Analiza hidrodinamičkih sila pri gibanju "kite foil" daske

Jušić, Dario

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:577585

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Dario Jušić

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Ivo Džijan, dipl. ing. Dario Jušić

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ivi Džijanu na ukazanim savjetima i pomoći pri izradi ovog rada. Također zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na nepresušnoj potpori tijekom studija.

Dario Jušić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Dario Jušić** Mat. br.: 0035181446

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza hidrodinamičkih sila pri gibanju „kite foil" daske**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of hydrodynamic forces acting on a moving kite foil**

Opis zadatka:

Prilikom jedrenja na „kite foil" dasci jedriličar je u interakciji s vodom preko uronjenog dijela daske te u interakciji s vjetrom dominantno preko zmaja (engl. kite). Kako bi se postigli stacionarni uvjeti gibanja daske, nužna je ravnoteža hidrodinamičkih, aerodinamičkih sila i gravitacijske sile.

Primjenom metoda računalne dinamike fluida za realni primjer geometrije uronjenog dijela daske potrebno je odrediti hidrodinamičke sile pri tipičnim uvjetima stacionarnog gibanja te analizirati utjecaj promjene duljine nosača stražnjeg krila na te sile. U računalnoj simulaciji je potrebno primijeniti model trodimenzijskog turbulentnog strujanja nestlačivog fluida. Radi pojednostavljenja numeričkog proračuna treba zanemariti utjecaj slobodne površine vode i utjecaj strujanja oko onih dijelova uronjene geometrije koji ne sudjeluju aktivno u održavanju ravnoteže. Vertikalnu ravninu simetrije geometrijskog modela definirati kao ravninu simetrije pri strujanju fluida.

Rad treba sadržavati:

1. Uvod s opisom razvoja opreme za „kite foiling"
2. Opis ravnoteže hidrodinamičkih, aerodinamičkih sila i gravitacijske sile
3. Kratki opis metode konačnih volumena
4. Opis geometrije uronjenog dijela daske i računalne domene proračuna
5. Postavke numeričkog modela
6. Rezultate proračuna hidrodinamičkih sila za različite duljine nosača stražnjeg krila
7. Diskusiju rezultata i zaključke

Rezultate proračuna prikazati odgovarajućim tablicama, dijagramima i slikama.
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
7. ožujka 2019.	9. svibnja 2019.	15., 16. i 17. svibnja 2019.

Zadatak zadao: Predsjednica Povjerenstva:

Ivo Džijan

Prof. dr. sc. Ivo Džijan Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA VI
POPIS OZNAKA VII
SAŽETAK IX
SUMMARY X
1. Uvod 1
2. Opis opreme za „kitefoiling“ 5
2.1. Zmaj (*engl. kite*) 5
2.1.1. Vrste zmajeva koje se koriste za kitefoiling 7
2.2. Daska 8
2.3. Krila (*foil*) 10
2.3.1. Povijesni razvoj tehnologije 10
2.3.2. Geometrija suvremenog kite foil-a 12
3. Analiza sila koje djeluju na jedriličara pri kitefoilingu 15
3.1. Upravljanje zmajem 15
3.2. Upravljanje daskom 17
3.3. Pojednostavljeni mehanički model kitefoil jedriličara i daske 19
3.3.1. Pretpostavke mehaničkog modela 19
3.3.2. Opis modela 20
4. Matematički model 24
4.1. Skup jednadžbi k-ε modela turbulencije za visoke vrijednosti *Re* [21] 24
4.2. Strujanje u blizini čvrste stijenke (zidne funkcije) 25
5. Simulacija strujanja oko izdvojenog prednjeg krila 27
5.1. Modeliranje područja proračuna i prostorna diskretizacija 27
5.2. Postavke simulacije 31
5.3. Rubni uvjeti 31
5.4. Rezultati 32
5.4.1. Određivanje orijentacijske vrijednosti sile uzgona na polumodelu krila 33
5.4.2. Prikaz i analiza rezultata računalnih simulacija 33
6. Razmatranje deformiranja prednjeg krila pri vožnji 47
6.1. Postavke računalne simulacije 47
6.2. Rezultati 47
7. Simulacija strujanja oko stražnjeg krila u neporemećenoj struji fluida 50
7.1. Modeliranje područja proračuna i prostorna diskretizacija 50
7.2. Postavke simulacije 51
7.3. Rubni uvjeti 51
7.4. Rezultati 52
7.4.1. Prikaz i analiza rezultata računalnih simulacija 52

8. Simulacija strujanja oko oba krila 57
8.1. Modeliranje područja proračuna i prostorna diskretizacija 57
8.2. Postavke simulacije 59
8.3. Rubni uvjeti 59
8.4. Rezultati 59
8.4.1. Usporedba rezultata na prednjem krilu 61
8.4.2. Usporedba rezultata na stražnjem krilu 62
8.4.3. Prikaz rezultata sile uzgona na stražnjem krilu 65
8.4.4. Računanje položaja težišta kontaktnog pritiska stopala na dasku 68
9. ZAKLJUČAK 70
LITERATURA 71

