbergentzia koalatitiboa hondar balio horiek 10^{-5} eskuratzean ematen dela esan daiteke. Lau

eraso angelu ezberdin eta sei altuera hautatu direla jabe izanda, hogeita lau simulazio egin izan dira bakoitzaren simulazio gastu denborala batezbesteko 194 ordutakoa izanik.



Irudia 3.3: Simulazioen arintze prozesuan domeinu konputazionalaren banaketa zortzi zatitan..

VGak sorturiko zurrumbiloaren aldagaiak jaso ahal izateko, VGaren irteera ertzetik behera jarioarekiko elkarzutak diren hamaika planoengandik eskuratuak izan dira, ikusi 3.1 irudia, simulazio bakoitzean. Plano elkarzutok VGaren irteera ertzetik δ mugako geruzaren lodieraren 1 eta 25 arteko proportzioan izan dira ezarriak.

3.2.1 Saretaren Kalitate Ikerketa

Honako ikerketan erabilitako sareta guztientzat bi izan dira saretaren kalitatea neurtzeko erabilitako parametroak, saretaren ortogonalitatea alde batetik eta zehertasuna bestetik. Aldagai hauek bientzat jasotako balioak 3.1 taulan jasotzen dira, sei VGen saretentzat.

Taula 3.1: Saretaren kalitaterako parametroak, aztertutako VG bakoitzarentzat..

VG Altuera	Ez-ortogonalitatea (Max)	Ez-ortogonalitatea (Avg.)	Gehienezko zehertasuna
1.2H	66.58°	12.71°	2.87
H	65.32°	12.69°	3.33
0.8H	64.85°	12.77°	3.22
0.6H	66.66°	13.02°	2.92
0.4H	63.28°	12.60°	3.56
0.2H	60.07°	12.60°	3.56

Ez-ortogonalitateak (nO) ondoz ondoko bi zelden zentroa elkartzen dituen zuzen batek eta beraien aurpegi komunaren normalitatearen arteko angelua neurtzen du, $nO < 70^\circ$ balioa baino txikiagoa den edozein ez-ortogonalitatek emaitza onargarria ematen digu eta erabilitako sareta guztiak, balio horien mugetan daude. Zeihartasunak ondoz ondoko bi zelden zentroa elkartzen dituen lerroak zelden aurpegi komuna zeharkatzen duen puntutik eta bi zelda hauen aurpegi komunaren zentroaren arteko distantzia neurtzen du. Zeihartasun balio geroz eta txikiagoa orduan eta hobeto, edonola ere, 20ren gaintetik dagoen edozein zeihartasun baliok doitasun gutxi dagoela adieraziko luke. Parametro hauek bi, ez-ortogonalitatea eta zeihartasuna, eskatutako baldintzen barruan daude.

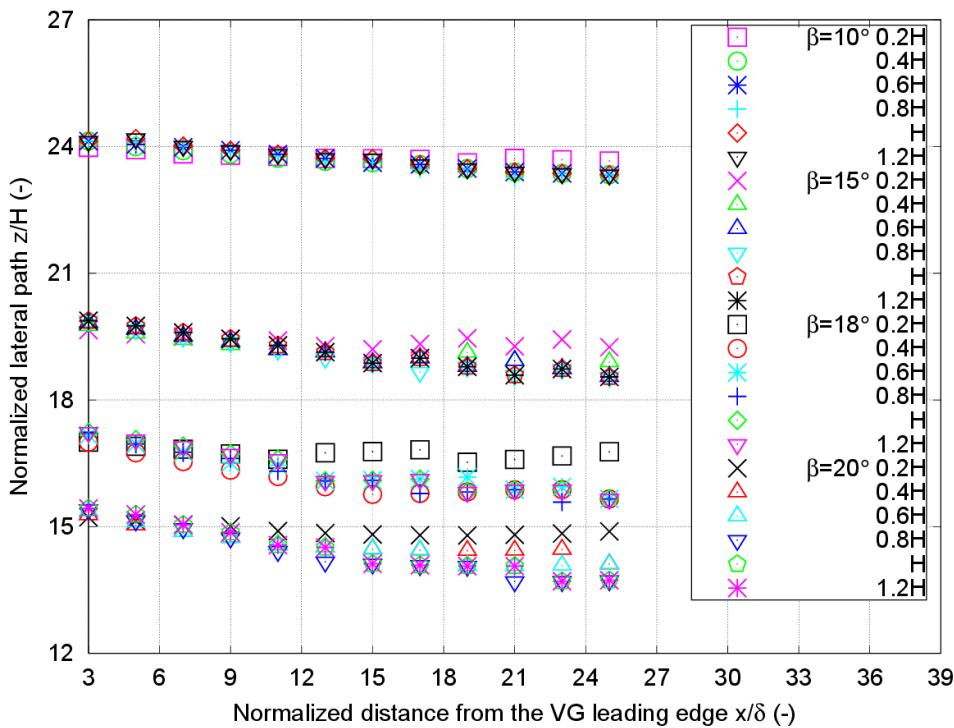
3.3 Emaitzak

Martinez-Filgueirak et al.[48] lanean adierazten duena jarraikiz zurrunbiloaren zentroaren ibilbidea, zurrunbiloaren tamaina, eta bortizitate altuena dira VG laukizuzen batek fluxuan behera eratzen duen zurrunbiloa karakterizatzeko parametro interesgarrienak, hauek, gorago aipatu bezala jarioarekiko elkarzut diren planoen bitartez jaso izan dira.

Yaok et al.[72] zurrunbiloaren zentroa definitzerako orduan, bortizitate handiena duen zurrunbiloaren puntua erabaki izan zen zentro gisa. Zurrunbilo sortzailearen irteera ertzetik behera ezarritako plano perpendikularretan jasotako bortizitate altueneko puntua izango zen aipaturiko zurrunbiloaren zentro hori. Zurrunbiloaren ibilbidea beraz, bortizitate balio horren garapenaren arabera adierazia izan daiteke, zentrotzat hartzen dugun puntu honen garapenaren arabera ezagutu dezakegu zurrunbiloaren mugimendu bertikala eta horizontala. Mugimendu honek, garapen honek, jariakinaren mugimendu eta geruzen nahasketan berebiziko garrantzia du.

3.3.1 Zurrunbiloaren Ibilbidea

Zurrunbiloaren zentroaren koordinatu bertikala y eta horizontala x , fluxuarekiko elkarzut diren planoen bitartez neurtu izan dira distantzia ezberdinetan. Kalkulu hauen bitartez lau eraso angelu eta sei VG altueratarako zurrunbiloaren ibilbidea jaso egin da. 3.4 eta 3.5 irudiek angelu eta altuera ezberdin guztietarako ibilbide bertikal eta horizontala adierazten dute.

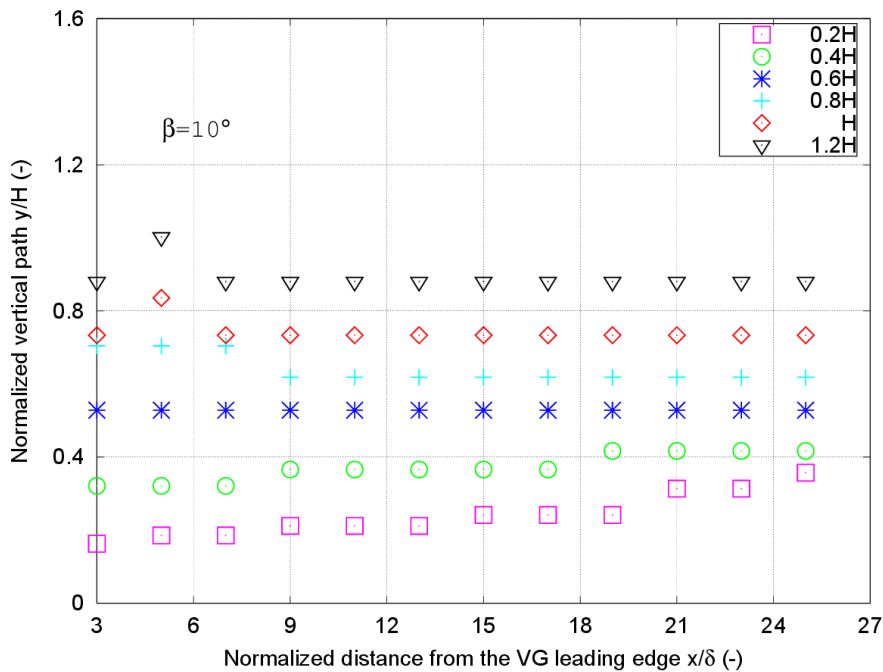


Irudia 3.4: $\frac{x}{\delta}$ distantzia axialarekiko zurrunbiloaren zentroaren posizio horizontal normalizatua VGaren irteera ertzetik behera sei VG altueratarako, 0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H, H, eta 1.2H, eta lau eraso angeluentzat β .

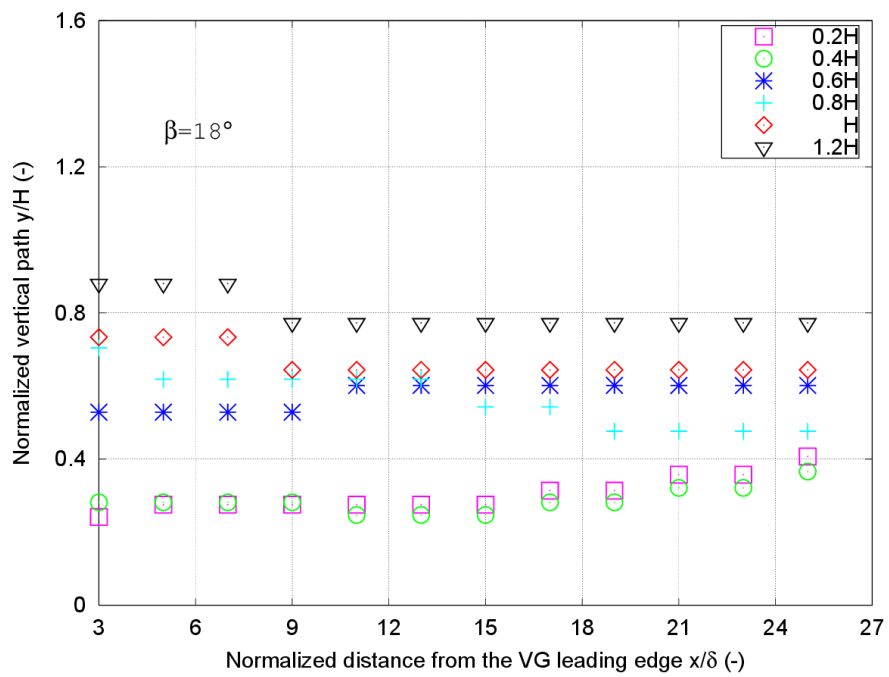
Zurrunbiloaren zentroaren garapen horizontala 3.4 irudian ikus daiteke, mugimendu honen garapena VGaren atzetik ateratako plano ezberdin guztietan ikus daiteke simulatutako kasu guztientzat. Mugimendu honek, kasu orotan, desbideraketa bat jazotzen da VGaren irteera ertzak zehazten duen noranzkoan, garapen hori $\beta = 15^\circ$, 18° , eta 20° kasuentzat ageri da baina nabarmenagoa VGaren altuera 1.2H denean.

Bestalde, 0.2H eta 0.4H altuerako kasuei erreparaturaz desbideraketa horizontal hau altuagoak diren VGen kasuek dutena baino nabarmen txikiagoa da. Horretan sakonduz, $\beta = 10^\circ$ dituen eraso angeluaren kasuan, desbideraketa oraindik ere txikiagoa da altuagoak diren eraso angeluen aurrean.

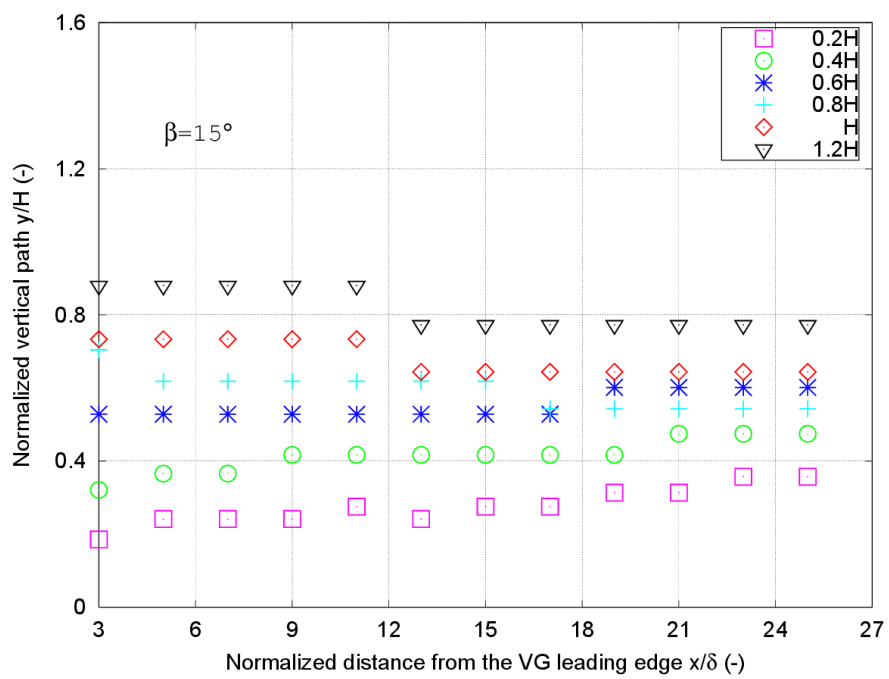
Ibilbide bertikala 3.5 irudian ikus daiteke, VGaren irteera ertzetik gertu ateratzerakoan zurrunbiloaren zentroa bertikalki VGaren altueran mantendu egiten da kasu guztietan. Aipaturiko 3.5 irudiko lau grafiko ezberdinetan ez dago inolako adierazgarritasunik ibilbide bertikalean, ez dago aldaketa nabarmenik. 0.8H, H eta 1.2H altuera duten VGen kasuetan beherako mugimendu txiki bat ematen da eta kontrara, 0.2H eta 0.4H altueratako kasuetan mugimendu txiki honek goranzko joera hartzen du. Azkeneko kasu bi hauetan ikusten den goranzko joera besteek dutenaren kontrakoa izatearen kausa, beraien tamaina txikia dela eta tokiko mugako geruzaren barneko aldean egotean aurkitu daiteke, hortaz, ebakidura biskositateak lehenetsuna hartu eta eragina izango du horrekin harremanetan.



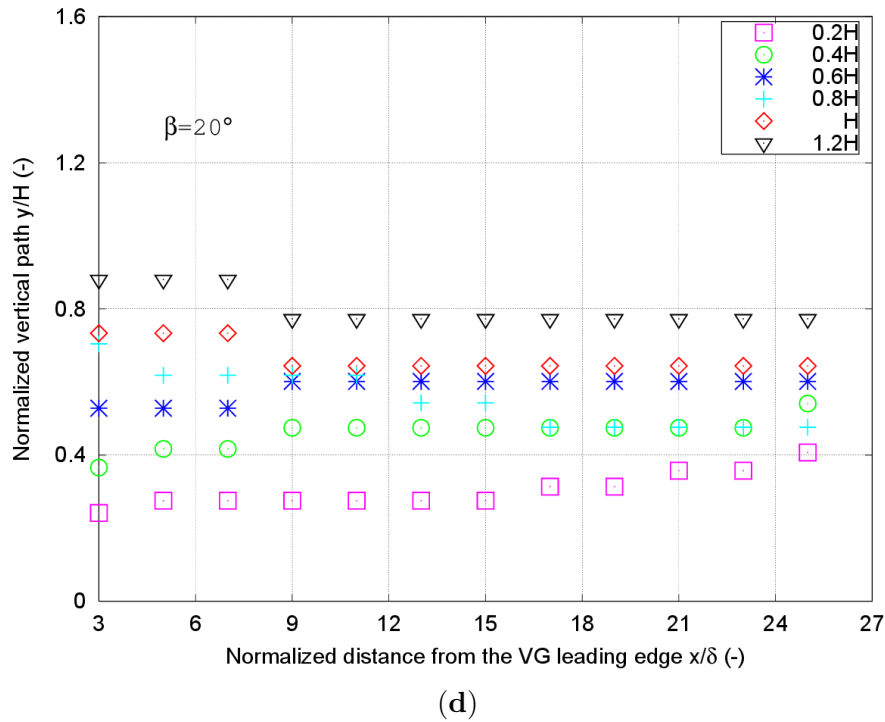
(a)



(c)



(b)



Irudia 3.5: $\frac{x}{\delta}$ distantzia axialarekiko zurrunbiloaren zentroaren posizio bertikal normalizatua VGaren irteera ertzetik behera sei VG altueratarako, 0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H, H, eta 1.2H, eta lau eraso angeluentzat β .

Mugako geruzaren lodieraren VG altuera antzekoa duten kasuek Fernandez-Gamiz et al.[24] ikerketan ateratako ondorioekin bat egiten dute, zeintzuen arabera zurrunbiloaren zentroaren ibilbide bertikala ez den emango beherako noranzkoan.

A eranskinetako lau irudietan zurrunbilo nagusiaren garapena ikus daiteke. Lau irudi hauek abiadura axialaren U_x distribuzioa jarioaren noranzkoan ateratako lau plano perpendikularretan ikus daitezke, plano hauek δ mugako geruzaren lodierarekiko proportzionalki izan dira ezarriak, VGaren sei altuerentzat eta lau eraso angeluentzat.

Zurrunbilo nagusiaren eraketa eta garapena argia da kasu guztientzat baina bereziki 0.6H altuera duen VGarentzat. Horrezaz gain, zurrunbiloaren tamainaren handitze koalitatiboa ematen da VGarengandik urrunago dauden planoetan ikusten den bezala. Tamainaren handitze honek zurrunbiloaren zentrotik kanpoalderako presioen gradiente txikiagoa adier-

azten du. Eranskinaren lau irudietan lau eraso angeluentzat ere, β angelua geroz eta handiagoa izanik eta VGa geroz eta altuagoa izanik koalitatiboki zurrunbilo nagusiaren tamaina handiagoa ikus daiteke.

Eranskineko irudietan ere zurrunbiloaren ibilbidearen desbideraketa horizontala atzeman daiteke VGaren irteera ertzetik distantzia handiagoa den heinean. Z-ardatzean ematen den desbideraketa VGa biratuta dagoeneko alderuntz ematen da eta VG altuera guztietan ikus daiteke, eraso angelu handiagoentzat gainera, $\beta = 18^\circ$ eta 20° , are nabarmenagoa da desplazamendua.

Laburbilduz, eranskinetan topatzen ditugun lau irudien bitartez egin daitekeen azterketa koalitatiboaren bitartez, zurrunbilo nagusia argi eta garbi identifikatu daiteke, altuera txikiena duen VGaren kasuan izan ezik $0.2H$, zurrunbiloa arrakastaz simulatu eta jaso egiten da. Altuera txikieneko kasuan, aurretik aipatu bezala, tokiko mugako geruzaren barneko aldean egoteagatik ematen da.

3.3.2 Zurrunbiloaren Tamaina

Jarioaren noranzkoan jarritako plano elkarzutan neurtutako bortizitatea hiru aldagai ezberdinen funtzio da, zurrunbiloaren zentroarekiko distantzia, plano horretako bortizitate altuena eta radioaren tamaina.

Bai datu esperimentalen kasuan zein CFDtik jasotakoetarako zurrunbiloaren tamaina eta honen radio neurtzea eginkizun zaila da. Martinez-Filgueira et al.[48] eta Fernandez-Gamiz et al.[26] ikerketek, jarioaren noranzkoarekiko ezarritako plano elkartzutean eta zurrunbiloaren zentrotik horizontalki igarotzen den lerro batetik topaturiko bortizitate profilak Gaussiar distribuzio motakoa dela erakutsi zuten eta era berean, zurrunbiloaren zentroa, bortizitate balio altuena gisa definiturik Gaussiar distribuzio horren zentroan dagoela.

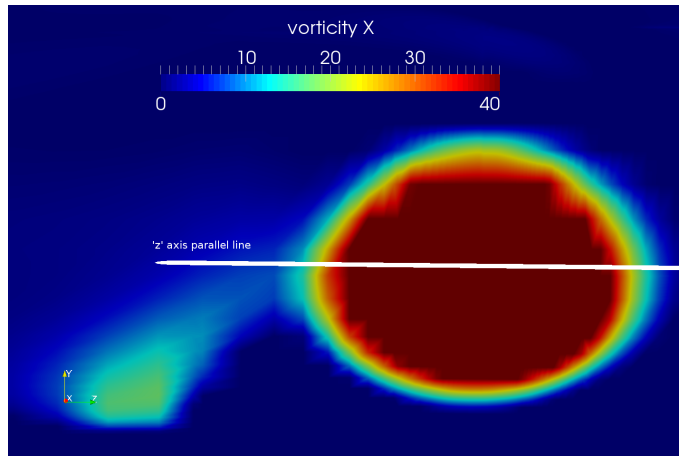
Bortizitate profila Gaussiar distribuziora hobeto doitu egiten da grafikoaren balio altuetan aldeetakoetan baino. Alboetan ematen den doitze arazo hau gainditzeko berritzailea den zurrunbiloaren tamainaren definizioarekin emango da, erdi bizitzaren radioaren bitartez ($R_{0.5}$). Erdi bizitzaren radioa zurrunbiloaren erdigunetik eta bortizitate altuena duen balioaren erdiko puntuaren arteko distantzia da, Brayk proposatu bezala [15]. Jasotako datu esperimentalekin doitasun handia dela eta irizpide ona da honako aldagaia zurrunbiloaren tamaina neurtzerakoan.

Hurrengo irudian 3.6, VGaren irteera ertzetik x distantziara eta jario askearen abiadurarekiko elkarzut den plano ikus daiteke. Zurrunbiloaren zentroari loturiko bortizitate profila eskuratzeko asmoz, zuriz irudikatutako, zurrunbiloaren zentrotik igarotzen den lerroaren datuak atera izan dira. VG kasu bakoitzerako, zurrunbilo zentroarekin erlazionaturiko bortizitate profila ateratzeko jarioarekiko perpendikularrak diren 12 plano erabili dira. Plano hauek VGaren irteera ertzetik 3δ eta 25δ distantzietara kokatu izan dira.

Jarioaren abiadurarekiko plano perpendikular batean bortizitatearen Gaussiar distribuzioa 3.2 eta 3.3 ekuazioetan ikus daiteke, r koordinatu radiala errepresentatzen duelarik, ω bortizitatea da s^{-1} adierazia, $R_{0.5}$ erdi bizitza radio m tan eta k konstante adimentsionala leko balioarekin. Martinez-Filgueiran et al.[48] adierazi bezala, $R_{0.5}$ a bortizitate balio altuenaren ω_{peak} erdia kalkulatuaz lortu daiteke.

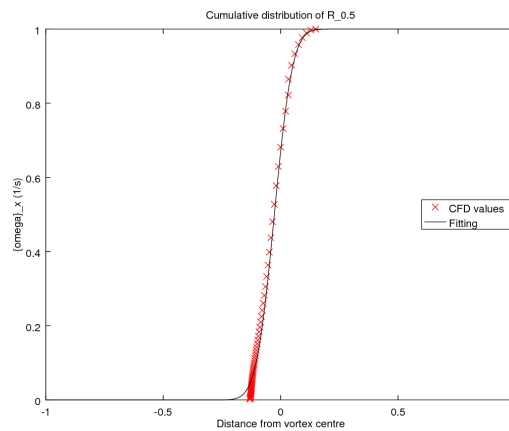
$$\omega(r) = \omega_{peak} e^{k(\frac{r}{R_{0.5}})^2} \quad (3.2)$$

$$\text{baldin } r = R_{0.5} \quad \text{eta} \quad \omega(r) = 0.5 \quad \begin{cases} k = \ln(\frac{\omega(R_{0.5})}{\omega_r}) = \ln(\frac{1}{2}) \\ \omega(r) = \omega_{peak} e^{\ln(\frac{1}{2})(\frac{r}{R_{0.5}})^2} \end{cases} \quad (3.3)$$

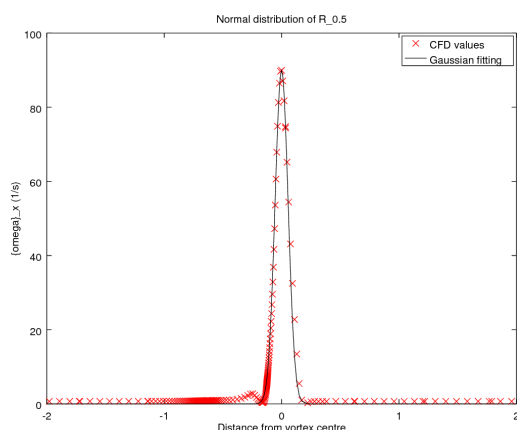


Irudia 3.6: Bortizitate distribuzioa VGaren irteera ertzetik behera x distantziara eta abiadura askearekiko perpendikularra den planoan. Abiadura askearekiko perpendikularra den plano perpendikularrean zurrunbilo nagusi eta bigarren mailakoaren bortizitate eremua. Lerro zuri horizontala z ardatzarekiko paraleloa da eta zurrunbiloaren zentrotik igarotzen da.

Erdi bitza radioa kalkulatzeko CFD bitartez eskuratutako datuekin doiketa Gaussiarra egitea beharrezkoa da hurrengo bi irudietan 3.7 eta 3.8 erakusten den bezala, distribuzio metatuarentzat eta normalarentzat. Distribuzio normalean argi eta garbi ikus daiteke CFD bitartez jasotako datuek kanpai itxura hartzen dutela datu altuenetatik gertu batez ere, horrela, justifikaturik geratzen da doiketa. Hurrengo irudiek $1.2H$ altueradun VG bati egiten diote erreferentzia 10° eraso angeluan kokaturik eta datuak, VGaren irteera ertzetik behera 9δ distantziara kokaturiko plano elkartzutean jaso dira.



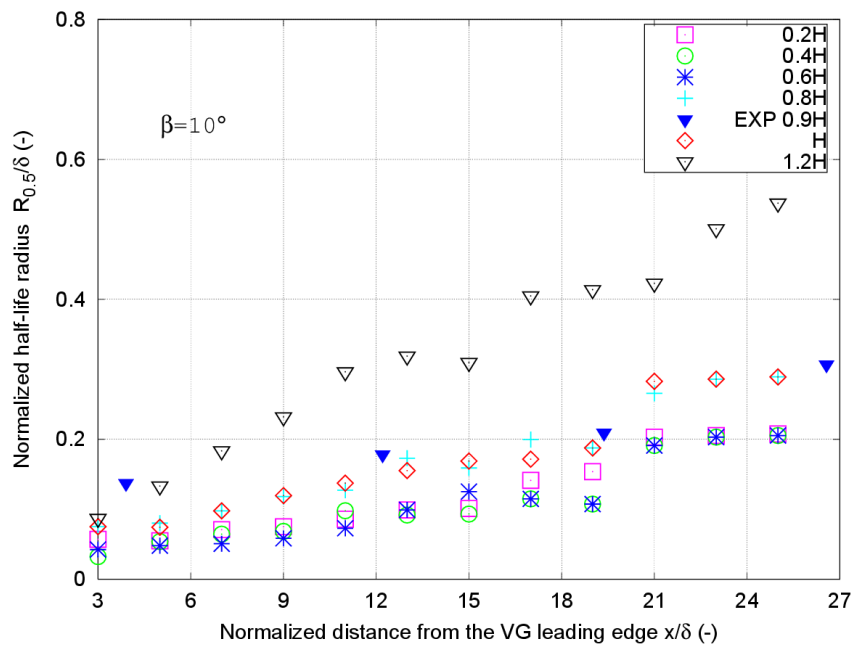
Irudia 3.7: Bortizitatearen errepresentazio kumulatiboa VGaren irteera ertzetik jarioan behera 9δ distantziara kokatuta dagoen planoan.