POPIS SLIKA

Slika 1. Skica predana uz patentni zahtjev 1968. godine [1] 1
Slika 2. Primjer opreme korištene tijekom 80-ih godina prošlog stoljeća [2] 1
Slika 3. Ekstremni uvjeti jedrenja na dasci [3] 2
Slika 4. „Windsurf foiling“ [5] 3
Slika 5. „Kitesurfing“, korištenje zmaja umjesto jedra za pogon [6] 4
Slika 6. Inovacija zvana "kitefoiling" [7] 4
Slika 7. Područje u kojem je moguć stabilni stacionarni let zmaja [8] 6
Slika 8. „SkySails“ propulzijski sustav za teretni brod [9] 6
Slika 9. Shematski prikaz KPS vjetroelektrane koja koristi zmajeve [10] 7
Slika 10. Primjer zmaja s komorom na napuhavanje na prednjem rubu [11] 8
Slika 11. Zmaj sa zatvorenim ćelijama [12] 8
Slika 12. Tipični primjer daske za kitefoiling zajedno s krilom [13] 9
Slika 13. Dvotrupac posade Emirates team New Zeland, *Americas Cup,* San Francisco USA, 2013. [14] 10
Slika 14. Grafički prikaz rezultata simulacije strujanja fluida oko jedrilice Emirates team New Zeland [16] 11
Slika 15. Regatna jedrilica Banque Populaire, natjecanje Vendee Globe 2016/2017. [17] . 11
Slika 16. Kitefoil tvrtke Levitaz, model „Element plate 96“ i njegovi dijelovi [18] 13
Slika 17. Položaj hvatišta kontrolnih niti na zmaju [19] 15
Slika 18. Tipični izgled ručke za upravljanje i raspored kontrolne užadi suvremenog zmaja [20] 16
Slika 19. Prikaz principa prividnog vjetra [19] 17
Slika 20. Koordinatni sustav za opisivanje položaja daske 18
Slika 21. Prikaz sila koje djeluju u pojednostavljenom mehaničkom modelu 20
Slika 22. Skica položaja točke A 22
Slika 23. Geometrija uronjenog dijela daske [24] 27
Slika 24. Polumodel prednjeg krila 28
Slika 25. Poprečni presjek prednjeg krila u vertikalnoj ravnini simetrije 28
Slika 26. Prostorna domena simulacije prednjeg krila 29
Slika 27. Prizmatični konačni volumeni uz površinu krila dobiveni korištenjem opcije „inflation“ 30
Slika 28. „Žičani“ prostorni prikaz mreže konačnih volumena po granicama domene 30
Slika 29. Korištena opcija „Body of influence“ 31
Slika 30. Dijagramski prikaz sile uzgona $F_L/2$ za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida 34
Slika 31. Dijagramski prikaz sile otpora $F_D/2$ za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida 35
Slika 32. Dodatne ravnine za prikaz rezultata simulacije 36
Slika 33. Strujnice $\alpha = 8°$, $v_s = 10$ m/s, ravnina $z = 0$ 36
Slika 34. Strujnice $\alpha = 8°$, $v_s = 10$ m/s, ravnina $z = 0{,}5w$ 37
Slika 35. Strujnice $\alpha = 8°$, $v_s = 10$ m/s, ravnina $z = 0{,}75w$ 37
Slika 36. Polje bezdimenzijskog koeficijenta tlaka C_p pogled na gornju stranu krila, $\alpha = 6°$, $v_s = 6$ m/s 38
Slika 37. Polje bezdimenzijskog koeficijenta tlaka C_p pogled na gornju stranu krila, $\alpha = 8°$, $v_s = 10$ m/s 38

Slika 38. Polje bezdimenzijskog koeficijenta tlaka C_p pogled na donju stranu krila, $\alpha = 6°$, $v_s = 6$ m/s 39
Slika 39. Polje bezdimenzijskog koeficijenta tlaka C_p pogled na donju stranu krila, $\alpha = 8°$, $v_s = 10$ m/s 39
Slika 40. Polje bezdimenzijskog koeficijenta brzine $C_v = v/v_s$, $\alpha = 8°$, $v_s = 10$ m/s, ravnina $z = 0{,}75\ w$ 40
Slika 41. Polje bezdimenzijskog koeficijenta brzine $C_v = v/v_s$, $\alpha = 8°$, $v_s = 10$ m/s, ravnina $z = 0$ 40
Slika 42. Polje bezdimenzijskog koeficijenta brzine $C_v = v/v_s$, $\alpha = 6°$, $v_s = 10$ m/s, ravnina $z = 0$ 41
Slika 43. Polje bezdimenzijskog koeficijenta brzine $C_v = v/v_s$, $\alpha = 8°$, $v_s = 10$ m/s, ravnina $z = 0$ 41
Slika 44. Polje bezdimenzijskog koeficijenta brzine $C_v = v/v_s$, $\alpha = 8°$, $v_s = 6$ m/s, ravnina $z = 0$ 42
Slika 45. Polje bezdimenzijskog koeficijenta brzine $C_v = v/v_s$, $\alpha = 8°$, $v_s = 10$ m/s, ravnina $z = 0$ 42
Slika 46. Polje bezdimenzijskog koeficijenta kinetičke energije turbulencija $C_{TKE} = k/k_{ulaz}$, $\alpha = 6°$, $v_s = 6$ m/s, ravnina $z = 0$ 43
Slika 47. Polje bezdimenzijskog koeficijenta kinetičke energije turbulencija $C_{TKE} = k/k_{ulaz}$, $\alpha = 6°$, $v_s = 10$ m/s, ravnina $z = 0$ 43
Slika 48. Polje bezdimenzijskog koeficijenta kinetičke energije turbulencija $C_{TKE} = k/k_{ulaz}$, $\alpha = 8°$, $v_s = 10$ m/s, ravnina $z = 0$ 44
Slika 49. Polje vrijednosti y^+ po površini prednjeg krila, $\alpha = 6°$, $v_s = 6$ m/s, pogled odozdo 45
Slika 50. Polje vrijednosti y^+ po površini prednjeg krila, $\alpha = 6°$, $v_s = 6$ m/s, pogled odozgo 45
Slika 51. Polje vrijednosti y^+ po površini prednjeg krila, $\alpha = 8°$, $v_s = 10$ m/s, pogled odozdo 46
Slika 52. Polje vrijednosti y^+ po površini prednjeg krila, $\alpha = 8°$, $v_s = 10$ m/s, pogled odozgo 46
Slika 53. Grafički prikaz raspodijele pomaka krila u smjeru *y*-osi po površini krila 48
Slika 54. Grafički prikaz raspodijele pomaka krila u smjeru *z*-osi po površini krila 49
Slika 55. Grafički prikaz rasodijele pomaka krila u smjeru *x*-osi po površini krila 49
Slika 56. Prostorni prikaz geometrijskog polumodela stražnjeg krila 50
Slika 57. Prostorna domena simulacije stražnjeg krila 51
Slika 58. Dijagramski prikaz sile uzgona na izdvojenom stražnjem krilu $F_{LS}/2$ za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida 53
Slika 59. Dijagramski prikaz sile otpora $F_D/2$ za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida 54
Slika 60. Polje vrijednosti y^+ po površini stražnjeg krila, $\alpha = 6°$, $v_s = 6$ m/s, pogled odozdo 55
Slika 61. Polje vrijednosti y^+ po površini stražnjeg krila, $\alpha = 6°$, $v_s = 6$ m/s, pogled odozgo 55
Slika 62. Polje vrijednosti y^+ po površini stražnjeg krila, $\alpha = 8°$, $v_s = 10$ m/s, pogled odozdo 56
Slika 63. Polje vrijednosti y^+ po površini stražnjeg krila, $\alpha = 8°$, $v_s = 10$ m/s, pogled odozgo 56
Slika 64. Izgled strujnica za slučaj izdvojenog strujanja oko prednjeg krila u ravnini $w = 0$ 57
Slika 65. Prostorna domena simulacije oba krila 58

Slika 66. Prikaz mreže konačnih volumena u ravnini z=0 za strujanje oko oba krila 59
Slika 67. Polje vrijednosti y^+ po površini oba krila, α = 7.5°, v_s = 8 m/s, pogled odozgo 60
Slika 68. Polje vrijednosti y^+ po površini oba krila, α = 7.5°, v_s = 8 m/s, pogled odozdo 60
Slika 69. Dijagramski prikaz sile uzgona $F_L/2$ na prednjem krilu za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida s vrijednostima za izdvojeno strujanje oko prednjeg krila i za slučaj zajedničkog strujanja 61
Slika 70. Prostorni prikaz prostornih strujnica pri strujanju oko oba krila α = 6.5°, v_s = 8 m/s 63
Slika 71. Ravninski prikaz ravninskih strujnica pri strujanju oko oba krila z = 0, α = 6.5°, v_s = 8 m/s 64
Slika 72. Ravninski prikaz polja brzine pri strujanju oko oba krila z = 0, α = 6.5°, v_s = 8 m/s 65
Slika 73. Dijagramski prikaz rezultata sile uzgona na polumodelu stražnjeg krila u ovisnosti o parametru Δl_F za različite vrijednosti parametra α pri v_s = 7 m/s 66
Slika 74. Usporedni prikaz polja brzine oko stražnjeg krila za Δl_F = +0,1m (gore) i Δl_F = -0,1m (dolje) ,z = 0, α = 7°, v_s = 7 m/s 67
Slika 75. Dijagramski prikaz rezultata sile uzgona na polumodelu stražnjeg krila u ovisnosti o parametru α pri v_s = 7 m/s i v_s = 8 m/s, Δl_F = 0 67

POPIS TABLICA

Tablica 1. Brzinski rekordi kroz povijest [4] 3
Tablica 2. Vrijednosti konstanti turbulencijskog modela [22] 25
Tablica 3. Dimenzije domene proračuna 29
Tablica 4. Fizikalni rubni uvjeti korišteni u svim računalnim simulacijama 32
Tablica 5. Vrijednosti sile uzgona $F_L/2$ za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida 34
Tablica 6. Vrijednosti sile otpora $F_D/2$ za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida 35
Tablica 7. Vrijednosti sile uzgona na izdvojenom stražnjem krilu $F_{LS}/2$ za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida 52
Tablica 8. Vrijednosti sile otpora $F_{DS}/2$ za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida 53
Tablica 9. Vrijednosti sile uzgona $F_L/2$ na prednjem krilu za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida pri strujanju oko oba krila 61
Tablica 10. Vrijednosti sile uzgona $F_{LS}/2$ na stražnjem krilu za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida pri strujanju oko oba krila 62
Tablica 11. Vrijednosti sile uzgona $F_{LS}/2$ na stražnjem krilu za prošireni raspon upadnih kuteva fluida pri strujanju oko izdvojenog stražnjeg krila 63
Tablica 12. Prikaz ulaznih vrijednosti i rezultata za izračun položaja težišta kontaktnog pritiska na dasku p(A) 69

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis	Jedinica
C_p	bezdimenzijski koeficijent tlaka	-
C_{TKE}	bezdimenzijski koeficijent kinetičke energije turbulencije	-
C_v	bezdimenzijski koeficijent brzine	-
E	modul vlačne elastičnosti materijala	GPa
F_A	reakcijska sila između jedriličara i daske	◦
F_D	sila otpora gibanja uronjenog dijela daske kroz vodu	N
$F_D/2$	sila otpora na polumodelu prednjeg krila	N
$F_{DS}/2$	sila otpora na polumodelu stražnjeg krila	N
F_L	sila uzgona pri gibanju uronjenog dijela daske	N
$F_L/2$	sila uzgona na polumodelu prednjeg krila	N
$F_{LS}/2$	sila uzgona na polumodelu stražnjegnjeg krila	N
$F_{Z,P}$	rezultantna sila u smjeru osi *z* na polumodelu krila	N
h	visina gornje površine daske u odnosu na ishodište k.s. daske	m
k_{ulaz}	kinetička energija turbulencije na ulaznoj granici domene	J/kg
k	kinetička energija turbulencije	J/kg
L	duljina izvodnice poprečog presjeka krila	m
l_F	udaljenost između prednjih rubova dvaju krila duž *x*-osi	mm
M_X	moment oko *x*-osi na uronjenom dijelu daske	Nm
M_Y	moment oko *y*-osi na uronjenom dijelu daske	Nm
M_Z	moment oko *z*-osi na uronjenom dijelu daske	Nm
m	masa jedriličara	kg
p_A	*p* koordinata točke A duž gornje površine daske	m
p_{izlaz}	tlak fluida na izlaznoj granici domene	Pa
v_s	brzina nastrujavanja fluida	m/s
v	brzina fluida	m/s