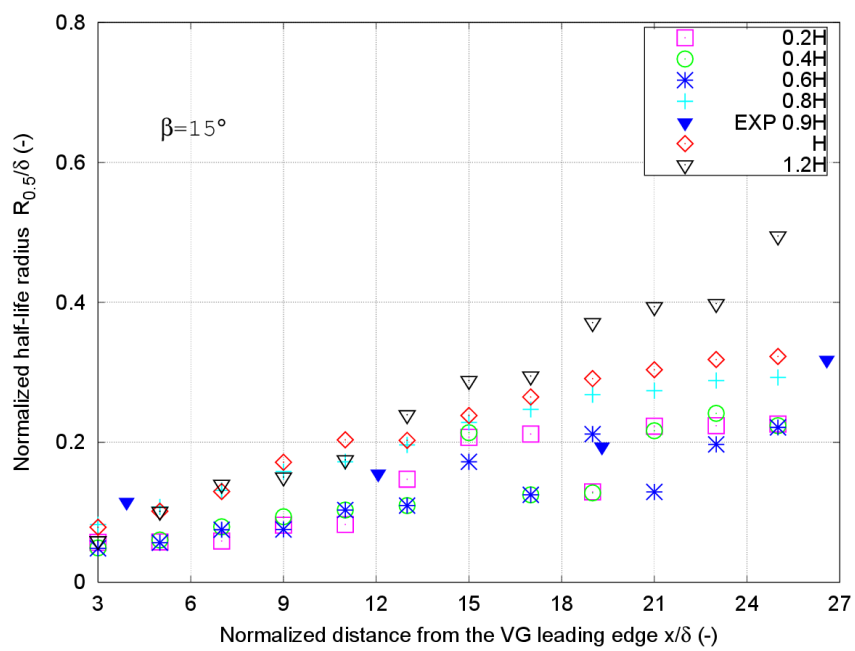
Irudia 3.8: Bortzitatearen distribuzio normala VGaren irteera ertzetik jarioan behera 9δ distantziara kokatuta dagoen planoan.

CFD emaitzak $R_{0.5}$ aldagairako 3.9 irudian ikus daitezke lau eraso angelu ezberdinentzat, $\beta = 10^\circ, 15^\circ, 18^\circ$, eta 20° , horiekin batera Brayk [15] eskuraturiko datu esperimentalekin batera (EXP). Agertzen diren balioak mugako geruzaren lodierarekiko (δ) VGaren sarrera ertzean normalizatu dira.

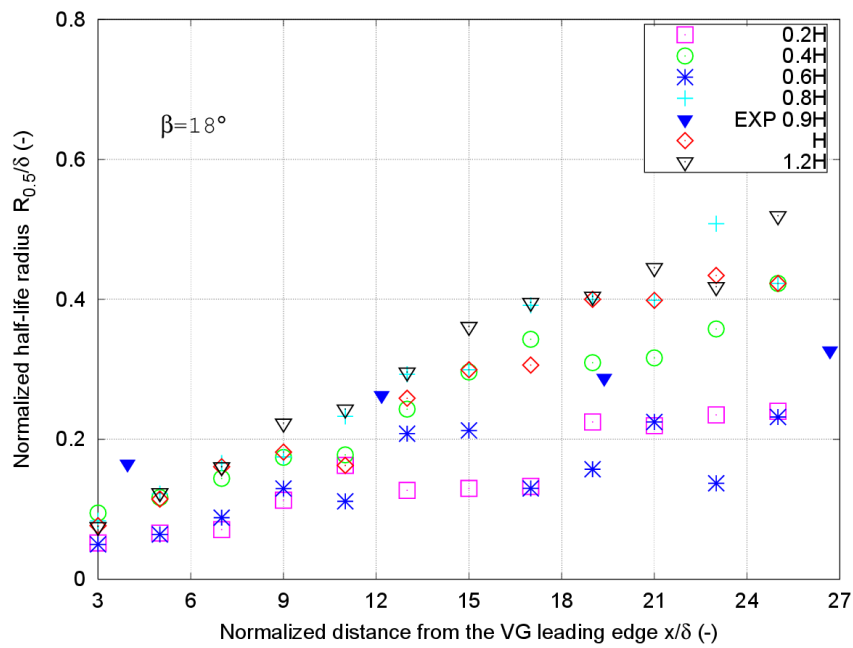
$R_{0.5}$ irizpidea kontuan harturik zurrunbiloaren tamaina ikertzean, balioaren handitzea ikus daiteke jarioaren norabidearekiko perpendikularrak diren planoetan geroz eta urrunago VGarengandik. CFD simulazioetan ikus daitekeen goranzko joera ere Brayk [15] esperimentalki jaso zuen angeluak handiagoak diren kasuetarako. Bai angelua handitzerakoan erdi biritza radioa handitzean zein VGaren altuera handitzean ikus daitekeen arren, nabarmenagoa da gorako joera hau TETik urrunago egoterakoan.



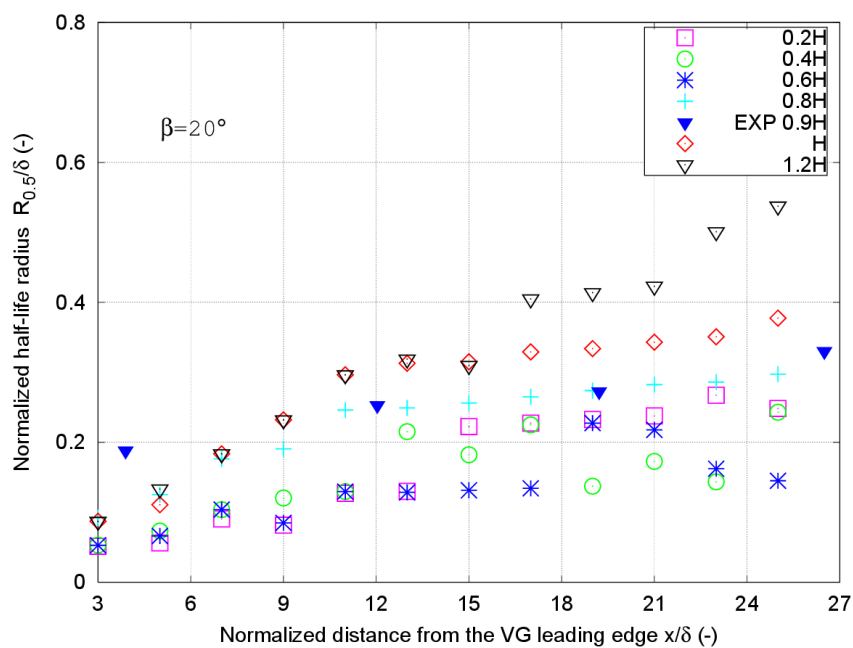
(a)



(b)



(c)



(d)

Irudia 3.9: $R_{0.5}$ ren CFD emaitzak lau eraso angelurentzat, (a) $\beta = 10^\circ$, (b) 15° , (c) 18° , eta (d) 20° . EXP Brayk[15] lortutako emaitza esperimentalei dagokie 0.9Hko VG batentzat. Balioak mugako geruzaren lodierarekiko (δ) normalizatua daude. y ardatzak $\frac{R_{0.5}}{\delta}$ erdibitza radioa errepresentatzen du eta x ardatzak normalizatutako distantzia axiala $\frac{x}{\delta}$.

VGaren altuerari soz, erdi bizitza radioaren balio altuagoak jaso izan dira altuera handiagoetako zurrunbilo sortzaileetarako. Altuera handieneko kasuan joera goranzkoa eta antzekoa bada guztietarako, 10° eraso angelurako eta irteera ertzetik gertu balio altuagoak jaso dira. Eraso angelu horretarako zehazki, 10° kasuan ere, ezberdintasun nabarmenagoa dago erdi bizitza radioan tamaina handiko VGentzat gainontzekoekiko.

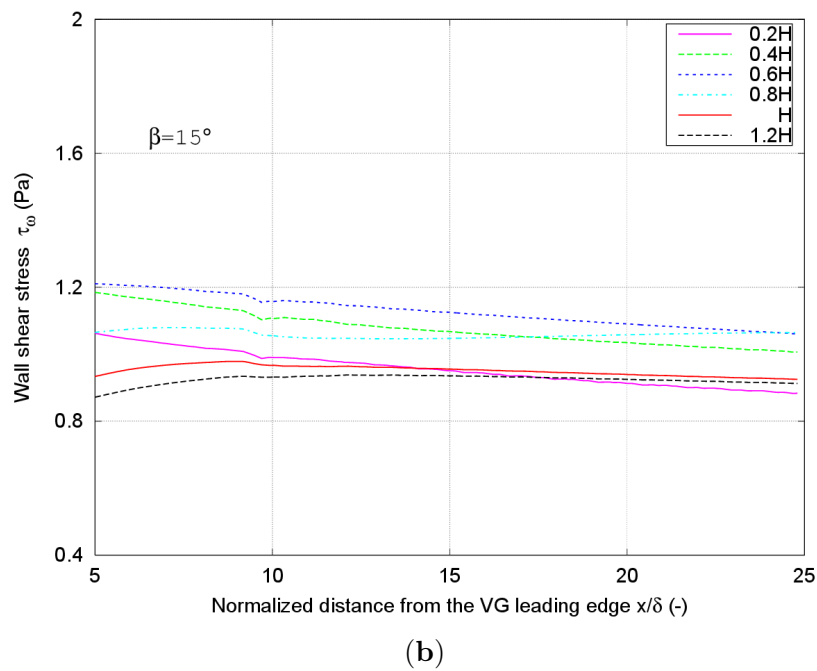
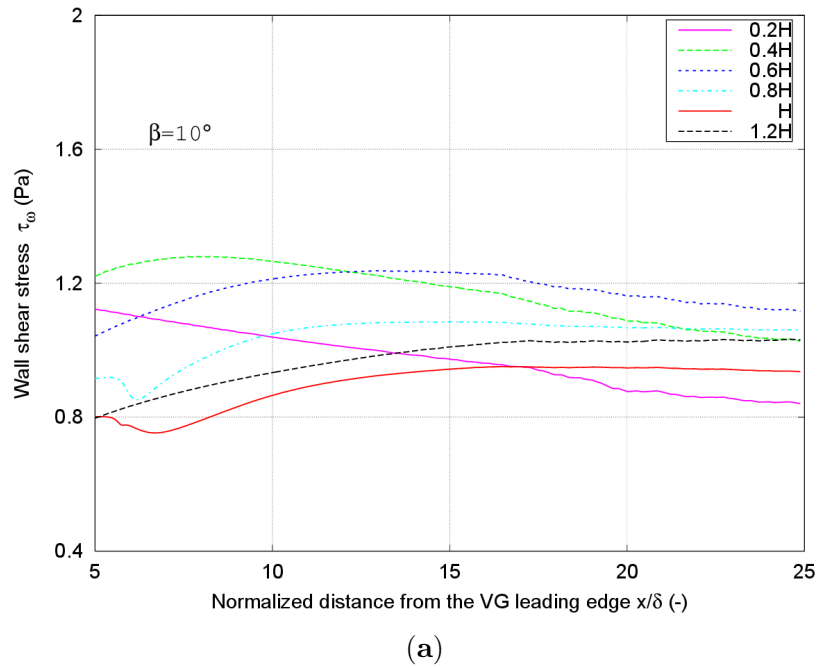
A eranskinaren hurrengo irudiekin zurrunbiloaren tamainaren inguruko ebaluazio koalitativoa egin daiteke. Abiadura eremuaren bitartez, VGaren irteera ertzetik behera ezarritako abiadura askearekiko perpendikularrak diren planoetan, VG altuera bakoitza eta eraso angelu bakoitzarekiko zurrunbiloaren garapena ikus daiteke tamainaren aldaketak igarritz. $0.2H$ eta $0.4H$ kasuetan gainazalarekin harremana handiagoa bada ere mugako geruzaren barnean egoteagatik, zurrunbiloaren eraldaketa bat ere atzematen da, geroz eta urrunago VGarengandik orduan eta zurrunbilo handiagoa dela ikusten da. Zurrunbiloaren eraketa argiagoa da $\beta = 18^\circ$ eta $\beta = 20^\circ$ eraso angeluentzat, handiagoak diren horientzat. Espero bezala ere, VGaren altuera handiagoa denean zurrunbiloa altuera handiagoan eratzen da. Ondorioz, emaitza koalitativo eta koantitatiboen artean erkaketa guztiz nabarmena ematen da, zurrunbiloaren posizio zein tamainaren garapenaren inguruan.

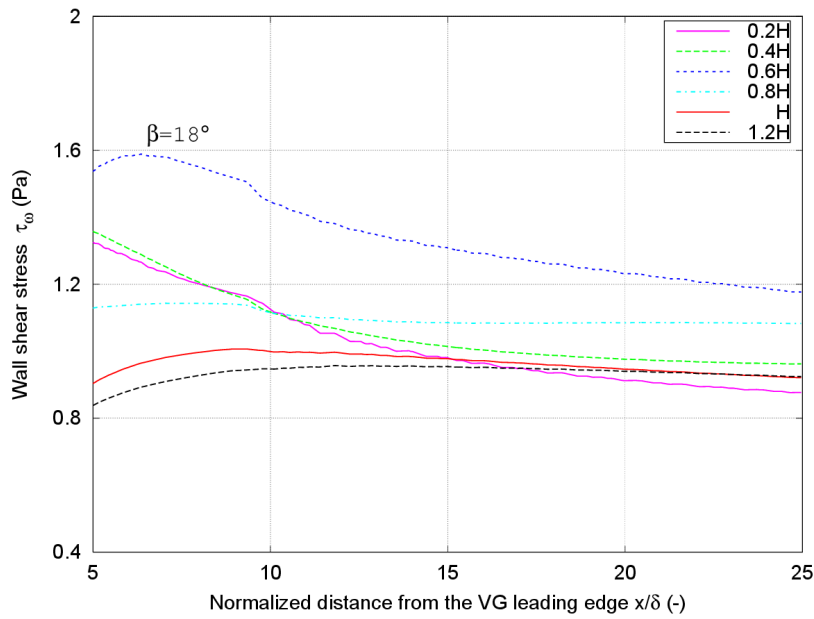
Jariakinaren eta bigarren mailako hormaren egituren arteko elkarreragin biskosoak eman arren, hiru dimentsioetako jariakin konplexu honetan sortutako zurrunbilo nagusia jaso da. Mota honetako jariakinen ezaugarritzean CFD tekniken funtzionamenduaren ebaluazio positiboa garrantzitsua da, jario mota hauek arazo hauetarako gehien erabilitakoak izan ohi dira.

3.3.3 Hormaren Ebakidura Tentsioa

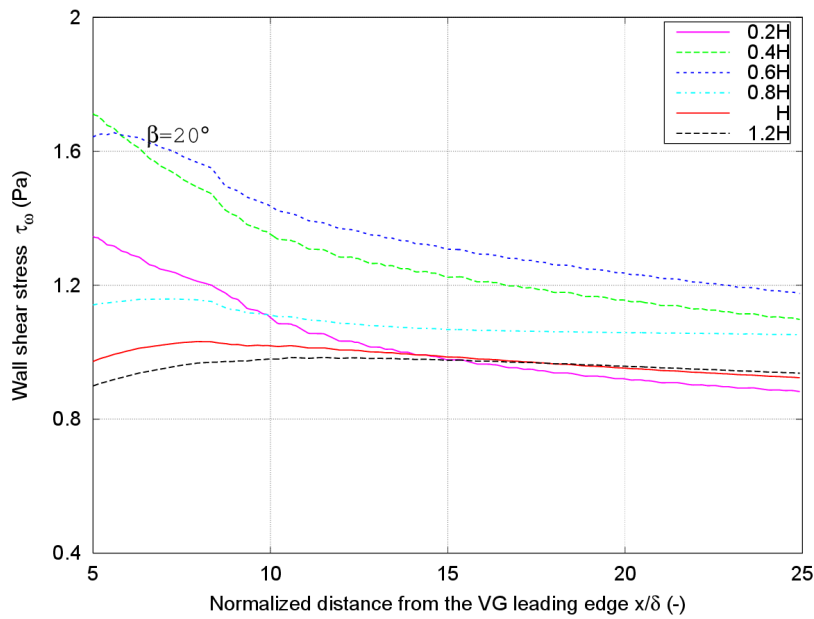
Hormaren ebakidura tentsioa τ_ω jariakinaren bereizketa ulertzeko garaian adierazgarria den parametroa dugu. Godard et al.[30] kontuan harturik, hormaren inguruko ebakidura tentsioak harreman zuzena izango du jariakinaren bereizketaren atzerapena edo ekiditearekin.

VG kasu guztientzat, altuera zein eraso angeluentzat, $\beta = 10^\circ, 15^\circ, 18^\circ$, eta 20° kalkulatu izan da. Ebakidura tentsio balio altuagoetarako, mugako geruza hobeto geratzen da gainazalean itsatsita. 3.10 irudian, τ_w hormaren ebakidura tentsioa erakusten da VGaren irteera ertzetik distantzia ezberdinetara eta eraso angelu ezberdinetzat.





(c)



(d)

Irudia 3.10: Jarioaren noranzkoarekiko elkarzut diren eta VGaren irteera ertzetik δ mugako geruzaren lodiarekiko proportzionala diren distantzietara kokatutako planoetan jasotako hormaren ebakidura tentsioa sei zurrumbilo sortzaileen altueretarako (0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H, H, eta 1.2H). Lau eraso angelu errepresentatzen dira, (a) $\beta = 10^\circ$, (b) 15° , (c) 18° , eta (d) 20° .

Hormaren ebakidura tentsioaren balio altuena 0.6H altueradun VGaren kasuan neurtu egin da eraso angelu guztientzat. $\beta = 10^\circ$ eraso angeluentzat 0.4H VG altuera kasuan balioa altuekin hasten da baina beheraka egiten du distantzia geroz eta handiagoa denean. Hormaren ebakidura tentsioa altuera kasu guztientzat eta eraso angelu guztientzat aldatzen da. Aldaketa hau nabarmenagoa da $\beta = 18^\circ$ eta $\beta = 20^\circ$ eraso angelu kasuentzat, 0.4H eta 0.6H altuera kasuentzat ebakidura tentsioa handiagoa da eta jarioan behera distantzia handitzen doan heinean tentsioa jaisten hasten da. Hala ere, 0.8H, H eta 1.2H kasuentzat eraso angelu guztientzat eta jarioan behera ebakidura tentsioan ez da aldaketa handirik ematen, $\beta = 10^\circ$ kasuan aldaketa txiki bat ematen da.

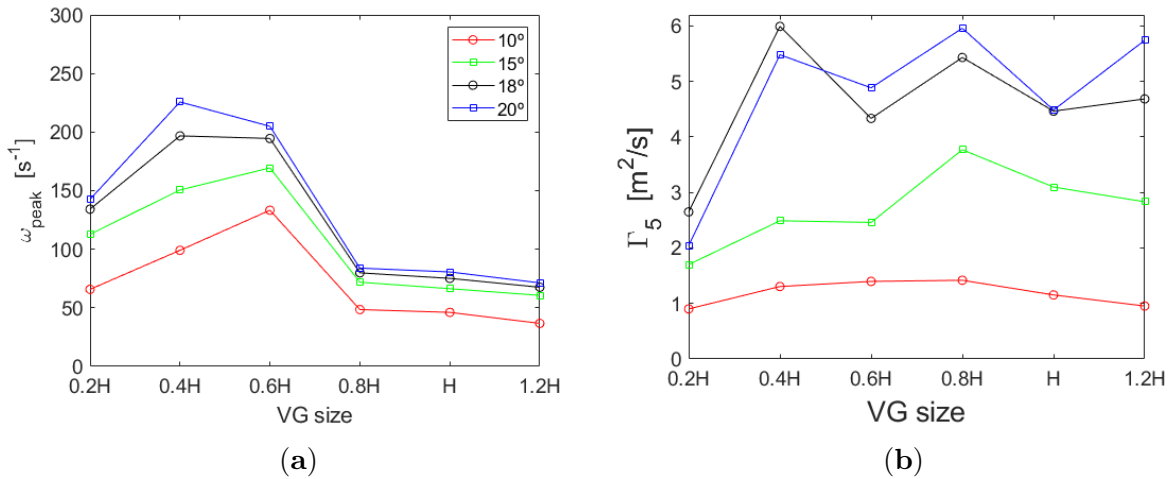
3.3.4 Zurrunbiloaren Indarra

Aurretiko atalean adierazi izan den bezala zurrunbiloaren bortizitatearen balio altuenak zurrunbiloari buruzko informazio baliotsua eskaintzen digu, hortaz, zurrunbilo sortzailearen irteera ertzetik 5δ distantziara kokatuta eta jarioaren abiadura askearekiko elkarzut den planoaren bortizitatea kalkulatu egin da eraso angelu eta VG altuera guztientzat. Horrezaz gain, zurrunbiloaren indarra ebaluatu da zirkulazioaren ebazpena eginaz Γ_5 aldagaia kalkulatzuz, 3.4 ekuazioan ikus bezala, eta Yao et al.[72] lanean oinarriturik. Horretarako zurrunbiloaren nukleotik gertu dagoen bortizitate balio altuena kalkulatzuz da jarioan behera dagoen 5δ planoan kalkulaturik. 3.11 irudiak zirkulazioaren balioak errepresentatzen ditu altuera ezberdinetarako.

$$\Gamma_5 = \frac{\omega_{peak} \cdot \pi \cdot R_{0.5}}{0.693} \quad (3.4)$$

Neurturiko zirkulazioaren aldaketa txikia jazo egiten da 0.4H VG altuera baino handiagoa duten kasuetan. Balio altuenak $\beta = 18^\circ$ eta $\beta = 20^\circ$ eraso angeluentzat neurtu izan dira eta kasu hauetan bietan joera antzekoa jarraituz. Hormaren ebakidura tentsioaren balioekin bat eginez 3.10c,d, non $\beta = 18^\circ$ eta $\beta = 20^\circ$ zein 0.4H eta 0.6H VG altuerentzat balio

altuenak jaso diren, 3.11 irudian zirkulazio balio altuenak eraso angelu eta VG altuera berdinentzat ematen da. Beraz, hormaren ebakidura tentsioa eta zirkulazioaren inguruko eraginkortasuna kontuan harturik 0.4H eta 0.6H VG altuera eta $\beta = 18^\circ$ eta $\beta = 20^\circ$ kasuan dira interesgarrienak.



Irudia 3.11: Bortizitate altuenak eta zirkulazioa VGaren irteera ertzetik 5δ distantziara VG tamaina ezberdinentzat (a) Bortizitate altuena; (b) Zirkulazio positiboa.

3.4 Sare Neuronal Artifiziala

VGaren tamaina normalizatuak, $(\frac{H}{\delta})$, eraso angeluak (β) eta VGaren atzeko ertzetik distantzia normalizatuak ($\frac{x}{\delta}$) VG batek sorturiko zurrumbilo nagusian duten eragina ikertu ostean, zurrumbilo sortzaile ezberdinen zurrumbiloen tamaina aurreikus dezakeen iragartze eredu bat tresna interesgarria litzateke. Egindako ikerketarako garaturiko ereduak aipaturiko hiru sarrera aldagaiak izango beharko lituzke, horrela, ingeniariak esparru ezberdinetan erabilgarriak diren horma ondoko luzetarako zurrumbiloak kontrolatuz. Hor-taz zurrumbiloaren izaera eta garapenaren kontrola zein aurreikuspenaren deskripzioak, aipaturiko aldagaiekin harremanduak, oso erakargarriak diren tresnetara bideratzeak interes handiko lana dira. Honenbestez, garatu beharreko ereduak, VGaren tamainaren,

dituen eta entrenaturiko hiru neurona dituen sarrerako hiru aldagaientzat Aurreko ikus daitekeen bezala. Hurrengo ekuazioen bitartez bizi erdiko radioaren aurreikuspen ereduak irudikatzen da. Ezkutuko neurona bakoitzaren irteera balioak 3.5 ekuazioaren funtzioaren bitartez errepresentatuak dira ikus daitekeen bezala sigmoide baten forma jarraituz. Aldagai guzti hauek ohikoa den atzerako propagazioa duen geruza anitzeko perzeptroi ereduak jarraitzen duen sare neuronalak da, edo BP-MLP (Backpropagation Multilayer Perceptron). Potentzial postsinaptiko bakoitza h_i , neurona bakoitzarentzat i konbinazio zuzen eta linear baten bitartez kalkulatzen dira. w_i irteerako geruzaren pisuak irudikatzen ditu eta w_{ij} sarrerako ezkutuko geruzaren pisuak.

$$R_{05} = \sum_{i=1}^{i=N_{hidden}} w_i \cdot g_i(\vec{x}) + \theta \quad (3.5)$$

$$g_i(\vec{x}) = \frac{1}{1 + e^{-h_i}} \quad (3.6)$$

$$h_i(\vec{x}) = \sum_{j=1}^{j=N_{inputs}} w'_{i,j} \cdot x_j + \theta'_i \quad (3.7)$$

Sare neuronalaren bitartez R_{05} aurreikuspen ereduarentzat jasotako pisu sinaptikoak hurrengo tauletan adierazten dira.

Taula 3.2: Sarrerako ezkutuko geruzaren pisuak (w_{ij}).

-1.9756	-3.5343	-0.8340
1.6403	1.2454	2.1392
-3.6515	0.1470	1.3296

Taula 3.3: Irteerako geruzaren pisuak (w_i).

-0.3296	0.8902	-0.9374
---------	--------	---------

Hurrengo irudiak entrenaturiko sare neuronalaren emaitzak erakusten ditu. Gorriz agertzen den zuzenak espero zen R_{05} erregresio marra errepresentatzen du, baita aurreikuspen neuronalak. Ardatz horizontalak esperotako bizi erdiko radioa eta bertikalak ordea, saren neu-

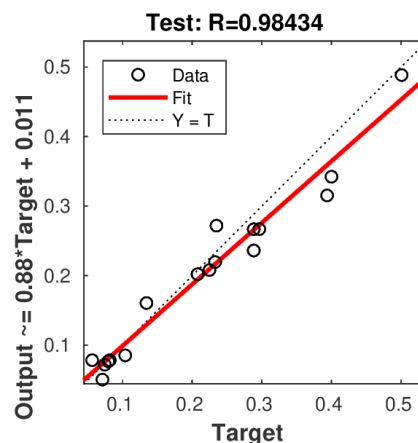
Taula 3.4: Ezkutuko geruzaren atariko aldagaiak θ

3.8458
-0.9691
-4.0059

Taula 3.5: Irteera geruzaren atariko aldagaiak θ'_i .

-0.3476

ronalak berak aurreikusten duen radioaren emaitza. Korrelazio koefizienteak eskaintako emaitzak 0.98431ko balioa eskaini izan du, honek, korrelazio ona ematen digu alde batetik ANNak ematen duen emaitzaren artean edo kalkulatu egiten dituen balioen artean eta helburutzat hartzen diren balioen artean. Simulaturiko VGen inguruan jasotako emaitza hauek ANN algoritmoaren bitartez R_{05} rekiko aurreikuspenak eta kalkuluak egiteko aukera ematen dizkio algoritmoari edozein VGrentzat, ikerturiko baldintzetan eta erabilitako Reynolds zenbakiarentzat, behintzat.



Irudia 3.13: Sare Neuronalaren entrenamenduaren erregresioa.

3.5 Ondorioak

Plaka lau batean kokatutako zurrumbilo sortzaile batek sortutako zurrumbilo nagusiaren karakterizazio egin da. Kode askea duen OpenFOAM liburutegiarekin simulazio numerikoak egin dira, lau eraso angelu ezberdinentzat, $\beta = 10^\circ, 15^\circ, 18^\circ,$ eta 20° eta sei VG altuerentzat, 0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H, H, eta 1.2H, H VGaren sarrera ertzean mu-

gako geruzaren lodieraren δ berdina izanik. VGek sorturiko zurrunbiloak konprima ezina, egonkorra eta turbulenta den jariatzenaren simulatu egin dira, $Re = 27000$ baliodun Reynolds zenbakia izanik mugako geruzan oinarriturik.

Zurrunbiloaren tamaina neurtzeko erabili izan den parametroa erdi bizitza radioa izan da R_{05} , emaitzek argi eta garbi utzi egin dute VGaren altuerarekiko eta eraso angeluarekiko menpekotasuna. Orohar, VGaren altuera geroz eta handiago izanik orduan eta zurrunbilo nagusiaren tamaina handiagoa. Aztertutako eraso angelu txikienarentzat $\beta = 10^\circ$ eta VG altuera handienarentzat $1.2H$ eskuratu izan da balio altuena. Hala ere, eraso angelua handiagoa denean, zurrunbiloaren tamainan ematen diren aldaketak ez dira altuera txikiagokoenekin alderaturik adierazgarriak. Bai ordea, eraso angeluek aurrera egin ahala presio eremuan, B eranskinean atzeman daitekeen bezala, VGaren inguruan presioak eragindako indarra handiagoa da.