w	širina polumodela krila	m
y^+	bezdimenzijska koordinata okomito na stijenku	-
α	kut nagiba daske oko *z*-osi u odnosu na horizontalnu ravninu	°
β	kut otklona daske oko *x*-osi u odnosu na vertikalnu ravninu	°
γ	kut otklona tijela jedriličara oko *z*-osi u odnosu na vertikalnu ravninu	°
ν	poissonov koeficijent	-
ρ	gustoća fluida	kg/m^3

SAŽETAK

U ovom radu je opisan način rada opreme koja se koristi za „kite foiling“ te način njena korištenja kako bi se dobila jasnija predodžba o silama s kojima su hidrodinamičke sile u ravnoteži. Ta ravnoteža opisana je pojednostavljenim mehaničkim modelom kako bi se rezultati dobiveni numeričkim simulacijama mogli kvantitativno usporediti s vrijednostima koje se očekuju u realnim uvjetima stacionarne vožnje.

U radu je zatim provedena analiza hidrodinamičkih sila na uronjenim dijelovima „kite foil“ daske. Promatrana je ovisnost hidrodinamičkog uzgona i otpora o tri parametra: brzini gibanja daske, uzdužnom nagibu daske i duljini nosača stražnjeg krila, pri tipičnim slučajevima stacionarnog gibanja.

Napravljena je simulacija izdvojenog strujanja oko prednjeg krila koja je poslužila za uži odabir parametara strujanja pri kasnijim simulacijama. Također je napravljena simulacija izdvojenog strujanja oko stražnjeg krila. Simulacijom zajedničkog strujanja oko oba krila utvrđen je zanemariv utjecaj stražnjeg krila na strujanje oko prednjeg krila i veliki utjecaj prednjeg krila na strujanje oko stražnjeg krila.

Sila uzgona na stražnjem krilu je promjenjivog predznaka i malog iznosa u usporedbi sa silom uzgona na prednje krilo, što je potvrdilo pretpostavku da prednje krilo služi za ostvarivanje sile uzgona, dok stražnje krilo služi stabilizaciji daske pri gibanju.

Ključne riječi: Računalna dinamika fluida, kitefoiling, hidrodinamički uzgon, hidrodinamički otpor

SUMMARY

In this thesis, the working principle of kite foiling equipment is described and the way it is used, so that the perception of forces which hydrodynamic forces are in balance with, could be obtained. This balance is described with a simplified mechanical model so that numeric simulation results could be compared quantitatively with values expected in real stationary sailing conditions.

Following this, the thesis presents research on hydrodynamic forces acting upon submerged parts of "kite foil" board with respect to three parameters: sailing speed, board pitch, and length of rear wing carrier, within typical stationary sailing conditions.

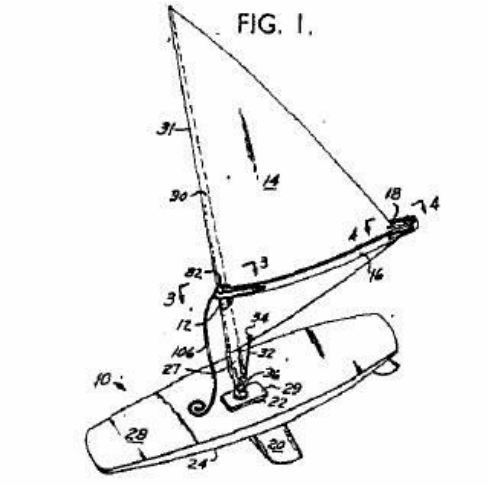
Simulation of isolated flow around the front wing was made, which was helpful for narrowing down ranges of flow parameters. Simulation of isolated flow around the rear wing was also made. By simulating combined flow around both wings, negligible influence of the rear wing on flow around the front wing and great influence of the front wing on flow around the rear wing was shown.

Lift force acting upon the rear wing changes orientation and has low values in comparison with front wing lift force, which verified the assumption that front wing is used for providing lift, while rear wing is used for stabilization of the board.

Key words: Computational Fluid Dynamics (CFD), kitefoiling, hydrodynamic lift, hydrodynamic drag

1. Uvod

Jedrenje na dasci je sport s dugom poviješću koja je počela krajem prve polovice prošloga stoljeća.Međutim dasku za jedrenje prvi su patentirali Jim Drake i Hoyle Schweitzer [1] tek 1968. godine. Skica predana uz patentni zahtjev prikazana je na slici [Slika 1]. Od samih početaka sport je u stopu pratio razvoj tehnologije pa se tako i oprema koja se pri tome koristi drastično mijenjala tijekom vremena.



Slika 1. Skica predana uz patentni zahtjev 1968. godine [1]

Od tada pa sve do današnjih dana traje kontinuirani razvoj i optimiranje opreme radi smanjenja mase, povećanja upravljivosti i smanjenja otpora gibanja kroz medij u kojem se giba. Ni danas se ne može reći da je oblik jednoznačno određeno što će biti vidljivo u primjerima koji slijede. Slika 2 prikazuje jedan primjer tipa opreme korištene tijekom 80-ih godina prošlog stoljeća .



Slika 2. Primjer opreme korištene tijekom 80-ih godina prošlog stoljeća [2]

Najznačajniji napredak koji je postignut 80-tih godina je da je omjer sile poriva i sile otpora omogućavao postizanje i održavanje brzine koja dasci omogućava da silu uzgona postiže ne više primarno hidrostatskim efektom uronjenog tijela u vodi već hidrodinamičkim djelovanjem na površini vode.