Aurreikus izan den bezala zurrunbiloaren ibilbidea VGaren altueraren eta eraso angeluaren β araberakoa da, eta ibilbide aldaketa hauek adierazgarriagoak dira eraso angelu handiagoentzat. $0.2H$ altueradun VGaren kasuan izan ezik ibilbide bertikalean aldaketa oso txikiak ematen dira, bereiziezinak izaterarte. Portaera berezi hau altuera txikiko VGarentzat, hormaren ondoko interakzioan kausatuta egongo da non eragin biskosoak handiagoak diren behe mailako geruza horietan.

Hormaren ebakidura tentsioa kontutan harturik bi ondorio atera daitezke. Alde batetik, eraso angeluaren araberako hormaren ebakidura tentsioan aldaketak daude. Eraso angelu handiagoentzat $\beta = 18^\circ$ eta 20° ebakidura tentsio handiago jasotzen da eta VGarengandik distantzia handiagora jaisten doa. Bestalde $0.4H$ eta $0.6H$ VG tamainetarako eta $\beta = 20^\circ$ eraso angeluarentzat balio altuena jaso egin dela. Gainera, zirkulazioa $0.4H$ eta $0.6H$ VG altuerentzat eta $\beta = 18^\circ$ eta 20° irteera ertzetik 5δ balio altuenak jasotzen dira ebakidura tentsioan ateratako ondorio berdinak ateraz. Hortaz, altuera hauek eta eraso angelu hauek dira aukera egokienak jarioaren bereizketaren kontrolerako.

4. Atala

Zelda sorta ereduaren doitasuna LES
eta RANS eredueterako

4.1 Laburpena

Plaka lauan kokaturiko eta jarioaren noranzkoan arbuigarria den presio gradientedun VG batek sorturiko zurrunbilo nagusia simulatu izan da CFD tekniken bitartez. Large Eddy Simulations (LES) eta Reynolds Average Navier Stokes (RANS) simulazioak egin dira zelda sorta eredia eta guztiz ebatzitako saretaren arteko emaitzak alderatzeko asmoz, bereziki, zelda sorta ereduaren doitasuna ikertzeko, oinarritzat hartuaz guztiz ebatzitako saretarekin. Zelda sortaren aplikazioak zelda kantitatean aurrezki nabarmena suposatzen du honek, denbora eta baliabideetan. Ikerketa honetan, egitura koherenteak, zurrunbiloaren ibilbidea eta hormaren ebakidura tentsioan emaitza onak eman dira baina, tamainan, indarrean eta abiadura profilean ezberdintasun txikiak eman dira. VG batean egiten den zelda sorta ereduaren lehen aplikaziotzat hartu daitekeen lehena izanik, sakonago landu beharreko gaia da VGen simulazioei dagokienean non aplikatu erabakitzeke. Zelda sorta ereduak guztiz ebatzitako saretaren aurrean abantailak suposatu ditzakeelako.

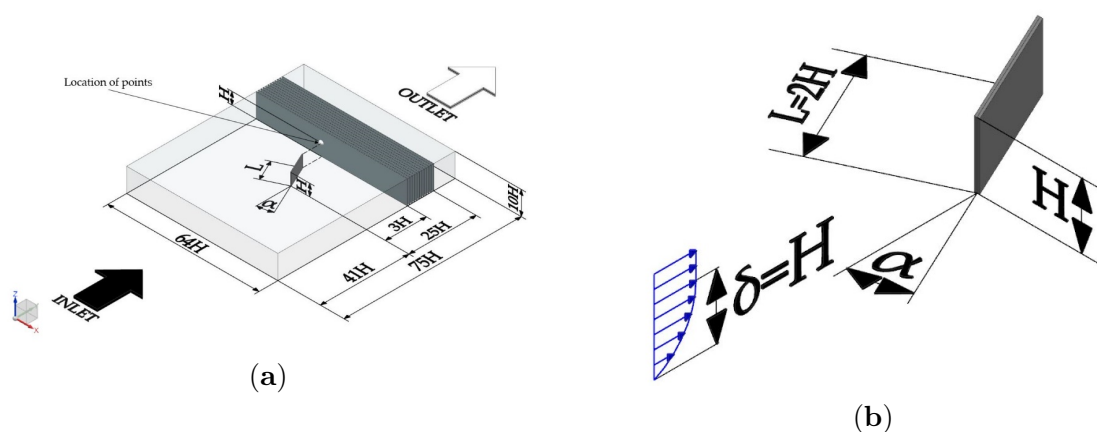
4.2 Antolamendu numerikoa

Zelda sorta ereduaren ikerketa egiteko asmoz, jarioan beherako presio gradiente arbuigarria duten simulazioak egin dira plaka lauan kokatutako zurrunbilo sortaileak eragindako zurrunbiloa jasotzeko. Simulazioa starCCM+v14.02.012 [18] kode komertziala erabiliaz egin dira.

4.2.1 Domeinu konputazionala

Domeinu konputazionala honako kasuan, bere oinarrian VG laukizuzen bat kokaturik duen bloke batez konposaturik dago. VGaren H altuera 0.25mkoa da eta haren L luzeera altueraren bikoitza. Hurrengo simulazioetarako eraso angelu bi izan dira kontuan hartuak,

18° eta 25°. Gainazalei dagokienez, zorua alde batetik eta VGaren gainazalak ezaugarri ez itsaskorrekin ezarri dira, jarioan gorako horma sarrera ezaugarriekin eta jarioaren behealdeko horma irteerakoekin. Gainontzeko gainazalak simetria plano gisa hartu dira jarioan eraginik izan ez dezaten. Domeinu konputazionalaren diseinua eta sarrerarekiko VGaren kokapena δ mugako geruzaren lodiera eta VGaren altuera bat egiteko egin dira, ($\delta=H$). Domeinuaren diseinua hurrengo irudian agertzen da 4.1. Datuak jasotzeko asmoz 12 puntu eta jarioaren noranzkoarekiko elkartzut eta VGaren irteera ertzetik beheran kokatu izan dira. Plano hauek 3δ eta 25δ ko distantzietara kokaturik daude eta 2δ distantziarekin. Aipatutako puntuak planoetan bertan kokaturik daude VGaren irteera ertzetik jarioan behera eta zorutik H altueran.



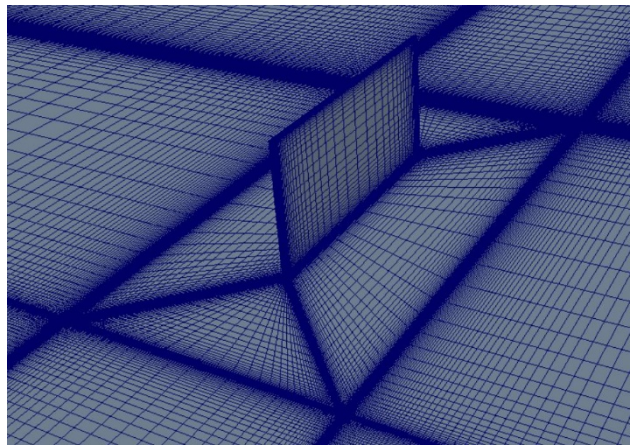
Irudia 4.1: Domeinu konputazionala (a) irudian eta zurrunbilo sortzailearen tamaina (b).

4.2.2 Eredu fisikoak

Hiru dimentsiotako jariakin konprimaezina kontsideratu izan da simulazioetarako non 1.225kg/m^3 ρ dentsitate balioa eta $1.85185 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ biskositate zinematikoa duen. Jarioaren abiadura askea 20m/s -an ezarri da, honek esan nahi du Reynolds zenbakia 27000 ingurukoa dela hurrengo ekuazioan ebatzi daitekeen bezala.

$$Re = U\delta v \quad (4.1)$$

Simulazioak egiterako orduan bi turbulenzia eredu erabili izan dira, Menterren $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) [20] RANSean oinarritutako eredu erabili izan da 18° eraso angeludun kasuentzat eta LES Smagorinsky SGS (sub-grid-scale hizkiengatik ingelesez) [21] eredu 25° eraso angelua dutenentzat. Allan et al. [22] ikerlariak jario batengan eraso angelu bietarako plaka lauan kokaturiko VG bakarraren eragina aztertu zuten, RANSean oinarritutako simulazioek datu esperimentalekin hertsiki harremanduak zeudela ondorioztatuz, VGaren irteera ertzetik gertuko distantzietan izan ezik, non zurrunbiloa ez dagoen guztiz ebatzita. Beraien ikerketan SST turbulenzia ereduaren portaera hobea aurkitu egin zen bestelako RANS erduekin alderatuta. RANS eta LES turbulenzia ereduak arrazoi birengatik izan dira hautatuak. Alde batetik, turbulenzia eredu bi hauekin simulazioak egiteak zelda multzoaren ereduaren zehaztasuna bai RANS zein LESen ikertzea ahalbideratzen du. Bestetik, Urkiola et al. [65] adierazi bezala eraso angelu handiek lan egiterakoan RANS erduek ez dituzte jariakinen ezaugarriak zehaztasunez atzematen, hortaz, $\alpha=25^\circ$ eraso angeluarentzat egokiagoa da LES erabiltzea. RANSean oinarrituriko simulazioen domeinuaren diskretizaziorako, jarioan gorako bigarren mailako dibergentzia eskema linear osoa erabili izan da [41]. LES simulazioen kasuan turbulentiaren eskala handiak zuzenean ebatzen dira domeinuaren edozein esparrutan, eta eskala txikiko mugimenduak erduztatu egiten dira. RANS ereduaren ekuazioekin alderaturik, LES ereduarekin ebatzitako ekuazioak batez bestekoa ateratzearen prozesuaren bitartez egin beharrean, iragazketa espazial batez egiten dira. Beraz, jariakinaren aldagaiak iragazitako balioen eta azpi-saretaren balioen artean. Iragazitako balioak Navier-Stokes ekuazioetan dira txertatuak. Ekuazioak borobiltzeko, SGS esfortzu tentsorea SGS eredu baten bitartez erduztatu da.



Irudia 4.2: Sareta finagoa VGaren inguruan.

4.2.3 Ebatzitako Sare Eredua

11.5 milioi zelda hexaedriko inguru dituen sareta egituratu bat garatu izan da. VGaren inguruan jazotzen diren gora beherak zehaztasun handiagoarekin ikertzeko asmotan, 4.2n nabarmentzen den bezala, inguru horretan zelden dentsitatea handiagoa da. Sareta hau bi eraso angeluentzat erabili izan da, $\alpha = 18^\circ$ eta $\alpha = 25^\circ$ kasuetarako, sareta biratuz behar beste.

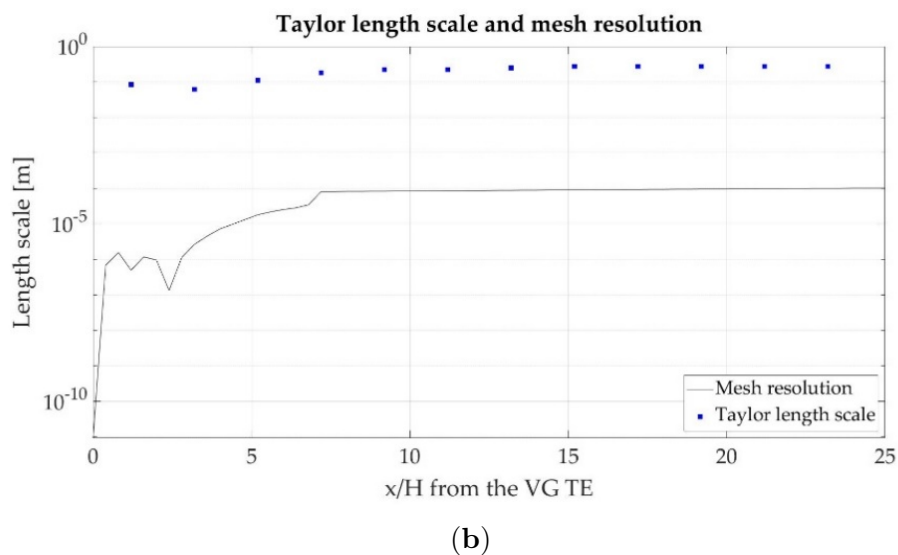
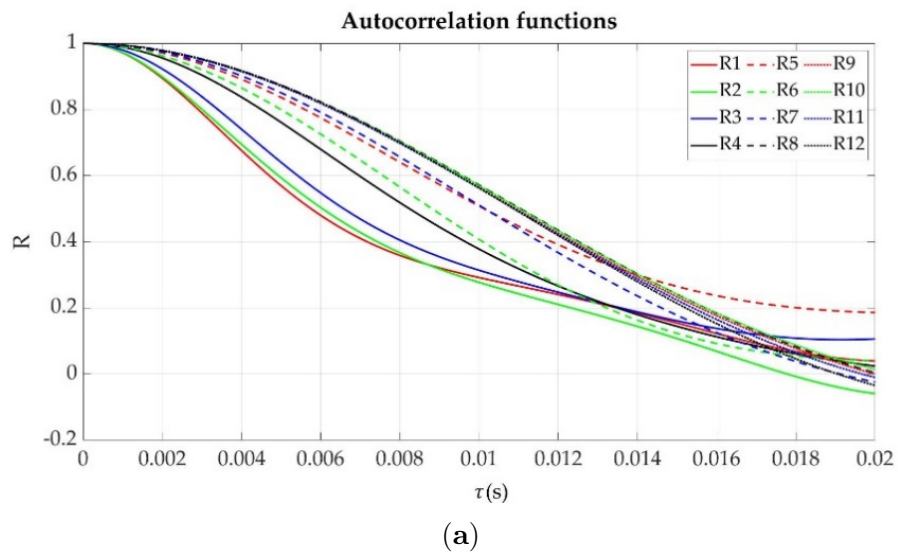
RANS ereduarentzat sareta bereizmen nahikoa dagoen ziurtatzeko Richardsonen Estrapolazio metodo Orokorra [59] erabili izan da, VGaren altzatze eta arrastearentzat. Metodo honen bitartez ikertutako parametroaren balioa estimatzen da zelda kantitateak infiniturako joera duen kasurako, ikusi Almohammadi et al. [2]. Konbergentzia ikerketa egoki batek behintzat, hiru sareta ezberdin behar ditu Stern et al. [63]en arabera. Gorago aipatutako saretaz gain, xehetasunez egindakotzat hartzen dena, erdi mailako eta larriagoak diren sareta bana garatu dira, gomendagarria den bezala, fintasun ezberdina baina geometrikoki antzekoak diren saretak erabili izan dira. Jasotako emaitzek R konbergentzia baldintza 0 eta 1 artean dagoela adierazi digute konbergentzia joera monotonikoa dela adierazten duena. Gainera, aurreikusitako RE arraste eta altzatze indar balioak sareta finenak emandako balioetatik gertu daudela ikusi da. Gauzak horrela, saretaren

bereizmena RANSentzat egokia dela ondorioztatzen da, hurrengo taulan Richardsonen Estrapolazio Orokorren emaitzak ikus daitezke.

Taula 4.1: Saretaren onarpena RANSerako, alde batetik saretaren bereizmena eta bestetik Richardsonen estrapolazio balioak.

	Larria[N]	Erdikoa[N]	Fina[N]	RE[N]	p	r
Arraste indarra	98.0699	89.8929	87.199	85.875	1.6018	0.329
Altzatze indarra	261.605	247.715	241.39	236.1	1.135	0.455

LES simulazioentzat egindako saretaren bereizmenaren nahikotasuna Kuczajek [43] ezarritako irizpidea kontuan harturik egin da. Aipatutako ikerketa kontuan harturik saretaren bereizmena Taylor (λ) luzeera eskalaren mailan egon behar du behintzat, guztiz ebatzi ahal izateko luzeera maila. Taylorren luzeera maila, izen bereko jatorriaren autokorrelazio funtzioaren hedapen koefizientetik eratorria da. Autokorrelazio funtzioak denbora segidetakako datuen, batez besteko, eta aurretiko datuen arteko harremana zehazten du. Funtzion honen bitartez jario baten turbulentzia zenbaterainoko den jakin daiteke, turbulentzia handiagoko kasuetan datuen arteko ezberdintasuna handiagoa da eta bera, autokorrelazio funtzioak zerorako joera azkarragoa hartuko du. Autokorrelazio funtziotik abiatuta Taylorren funtzio mailaketa kalkulatzeko da eta azkenik, Taylorren hipotesitik luzeera [64], ebazpenaren argipenak [42, 43] lanetan. Metodoa aurretik aipaturiko 12 puntuetan erabili izan da, puntu ezberdin hauen autokorrelazio funtzioak 4.3 (a) irudian ageri dira eta Taylorren luzeera eskala eta saretaren bereizmena 4.3 (b) irudian. Emaitzek, autokorrelazio funtzioen 0 baliorako joera nabarmena erakusten dute. Joera honen kausa, jariakari ezarritako presio gradientearen balio arbuiagarrian aurkitzen da eta hau, Taylorren luzeera maila eta saretaren bereizmenaren arteko ezberdintasun nabarmenean jasotzen da, Kuczajek et al. [42] proposaturiko irizpidea asetuaz. Hortaz, sareta LES simulazioetarako erabilgarria dela ondorioztatu daiteke.

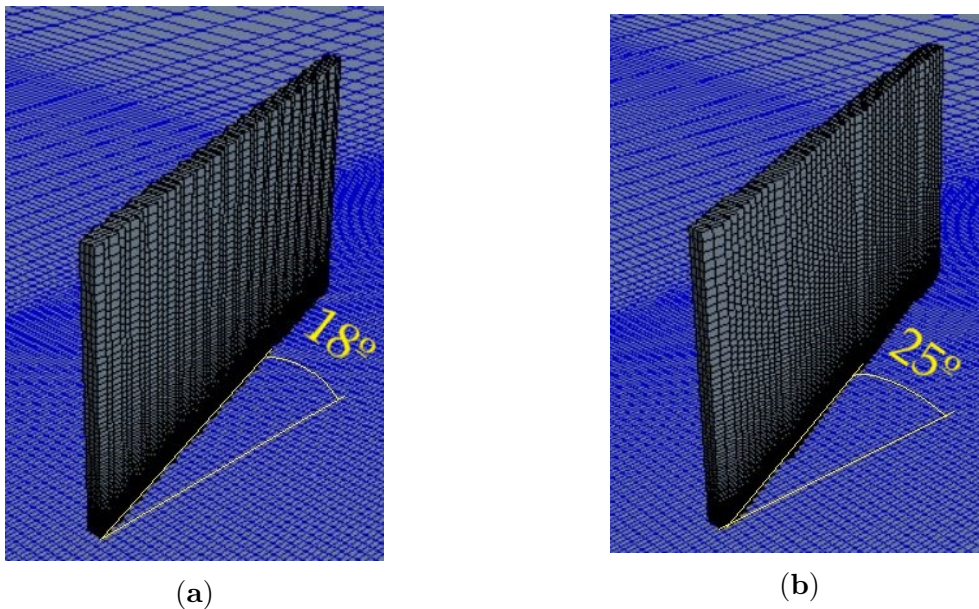


Irudia 4.3: LESentzat sareta baieztatzea: (a) Autokorrelazio funtzioak; (b) Taylorren luzeera eskala eta sareta bereizmena.

4.2.4 Zeldak Sorta Eredua

Ikerketa honetarako VGetan ezarritako zeldak sorta ereduaren zehaztasuna ere landu egin da. Eredua hau ezartzeko, VGrik gabeko sareta bat garatu izan da ondoren, beharrezkoa den egituraren geometria garatzen da, kasu honetan, VGa. VGa definitzerako orduan,

haren kokapenaren inguruko zeldei etekina atera egin izan da. Behin geometria zehazturik, aipaturiko geometriaren inguruan dauden zeldak aukeratu dira, bertan zelda sorta berri bat sortu egiten da eta hormaren muga ezaugarriak ezartzen zaizkio. Zelda sortaren ezarpenaren inguruan Ballesteros-Coll et al. [9] egindako lana oinarrian hartuta egin da, baita Ibarra et al. [36]. 4.4 irudian zelda sortaren implementazioaren baitan VGaren eraikuntza ikus daiteke. Guztiz ebatzitako sareta batekin konparaturik, larriagoa den saretarekin lan egin daiteke zelda sortaren teknika erabiltzen bada, horrela gastu denborala eta konputazionala aurreztuz. Hori dela eta, honako simulazioak egiteko 7.2 milioi zeldadun sareta erabili dira.



Irudia 4.4: VGaren zelda sorta eraikuntza. (a) $\alpha = 18^\circ$; (b) $\alpha = 25^\circ$.

4.3 Emaitzak

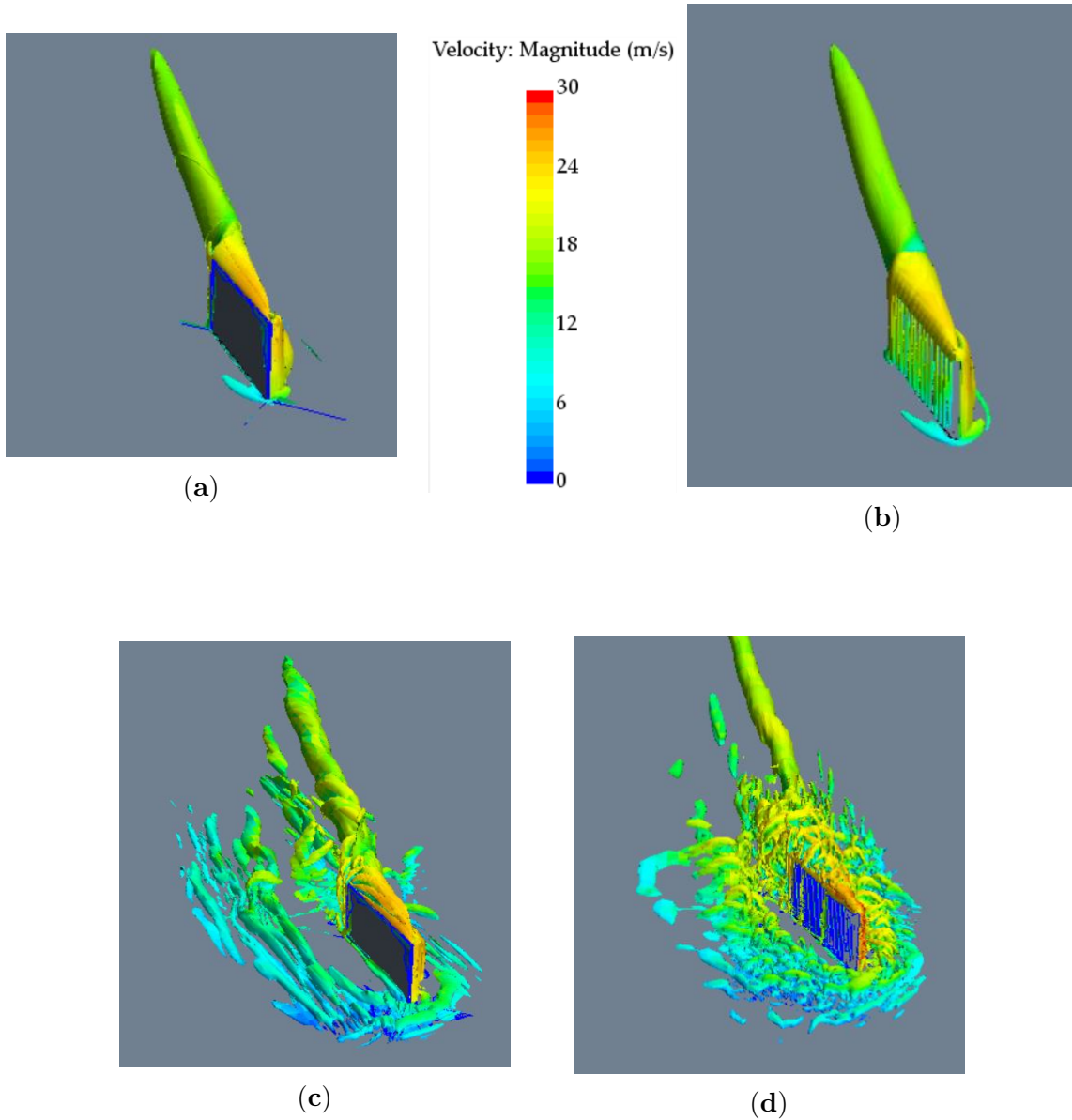
Zelda sorta teknika erabiltzerakoan eta guztiz eraturiko sareten arteko emaitza koantitatibo eta koalatiboen konparaketa egiteko asmoz, plaka lau batean kokaturiko VG laukizuzen formako batek eraturiko zurrunbiloen simulazioak egin dira. Zurrunbiloen ezaugarritzea egite asmoz, zurrunbilo nagusiaren ibilbidea, indarra eta abiadura profilak

ikertu izan dira, horrezaz gain, egitura koherenteak eta hormaren ebakidura tentsioa ere jaso izan dira. Simulazio guztietan 56 Intel Xeon 5420 nukleo eta 45GB RAM erabili izan dira paraleloki lan egiten duten lan esparruetan. Guztiz osaturiko saretadun ereduaren simulazioetan 170,334s behar izan dira RANS turbulenzia ereduak erabiltzerakoan, LES kasudun simulazioetarako 663,595s behar izan dira. Bestalde, zelda sorta ereduaren bitartez aurrera eramandako simulazioetan, RANS turbulenzia kasuetarako 103,120s erabili dira eta 401,070s LES simulazioetarako.

4.3.1 Egitura koherenteak

Jarioaren egitura koherenteak identifikatzeko Q irizpidearen metodoa erabili da [34], isogainazalak aplikatuz. Q ren balioa $2500 s^{-2}$ gisa zehaztu da. Isogainazal hauek 4.5 irudian ikus daitezke. Veltek et al [68] PIV (Particle Image Velocimetry) teknikaren bitartez jasotako neurketekin, VGarengandik behera bi egitura zurrunbilotsu sortzen direla erakutsi zuten. Zurrunbilo nagusia VGaren goiko partean agertzen da eta jarioaren noranzkoa hartzen du. Bigarren mailako zurrunbiloa ordea VGaren beheko partean agertzen da eta ferra itxurako zurrunbilotzat hartzen da. Bigarren mailako zurrunbilo hau bi zatitan banatzen da, presioaren aldea eta xurgatzearen aldea, xurgatze aldeak zurrunbilo nagusiaren aurkako zeinua duela eta, sorreraren hasieran zurrunbilo nagusiak mugitu egiten du bigarren mailakoa. Beraz, zurrunbiloen sortzearen hasierako uneetan esan daiteke bigarren mailako zurrunbiloak ez duela jarioaren noranzkoa jarraitzen. RANS turbulenzia ereduaren erabilerak zurrunbilo nagusia jasotzen lagundu du, kasu bietan, baina ez bigarren mailakoa iragartzen kasu bietan zurrunbilo nagusiaren aurreikuspen antzekoa eginez. LES simulazioetan ordea, bai zurrunbilo nagusia zein bigarren mailako zurrunbiloa jaso dira hala ere, bi egitura zurrunbilotsuak jaso izanda, zelda sortaren eredu jarraikiz egindako simulazioetan jasotakoa ez da guztiz eraturiko saretan jasotako bezain asegarria izan. Zelda sortaren eredu jarraiturik simulazioak jasotako zurrunbilo nagusia luzeagoa eta estuagoa da guztiz eraturiko saretak egindakoarekin aldeturik, bigarren maila zurrun-

biloa ordea ez da zelda sortaren simulazioetan horren nabarmena, zurrumbiloaren presio eta xurgatze eremuak behar beste ondo definitu ez direlako. Beraz, bigarren mailako zurrumbiloa ez da zurrumbilo nagusiagatik arrastatua.



Irudia 4.5: Isogainazalak abiaduraz koloreztaturik: (a) RANS guztiz eraturiko saretan ($\alpha = 18^\circ$); (b) RANS zelda sorta ereduaren ($\alpha = 18^\circ$); (c) LES zelda sorta ereduaren ($\alpha = 25^\circ$); (d) LES guztiz eraturiko saretan ($\alpha = 25^\circ$).