Daljnjim poboljšanjem performansi opreme omogućeno je da sport razvije svoju ekstremnu stranu jer su postale moguće situacije u kojima je prije bilo nemoguće održavati kontrolu nad daskom i dovesti se u određenu poziciju u odnosu na valove i ostalo okruženje, kao što prikazuje Slika 3.



Slika 3. Ekstremni uvjeti jedrenja na dasci [3]

Iz tablice [Tablica 1. Brzinski rekordi kroz povijest] može se zorno preko službenih rekorda postignute brzine na dasci [4] pogonjene jedrom dobiti dojam o tome koliki je napredak postignut u 32 godine razvoja. Podaci iz tablice također pokazuju koliki je potencijal energije vjetra jer navedene vrijednosti ulaze u domenu motornih vozila, a ovdje se radi isključilo o pogonu snagom vjetra bez ikakvog zagađenja okoliša tijekom korištenja.

Tablica 1. Brzinski rekordi kroz povijest [4]

Godina	Brzina [kt]	Brzina [km/h]	Jedriličar	Mjesto u kojem je postignut rekord
1980	24,63	45,61	Jaap van de Rest	Hawaii, SAD
1983	30,83	57,10	Fred Haywood	Weymouth, UK
1986	38,66	71,60	Pascal Maka	Fuerteventura, Canaria, Španjolska
1993	45,32	83,93	Thierry Bielak	Sainte Marie de la Mer, Francuska
2004	46,82	86,71	Finian Maynard	Sainte Marie de la Mer, Francuska
2008	49,09	90,91	Antoine Albeau	Sainte Marie de la Mer, Francuska
2012	52,05	96,40	Antoine Albeau	Luderitz, Namibjia

Osim vidljive konstantne težnje da se postojeći koncepti optimiziraju postoji i konstantno pojavljivanje novih koncepata koji koriste dio postojeće opreme ili služe vrlo sličnoj svrsi. Kroz godine došlo je do vrlo zanimljivih inovacija, a primjeri onih koje su doživjele popularnost su: „windsurf foiling“ [Slika 4], „kitesurfing “ [Slika 5] i „kitefoiling“ [Slika 6].



Slika 4. „Windsurf foiling“ [5]

Na prethodnoj slici je prikazana varijacija istog sporta koji se razlikuje od osnovnog po tome što je klasična peraja koja ostvaruje uzgon samo u horizontalnom smjeru zamijenjena formom vidljivom na desnoj strani slike koja omogućuje korištenje potpuno uronjene geometrije za stvaranje hidrodinamičkog uzgona. Ovo je efikasnije od prethodno navedenih primjera. Međutim, navedena izvedba je po svojoj prirodi nestabilna iako nije podložna destabilizirajućem utjecaju valova na površini vode.



Slika 5. „Kitesurfing“, korištenje zmaja umjesto jedra za pogon [6]

Gornja slika pokazuje primjer inovacije gdje je jedro zamijenjeno zmajem čime se eliminira negativan utjecaj kojeg ima visina težišta aerodinamičke sile jedra u odnosu na dasku. Međutim, zmaj je prostorno vrlo zahtjevan zbog dugačkih kontrolnih užadi zbog kojih može biti i opasan za ljude u neposrednoj okolini.

Kronološki najmlađi novitet zapravo je kombinacija dvije prethodne izvedbe.Razvojem opreme u smislu poboljšane kontrole, postala je moguće izvedba tzv. „kite-foilinga“ koji koristi zmaj kao pogon, a hidrodinamički uzgon ostvaruje potpuno uronjenom geometrijom krila. Ovo pomalo podsjeća na scene iz filmova znanstvene fantastike.



Slika 6. Inovacija zvana "kitefoiling" [7]

2. Opis opreme za „kitefoiling“

Opremu koja se koristi pri kitefoilingu čine:

- zmaj (*engl. kite*) zajedno sa kontrolnom užadi,
- daska,
- krila zajedno sa nosačem, popularno zvani *foil*.

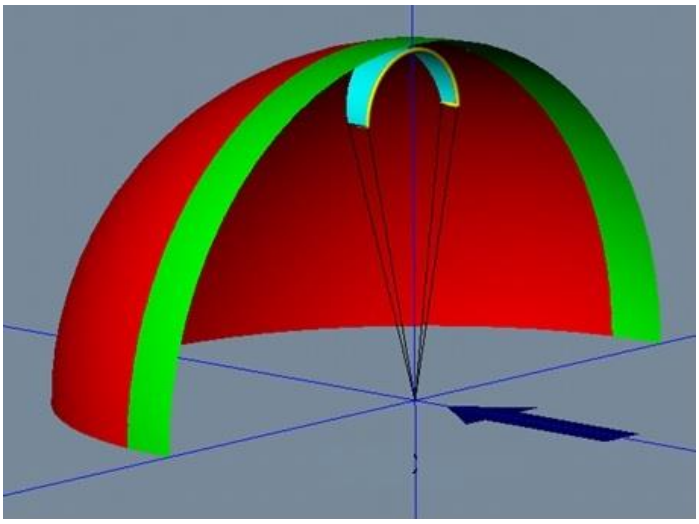
Opis navedenog slijedi u narednim poglavljima. Valja napomenuti da je iz gornjeg popisa izostavljen takozvani trapez pojas koji služi tome da se sila iz kontrolnih užadi zmaja prenese na tijelo jedriličara kako bi se izbjeglo nepotrebno umaranje mišića ruku. Pojas je gotovo identičan onima za ostale vodene sportove na dasci koji koriste vjetar te se ovdje neće opisivati.