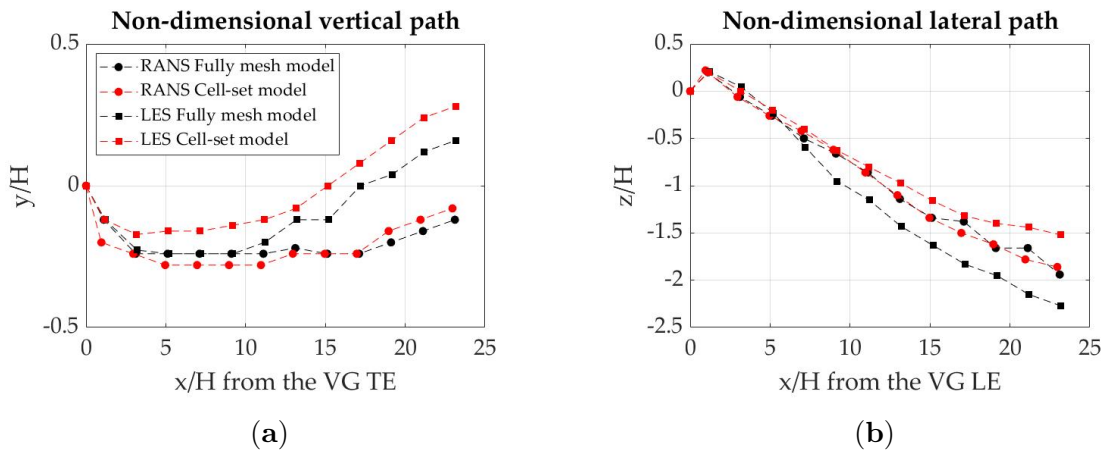
RANS zein LES ereduaren bitartez egindako simulazioetan, zelda sortaren bitartez egituratuko saretaren kasuan turbulentsia txikiak topatu izan dira VGaren inguruan. Turbu-

lentzia hauen kausa, zelda sortaren kasuan VGaren gainazala ereduarekiko zuzen kokaturik.

4.3.2 Zurrunbiloaren ibilbidea

Zurrunbiloen karakterizazioa egin ahal izateko gorago aipatu eta jarioarekiko elkartutak diren 12 planoetan abiadura axiala neurtu izan da. RANS simulazioen kasuan unean uneko balioak hartu dira kontutan, eta LES simulazioetan ordea, jarioa guztiz garatu eta 2 segundotara jasotzen den batez bestekoa. C eranskinean irudian abiadura axialaren balioak agertzen dira. Emaitzek garbi erakusten dute VGaren irteera ertzetik distantzia handitzerakoan jarioan behera, abiadura txikitu egiten da zurrunbilo nagusiaren tamaina handituz doan heinean. Yao et al. [72] ikerketarekin bat, zurrunbiloaren forma ez da guztiz borobila.

RANS simulazioetan lortutako emaitzei soz, antzekotasun handia igartzen da guztiz osatutako sareta eta zelda sorta ereduaren bitartez egindako eruedetan, aurretik aipatutako egitura koherenteetan ez bezala, aipatzekoa da, abiadura axialaren datuekin bigarren mailako zurrunbiloaren presio eremua jaso egiten dela. LES simulazioetan, egitura koherenteen kasuetan bezala zurrunbilo nagusia estuagoa da eta abiadura bere zentroan altuagoa zelda sortaren kasuan bereziki eta VGarengandik urrutiagoko lekuetan. Formaren aldetik antzekoak izanda ere, VGarengandik abiatutako zurrunbiloaren ibilbidea ez da guztiz berdina bi eruedetarako. Horretarako zurrunbilo nagusiaren posizioa eta ibilbidea ikertuak izan dira. 4.6 (a) irudian zurrunbiloaren zentroaren ibilbide bertikala eta 4.6 (b) irudian horizontala jasotzen dira, zurrunbiloaren zentroa bortizitate altueneko puntua erreferentzia gisa harturik kalkulatu da.

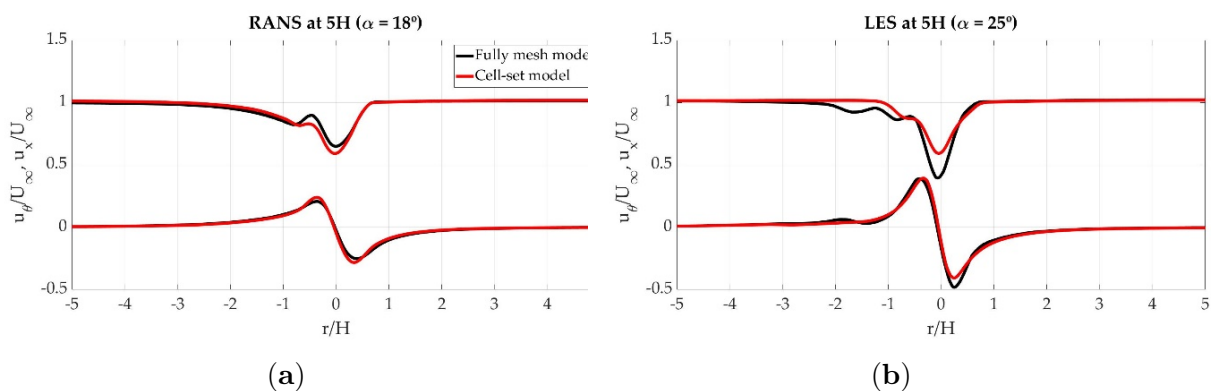


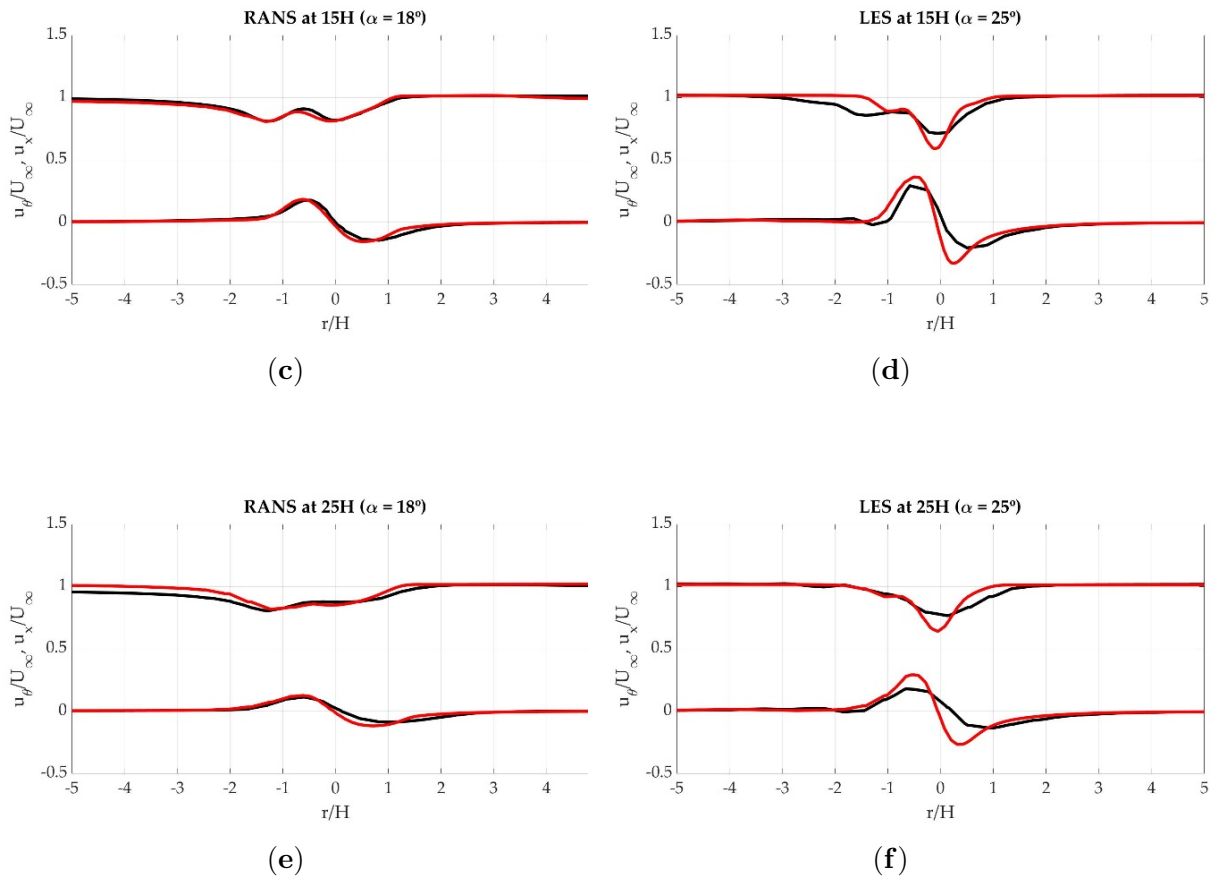
Irudia 4.6: Zurrunbilo nagusiaren ibilbide adimentsionala: (a) Ibilbide bertikala; (b) Horizontala.

VGaren inguruan zurrunbilo nagusiaren posizio bertikala VGaren altueraren azpitik kokatzen dela ikus daiteke baina jarioa VGarengandik urrundu egiten den heinean, zurrunbilo nagusiak altuera hartu egiten du. Gertakari hau nabarmenagoa da $\alpha=25^\circ$ kasurako. RANS turbulentsia ereduaren kasuan zelda sortarekin desplazamendu bertikal txikiagoa jazo egiten da VGaren inguruko eremuetan baina, jarioa VGarengandik urrunago dagoen tokietara abiaturik orduan eta altuera handiagoa hartu egiten du, aurreikus zitekeen bezala[35]. LES simulazioetan baina, zelda sorta zein guztiz eraturiko sarearentzat joera berdina ematen da, balioetan ezberdintasun txikiak agertuz, zelda sorta ereduaren baitan desplazamendu bertikal handiagoa izanik[36]. Alboko ibilbideari dagokionez, kasu guztietan zurrunbilo nagusiaren zentroaren mugimendu bat ikus daiteke VGarengandik behera jarioak jarraitzen duen heinean. VGaren inguruan kasu guztietan antzekoak diren desplazamenduak ikus daitezke baina jarioak aurrera egiten duenean ezberdintasuna ageri geratzen da LES simulazioen bi ereduarentzat. RANS kasuetan ordea, emaitzek nahiko antzeko balioak ematen dituzte. Bai ibilbide bertikala zein albokoa kontutan harturik jasotako emaitzak Fernandez-Gamiz et al. [27] jasotakoekin bat datoz.

4.3.3 Abiadura profilak

Velte et al. [66][67] ikerketan ikus daitekeenez VG batek eraturiko zurrumbilo nagusiak simetria helikoidala du, hortaz, u_x abiadura axialaren eta U_θ abiadura azimutalaren abiadura profilak elkarloturik daude. Zurrumbiloaren abiadura profilak ikertzeko, zurrumbiloaren zentroa zeharkatzen duen marra zuzen horizontala egin da. 4.7 irudian VGaren irteera ertzetik 5H, 15H eta 25Hra jasotako abiadura axial eta azimutalen abiadura profilak jaso dira. Abiadura profil hauek abiadura askearekiko normalizaturik daude. Ikusten diren abiadura profilek Velte et al. [66][67] aurreikusitako harremana erakusten badute ere, mugimendu batzuk ere nabarmentzen dira bigarren mailako zurrumbiloaren eraginez. Mugimendu ez ohiko horiek abiadura axialaren profilean argiago ikusten dira non simetrikoak ez diren bigarren mailako zurrumbiloaren zeharkako presioa dela eta. RANS simulazioetan, abiadura profil nahiko antzekoak eman dira ikertutako plano ezberdinetan. LESean ordea VGaren inguruan balio antzekoak eman badira ere handiagoak dira abiaduraren emaitzak zelda sorta ereduarentzat, VGarengandik urrunagoko esparruetan batez ere. Hala ere, ezberdintasunak oso txikiak dira eta joera kasik berdina daukate.



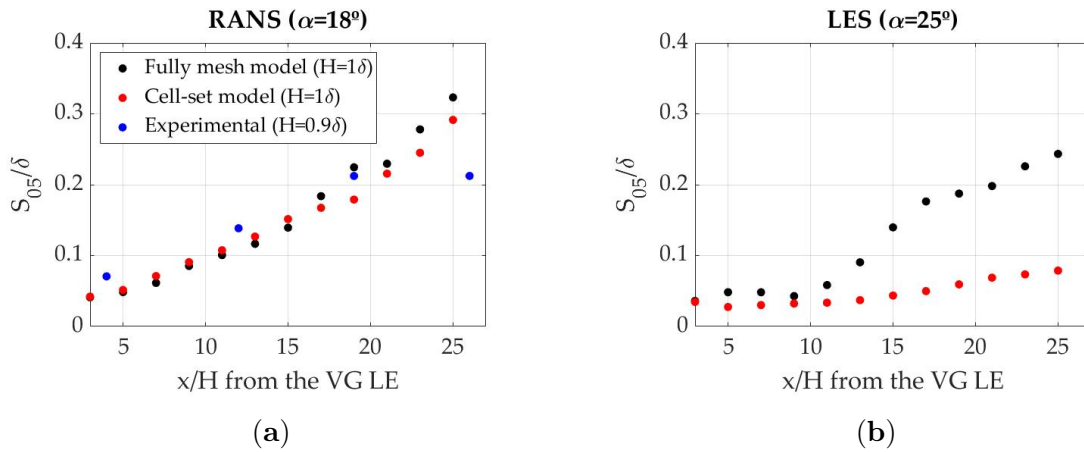


Irudia 4.7: Abiadura axial (goian) eta azimutalaren (behean) abiadura profilak: (a) RANS VGaren sarrera ertzetik 5Hra; (b) LES 5Hra; (c) RANS 15Hra; (d) LES 15Hra; (e) RANS 25Hra; (f) LES 25Hra.

4.3.4 Zurrunbiloaren tamaina

Zurrunbilo nagusiaren tamaina kalkulatzeko asmoz Gutierrez-Amo et al. [32] lanean definituriko Bizi erdiko Gainazala (S_{05}) edo Half-life Surface kalkulatu izan da. Parametro hau bizi erdiko radioarekiko Bray [15] alternatiboa den aldagaia da, bortizitatearen distribuzioa simetrikoa ez den kasuetarako erabilgarri dena. Metodo hau, bortizitate balio altuenaren erdia dagoeneko forma eliptikodun area topatzean datza (i_{peak2}). Helburu honetarako jarioarekiko elkartzuta den bortizitatearen distribuzioa lortzeko jarioaren noranzko bera duten puntuen bortizitatea atera izan da. Horrekin loturik, bortizitate gorenaren erdia duten lau puntuak hartu dira, lau puntu hauek forma eliptiko bateri

begira zehaztuz. 4.8 Irudiak S_{05} balioak erakusten ditu, zurrumbilo nagusiarentzat. Ikerketa honen bitartez eskuraturiko balioak Brayk [15] eskuratutakoekin konparatu izan dira eta zelan ikerketa hartan, erdi bizitza erradioarekin egin izan dira era honetan izango dira erakutsiak,



Irudia 4.8: Zurrumbilo nagusiaren bizi-erdi gainazala: (a)RANS; (b) LES.

Zurrumbiloaren ibilbidearen emaitzak ontzat harturik, aurreikusi bezala, bizitza erdiko gainazala handitu egiten da VGarekiko distantzia handiagoa egiterakoan. Aurretik jasotako datuak kontuan harturik, zelda sorta ereduaren kasuan erdi bizitza gainazala konstante antzera mantentzen da LES kasuan. RANSean ordea, bi kasu ezberdinetan oso antzeko emaitzak eman dituzte, horrezaz gain emaitza esperimentalekin antzekotasun handia ematen dute batez ere, VGarengandik gertu.

4.3.5 Zurrumbiloaren Indarra

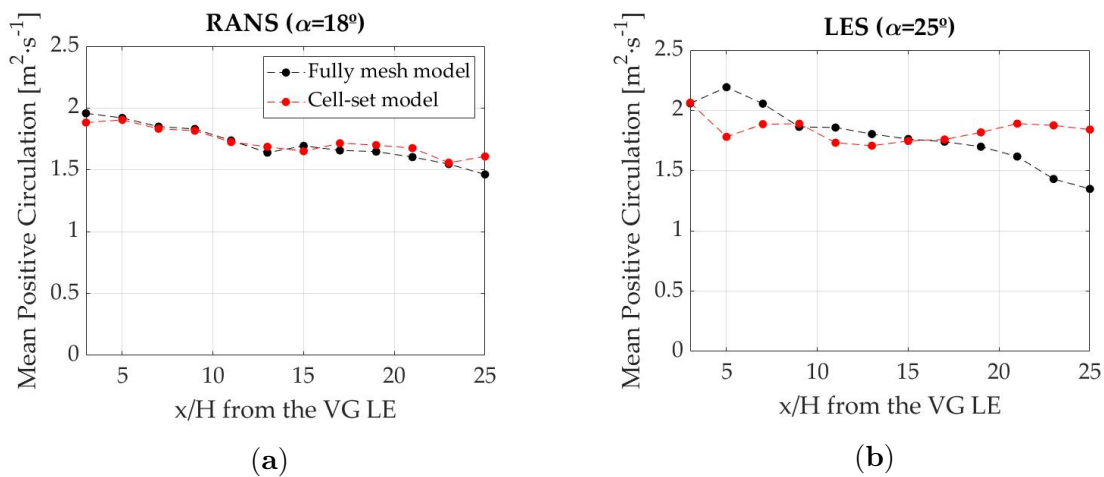
Zurrumbiloak duen kiribiltze gaitasuna zirkulazio positiboaren balioarekin (Γ^+) ebaluatzen da hurrengo espresioa jarraikiz.

$$\Gamma^+ = \int_S \omega_x^+ dS \quad (4.2)$$

Ikerketa honetan, zirkulazio positiboaren batez bestekoa (Γ_{05}^+) deritzon parametroa ebaluatuko da Gutierrez-Amok et al. [32] adierazi bezala. Parametro hau zirkulazio positiboarekiko alternatiboa den parametroa da eta aurretik aipatutakoarekin harremandua da. Kalkulatzeko, hurrengo espresioa kontuan harturik:

$$\Gamma_{05}^+ = \frac{\omega_{xmax}}{2} S_{05} \quad (4.3)$$

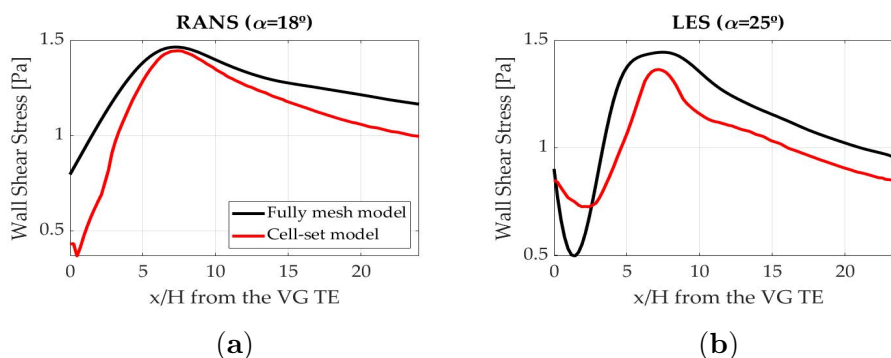
Hurrengo irudiek zurrumbilo nagusiaren batezbesteko zirkulazio positiboa agertzen dute. Egitura koherenteetan ikusten den gisa, LES kasuetan, zelda sortaren kasuetan zurrumbilo nagusiari dagokionez, askoz luzeagoa den guztiz eraturiko sarearen kasuan baino. Honek, bortizitatea handiago dela eta zirkulazioaren batezbestekoaren balio altuagoetan jasotzen dela VGaren urrutiagoko lekuetan. Are gehiago, balioak kasik konstante mantentzen dira, hortaz, bariazioek arbuiagarriak dira. RANS kasuetan ezberdintasun oso txikiak topatu dira eredu ezberdinetan.



Irudia 4.9: Zurrumbilo nagusiaren zirkulazio positiboaren batez bestekoa, (a) RANS; (b) LES.

4.3.6 Hormaren ebakidura tentsioa

Gorago aipatu bezala. VGaren helburu nagusia jarioaren gainazalarekiko bereizketa ekiditean datza edo behintzat, bereizketa horren atzerapena. Hormaren ebakidura tentsioa aipatutako fenomenoaz azaltzeko erabilgarria den parametroa da, hurrengo 4.10 irudiak VGaren irteera ertzaren atzean emandako presio balioak agertzen ditu. RANS simulazioetan, unean uneko balioak hartzen dira kontuan, LES kasuetan ordea batez besteko balioak 2sren ostean jarioa guztiz garatuta dagoenean. Kasu guztietan hormaren ebakidura tentsioa balio txikitatik abiatzen da gehienezko balio jakinerarte zeinaren ostean berriro ere txikitzen den. Balio altuena, $x/H = 7$ inguru denean jaso egin da. Bai RANS zein LES ereduaren bitartez hormaren ebakidura tentsioaren balio altuenaren aurreikuspen asegarriak lortzen dira, bereziki zelda sorta ereduaren kasuan, nahiz eta emaitzak ezberdinak izan. RANSeri dagokionean gehienezko balioak ia berdinak dira baina, VGarengandik urrunagoko balioetan ezberdintasuna handituz doa. LESekin, joera bera jarraitu beharrean balioak pixkat baxuagoak dira eremu guztietan. Balioetan ematen diren ezberdintasun hauek zurrumbilo nagusiaren mugimenduari egotzi dakizkioke, zurrumbilo nagusiaren desplazamendua handiagoa den heinean orduan eta eragin txikiagoa VGaren atzea eta honek, hormaren ebakidura tentsio balio txikiagoak dakartza. Bi ereduekin eta aurreikus bezala, Godard eta Stanilas [30] ikerketari soz, 18° kasuetan topatu izan dira hormaren ebakidura tentsio balio altuenak.



Irudia 4.10: VGaren irteera ertzetik (TE) haratagoko hormaren ebakidura tentsioa, (a) RANS; (b) LES.

4.4 Ondorioak

Zelda sorta eta guztiz eraturiko saretaren ereduak erabilia plaka lau batean kokaturiko VG bakarraren RANS eta LES CFD simulazioak egin izan dira, jarioaren noranzkoan arbuigarria den presio gradientearekin. Zurrunbilo nagusiaren egitura koherenteak, hormaren ebakidura tentsioa, ibilbidea, tamaina, indarra eta abiadura profilak kalkulatu izan dira eta konparatu, zelda sortaren ereduaren doitasuna kalkulatzeko. Aipatu beharra dago zelda sortaren ereduaren aplikazioak saretaren zelda kantitatea 11.5milioietatik 7.2milioietara igaro dela horren bitartez, bai RANS zein LES kasuetan %40ko aurrezkoa eraginez denbora konputazionalan. RANS oinarrian hartzen duten turbulenzia ereduaren kasuan zelda sorta ereduak errendimendu ona eskaini du, doitasun handia ikusi delako zelda sorta ereduaren eta guztiz eraturiko saretaren ereduaren emaitzen artean ikerturiko parametro guztientzat. LES turbulenzia ereduarentzat egitura koherenteen, zurrunbiloaren ibilbidearen eta hormaren ebakidura tentsioaren aurreikuspen asegarriak jaso dira zelda sorta ereduarentzat. Zurrunbilo nagusiaren tamaina, indarra eta abiadura profilak kalkulatzeko ordea ezberdintasunak atzeman izan dira. Ezberdintasun hauek LES turbulenzia ereduaren zelda sorta ereduak zurrunbilo nagusiaren bortizitatea gaintetik aurreikusten dituelako ematen dira, VGarengandik urrutiko puntuetan bereziki. Bestalde, zurrunbiloaren tamainaren kalkuluek emaitza txikiagoak ematen dituzte, zurrunbiloaren indarraren eta abiadura profileko balio handiagoak guztiz eraturiko ereduaren aurrean. Zurrunbiloaren tamainaren kasuan izan ezik non ezberdintasunak nabarmenak diren, emaitzak onargarritzat hartzen dira. Ondorioz, RANS turbulenzia erduetarako zelda sortaren bitartez lorturiko emaitza onak direla eta RANSentzat guztiz erabilgarria da zelda sorta ereduak. LES turbulenzia ereduarentzat emaitzak onargarriak badira ere, ikertu diren kasuetarako, guztiz eraturiko saretak emaitza egokiagoak ematen ditu. Hala ere, VGentzat zelda sortaren ereduaren lehen aplikazio gisa hartu daiteke honakoa eta ikerketa sakonago bat egitea beharrezkoa da, LES turbulenzia ereduarentzat zein kasuetarako

erabilgarria den jakiteko, guztiz eraturiko saretaren aurrean dituen abantailak garrantzitsuak direlako denbora aurrezpena dela eta.

5. Atala

Zurrunbilo sortzaileen jBAY
ereduztatzea

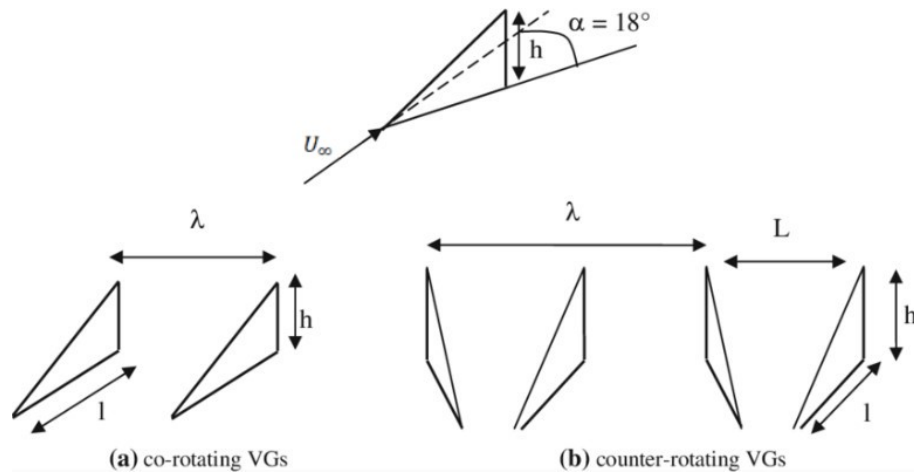
5.1 Sarrera

Dagoeneko erakutsi den bezala, haizearengandik jasotako energiaren eskariaren handitzea zuzenki harremandua dago alde batetik, haize turbinen tamainaren aldaketarekin eta bestalde, jarioaren kontrolerako gailuen garapenarekin, VGak kasu. Ondorengo ikerketan ere VG batek sortutako zurrunbilo nagusiaren ezaugarritzea egin da eta horretarako DU97W300 profil aerodinamiko baten eraginkortasun aerodinamikoa ebaluatu da VGa duen profila eta VGrik gabekoaren arteko alderaketa eginaz.

Ikerketa honetan, triangelu forma duen zurrunbilo sortzaile baten kasua simulatu izan da alde batetik, jBAY iturburu eredua ezarriz eta bestetik, guztiz eraturiko sareta fluidodinamika konputazionalaren (CFD) ereduaren bitartez. Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) simulazioak erabili ziren VGen eragina egoera egonkorrean kalkulatzeko, eta banatutako zirimolen simulazio (DES) eredua erabili zen *stall* egoeratik gertuko eraso angeluak (AoA) kalkulatzeko.

jBay eredua jarraikiz egindako simulazio guztiek $Re = 2 \times 10^6$ Reynolds zenbakiaren egin dira 0° eta 20° arteko eraso angeludun VGen eragina ikertzeko asmoz eta horrezaz gain, haize tunelean jasotako datu esperimentalekin alderatzeko. Ikusiko da zelan, VGaren instalazioak beste behin eraginkortasun aerodinamikoan hobekuntza bat suposatzen duen eta jBAY ereduaren erabilerak emaitza asegarriak eskaintzen dituen karakterizazio fidagarri bat eskuartean izan eta dagokion VGaren ezaugarri egokienak aukeratzeko.

Zurrunbilo sortzaileek jarioarekiko angelu ezberdinetan kokaturik, honen gainazalarekiko banaketa atzeratu edo ekiditeko gaitasuna argi erakutsi dute [39]. Betteronek et al. [13] VG konfigurazio ezberdin bi erakutsi zituzten gaur egungo erabiletarako, kontrarrotazionala eta korrotazionala. Korrotazionalaren kasuan VG guztiek jarioarekiko noranzko bera daukate, eta kokapen kontrarrotazionalan ordea, batak bestearekiko kontrako angelua daukate, 5.1 irudian ikus daiteke. Aplikazio gehienetan jarioaren banaketa ekiditen duela



Irudia 5.1: Bi konfigurazio nagusien adierazpenak. (a) Kontrarrotazionalki kokatuak eta (b) Korrotazionalki kokatuak.

eta[16] kokapen kontrarrotazionala eraginkorrena da, [30], [37], eta [15].

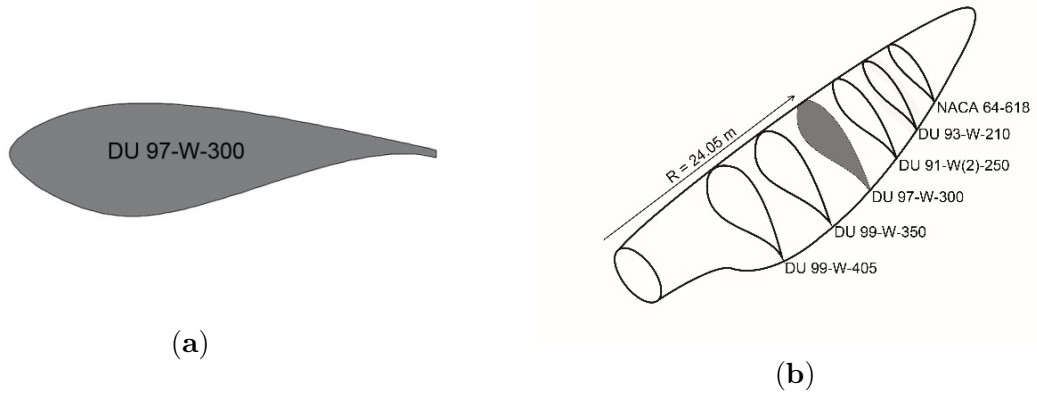
5.1 irudian, U_∞ zeinuak sarrerako jarioaren abiadura askea errepresentatzen du, h zeinuak altuera eta l luzeera da zoruko gainazalaren luzeeran. Konfigurazio korrotazionalan eta kontrarrotazionalan, VGen arteko distantzia λ eta L rekin adierazi dira, hurrenez hurren, irteera ertzetik distantzia zehaztuz. Zurrumbilo sortzaileen forma eta hauen kokapena pala edo hegalean jarioaren izaeran berebiziko eragina daukate, ikusi Martinez et al.[49] non RVG (Rod Vortex Generators) delakoen implementazioan ere mugako geruzaren itxastea ematen den. Formari dagokionean, hirukidun formaren inguruan ikerketa ugari garatu izan dira muga geruzaren banaketa ekiditean duten eraginkortasuna ezagutzeko, Lin [45]. Profil lodietan delta erdia formadun VGen eragin aerodinamikoa Zhang et al. [74]en ikus daiteke ikertua eta Hansen et al. [33] lanean VG hiruki eta laukizuzenek sortutako zurrumbiloen indarra neurtu zuten. Emaitza honenak jasotzeko idearekin ikerketa parametrikoak abian jartzea lagungarria izango da, Jirasek [37] gisan. Ikerketa hauek, orohar, guztiz eraturiko sareten simulazio numerikoen bitartez eginak dira, konputazionalki eskaera handia duten ikerketak izanik, sareta hauen zelda kopuru altua dela eta, ikusi Fernandez-Gamiz et al.[26]). Joukowskiren altxatze teoreman eta hegal profil mehearen teorian oinarriturik, emaitza bat lortze aldera indarrak erabiltzen dituen, BAY izeneko iturburu eredu berria erabili izan da, Bender et al. [12]. Navier-Stokesen bolumen

finitoen kodean laukizuzen formako zurrunbilo sortzaileak simulatu izan dira, saretaren geometriaren guztizko eraikuntzarako baldintzak arbuiatuz. Ereduaren kalibrazioa guztiz eraturiko saretarekin alderaturik egin izan da, Errasti et al. [23] lanean egin gisa. BAY eredia laukizuzen formako zurrunbilo sortzaileek sorturiko zurrunbiloen jario ezberdinetarako arrakastaz ebaluatu izan da, Dudek [22]. Azken garaiotan eguneraturiko eredia agertu izan da jBAY izenez ezaguna, Jirasekek [37] proposaturik eta garaturik. Hiruki formako zurrunbilo sortzailea DU97W300 profilean kokatu izan da ikerketa honetan, jBAY iturburu ereduaren baitan, profil honen aukeraketa NRELEk Jonkman et al. [38] lanean aurkeztutako 5MWeko haize errotaren baitan dagoena izateagatik egin da, 5.2 (a) irudian profilaren silueta agertzen da eta 5.2 (b) irudian profilaren kokapena palaren osotasunean, emaitzak alderatzeko asmoz ere 1.5MWeko palan oinarritutako Wu et al.[71] ikerketa ere kontuan izan da. Eraginkortasun aerodinamikoan lan honetan altzatzeak arrastearekiko harremanean finkatu da, eta VGarekin eta VGrik gabeko baldintzetan simulatu izan da. Era berean, zurrunbiloaren zentroaren ibilbidea, hormaren ebakidura tentsioa, presio koefizientea gainazaletik, eta zurrunbiloaren ikuspegia VGaren irteera ertzetik behera ikuskatu da. jBAY ereduaren abantaila hirukia den VG bat simulatzerako orduan, guztiz eraturiko saretaren baitan, aplikatzeko erraztasunean datza, VGaren geometriarik ez delako behar. Are gehiago, metodo honek erraztasun handia ematen du VG tamaina eta eredu ezberdinak simulatu nahiko balira.

5.2 Erabilitako tresna eta metodoak

5.2.1 jBAY Eredua

Haizearen eta bestelako jariakinen portaera eta horiek direla eta profil aerodinamikoaren eraginkortasuna aurreikusteko erabilitako tresna ohikoena fluidodinamika konputazionala da (CFD). Teknika hauen bitartez eginiko simulazioak kontuan harturik eta haize



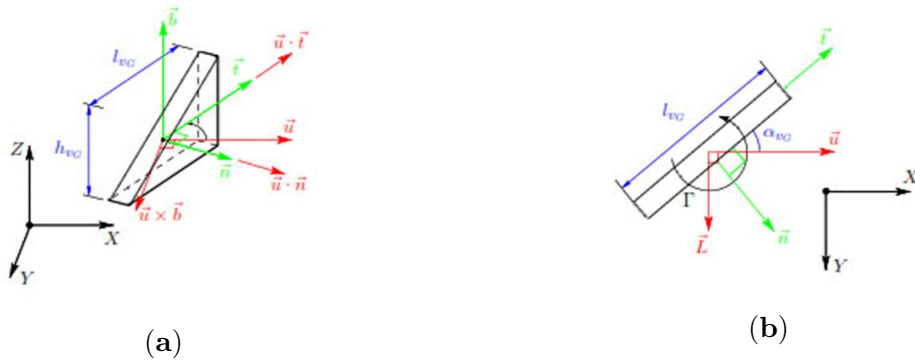
Irudia 5.2: (a) DU97W300 profil aerodinamikoa; (b) 5MWeko NREL pala batean profil aerodinamikoaren banaketa.

tuneletan egindako esperimenduekin batera, fidagarria den edozein ikerketa parametrikoa bideragarria da. Baina simulazioak egiterako orduan guztiz eraturiko saretek gastu konputazional handia eragiten dute barnean daramatzaten zelda kopuru handiarengatik. Lan honetan, gorago aipaturiko BAY eredian oinarrituriko Jirasekek [37] proposaturiko jBAY iturburu eredia STAR CCM+ [17] kode komertzialaren bitartez erabili izan da. BAY eredia, VGaren geometria, toki horretan bertan antzekoa den bestelako geometria bat azpidomeinu baten bitartez txertatzeko aukera baliatu da, plaka itxura duen zurrumbilo sortzailea txertatuz Navier-Stokesen bolumen finitoen kodea erabiliz. Horrekin batera VGaren eragina simulatzeko asmoz, jarioarekiko elkartzuta den gorputz indarren distribuzio jakina aplikatu da, ikusi 5.3. Hurrengo ekuazioaren bitartez erreprezentaturiko indar normala 5.1 ekuazioan L gisa agertzen da, G eranskinean xehetasun handiagoarekin adierazita. Indar elkartzut honek VG batek sorturiko zurrumbiloaren indarra simulatzen du diseinatu eta saretu behar barik, ikusi Fernandez-Gamiz et al. [25]. Hurrengo ekuazioaren bitartez VGaren domeinuko zelda bakoitzean ematen den indarra neurtzen da.

$$\vec{L}_{cell} = C_{VG} \rho (\vec{u} \cdot \vec{b}) (\vec{u} \cdot \vec{n}) \frac{(\vec{u} \cdot \vec{t})}{\|\vec{u}\|} S_{VG} \frac{V_{cell}}{V_S} \quad (5.1)$$

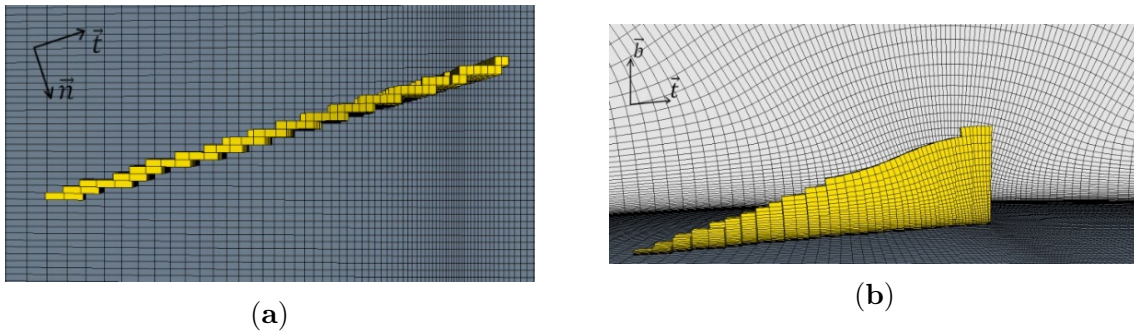
L_{cell} zelda bakarraren indarra izanik; C_{VG} erlaxazio faktore bat izanik Jiraseken [37] arabera 10eko balioaren ingurukoa dena; bertako dentsitate; u uneko abiadura; b unitate

faktore jakina da $b=n \times t$ gisa definiturik (VGarekiko bektore normal eta tangenziala); SVG VGaren azalera; Vcell zelda bakoitzaren bolumena; eta VSeredia aplikatuta da-goeneko sareturiko zelda kopuru totala, ikusi Errasti et al. [23].



Irudia 5.3: Triangelu formako VG bateko indarren ikuspegia: (a) alboko ikuspegia eta (b) goitiko ikuspegia.

Lan honetan, dagozkion indarrak domeinuaren zelda guztietan eratu beharrean BAY ereduak eskatu bezala, VGa errepresentatzen duten zelda horietan bakarrik aplikatu izan dira, Chillon et al. [19] oinarrian harturik, hurrengo irudian ageri direnetan, alegia.

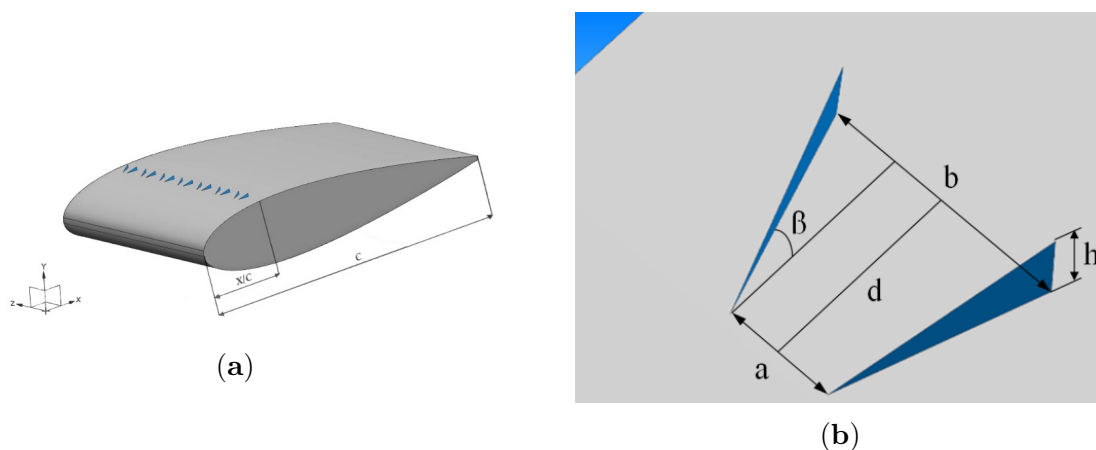


Irudia 5.4: Indarrak aplikatu izan direnko VGaren zeldak: (a) goitiko ikuspegia eta (b) alboko ikuspegia.

5.2.2 Domeinu konputazionala eta VGa

Domeinu konputazionala 0.65mtako korda luzedun (c) DU97W300 eredu bat da, 0.0175mtako hego luzearekin. VGak jarioan behera izango duen eragina alboan legokeen batenaren

simetrikoa izango zelakoa aurreikusiz, bi VG ezarri beharrean bakarra kokatu da. Erabaki honek gastu konputazionala jaitsiko du. Hegalaren profilaren korda luzeera baino 30 aldiz handiagoko radioa duen O formako domeinu konputazionala definitu da. Aurreko eta atzeko aldeentzat mugako baldintza ezarri zaie eta profilaren gainazalari ez irristatze horma baldintzak. Urrutiko esparruko domeinuari jario askearen baldintza ezarri zaio. Domeinua orohar diskretizatu izan da egituratuko 6.64 milioi zelda dituen sareta baten bitartez. VGaren kokapena aurreikusten den sarrera eta irteera ertzen arteko esparruan zelden kopurua handitu egin izan da, baita VGaren kokapenean bertan, 1.1eko sareta handitze ratioarekin. VGaren oinarritzko aldagaien konfigurazioa 5.5 irudian agertzen dira. 5.1 Taulak kasu honetan erabilitako parametro geometrikoen balioak erakusten ditu. VGaren kokapena profilaren sarrera ertzetik korda luzeeraren %30ean kokatu da, $x/c=0.3$, ikusi Baldacchino et al.[8].



Irudia 5.5: VGekin hornitutako profil aerodinamikoak: (a) ilaran kokatutako VGak; (b) VG bikote baten xehetasuna neurri geometrikoekin.

Taula 5.1: VGaren neurri geometrikoak.

h [mm]	d [mm]	a [mm]	b [mm]	β [°]
5	17	10	20	18

5.2.3 Antolamendu numerikoa

Lan honetan bi eredu numeriko erabili izan dira simulazioak egiterako orduan. Eraso angeluaren (AoA) balioa 12° baino txikiagoa denean eta jariakin egonkorra eta konprimaezinarekin, Reynolds-averaged Navier Stokes (RANS) metodoa erabili izan da emaitzak jasotzeko eta turbulentsia ereduari dagokionean Meneterren [51] $k-\omega$ shear stress transport (SST) edo ebakidura tentsio garraiatzearen, ereduia izan da. Zhong et al. [76] jarraikiz, RANS turbulentsia ereduaren sinplifikazioek CFD metodoen doitasuna txikiagoa izatera eramaten dute batez ere, turbulentsia beraren simulazioari dagokionean. Arrazoi honengatik berarengatik, eraso angelu handiagoetarako, pala edo hegala gelditze (*stall*) egoeran legokenean, banatutako zirimola simulazioa edo ingelesez Detached eddy simulation (DES) planteatzen da. Adibidez, Meana-Fernandez [50] ikerketan DES erabiliaz DU-06-W-200 profil bat simulatzerakoan indar aerodinamikoaren simulazio errealistagoa jasotzen zela adierazi zen, jarioaren mugimenduetan doitasun handiago emanez. Simulaziorako eredu honek ezaugarriak partekatzen ditu RANSean oinarrituriko Spalart-Allmarasekin mugako geruzetan eta LESein egonkorrak ez diren banaturiko geruzekin, ikusi Guo et al. [31]. Emaitza onartu izan da eta elkarketa ontzat eman hondar numerikoan hiru magnitude ordenako erorketa egoterakoan. DES simulazioetan definitu beharreko parametro garrantzitsuenetarikoa Couranten zenbakia da C . Zeldaren tamainaren Δx , definituriko denbora urratsen (Δt) eta jarioaren abiaduraren (u) menpekoea da hurrengo ekuazioan ikus daitekeen bezala. Laburki azalduta, zenbaki honek, partikula bat, denbora tarte batean, zelda batetik bestera zelan mugitzen den adierazten du. Couranten zenbakiaren balioa 1 baino txikiagoa edo berdina baldin bada, jariakinaren partikula bat zelda batetik bestera denbora urrats bakarrean mugituko da, Courant zenbakia ordea 1 baino handiagoa izanez gero, partikulak zelda bi edo gehiagotara mugituko dira. Ikeritutako egonkorrak ez diren kasu guztietan Courant zenbakia 20 baliokoa izan da, 10^{-5} balioko denbora urratsarekin.

$$C = \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (5.2)$$

Reynolds zenbakiari dagokionean ikerketa honetan $Re=2 \times 10^6$ izan da, $c = 0.65$ mko luzeera duen profil korda batean oinarriturik; biskositate zinematikoa $=1.51 \times 10^{-5}$ izanik; eta jario askearen abiadura $U= 46.52$ m/s, ikusi 5.3 ekuazioa:

$$Re = \frac{cU_{\infty}}{\nu} \quad (5.3)$$

5.3 Emaitzak

Honako ikerketan profil aerodinamiko batean VG baten instalazioak izan dezakeen eragina ikertu izan da, hurrengoak dira kontuan harturiko ezaugarri aerodinamikoak: altzatze eta arraste koefizienteak, zurrunbiloaren ibilbidea, zurrunbiloaren gainbehera, hormaren ebakidura tentsioa, gainazal osoan zehar dagoen presio koefizientearen banaketa eta zurrunbiloaren behaketa VGaren irteera ertzetik beherago angelu ezberdinetarako.

5.3.1 Altzatze eta arraste koefizienteak

Sørensen et al. [62], Fernandez-Gamiz et al. [27], eta Rooij et al. [60] eta Wu et al.[71] ikerketak ikusirik, profil aerodinamiko batean zurrunbilo sortzaile bat ezartzeak altzatze koefizientearen balio altuagoan ikusiko da eta hondar arrastearen igoera txikia. Ikertutako kasu orotarako, eraso angelu handiagoentzat, VGak hegal edo palari egoera egonkorrean denbora gehiago egotea ahalbideratzen du, VGrik gabeko egoerarekin alderaturik, hutsik dagoen profila *stall* egoerako angeluetan ere altzatze balioak lortuz. Profilaren altzatze eta arraste koefizienteak hurrengo ekuazioaren 5.4 bitartez ebatzi daitezke.

$$C_{L,D} = \frac{\sum_f (f_f^{pressure} + f_f^{shear}) n_D}{\frac{1}{2}(\rho_{ref} V_{ref}^2 a_{ref})} \quad (5.4)$$

CL eta CD altzatze eta arraste koefizienteak izanik hurrenez hurren; $f_{pressure}$ eta f_{shear} , f gainazaleko bektoreak izanik; p_{ref} , V_{ref} , eta a_{ref} erreferentziazko dentsitatea, abiadura eta gainazala dira; eta nD indar bakoitzaren arabera zehaztutako noranzko bektorea. Gainazal baten gaineko presio indarraren bektorea jarraitzen duen ekuazioaren 5.5 arabera kalkulatu daiteke:

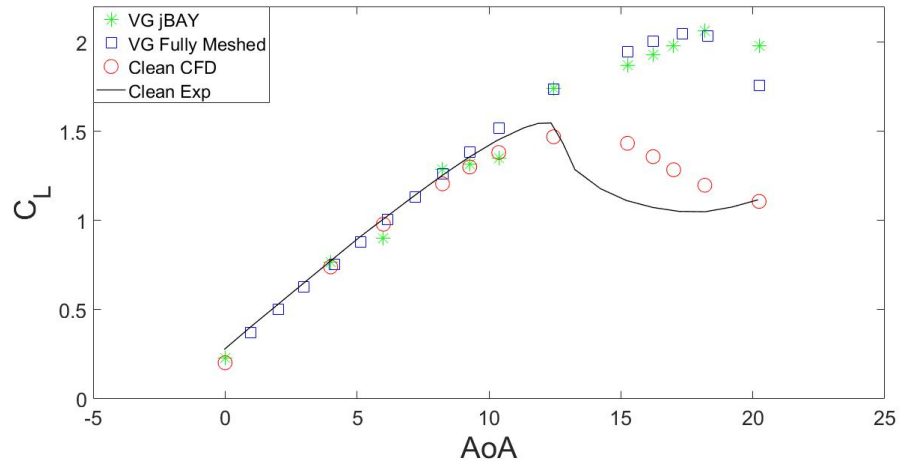
$$f_f^{pressure} = (p_f - p_{ref})a_f \quad (5.5)$$

p_f aurpegiaren presio estatikoa da; p_{ref} erreferentziazko presioa; eta a_f aurpegiaren azalera bektorea. f gainazal aurpegiko ebakidura indarra 5.6 ekuazioan errepresentatzen da:

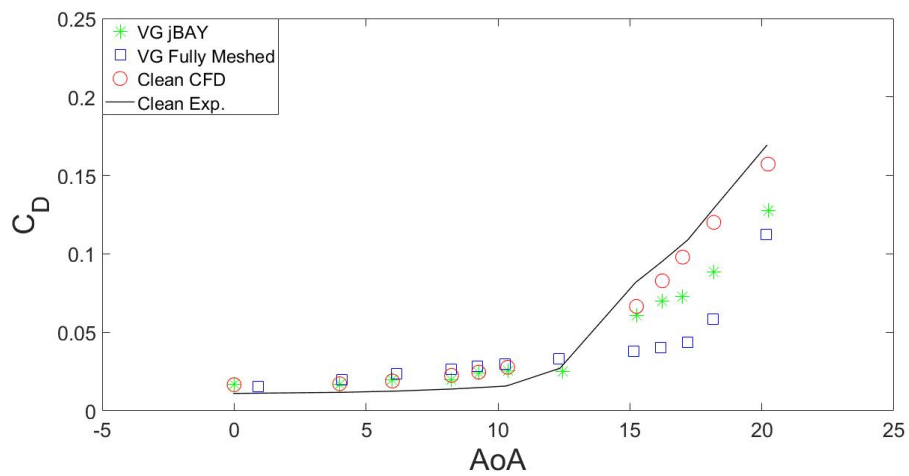
$$f_f^{shear} = -T_f a_f \quad (5.6)$$

T_f tentsio tentsorea izanik. Ikertutako eraso angeluak (AoA) 0° eta 20° artean daude. Altzatze koefizienteak nabarmen handitzen dira erlazio lineala jarraikiz *stall* angelue-tararte. Gelditze angelu hauek 12° inguruan daude garbi dagoen profil batentzat Rooij et al. [60] ikusiz, eta 18° eta 20° bitartekoa VGa duten profilen kasuentzat Gaok et al. [29] adierazi bezala. Hurrengo irudian 5.6 ikusten den bezala angelu horietarako, jariakinaren banaketarekin harremandutako efektuak agertzen dira eta altzatze koefiziente ezkorragoa agertzen da. Altzatze balio altuago hori gelditze edo *stall* unea baino lehen agertzen da eta handiagoa da eraso angelu ezberdinetan VGdun kasuetan. Emaidza numerikoak baieztatzeko asmoz, Gao et al. [29] ikerketan jasotakoekin alderatu egin dira altzatze eta arraste koefizienteentzat eta emaitza esperimentalekin [60] profil garbiaren kasuan. Gelditze angeluetatik gertuko balioetan ezberdintasun txiki bat jaso izan da profil garbiaren datu numeriko eta esperimentalen artean. Orohar, CFD simulazioek eraso angelu altuetan altzatze koefizientearen eragin handiagoa aurreikusten dute, ikusi Li et al. [44]. Gelditze arineko egoeretan ere Raffel et al. [58] ikerketan ezberdintasunak topatzen dira

datu esperimental eta numerikoen artean. Hurrengo 5.6 irudian arraste koefizientearen handitze esponentziala agertzen da *stall* angelutik haratago non emaitzek Baldacchino et al.[8] eta Nikolau et al.[53] ikerketan jasotakoekin koherenteak diren.



(a)



(b)

Irudia 5.6: $Re = 2 \times 10^6$ zenbakian DU97W300aren (a) altzatzeta eta (b) arraste koefizientearen alderaketa fluidodinamika konputazionala eta datu esperimentalen artean.

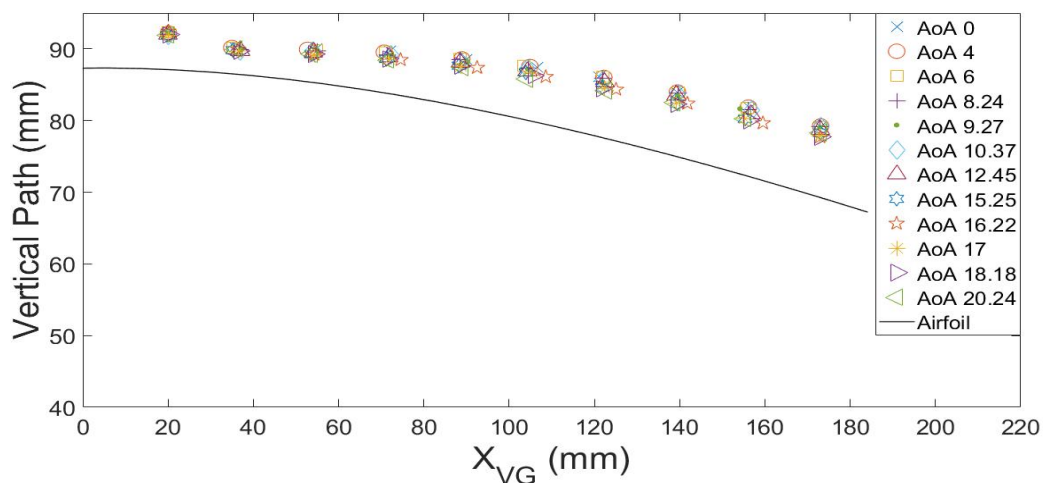
5.3.2 Zurrunbiloaren ibilbidea eta gainbehera

Bortizitate balio altuenaren ikerketak, VGarengandik jarioan behera, bi alderdi ditu. Alde batetik bortizitate altuenak definitzen duen zurrunbiloaren zentroaren ibilbide bai bertikala zein horizontala ikertu izan dira. Bestetik, zurrunbiloaren gainbehera aztertu izan da VGarengandik haratago bortizitate balio altuena geroz eta txikiagoa izanik.

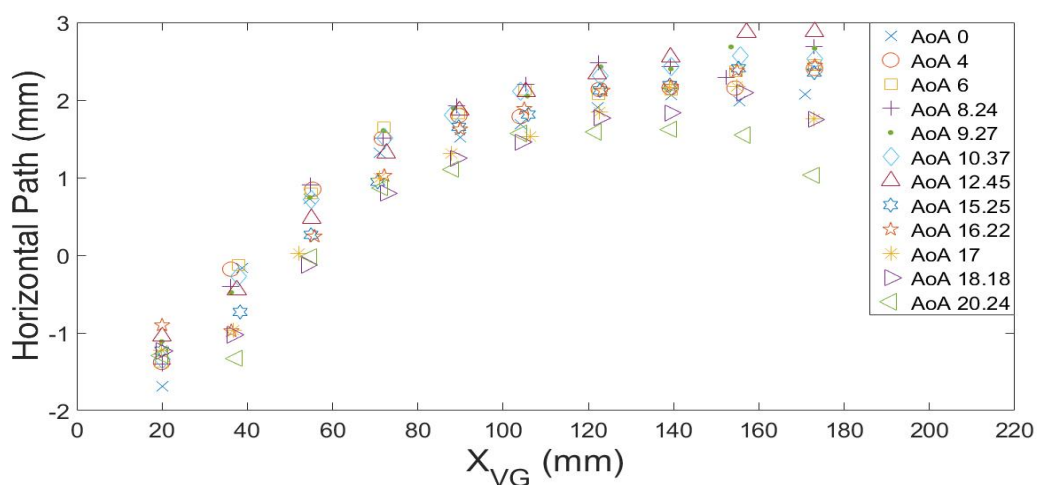
Zurrunbiloen forma zirkularra dela eta bere zentroa bortizitate balio altuena dagoeneko dela Zhen et al. [75] ikerketan ondorioztatzen da. Hortaz, balio goren horren bitartez eta kokapena ezagutuz eraso angelu guztientzat VGaren irteera ertzetik behera zurrunbiloaren ibilbidea ezagutu daiteke. VGak sorturiko zurrunbiloaren ibilbideak, zurrunbiloaren berebiziko garrantzia duen ezaugarritze bat eskaintzen du, izaeraren berri emanez VGaren diseinua egokitze aldera. Azterketa ezberdin asko egin dira bortizitate balio altuena topatzeko, zurrunbiloaren ezaugarritze asegarria Fernandez-Gamiz et al. [27] ikerketan aurkitu daiteke.