2.1. Zmaj (*engl. kite*)

Zmaj možemo pojednostavljeno definirati kao jedro kojeg karakterizira to da nema niti jednu točku kojom je čvrsto vezan za okolinu, već je jedina mehanička interakcija u spojnim točkama pomoću kontrolnih užadi, što znači da zmaj ima slobodne pomake u smjerovima tangencijalnim na sferu čiji radijus je kontrolno uže . Nadalje kako se radi o kontrolnom užetu koje po definiciji nema savojnu niti tlačnu krutost već samo vlačnu krutost u spojnim točkama zmaja također je slobodan pomak po osi koje čini kontrolno uže u smjeru koji rezultira skraćenjem užeta, a spriječen je jedino pomak koji rezultira produženjem užeta. Baš taj izostanak reakcijskih sila glavni je uzrok relativno slabe stabilnosti zmaja pri letu. Naime svaka pa i najmanja neuravnoteženost aerodinamičkih sila na tijelu zmaja i vlačnih sila u kontrolnim užetima te gravitacijske sile uzrokuje ubrzanje zmaja u smjeru rezultantne sile. Navedeno ubrzanje traje sve do trenutka kada zmaj zauzme novi položaj takav da je ravnoteža sila postignuta.

Naredna slika [Slika 7] prikazuje područje u kojem je moguće postignuti stabilan let zmaja, dakle izvan prikazanog sfernog isječka stabilan let nije moguć. Na slici plava strjelica označava smjer vjetra, crvenom bojom prikazano je stabilno područje, a zelenom bojom prikazano je prijelazno područje naime točan položaj prijelaznog područja određen je brzinom vjetra. Naime da bi zmaj letio između ostalog nužno je da aerodinamička sila uzgona na tijelu zmaja uravnoteži gravitacijsku silu , a kako je masa zmaja konstantna, što je brzina vjetra

manja za održavanje sile uzgona nužno je povećanje kuta nastrujavanja fluida na tijelo zmaja, što se postiže tako da zmaj zauzme položaj pomaknut u smjeru strujanja vjetra. Ukoliko se zmaj nađe ispred (gledano u smjeru strujanja vjetra) zelenog područja dolazi do gubitka napetosti u kontrolnoj užadi, samim time i gubitka ravnoteže i upravljivosti nad zmajem te zmaj nastavlja gibanje „slobodnim“ padom.



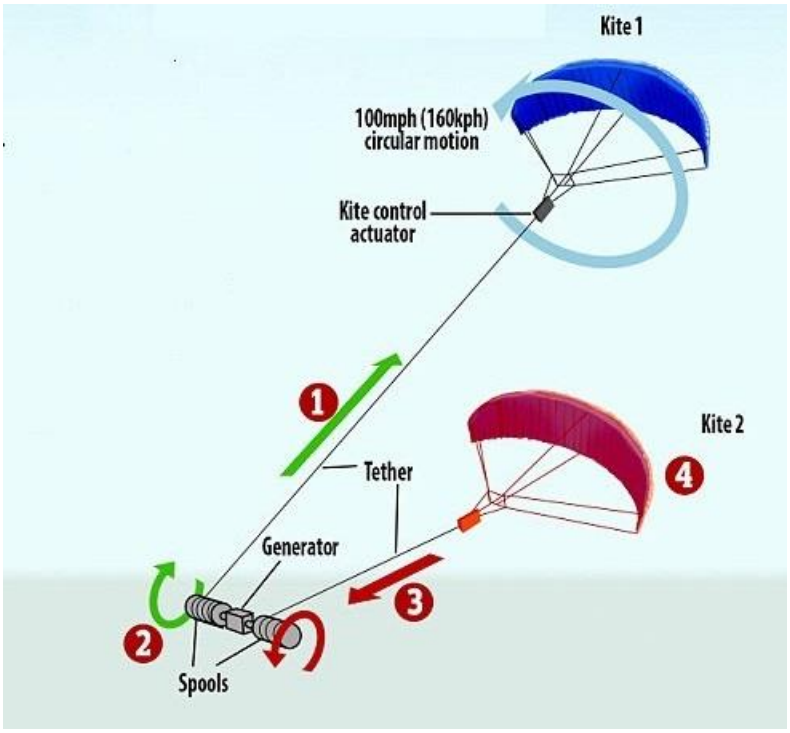
Slika 7. Područje u kojem je moguć stabilni stacionarni let zmaja [8]

Narednim slikama [Slika 8 i Slika 9] prikazane su neke od zanimljivih primjena zmajeva izvan jedriličarskih aktivnosti na vodi. Slika 8 prikazuje propulzijski sustav namijenjen teretnim brodovima čija je svrha ušteda na troškovima goriva te smanjenje negativnog utjecaja na okoliš. Glavni tehnološki napredak koji ističe ovaj proizvod je teleskopski mehanizam za puštanje i vračanje zmaja na palubu , a nalazi se na pramcu broda kao što je vidljivo i na slici.



Slika 8. „SkySails“ propulzijski sustav za teretni brod [9]

Drugi primjer [Slika 9] je shematski prikaz vjetroelektrane koja za pogon električnog generatora koristi razliku između uzgona koji se ostvaruje na zmaju koji miruje i postavljen je s minimalnim upadnim kutem te zmaja koji ostvaruje kružnu putanju kako bi svojim gibanjem stvorio dodatno prividno strujanje fluida preko svoje površine. Zmajevi su identičnih dimenzija i prema vitlima su uhvaćeni s po jednim užetom. Prednost ovakvih vjetroelektrana u odnosu na klasične je manja početna cijena i to da nema potrebe za masivnim temeljima, a nedostatak je u složenom procesu upravljanja nad zmajevima koji se realizira pomoću aktuatora koji je smješten na užetu blizu zmaja. Aktuator upravlja zmajem preko međusobno različit dužina kontrolnih užadi na pojedinom zmaju.