Plaka lauan kokaturiko VGen kasuan ordea, zurrunbiloaren ibilbide bertikalak ez du aldaketa handirik somatzen eta luzeetarako ebaketan horizontal agertzen da Ibarra-Udaeta et al. [35] ikerketan ondorioztatu bezala. Profil aerodinamikoetan, zurrunbiloaren joera hormarekiko paraleloki garatzea da. Zurrunbiloaren izaera hau Errasti et al. [23] ikerketan ere ondorioztatzen da non, plaka lau batean VG bat kokatuta eta aldapa batez jarraituz izanik, kasu honetan zurrunbiloak aldaparen gainazalera gerturatzeko joera hartuta. Lan honetan, helburu horretarako egindako simulazioek zurrunbiloaren portaera berdina iragarri dute VGaren osteko 20mmtan eraso angelu guztientzat. Aipatutako distantzia horretatik haratago, ibilbide bertikalak aldaketa txikiak erakusten ditu, eraso angelu handientzat zurrunbiloaren gainbehera arinago izanik, eraso angelu hauetarako zurrunbiloa laburragoa delako. Gelditze egoeratik gertu, mugako geruzan eraturiko zurrunbiloak profil aerodinamikoetik banatzeko joera hartzen du lorratz turbulentuei bidea emanik, hauek arraste eta altzatze koefizienteetan eragin handiagoa izanik indarretan

jasandako gorabeherak indartsuagoak izateagatik. VGaren instalazioari esker, mugako geruza eraso angelu handiagoentzat ere, hormari itsatsita geratzen da banaketa atzeratuz, ailegaten da hala ere, joera ezkorragoko unea eraso angelu handietan 20° kasuan, geratze puntu bat atzeman arte. Ibilbide bertikala 5.7 irudian errepresentatzen da, lerro beltzaren bitartez gainazala adieraziz.



Irudia 5.7: Bortizitate altuenaren ibilbide bertikalaren alderaketa eraso angelu ezberdinentzat.

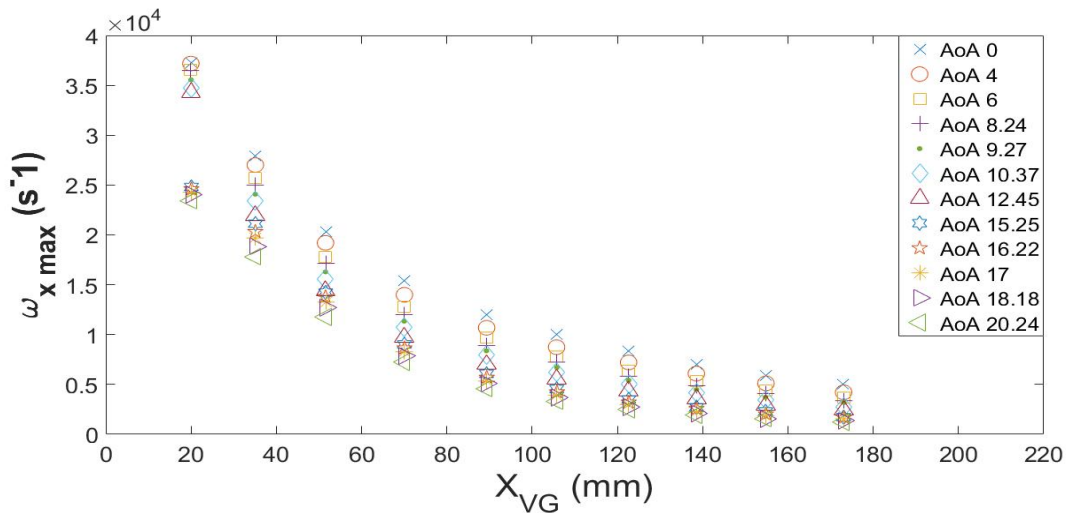


Irudia 5.8: Bortizitate altuenaren ibilbide horizontalaren alderaketa eraso angelu ezberdinentzat.

Ibarra- Udaeta et al.[35] ikerketan zurrunbiloaren alboko ibilbidea zurrunbilo sortzailearen noranzkoan desplazamendu bat ematen dela adierazten da. Aurreko irudian 5.8, alboko

desplazamendu hau atzeman daiteke, angelu egonkor zein *stall* angeluetan antzeko mugimendua ikusten da txikiagoa izatearen joera izanik angelua handitzean. Kasu guztietan mugimendu handiagoa ikusten da hasierako tartetean, geroz eta alboko mugimendu txikiagoaz VGtik 80mmtara. Are gehiago, eraso angelu handieneko kasuan, 160mmtatik haratago alboko mugimendu horrek hasierako posizioa berreskuratzeko joera du.

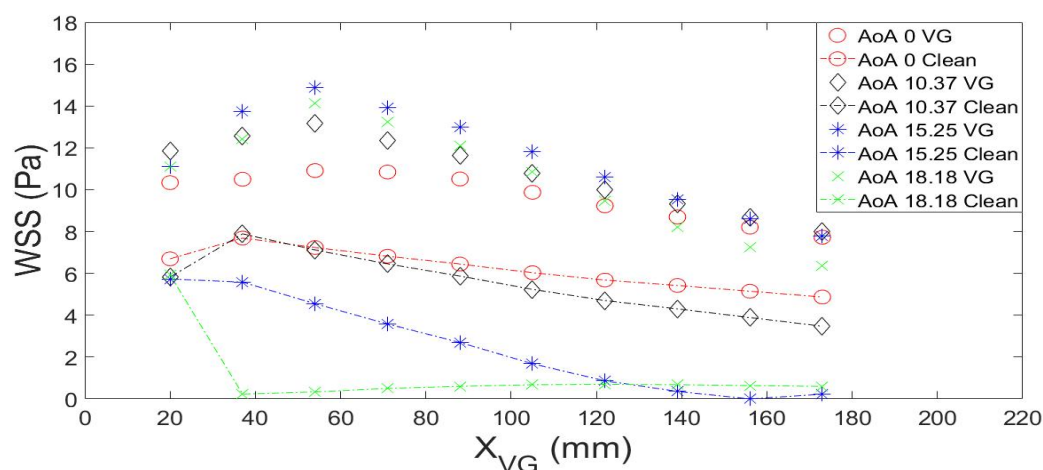
Zurrunbiloaren gainbehera intereseko parametroa da non zurrunbiloaren indar galera adieraziko duen. Martínez-Filgueira et al.[48] ikerketan bortizitate altuenaren balioaren gainbehera ikertu izan da, bertan, plaka lau batean kokaturiko VGak sorturiko zurrunbiloan balio goren horren beherakada esponentziala ikusi izan da, geroz eta urrunago orduan eta bortizitate altuenaren balioa txikiagoa. Ikerketa honen bortizitate balio altuenak 5.9 irudian agertzen dira eraso angelu guztientzat eta distantzia ezberdinentzat. Bertan, eraso angelu bakoitzarentzat balio ezberdinak daudela ikus daiteke, nabarmenagoa izanik angelu egonkor eta geratze egoeran daudenen artean batez ere, VGaren atzeko lorratz ondoko egoeretan. Bortizitate balio altuenak espero bezala angelu egonkorren kasuetan atzeman dira txikiagotuz eraso angelu handiagotzat. Hasierako 40mmtatik haratago bortizitate balioak erkatzeko joera hartzen dute azken VGarengandik 175mmtara arte mantenduz non $5000s^{-1}$ baino txikiagoa den eta beti, txikiagoa eraso angelu handiagotzat.



Irudia 5.9: Bortizitate altuenaren balioen alderaketa eraso angelu ezberdinentzat.

5.3.3 Hormaren ebakidura tentsioa

Hormaren ebakidura tentsioa VGaren ondoko distantzietara 5.10 irudian ikus daiteke. Neurriak hartzeko, gainazalaren luzeerarekiko paraleloa den eta VGaren irteera ertzetik abiatuta jarioan behera 175mmtararte kokatutako lerro batean egin da. Hartutako neurriek Godard eta Stanislasek [30] hartutakoekin koherenteak dira. Aipatutako ikerketa horretan bezala, VGaren instalazioak hormaren ebakidura tentsioaren balioan gorakada eman da garbi dagoen gainazalarekin alderatzen bada.



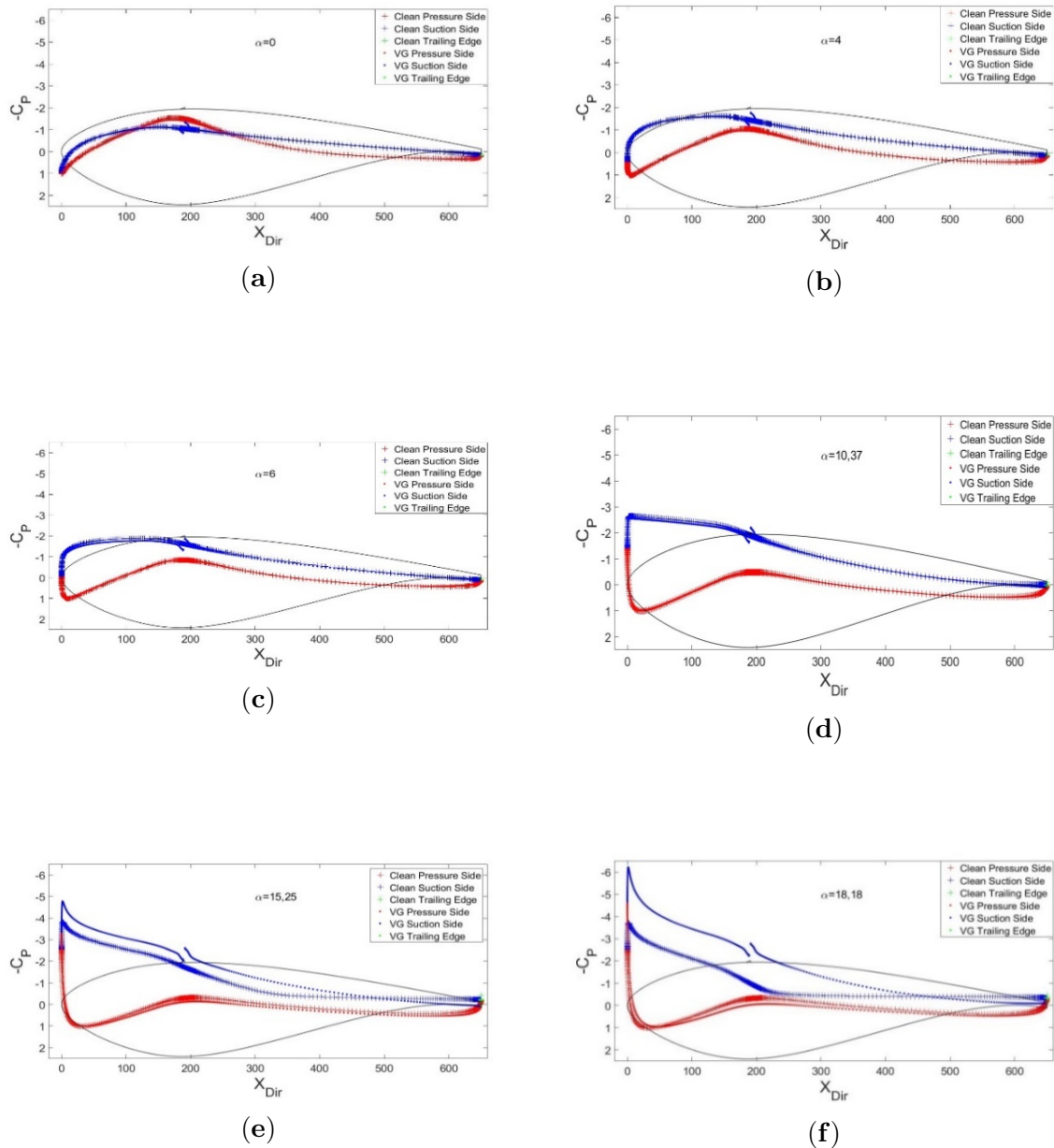
Irudia 5.10: Hormaren ebakidura tentsio balioak eraso angelu ezberdinentzat.

VGdun kasuetan, zurrumbilo sortzailearen irteera ertzetik behera 54mm-tara goranzko joera atzeman daiteke grafiko guztietan. Aipatutako puntutik aurrera, balioek behera egiten dute apurka azken 173mm-tan VGaren irteera ertzetik %42 eta %70eko tartean geratuz, eraso angelu handiagoetan balio altuena eta txikiaren artean ezberdintasuna txikiagoa da. Hormaren ebakidura tentsioaren balio altuena 15.25° eraso angeluarekin eman da non $14.86s^{-1}$ izan den. VGrik gabeko profil aerodinamikoan bi simulazio mota izan dira ebaluatuak, 12.25° eraso angelu baino txikiagoko egoera egonkorra eta altuagoak diren angeluentzat DESean oinarritutako simulazioak. Alde batetik, egoera egonkorreko profil garbiaren kasuan balio altuena zurrumbilo sortzailearen inguruan aurkitzen da, 37mm-tara. Puntu horretatik aurrera hormaren ebakidura tentsioaren balioek behera egiten dute.

Horrela, VGrik gabeko kasu guztietan balioen garapen antzekoa ikusten betiere, balio altuagoak izanik eraso angelu txikiagoentzat. Bestalde, geratze egoeran dauden kasuetan VGaren irteera ertzetik 20mmtara erakusten dute baliorik altuena, hortik aurrera eta espero bezala balioek beheranzko joera dute zerotik gertu geratu arte, minimoa den balio horretara behin ailegaturik goranzko joera arina jasaten du joerak bertan egonkortuz. Eraso angelu handiagoentzat, hormaren ebakidura tentsioak zero balioa VGarengandik gertuago hartzen du.

5.3.4 Presio koefizientearen distribuzioa

Hurrengo irudian 5.11 VGrik gabeko eta VGdun DU97W300 profil aerodinamikoaren presio distribuzioa ikus daiteke VGa duen kasuan, zurrunbilo sortzailea 0° , 4° , 6° , 10.27° , 15.25° , eta 18.18° AoAetan kokaturik. Profil aerodinamikoa eta VGa lerro beltzen bitartez izan dira errepresentatuak. Presio esparruaren eta xurgapen esparruaren arteko ezberdintasunek altzatze eragiteko gaitasuna erakusten dute. Eraso angelu txikietan ez da ezberdintasun handirik igartzen C_p distribuzioan VGa duen kasua garbi dagoen kasuarekin alderatuz gero, horrek, jarioaren kontrolak izandako eragin txikia erakusten du. Hala ere, eraso angeluak handiagoak diren heinean presio koefizientearen aldaketa nabarmenagoak ematen dira garbi eta VGa duten profil aerodinamikoaren artean. 12° eraso angelutik aurrera kontrolagailuaren eragina argiagoa izaten hasten da, kasu gehiagorekin alderatzeko aukera ematen da Nikolauk et al.[53] egindako ikerketan. Nabarmena da xurgatze eremuan balioetan ematen den ebakidura, zurrunbilo sortzailearengatik ematen da.



Irudia 5.11: $Re = 2 \times 10^6$ zenbakian DU97W300aren presio koefizienteen alderaketa hur-
 rengo eraso angeluetan: (a) 0° ; (b) 4° ; (c) 6° ; (d) 10.37° ; (e) 15.25° , eta (f) 18.18° .

5.3.5 Zurrunbiloaren behaketa

Simulatutako sei angeluen arteko konparaketa koalatibo bat egite aldera, D. eranskineko irudiak abiadura axialaren eremua errepresentatzen du $AoA = 0^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 10.37^\circ, 15.25^\circ$, eta 18.18° kasuetarako. Jarioaren abiadura askearekiko elkartzutak diren planoak VGaren

irteera ertzetik VGaren altueraren hala bosteko distantziara kokatu dira, posizio horretan Urkiola et al. [65] ikerketa oinarrian harturik, zurrunbiloa guztiz ebatzita dagoelako eta horrela, eraso angelu bakoitzaren zurrunbiloaren forma ikus daiteke. Koalitatiboki aipatu daiteke eraso angelua handiagoa denean orduan eta zurrunbilo handiagoa ematen dela. Horrek esan nahi du VGaren eragina txikiagoa dela angelu txikiagoentzat eta emaitza honek bat egiten du koantitatiboki presio distribuzioen 5.10 eta 5.11 irudian ondorioztatutakoarekin.

5.4 Ondorioak

Delta itxurako zurrunbilo sortzaile batek jarioan behera zurrunbiloa sortzerakoan ematen den eraginkortasun aerodinamikoak ikertu izan dugun lan honetan ondorengo ondorioak jaso izan ditugu. Zurrunbilo sortzailearen forma semi delta itxurako eta $\beta = 18^\circ$ eraso angeluan kokaturikoa da, 5mm altuera, 17mm luze eta jBAY iturburu ereduaren bitartez ereduizatua. Bi zurrunbilo sortzaileen arteko distantzia 10mmkoa izan da hauen irteera ertzetik neurtuta eta 20mmkoa sarrera ertzetik neurtuta. VGaren kokapena DU97W300 profil aerodinamiko baten $x_c=0.30$ proportzioan eta kordaren 0.65mtan ezarri da. $Re = 2 \times 10^6$ Reynolds zenbakidun eta $U = 46.52$ m/s jarioaren abiadura askea duten DES metodoa erabilitako simulazioak egin dira eraginkortasun hori aurreikusteko. Altxatze koefizientean hobekuntza bat igarri da VGaren instalazioa eginda DU97W300 profilean arraste hondarrean hori bai, igoera txiki bat jasanez xurgatze eremuan emandako ebakidura indarrak direla eta. jBAY ereduari esker VG mota ezberdinen konfigurazio eta aplikazioen ikerketa parametrikokoak garatu daitezkeela ondorioztatzen da Chillonek et al. [19] iragarri bezala, emaitza hobezinak eskuratzeko asmoz. Bestalde, zurrunbiloaren ibilbide bertikala hormaren eragina dela eta baldintzatuta geratzen da. Eraso angelu (AoA) gehientzat zurrunbiloa profilaren gainazalaren xurgatze eremuan itsatsita geratzeko jorera hartzen du altxatze koefizientean hobekuntza bat emanez graduazio horietan, horrela

eraginkortasun aerodinamikoan hobekuntza bat ahalbideratuz. Bortizitatean oinarrituriko zurrunbiloaren gainbeherari dagokionez jokabide antzekoa atzeman da kasu guztietan baina balio altuagoekin eraso angelu handiagoen kasuetan. Adierazgarria den beste gertakari bat hasierako bortizitate balio altuenen ezberdintasuna da, nabarmena izatera heltzen dena $AoA = 12.45^\circ$ eta $AoA = 15.25^\circ$ kasuetan, tarte horretan non garbi dagoen profil aerodinamikoak *stall* egoera izaten hasten den. Gainera, alde batetik hormaren ebakidura tentsioan VGak duen eragina argia da, tentsio honen balioak handituz eta profil aerodinamiko garbiak *stall* egoeran egongo zen uneetan arraste indarrean orohar handitze bat suposatuz, VGak eragindako zirkulazioa dela eta. Bestalde, eraso angelua 12° kasuarengandik handiagoetan DU97W300 profilaren presio koefizientean goranzko jorera eragina erakusten da. Eraso angelu txikiagoetan ordea ez da C_p distribuzioan ezberdintasun handirik igartzen garbi dagoen eta VG kontrolatzailea instalaturik dagoeneko kasuen artean. Azkenik, zurrunbiloaren tamainari dagokionean instalaturiko VGaren eraso angeluaren arabera eragin bat atzematen da non, angelu handiagoentzat zurrunbiloa handiago dela ikusten den.

6. Atala

Ondorioak

Hurrengo lerroetan egindako ikerketaren ondorioak bilduko dira. Urrats ezberdinetan zehar eta teknika ezberdinen erabileraren bitartez, lanaren helburu nagusia aurrera atera da, hau da, zurrumbilo sortzaile batek jarioan behera sortu egiten duen zurrumbilo nagusiaren atzematea eta karakterizazioa. Guztiz eraturiko saretaren kasuan, zelda sorta ereduaren bitartez eta baita jBAY eredu zuzenari esker, zurrumbiloaren karakterizazio koantitatiboa eta koalitiboa egitea posible izan da, jasotako emaitzetan jarraipen eta koherentzia emanez.

Hasiera batean OpenFOAM software askekoa den liburutegiarekin, lau eraso angelu ezberdinentzat, $\beta = 10^\circ, 15^\circ, 18^\circ,$ eta 20° , baita sei VG altuerentzat, $0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H, H,$ eta $1.2H$. Ondoren $\beta = 18^\circ$ eta 25° eraso angeluetarako bai zelda sortaren ereduaren bitartez zein guztiz eraturiko saretaren bitartez RANS eta LES simulazioak egin dira, hauek errepresentatu egin dituzten zurrumbilo sortzailearen zurrumbiloak nabarmenki ezaugarrituz. Azkenik jBAY ereduaren bitartez RANSean oinarritutako simulazioak eta *stall* zonaldeetik gertuko eraso angeluetan DES simulazioak egin dira profil aerodinamiko batean kokatutako $\beta = 18^\circ$ posizioan dagoen VGak eraturiko zurrumbiloa karakterizatzeko. Profil aerodinamikoa angelu ezberdinetara kokatu da, 0° eta 20° angeluen artean hain zuzen ere.

Kontrolatzailearen kariaz eraturiko zurrumbiloaren tamaina, zentzu koantitatiboan, erdi bizitzaren radioa izan da neurketa egiteko erabili den aldagaia, $R_{0.5}$. Emaitzek argi eta garbi utzi egin dute VGaren altuerarekiko eta eraso angeluarekiko menpekotasuna. Zelda sortaren ereduaren radioaren erdi bizitza gainazala kalkulatu bada ere radiotik eratorria den neurria dugu hau eta kasu bietan, radioaren zein gainazalaren balioak kontuan harturik aipatutako menpekotasuna nabarmena da. Gogorarazi behar da, gainazalaren erabilera egiten dela bortizitatearen distribuzioa simetrikoa ez deneko kasuetan.

Aipatutako angeluarekiko menpekotasuna ageriagoa da altuera handiagoko VGen kasuetan eta ez horrenbeste VG tamaina txikientzat, beraz, tamainaren handitzea bai eraso angelua eta altuera aldagai gisa ezarriko bagenizkio, handitzea ez lineala izatera igaroko litzateke. Aurreikus izan den bezala zurrumbiloaren ibilbide horizontala zein bertikala

VGaren altueraren eta eraso angeluaren β menpekotasuna ere agerikoa da, VGaren eraso angeluen handitzearen are eta handiagoa izanik desplazamendua. Zurrunbiloak, kasu ororentzat hasierako igoera txiki baten ostean beherako joera hartu egiten du egonkortu arte, jBAY ereduaren kasuan ordea non VGa profil aerodinamiko baten gainean kokaturik dagoen, ez da egonkortzerik ematen gainazala laua ez den heinean, honekiko atxikimendua hartu egiten baitu profilaren gainazal bihurtua jarraituz eta bertikalki jaitsiz. Zurrunbiloaren zentroaren ibilbide horizontala ere eraso angeluaren eta VGaren tamainaren araberakoa dela kasu orotan, VGaren irteera ertzak agintzen duen noranzkoan.

Ebakidura tentsioaren ebaluazioa lehen atalean egin ostean non zirkulazio positiboarekiko bateragarritasuna erakutsi den zelda sortarekin alderatzea egitea komeni da. Hormaren ebakidura tentsioaren baitan VGak zurrunbiloa sortu eta berehala ebakidura tentsioaren balioen igoera nabarmena eragiten du hortik aurrera jaitsiera eraginez non RANS kasuei dagokienean egonkortze nabarmenago baterako joera ematen den. Era berean, guztiz eraturiko saretaren kasuetan eta baita RANS ereduetan, balioen aurreikuspena handiagoa da LES eta baita zelda sortaren ereduarentzat, joerari dagokienean ordea antzekotasun handikoa izanik. RANS kasuei dagokienean argi eta garbi balio altuagoak eman dira angelu altuagoentzat, LES simulazioek ordea joera hori puskatzen dute ez baitute horren aurreikuspen alturik ematen. Profil aerodinamikoan kokaturiko VGaren kasuan ebakidura tentsioak oso balio ezberdinak eskaintzen ditu VGa bertan dagoeneko kasuetan ez dagoenekoekin alderaturik, aurrekoetan tentsio handiagoa eskainiz. VGdun kasuetan hala ere, ez da angeluaren lehentasunik ikusten eta balio altuena eraso angelua $\beta = 15.25^\circ$ denean ematen da, gogoratu honetan profilaren eraso angeluaz dihardugula.

Zirkulazio positiboaren alderatzean angeluaren nagusitasuna aipatzea ezinbestekoa da, angelu beraren balioan ezberdintasunak ez baitira benetan adierazgarriak nahiz eta $0.4H$ eta $0.8H$ balioetan bateragarriak diren oso, ebakidura tentsioaren balioekin. Aldaketa handiagoa aipatu behar da angeluari dagokienean non bai zelda sortaren ereduaren zein saretarenean angelu handiagoentzat balioak handiagoak baitira.

Simulazioak egiterako orduan guztiz eraturiko saretaren kasuaren aurrean abantaila konputazional argia erakutsi izan dituzte zelda sortaren ereduak eta jBAY ereduak ere. 11.5 milioi zeldatik 7.2 milioietara igaro egin da bai RANS zein LES erduentzat denbora konputazionalan %40ko aurrezkoa suposatuz. Deigarriagoa egiten da zelda kopuruaren auzia, profil aerodinamiko bat simulatu egin baita DES simulazio bitartez eta horretarako, O itxurako domeinu konputazionala simulatu da profil aerodinamiko barne daukana eta guztira 6.64 milioi zelda dituen. LES eredu aplikatzeko erraztasun handiagoa ematen du zelda sorta ereduak bere doitasuna baliatzeko ezinbestekoa baita zelda kopurua ahal den balio txikienetan mantentzea beti ere, fintasuna galdu gabe. Hala ere, LES ereduak zelda sortaren ereduztatzearen kasuan zurrunbilo nagusiaren bortizitatea gainetik aurreikusten du VGaren urrutiko esparruetan, horrek dituen ondorioekin. Honek eragin negatiboa zurrunbiloaren tamainan soilik atzeman daiteke, gainontzekoan arazorik gabe onargarriak diren emaitzak eskaintzen ditu.

CFD tekniken erabilgarritasuna ondo erakutsi izan da jBAY iturburu ereduaren bitartez ereduztatuako kasuan. VGaren kokapena DU97W300 profil aerodinamiko baten $x_c=0.30$ proportzioan eta kordaren 0.65mtan ezarri da eta jario kontrolatzailearen eraginkortasuna DES simulazioekin egin da. Profil aerodinamikoetan berebiziko garrantzia duen altzatze koefizientean hobekuntza bat igarri da VGaren instalazioa eginda DU97W300 profilean. jBAY ereduari esker erraztasun erlatiboki handiaz VG mota ezberdinak diseinatzeko aukera zabaltzen da baita, etorkizunari begira profilaz gain, egitura handia-goetan VG errenkadek jarioaren kontrolean duten eragina aurreikusteko balizko gaitasuna erakutsi da. Forma, kokapena zein kopurua aldatuz ikerketa parametrikoko ezberdinak egiteko aukera zabalik mantentzen da. Era berean, VGaren instalazioak profil aerodinamikoan eraginkortasunaren hobetze bat dakarrela ikus daiteke, *stall* egoerarengandik gertuko esparruetan DU97W300 profilaren presio koefizientearen handitzea jazo egiten da, batez ere 12° angeluetatik aurrera. Altzatze koefizientean igoerak batez ere eta arraste koefizientearen balioen txikiagotzeak baita, VGen eragina guztiz argi uzten ditu, aurretik

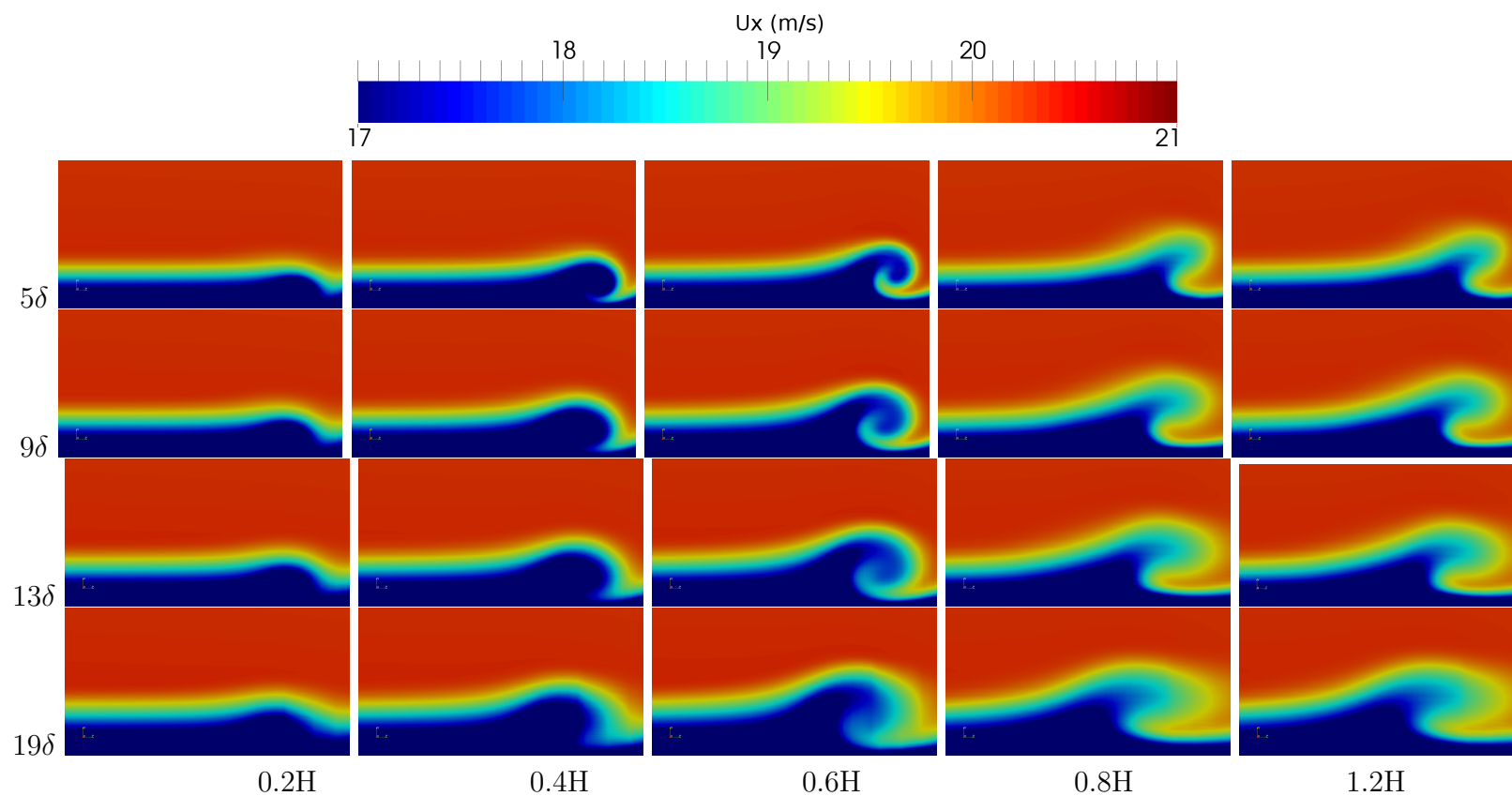
aipatu izan den bezala.

Profil aerodinamikoetan orohar eta haize errotetan bereziki, aurkeztutako metodo anitz hauek dira CFD tekniken bitartez eraginkortasuna hobetuko duten ikerketak abiatzeko ohikoen erabiliak izango direnak. Aurkeztutako emaitzak eredu eta argibide gisa erabili daitezke VGen erabilera eraginkorra sustatzeko, horretarako tresna baliagarri gisa sare neuronalak emandako emaitzetan ere aurki daiteke, eredu analitikoek ere erraztasun handiagoa eskaini baitezakete aurreikuspenak egiteko eta lokalki bada ere VGen aplikazioak dakarren jarioaren kontrola egitea erraztuz. Arazoan eragiten duten parametro anitzak direla eta, jarioaren portaeraren ezagutza garrantzitsua da oso, VGen aplikazioetarako.

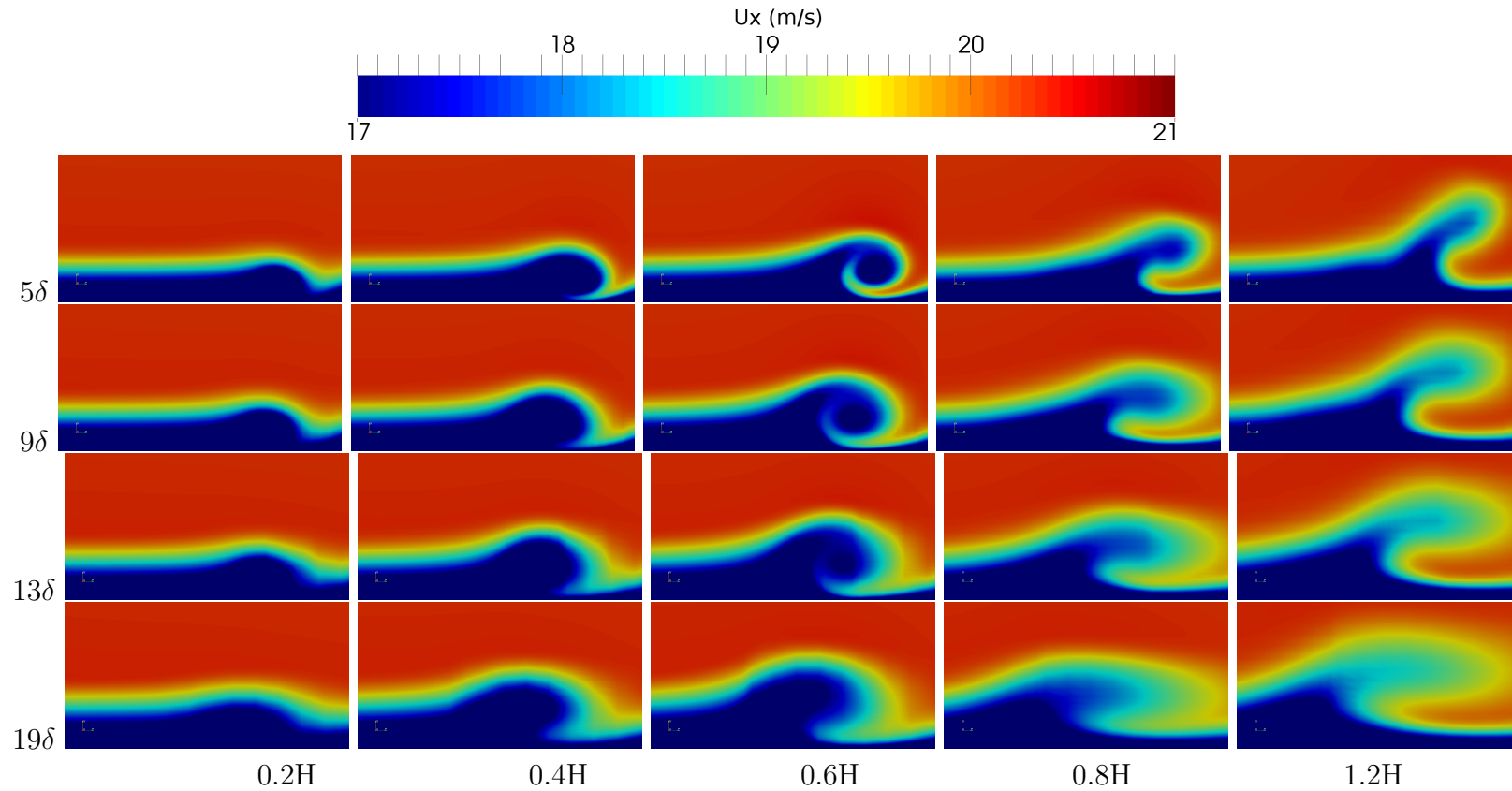
Eranskinak

A. Eranskina

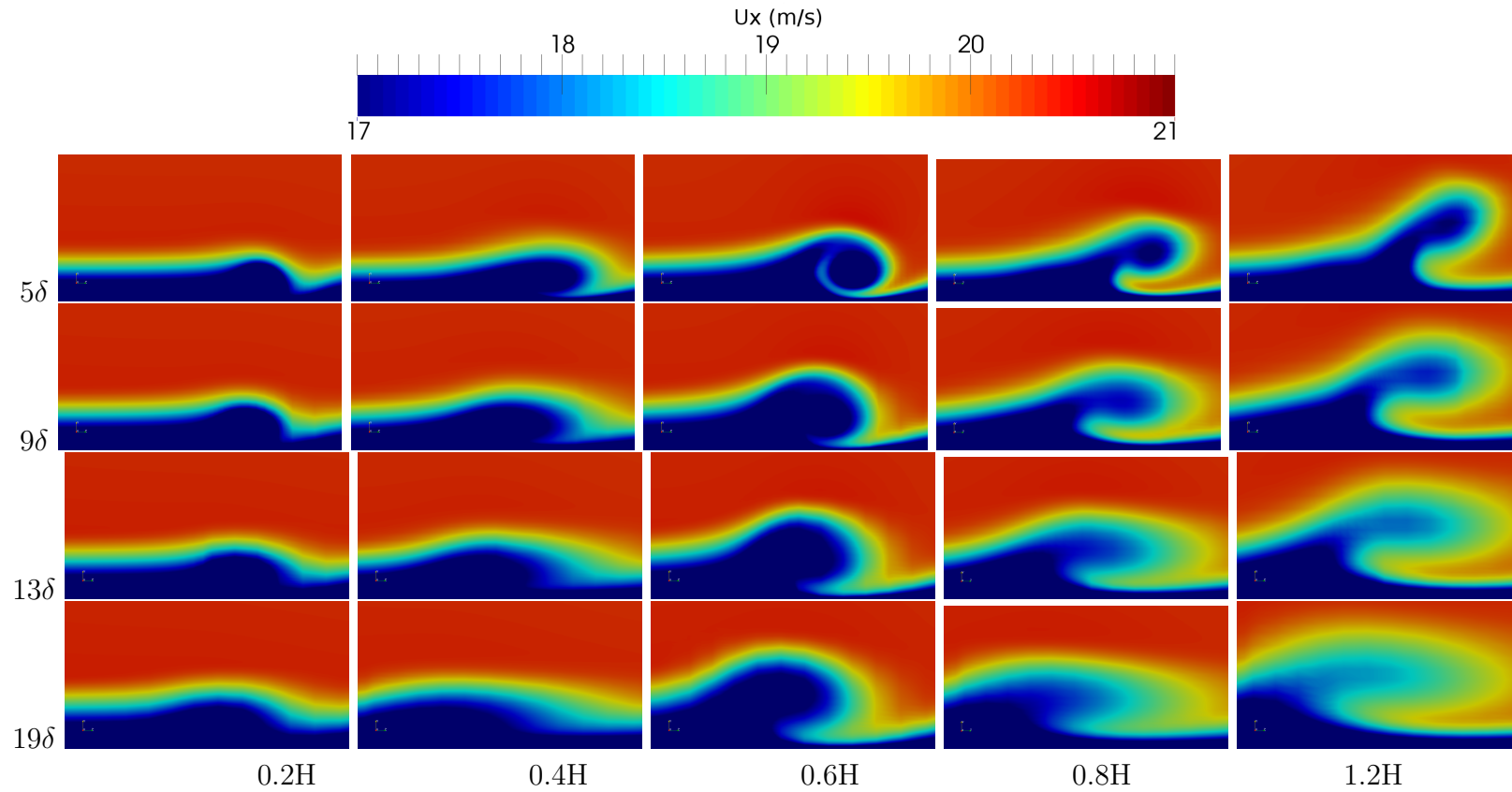
A.1 Eranskina Abiadura distribuzioa



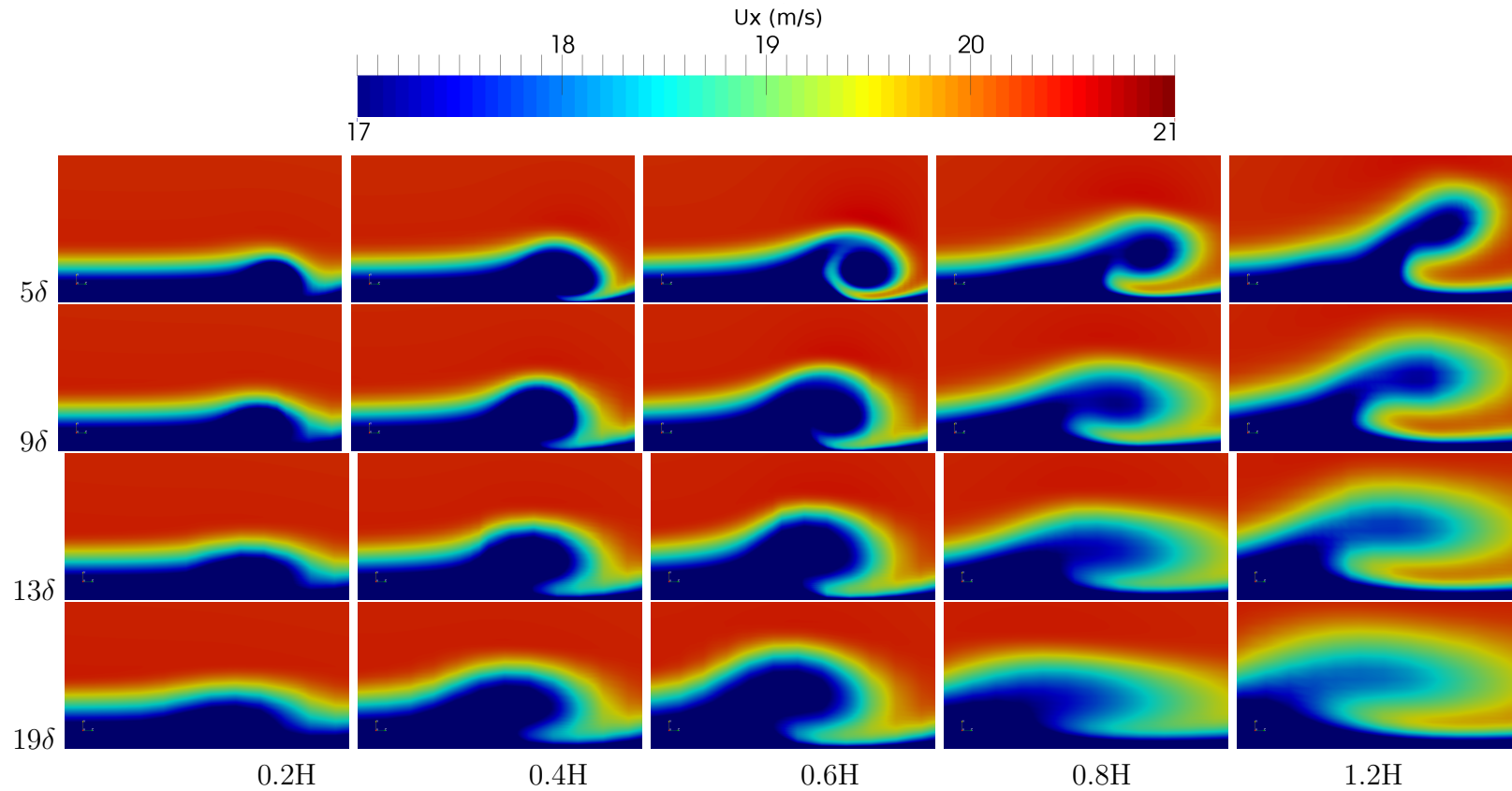
Irudia A.1: Abiadura axialaren distribuzioa $U_x \text{ ms}^{-1}$ VGare irteera ertzetik mugako geruzaren lodierarekiko δ distantzia proportzionalan kokaturiko plano elkarzutean, sei VG altuerentzat $0.2H$, $0.4H$, $0.6H$, $0.8H$, H eta $1.2H$. Eraso angelua 10° .



Irudia A.2: Abiadura axialaren distribuzioa $U_x \text{ ms}^{-1}$ VGare irteera ertzetik mugako geruzaren lodierarekiko δ distantzia proportzionalean kokaturiko plano elkarzutean, sei VG altuerentzat $0.2H$, $0.4H$, $0.6H$, $0.8H$, H eta $1.2H$. Eraso angelua 15° .



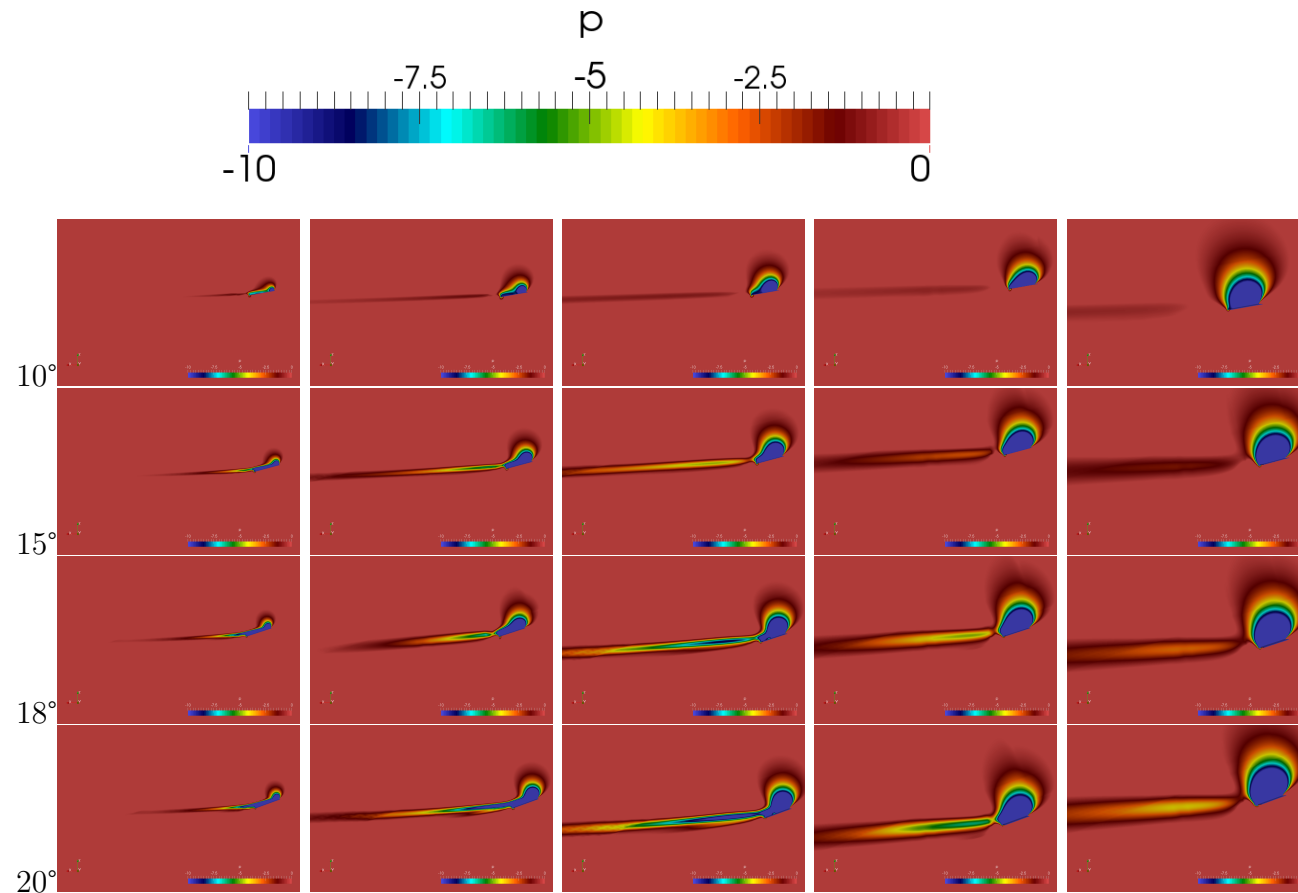
Irudia A.3: Abiadura axialaren distribuzioa $U_x \text{ ms}^{-1}$ VGare irteera ertzetik mugako geruzaren lodierarekiko δ distantzia proportzionalean kokaturiko plano elkarzutean, sei VG altuerentzat $0.2H$, $0.4H$, $0.6H$, $0.8H$, H eta $1.2H$. Eraso angelua 18° .



Irudia A.4: Abiadura axialaren distribuzioa $U_x \text{ ms}^{-1}$ VGare irteera ertzetik mugako geruzaren lodierarekiko δ distantzia proportzionalean kokaturiko plano elkarzutean, sei VG altuerentzat $0.2H$, $0.4H$, $0.6H$, $0.8H$, H eta $1.2H$. Eraso angelua 20° .

B. Eranskina

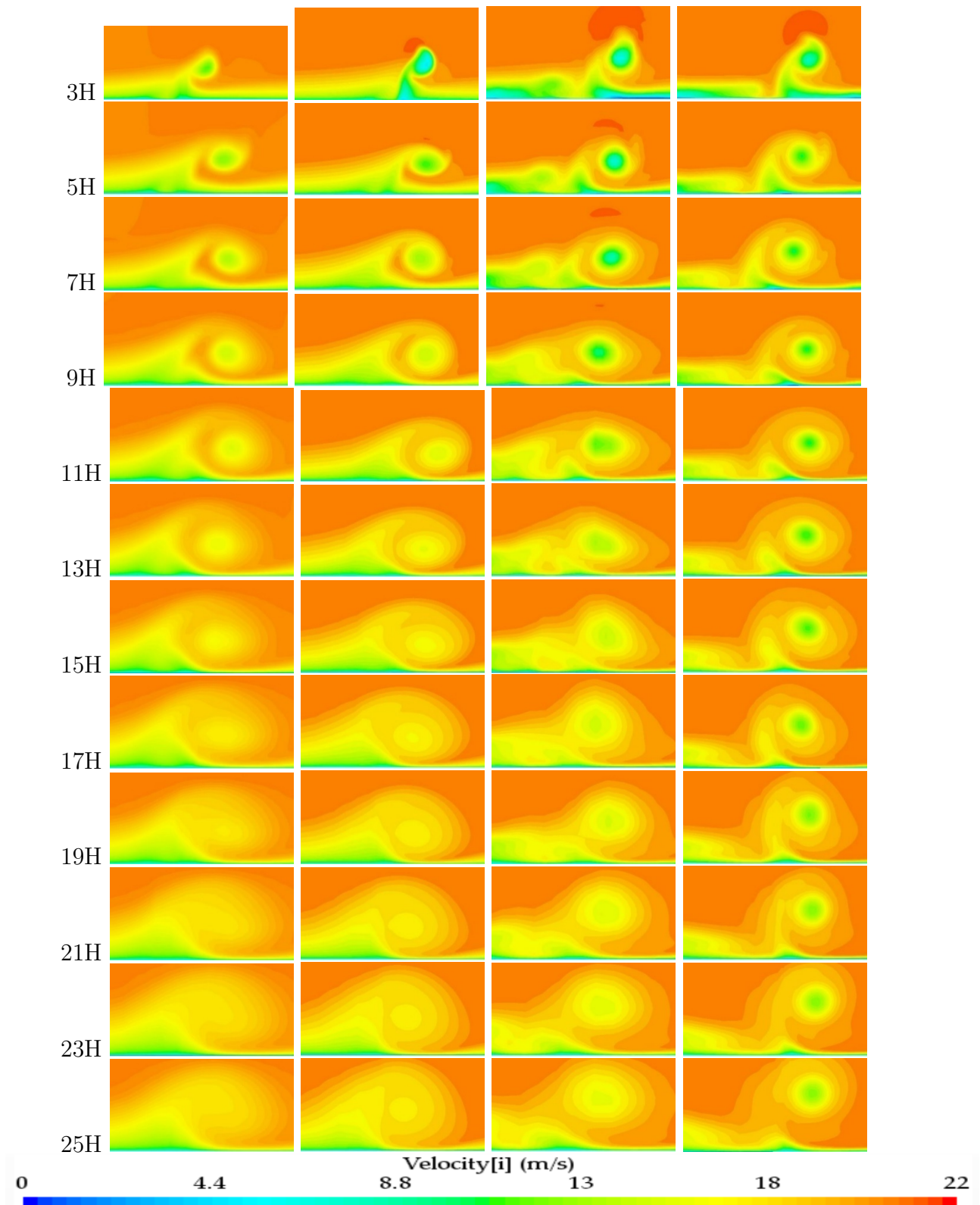
B.1 Eranskina Presio eremua



Irudia B.1: VGaren inguruko presio eremua VG altuera eta eraso angelu ezberdinentzat, ikuspegia XZ planoarekiko elkartuta. Presioa airearen dentsitatearekin normalizatua dago m^2/s^2 .

C. Eranskina

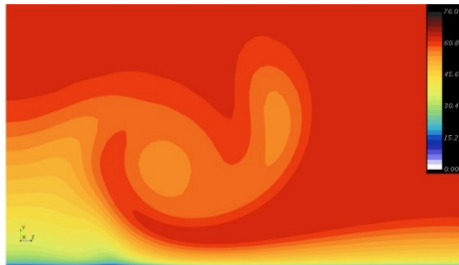
C.1 Eranskina Abiadura axialaren alderaketa eredu



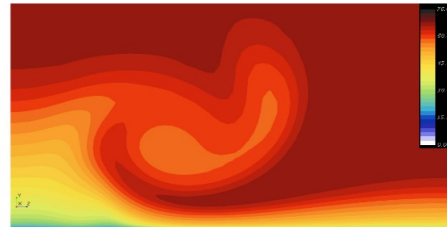
Irudia C.1: Abiadura axiala 12 plano elkartutetan. Zutabeka: 1.a Guztiz ebatzitako sareta RANSean, $\alpha = 18^\circ$; 2.a Zeldi sorta RANSean, $\alpha = 18^\circ$; 3.a Guztiz ebatzitako sareta LESean, $\alpha = 25^\circ$; 4.a Zeldi sorta LESean, $\alpha = 25^\circ$

D. Eranskina

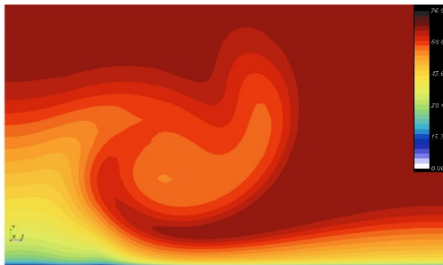
D.1 Eranskina Abiadura axialaren distribuzioa



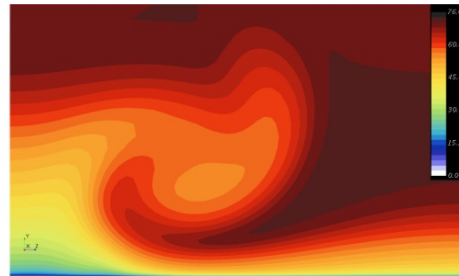
(a)



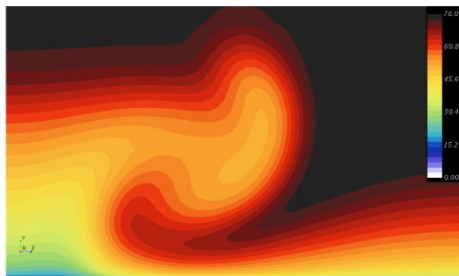
(b)



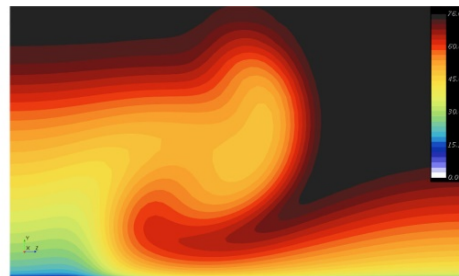
(c)



(d)



(e)



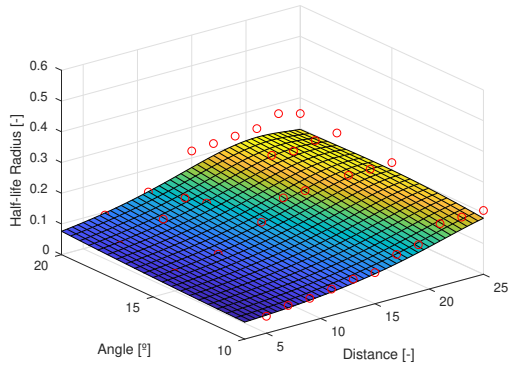
(f)



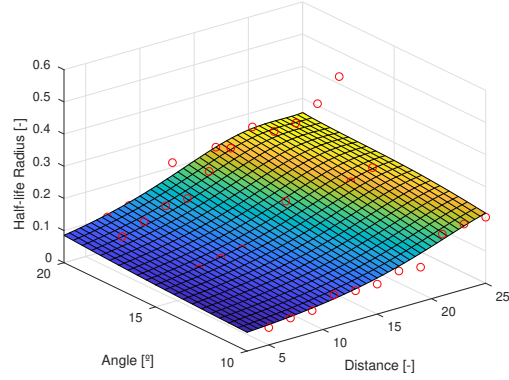
Irudia D.1: Abiadura axialaren eremuak eraso angelu ezberdinentzat: (a) 0° , (b) 4° , (c) 6° , (d) 10.37° , (e) 15.25° eta (f) 18.18° neurturik, VGarengandik jarioan behera ohiko VGaren bost adina altuerako distantzian kokatutako plano elkartuztean.