Slika 9. Shematski prikaz KPS vjetroelektrane koja koristi zmajeve [10]

2.1.1. Vrste zmajeva koje se koriste za kitefoiling

Zmajeve koji se koriste na sportove na vodi pa tako i za kitefoiling možemo podijeliti u dvije kategorije:

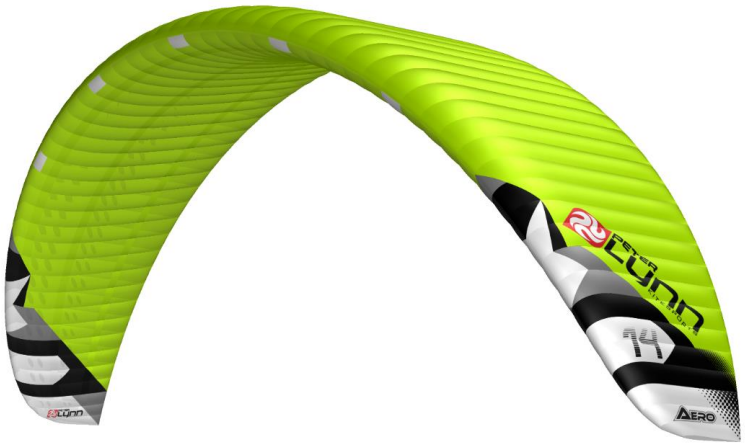
- zmajevi sa komorom pod tlakom na prednjem rubu (*engl. leading edge inflatable*),
- zmajevi sa zatvorenim ćelijama (*engl. cloesed cell*).

Zahtjev koji se postavlja na sve zmajeve koji se koriste za sportove na vodi je taj da trebaju pružati mogućnost da jedriličar samostalno podigne zmaj nakon što završi u vodi.



Slika 10. Primjer zmaja s komorom na napuhavanje na prednjem rubu [11]

Prednosti ove vrste zmaja pokazanog na slici [Slika 10] je u tome da komora sa stlačenim zrakom na prednjem rubu zmaju daje određenu krutost koja pomaže tome da zmaj kroz različite režime strujanja fluida oko njega zadrži isti oblik. Ta krutost također pomaže pri ponovnom podizanju nakon što zmaj padne u vodu te pruža uzgon kako bi zmaj ostao na površini vode prilikom pada.



Slika 11. Zmaj sa zatvorenim ćelijama [12]

Prednost ove druge vrste zmajeva [Slika 11] je u tome da u pravilu imaju bolju efikasnost, a mana im je to da tijelo zmaja ima malu krutost pa je otežano ponovno podizanje iz vode te se kontrolna užad mora razgranati prije pričvršćivanja na tijelo zmaja kako ne bi došlo do lokalnih deformacija.

2.2. Daska

Kitefoil daska jedriličaru omogućava upravljanje nad uronjenim krilima tako da opterećenje kojim jedriličar djeluje na dasku prenosi na nosač krila, također daska svojim volumenom

osigurava pozitivnu plovnost sklopa daske, nosača krila i krila. Pri niskim brzinama kada je daska u kontaktnu s vodom, daska svojim oblikom pomaže pri održavanju direkcijske stabilnosti. Volumen daske nije dovoljan da bi podržao težinu jedriličara, dakle pri mirovanju uslijed težine jedriličara daska tone.



Slika 12. Tipični primjer daske za kitefoiling zajedno s krilom [13]

Slika 12 prikazuje jedan od najčešće korištenih oblika daske za kitefoil, naime pri vožnji kada površina daske nije u kontaktu s vodom sam njen oblik ima vrlo mali utjecaj na ukupno ponašanje daske. Uzrok tome leži u tome da su aerodinamičke sile koje se javljaju pri strujanju zraka oko neuronjenog dijela daske značajno manjeg iznosa u odnosu na hidrodinamičke sile koje se ostvaruju na krilima i uronjenom dijelu nosača krila. Pa tako postoje daske različitih oblika koje se mogu značajno razlikovati od prikazanog. Kao dodatna opcija na dasku se mogu montirati spužvasti prihvati pod koje jedriličar umetne prednji dio stopala čime se olakšava upravljanje nad daskom pri malim brzinama, okretima te pri pokretanju iz vode. Daska je u potpunosti funkcionalna i bez navedenih prihvata za stopala, a prilikom padova manje su mogućnosti za ozljedu kako zglobova nogu tako i ostalih dijelova tijela koji mogu doći u kontakt s oštrim dijelovima krila.

Pri stacionarnoj vožnji jedriličar na dasku djeluje gotovo isključivo stopalom na površinu daske, a ne na prihvat za stopalo pa prema tome postojanje prihvata ne mijenja značajno raspored reakcijskih sila između jedriličara i daske.

2.3. Krila (*foil*)

Realizacija ideje da se umjesto volumena trupa za stvaranje potrebnog uzgona koriste hidrodinamičke sile na uronjenom krilu pojavila se na plovilima pogonjenim vjetrom krajem sedamdesetih godina prošlog stoljeća. Ali se zbog relativno slabijih performansi ondašnje opreme i slabijih mehaničkih svojstva dostupnih materijala za izradu nije pokazala kao praktično rješenje.

2.3.1. Povijesni razvoj tehnologije

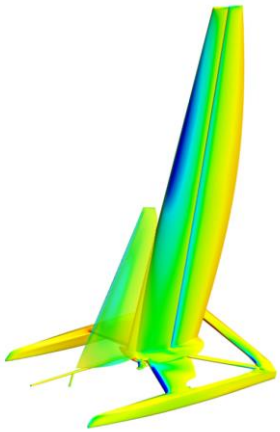
Početkom ovog stoljeća tehnološkim napretkom, krila polagano dolaze u širu upotrebu i to poglavito na daskama za jedrenje pogonjenim kako klasičnim jedrom tako i zmajem. Kao trenutak značajnog napretka u razvoju krila za plovila pogonjena vjetrom može se izdvojiti najprestižnije jedriličarsko natjecanje *Americas Cup* gdje su se 2013. godine po prvi puta u povijesti pojavili višetrupci koji koriste krila za postizanje uzgona te se u vožnji trupovi u potpunosti nalaze izvan vode, kao što se može vidjeti na slici ispod [Slika 13].