E. Eranskina

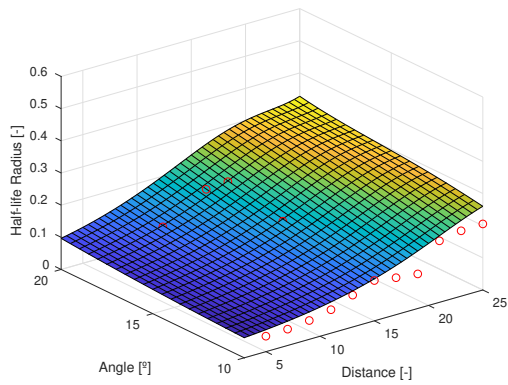
E.1 Eranskina R_{05} geruzak



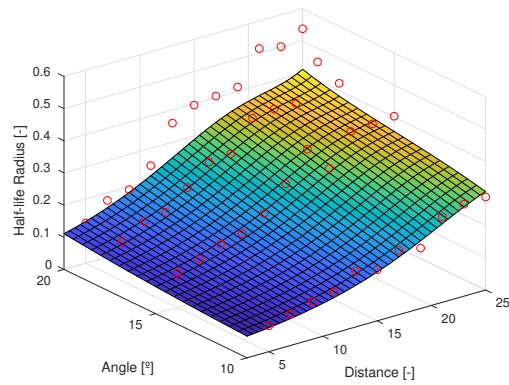
(a)



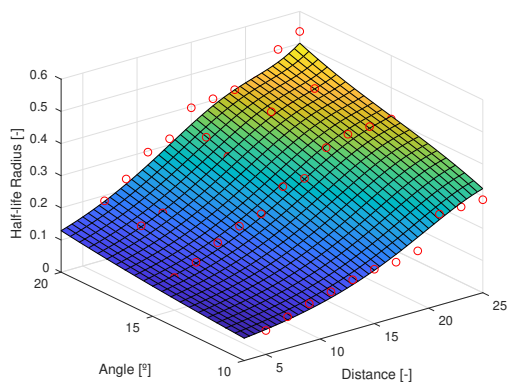
(b)



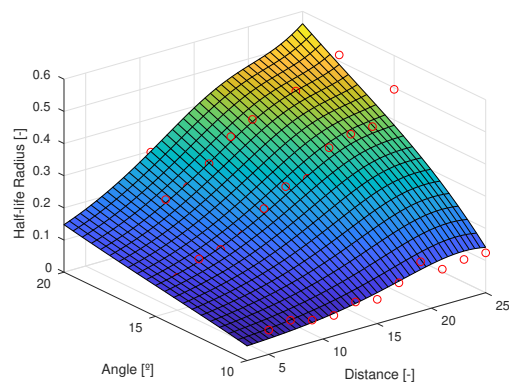
(c)



(d)



(e)



(f)

Irudia E.1: Zurrunbilo sortzaile altuera ezberdinentzat sare neuronal artifizialen bidez lorturiko geruzak R_{05} , eraso angelu (AoA) eta irteera ertzetikiko distantziaren arabera. (a) 0.2H, (b) 0.4H, (c) 0.6H, (d) 0.8H, (e) H, (f) 1.2H.

F. Eranskina

F.1 Eranskina Turbulentzia eredua

Lan honen hasieran aipatu bezala Ebakidura Tentsio Garraiatzearen turbulentzia eredua erabili izan da, ingelesez Shear Stress Transport (SST), zehazki ω ekuazioarekin doan eredua. Erabaki hau, mugako geruzetan lan egiterakoan ekuazio honen fidagarritasuna eta doitasuna handiagoa delako hartu da. Aukeraketak bazterrean utzi egin du ϵ eredua bere mugen artean oso erantzun eskasa ematen duelako kontrako presio gradienteen egoeretan eta hori dela eta, jarioaren banaketa prozesua gutxietsi edo arbuiatu egiten du aurreikuspen apalegiak eginez. Honek berebiziko garrantzia du simulatu nahi diren fenomenoetan, karga galerak egon daitezkeen egoera batean hauek aurreikuspena ez egiteak eta jariakina gainazalean itsatsita dagoela suposatzeak diseinuan fidagarria ez den emaitza eskuratzearen arriskua dago.

F.1.1 $k - \omega$ eredua

$k - \omega$ ereduak zurrumbilo biskositatea ν_T harremanetan jartzen du energia zinetiko turbulentuarekin k non disipazio harremana ω den:

$$\mu_T = \rho \frac{k}{\omega} \quad (\text{F.1})$$

Energia zinetiko turbulentua k eta ω disipazio turbulentuaren harremana hurrengo garraio ekuazioek definitzen dute.

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta' \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (\text{F.2})$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (\text{F.3})$$

$k-\omega$ ereduak asetasun handiagoa erakutsi du gainazaletatik gertu ematen diren fenomenoak ebaluatzerakoan, sarrera balioekin alderaturiko aldaketa txikietan ere $k-\omega$ ereduak sentibiltate handia erakutsi izan du ω balioetarako mugako geruzaren hegietan, [51].

G. Eranskina

G.1 Eranskina BAY eredia

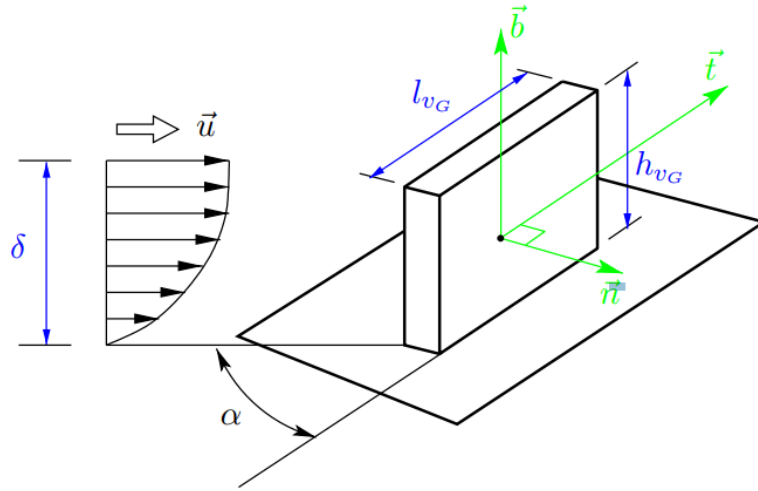
BAY iturburu eredia Bender et al. [12] ikerlariak garatu egin zuten xafra itxurako zurrunbilo sortzaileak Navier-Stokes bolumen finitoko kodeetan simulatzeko asmoz. Eredua EllipSys CFD kodean txertatu egin zen iturburu eredu gisa, momentu eta energia ekuazioen barruan. Eredu honek gainazalarekiko paraleloa den eta uneko jarioaren noranzkoarekiko elkartzuta den indarra txertatzen du, ikusi 5.3 irudia. Indar honek zurrunbilo sortzaile batek eragiten duen alboko indarra simulatzen du. Ereduak iturburu terminoak gehitu eta VGak kokatua beharko lukeen lekuko zeldetan VGaren geometria errepresentatuta ez badago ere. Benderrek et al. [12] eredu hau garatu zuen Jukowskiren altzatzete teoreman oinarrituta alde batetik eta profil aerodinamiko mehearen bestetik, biekin VGaren eraginak ereduizatuz. Zurrunbilo sortzaile laukizuzen bat kontuan hartuz altzatzete indarrak ondorengo ekuazioen arabera kalkulatu daitezke:

$\vec{L} \equiv \text{VGan Altzate indarra}$

$$\vec{L} = \rho(\vec{u} \times \vec{b}) \Gamma h_{VG} \quad (\text{G.1})$$

Non \vec{b} , \vec{n} , \vec{t} aldagaiek Unitate bektoreak errepresentatuko duten, ρ k dentsitatea, Γ ikurrak zirkulazioa, \vec{u} tokiko abiadura bektorea izanik eta $\vec{b} = \vec{n} \times \vec{t}$

Indarraren norabide eta noranzkoa uneko tokiko abiaduraren eta unitate bektorearen arabera neurtuko dira VGaren baitan. VGaren bektore elkartzut eta tangentialak \vec{n} eta \vec{t} bektoreek errepresentatu dituzte.



Irudia G.1: VG laukizuzen baten indarren 3Dtako ikuspegia

Tokiko eraso angelua honela kalkulatu daiteke:

$$\sin\alpha = \frac{\vec{u} \cdot \vec{n}}{\|\vec{u}\|} \Rightarrow \text{baldin } \alpha \ll 1 \Rightarrow \alpha \cong \frac{\vec{u} \cdot \vec{n}}{\|\vec{u}\|} \quad (\text{G.2})$$

Joukowskiren 2Detako profilaren teoria kontuan harturik $\Rightarrow \Gamma = \alpha \|\vec{u}\| l_{VG}$

$$\vec{L} = \pi\rho(\vec{u} \times \vec{b})(\vec{u} \cdot \vec{n}) S_{VG} \quad S_{VG} \equiv \text{Gainazal lau paraleloa } (l_{VG} \times h_{VG})$$

$$\vec{L}_{cell} = \pi\rho(\vec{u} \times \vec{b})(\vec{u} \cdot \vec{n}) S_{VG} \frac{V_{cell}}{V_S} \quad V_S \equiv \text{Bolumen totala}$$

Bender et al. [12] kontuan harturik hurrengo terminoa txertatuko litzateke $\frac{\vec{u} \cdot \vec{t}}{\|\vec{u}\|}$:

$$\vec{L}_{cell} = C_{VG}\rho(\vec{u} \times \vec{b})(\vec{u} \cdot \vec{n}) \frac{(\vec{u} \cdot \vec{t})}{\|\vec{u}\|} S_{VG} \frac{V_{cell}}{V_S} \quad (\text{G.3})$$

BAY ereduaren ezartzean beharrezkoa den kalibrazioa guztiz ebazitako saretaren ereduaren aurrean. Azken ekuazioak G3, c gisa eredu aurrera ateratzeko erlaxazio parametroa errepresentatzen du. Parametro hau, indar barriaduraren kasuan, guztiz ebazitako saretaren emaitzekin bat egiteko erabiltzen da.

Bibliografia

- [1] ALLAN, B., CHUNG-SHENG, Y., AND LIN, J. Numerical simulations of vortex generator vanes and jets on a flat plate. *1st Flow Control Conference, AIAA* (June 2002), 24–27. St. Louis, Missouri.
- [2] ALMOHAMMADI, K., INGHAM, D., MA, L., AND POURKASHAN, M. Computational fluid dynamics (cfd) mesh independency techniques for a straight blade vertical axis wind turbine. *Energy 58* (2013), 483–493.
- [3] ANDERSON, AND D, J. Fundamentals of aerodynamics. *Mcgraw Hill Series in Aeronautical and Aerospace Engineering* (1991).
- [4] ARAMENDIA, I., FERNANDEZ-GAMIZ, U., RAMOS-HERNANZ, J. A., SANCHO, J., LOPEZ-GUEDE, J. M., AND ZULUETA, E. Flow control devices for wind turbines. *Springer International Publishing* (2017), 629–655 .
- [5] ARAMENDIA-IRADI, I., FERNANDEZ-GAMIZ, U., SANCHO-SAIZ, J., AND AL., E. State of the art of active and passive flow control devices for wind turbines. *DYNA 91*, 5 (2016), 512–516.
- [6] ASHILL, P., FULKER, J., AND HACKETT, K. Research at dera on sub boundary layer vortex generators (sbvgs). *39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (January 2001), 8–11. Reno, Nevada.

-
- [7] ASHILL, P., FULKER, J., AND HACKETT, K. Studies of flows induced by sub boundary layer vortex generators (sbvgs). *40th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (January 2002), 14–17. Reno, Nevada.
- [8] BALDACCHINO, D., FERREIRA, C., DE TAVERNIER, D., TIMMER, W., AND VAN BUSSEL, G. Experimental parameter study for passive vortex generators on a 30% thick airfoil. *Wind Energy* (04 2018).
- [9] BALLESTEROS-COLL, A., FERNANDEZ-GAMIZ, U., ARAMENDIA, I., ZULUETA, E., AND LOPEZ-GUEDE, J. M. Computational methods for modelling and optimization of flow control devices. *Energies* 13, 14 (2020).
- [10] BARLAS, T. K., AND VAN KUIK, G. A. M. Review of state of the art in smart rotor control research for wind turbines. *Progress in Aerospace Sciences* 46, 1 (2010), 1.
- [11] BECKER, R., GARWON, M., GUTKNECHT, C., BÄRWOLFF, G., AND KING, R. Robust control of separated shear flows in simulation and experiment. *Journal of Process Control*, (2005).
- [12] BENDER, E., ANDERSON, B., AND YAGLE, P. Vortex generator modeling for navier-stokes codes. *ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference* (1999), FEDSM99–FEDSM6919.
- [13] BETTERTON, J. G., HACKETT, K. C., ASHILL, P. R., WILSON, M. J., JBETTERTON, I. J. W., BEDFORD, D. D., TILMAN, U. C. P., AND LANGAN, K. J. Laser doppler anemometry investigation on sub boundary layer vortex generators for flow control. *10th Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics* (July 2000), 10–12.
- [14] BRAGG, M. B., AND GREGOREK, G. M. Experimental study of airfoil performance with vortex generators. *Journal of Aircraft* 24, 5 (May 1987), 305–309.

- [15] BRAY, T. P. *A parametric study of vane and air-jet vortex generators*. PhD thesis, Cranfield University, College of Aeronautics, (1998).
- [16] BUR, R., COPONET, D., AND CARPELS, Y. Separation control by vortex generator devices in a transonic channel flow. *Shock Waves* 19 (December 2009), 521–530.
- [17] CCM+C, S. Version 13.02.011., <http://mdx.plm.automation.siemens.com/>. Accessed: 2020/04.
- [18] CCM+C, S. Version 14.02.012., <http://mdx.plm.automation.siemens.com/>. Accessed: 2020/10.
- [19] CHILLON, S., URIARTE-URIARTE, A., ARAMENDIA, I., MARTÍNEZ-FILGUEIRA, P., FERNANDEZ-GAMIZ, U., AND IBARRA-UDAETA, I. jbay modeling of vane-type vortex generators and study on airfoil aerodynamic performance. *Energies* 13, 10 (2020).
- [20] CORTEN, G. P. Vortex blades. *AWEA WindPower* (June 2007).
- [21] CRESPO, A. *Mecánica de Fluidos*. Thomson Editores, Madrid, 2006.
- [22] DUDEK, J. C. Modeling vortex generators in a navier-stokes code. *AIAA Journal* 49, 4 (2011), 748–759.
- [23] ERRASTI, I., FERNÁNDEZ-GAMIZ, U., MARTÍNEZ-FILGUEIRA, P., AND BLANCO, J. M. Source term modelling of vane-type vortex generators under adverse pressure gradient in openfoam. *Energies* 12, 4 (2019).
- [24] FERNANDEZ-GAMIZ, U., ERRASTI, I., GUTIERREZ-AMO, R., BOYANO, A., AND BARAMBONES, O. Computational modelling of rectangular sub-boundary layer vortex generators. *Applied Science* 8, 138 (2018).
- [25] FERNÁNDEZ-GAMIZ, U., RÉTHORÉ, P.-E., SØRENSEN, N. N., VELTE, C. M., ZAHLE, F., AND EGUSQUIZA, E. Comparison of four different models of vortex gen-

- erators. *In Proceedings of EWEA - European Wind Energy Conference & Exhibition European Wind Energy Association (EWEA)* (2012).
- [26] FERNÁNDEZ-GÁMIZ, U., VELTE, C. M., RÉTHORÉ, P. E., SØRENSEN, N. N., AND EGUSQUIZA, E. Testing of self-similarity and helical symmetry in vortex generator flow simulations. *Wind Energy*, (2016).
- [27] FERNÁNDEZ-GÁMIZ, U., ZAMORANO, G., AND ZULUETA, E. Computational study of the vortex path variation with the vg height. *The Science of Making Torque from Wind, Journal of Physics* 524 (2014,).
- [28] FERNANDEZ-GAMIZ, U., ZULUETA, E., BOYANO, A., ANSOATEGUI, I., AND URIARTE, I. Five megawatt wind turbine power output improvements by passive flow control devices. *Energies* 10, 6 (2017).
- [29] GAO, L., ZHANG, H., LIU, Y., AND HAN, S. Effects of vortex generators on a blunt trailing-edge airfoil for wind turbines. *Renewable Energy* 76 (2015).
- [30] GODARD, G., FOUCAUT, J. M., AND STANISLAS, M. Control of a decelerating boundary layer. part 2: Optimization of slotted jets vortex generators. *Aerospace Science and Technology* (2006).
- [31] GUO, C., GUO, H., HU, J., SONG, K., ZHANG, W., AND WANG, W. Large eddy simulation of flow over wavy cylinders with different twisted angles at a subcritical reynolds number. *Journal of Marine Science and Engineering* 7 (July 2019), 227.
- [32] GUTIERREZ-AMO, R., FERNANDEZ-GAMIZ, U., ERRASTI, I., AND ZULUETA, E. Computational modelling of three different sub-boundary layer vortex generators on a flat plate. *Energies* 11, 11 (2018).
- [33] HANSEN, M. O. L., CHARALAMPOUS, A., FOUCAUT, J.-M., CUVIER, C., AND VELTE, C. M. Validation of a model for estimating the strength of a vortex created from the bound circulation of a vortex generator. *Energies* 12, 14 (July 2019).

- [34] HUNT, J., WRAY, A., AND MOIN, P. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows. *Studying Turbulence Using Numerical Simulation Databases -1* (November 1988), 193–208.
- [35] IBARRA-UDAETA, I., ERRASTI, I., FERNANDEZ-GAMIZ, U., ZULUETA, E., AND SANCHO, J. Computational characterization of a rectangular vortex generator on a flat plate for different vane heights and angles. *Applied Sciences* 9, 5 (2019).
- [36] IBARRA-UDAETA, I., PORTAL-PORRAS, K., BALLESTEROS-COLL, A., FERNANDEZ-GAMIZ, U., AND SANCHO, J. Accuracy of the cell-set model on a single vane-type vortex generator in negligible streamwise pressure gradient flow with rans and les. *Journal of Marine Science and Engineering* 8, 12 (2020).
- [37] JIRASEK, A. Vortex-generator model and its application to flow control. *Journal of Aircraft - J AIRCRAFT* 42 (November 2005), 1486–1491.
- [38] JM, J., BUTTERFIELD, S., MUSIAL, W., AND SCOTT, G. Definition of a 5mw reference wind turbine for offshore system development. *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* (January 2009).
- [39] JOHNSON, S., BAKER, J., DAM, C., AND BERG, D. An overview of active load control techniques for wind turbine with an emphasis on microtabs. *Wind Energy* 13 (March 2010), 239 – 253.
- [40] JOHNSON, S. J., CASE, V. D., AND BERG, D. E. Active load control techniques for wind turbines. *SAND2008-4809; Sandia National Laboratories* (2008).
- [41] KHOSLA, P., AND RUBIN, S. A diagonally dominant second-order accurate implicit scheme. *Computers and Fluids* 2, 2 (1974), 207–209.
- [42] KUCZAJ, A., AND KOMEN, E. An assessment of large-eddy simulation toward thermal fatigue prediction. *Nuclear Technology* 170 (April 2010), 2–15.

- [43] KUCZAJ, A., KOMEN, E., AND LOGINOV, M. Large-eddy simulation study of turbulent mixing in a t-junction. *Nuclear Engineering and Design* 240, 9 (2010), 2116–2122. Experiments and CFD Code Applications to Nuclear Reactor Safety (XCFD4NRS).
- [44] LI, S., ZHANG, L., YANG, K., XU, J., AND LI, X. Aerodynamic performance of wind turbine airfoil du 91-w2-250 under dynamic stall. *Applied Sciences* 8, 7 (2018).
- [45] LIN, J. C. Review of research on low-profile vortex generators to control boundary-layer separation. *Progress in Aerospace Sciences* (2002).
- [46] LOPEZ-GUEDE, J. M., RAMOS-HERNANZ, J. A., ZULUETA, E., FERNANDEZ-GAMIZ, U., AND OTERINO, F. Systematic modeling of photovoltaic modules based on artificial neural networks. *International Journal of Hydrogen Energy* 41, 29 (2016), 12672 – 12687. Special Issue on 3rd European Conference on Renewable Energy Systems (ECRES 2015), 7-10 October 2015, Kemer, Antalya, Turkey.
- [47] LOPEZ-GUEDE, J. M., RAMOS-HERNANZ, J. A., ZULUETA, E., FERNANDEZ-GAMIZ, U., AND AZKUNE, G. Dual model oriented modeling of monocrystalline pv modules based on artificial neuronal networks. *International Journal of Hydrogen Energy* 42, 28 (2017), 18103 – 18120. Special Issue on The 4th European Conference on Renewable Energy Systems (ECRES 2016), 28-31 August 2016, Istanbul, Turkey.
- [48] MARTÍNEZ-FILGUEIRA, P., FERNANDEZ-GAMIZ, U., ZULUETA, E., ERRASTI, I., AND FERNANDEZ-GAUNA, B. Parametric study of low-profile vortex generators. *International Journal of Hydrogen Energy* (2017).
- [49] MARTINEZ SUAREZ, J., AND FLASZYNSKI, P. Application of rod vortex generators for flow separation reduction on wind turbine rotor. *Wind Energy* 21 (07 2018).
- [50] MEANA-FERNÁNDEZ, A., FERNÁNDEZ ORO, J. M., ARGÜELLES DÍAZ, K. M., AND VELARDE-SUÁREZ, S. Turbulence-model comparison for aerodynamic-

- performance prediction of a typical vertical-axis wind-turbine airfoil. *Energies* 12, 3 (2019).
- [51] MENTER, F. R. Zonal two equation k-omega turbulence model for aerodynamic flows. *AIAA Journal* 932906 (1993).
- [52] MILLER, G. E. Comparative performance tests on the mod-2, 2.5-mw wind turbine with and without vortex generators. *DOE/NASA Workshop on Horizontal Axis Wind Turbine Technology. Cleveland, OH, United States.* (1984), 8–10.
- [53] NIKOLAOU, I., POLITIS, E., AND CHAVIAROPOULOS, P. Modelling the flow around airfoils equipped with vortex generators using a modified 2d navier–stokes solver. *Journal of Solar Energy Engineering-transactions of The Asme - JSOL ENERGY ENG* 127 (05 2005).
- [54] OPENFOAM. <https://www.openfoam.org/>. Accessed: 2018-06.
- [55] ØYE, S. The effect of vortex generators on the performance of the elkraft 1000 kw turbine. *9th IEA Symposium on Aerodynamics of Wind Turbines. ISSN, Stockholm, Sweden.* (1995).
- [56] PEARCEY, H. Introduction to shock-induced separation and its prevention by design and boundary layer control. In *In Boundary Layer and Flow Control, its Principles and Application* (1961), Pergamon Press: Oxford, UK.
- [57] PRANDTL, L. Über flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner reibung. *Verhandl. III. Intern. Math. Kongr. Heidelberg* (1904).
- [58] RAFFEL, M., FAVIER, D., BERTON, E., RONDOT, C., NSIMBA, M., AND GEISSLER, W. Micro-piv and eldv wind tunnel investigations of the laminar separation bubble above a helicopter blade tip. *Measurement, Science and Technology* 17 (July 2006), 1–13.

- [59] RICHARDSON, L. F., AND GAUNT, J. A. The deferred approach to the limit. part i. single lattice. part ii. interpenetrating lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character* 226 (1927), 299–361.
- [60] ROOIJ, R., AND TIMMER, W. Roughness sensitivity considerations for thick rotor blade airfoils. *Journal of Solar Energy Engineering-transactions of The Asme - JSOL ENERGY ENG* 125 (January 2003).
- [61] SKRZYPIŃSKI, W., GAUNAA, M., BAK, C., JUNKER, B., BRØNNUM, N., AND KRUSE, E. Increase in the annual energy production due to a retrofit of vortex generators on blades. *Wind Energy* 23, 3 (Nov. 2019), 617–626.
- [62] SØRENSEN, N., ZAHLE, F., BAK, C., AND VRONSKY, T. Prediction of the effect of vortex generators on airfoil performance; prediction of the effect of vortex generators on airfoil performance. *Journal of Physics: Conference Series* 524 (June 2014), 012019.
- [63] STERN, F., WILSON, R., COLEMAN, H., AND PATERSON, E. Comprehensive approach to verification and validation of cfd simulations—part 1: Methodology and procedures. *Journal of Fluids Engineering* 123 (December 2001), 792.
- [64] TAYLOR, H. Summary report on vortex generators. Tech. rep., Research Department Report No. R-05280-9;United Aircraft Corporation, 1950.
- [65] URKIOLA, A., FERNANDEZ-GAMIZ, U., ERRASTI, I., AND ZULUETA, E. Computational characterization of the vortex generated by a vortex generator on a flat plate for different vane angles. *Aerospace Science and Technology* (2017).
- [66] VELTE, C. M., HANSEN, M. O. L., GEORGE, W. K., AND MEYER, K. E. Characterization of vortex generator induced flow. *Kgs. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark (DTU). (DCAMM Special Report)*. (2009).

- [67] VELTE, C. M., HANSEN, M. O. L., AND OKULOV, V. L. Helical structure of longitudinal vortices embedded in turbulent wall-bounded flow. *Journal of Fluid Mechanics* (2009).
- [68] VELTE, C. M., HANSEN, M. O. L., AND OKULOV, V. L. Multiple vortex structures in the wake of a rectangular winglet in ground effect. *Experimental Thermal and Fluid Science* 72 (2016).
- [69] WELLER, H. G., TABOR, G., JASAK, H., AND FUREBY, C. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques. *Computers in Physics* 12, 6 (1998), 620 – 631.
- [70] WOOD, R. A discussion of aerodynamic control effectors (aces) for unmanned air vehicles (uavs). In *1st UAV Conference* (may 2002), Infotech@Aerospace Conferences, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [71] WU, Z., CHEN, T., WANG, H., SHI, H., AND LI, M. Investigate aerodynamic performance of wind turbine blades with vortex generators at the transition area. *Wind Engineering* (08 2021), 0309524X2110385.
- [72] YAO, C., LIN, J., AND ALLEN, B. Flowfield measurement of device-induced embedded streamwise vortex on a flat plate. in: Presented at 1st flow control conference, fluid dynamics and co-located conferences. *American Institute of Aeronautics and Astronautics* (June 2002).
- [73] ZAMORANO, G., GARRO, B., FERNÁNDEZ-GÁMIZ, U., AND ZULUETA, E. Computational study of the variation of the incidence angle in a vortex generator. *DYNA New Technologies* (2015), 1–13.
- [74] ZHANG, L., LI, X., YANG, K., AND XUE, D. Effects of vortex generators on aerodynamic performance of thick wind turbine airfoils. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 156 (September 2016), 84–92.

- [75] ZHEN, T., ZUBER, M., AND AHMAD, K. Experimental and numerical investigation of the effects of passive vortex generators on aludra uav performance. *Chinese Journal of Aeronautics - CHIN J AERONAUT* 24 (October 2011), 577–583.
- [76] ZHONG, W., TANG, H., WANG, T., AND ZHU, C. Accurate rans simulation of wind turbine stall by turbulence coefficient calibration. *Applied Sciences* 8, 9 (2018).

Laburdurak

AcVG	Actuator Vortex Generator Model
ANN	Artificial Neural Network
AoA	Angle of Attack
BEM	Blade Element Momentum
BP-MLP	Back Propagation Multilayer Perceptron
CD	Drag Coefficient
CFD	Computational Fluid Dynamics
CL	Lift Coefficient
COE	Cost of Energy
CVG	Conformal Vortex Generator
DES	Detached Eddy Simulation
DS	Delay Stall
EWEA	Energy Wind Energy Association
LE	Leading Edge
MC	Mid Chord
nO	Non-Orthogonality
OM	Operation and Maintenance
RANS	Reynolds Average Navier–Stokes
SGS	Sub Grid Scale

SVG Submerged Vortex Generator

SST Shear-Stress Transport

TE Trailing Edge

VG Vortex Generator