Slika 13. Dvotrupac posade Emirates team New Zeland, *Americas Cup*, San Francisco USA, 2013. [14]

Prikazana jedrilica [Slika 13], kao i jedrilice ostalih sudionika u tom natjecanju, rezultat je višegodišnjeg intenzivnog razvoja uz za jedriličarski sport izrazito velika novčana sredstva, što je rezultiralo dotad neviđenim performansama na regatnom polju. Za potrebe navedenih jedrilica postignut je veliki napredak na polju upravljanja nagibnim kutevima uronjenih krila što je nužno za održavanje stabilne visine jedrilice iznad vode. Prema izvoru [15], za razvoj

mnogih elemenata jedrilice sa slike [Slika 13] korišten je upravo programski paket ANSYS koji će biti korišten i za potrebe ovoga rada.



.

Slika 14. Grafički prikaz rezultata simulacije strujanja fluida oko jedrilice Emirates team New Zeland [16]

Zahvaljujući velikoj medijskoj popraćenosti natjecanja i postignutom napretku u performansama, dodatno se potaknula primjena i razvoj uronjenih krila i u drugim oblicima jedriličarskog sporta pa tako i u oceanskom sportskom jedrenju, kao što prikazuje Slika 15.



Slika 15. Regatna jedrilica Banque Populaire, natjecanje Vendee Globe 2016/2017. [17]

Primjer prekooceanske regatne jedrilice na slici iznad zanimljiv je po tome da je uronjeno krilo izmaknuto izvan uzdužne osi trupa jedrilice čime je postignuto to da uzgon ostvaren na uronjenom krilu osim što smanjuje površinu trupa uronjenu u vodu također dodatno povećava moment bočnog stabiliteta jedrilice. Jedrilica s ovakvim tipom krila nije u mogućnosti aktivno regulirati postavni kut krila kako bi se trup održao izvan vode, već je zamišljena da je uvijek neki dio površine trupa u kontaktu s vodom pa se na taj način osigurava stabilnost plovidbe.

Kitefoiling je izglasan kao olimpijska disciplina u jedrenju za Olimpijske igre u Parizu 2024. godine, osim njega od jedriličarskih disciplina koje koriste uronjena krila tu je i olimpijski dvotrupac pod nazivom Nacra 17. Ono što ističe dasku za kitefoiling u odnosu na ostala plovila pogonjena vjetrom koja koriste uronjena krila jest tehnička jednostavnost načina upravljanja nad postavnim kutem uronjenog krila. Naime svi navedeni primjeri jedrilica u ovom poglavlju imaju neki mehanički sistem za podešavanje postavnog kuta krila koji variraju od jednostavnijih polužnih mehanizama s koloturnicima i kontrolnom užadi do složenijih hidrauličkih sistema. Stoga možemo reći da se pri kitefoilingu upravljanje nad krilom u potpunosti svodi na vještinu jedriličara. Kitefoiling je također poseban po tome da ima daleko najveću mogućnost promjene relativnog položaja hidrodinamičkih površina u odnosu na aerodinamičke površine, čemu ponajviše doprinose stupnjevi slobode zmaja spomenuti u prethodnom poglavlju. Upravo ti stupnjevi slobode omogućavaju jedriličaru da kitefoil opremu postav u najpovoljniji prostorni razmještaj za dane uvjete na vodi, o čemu će biti više napisano u narednom poglavlju.

2.3.2. Geometrija suvremenog kite foil-a

Kao primjer za opisivanje dijelova koji čine jedan kitefoil poslužit će proizvod tvrtke Levitaz, jedne od vodećih proizvođača na tržištu, konkretno model iz njihove ponude proizvoda za rekreativne jedriličare, proizvod pod nazivom „Element plate 96“. Riječ „plate“ u nazivu označava način na koji se proizvod učvršćuje na dasku, a ovdje se radi o prirubnici pravokutnog oblika pri čemu je cijela kontaktna površina s daskom u jednoj ravnini, otuda i naziv „plate“. Prirubnica se učvršćuje s četiri vijka pravokutnog razmještaja na osnom razmaku 165x90mm. Navedeni model dostupan je i u „tuttle“ izvedbi gdje se foil za dasku učvršćuje konusnim perom s pravokutnom bazom koji prodire u dasku, što je ujedno i drugi od dva načina spajanja koji pokrivaju gotovo svu trenutno dostupnu ponudu na tržištu. Valja napomenuti da dimenzije kako prirubnice tako i „tuttle“ pera nisu definirane normom, međutim proizvođači se kroz generacije proizvoda trude održati konzistentnost mjera i oblika kako bi se omogućila međusobna izmjenjivost pojedinih dijelova opreme. Broj 96 u nazivu modela označava visinu vertikalnog nosača krila u centimetrima.



Slika 16. Kitefoil tvrtke Levitaz, model „Element plate 96“ i njegovi dijelovi [18]

Primjer prikazan na slici [Slika 16] prikazuje trenutno najpopularniju izvedbu koja zbog svoje rastavljivosti ima daleko manje transportne dimenzije u odnosu na nerastavljivu izvedbu. Krutost spojeva između pojedinih dijelova predstavlja veliki konstrukcijski izazov i ne može se reći da je u potpunosti savladan. Pomaci u spojevima dodatno narušavaju krutost konstrukcije što dovodi do otežane upravljivosti nad krilima. Iz tog se razloga natjecateljski modeli, za koje se pretpostavlja veće opterećenje i veća brzina pri vožnji, nerijetko izrađuju s nerastavljivim spojevima što im nedvojbeno smanjuje praktičnost prilikom transporta.

Slika 16. desno prikazuje dijelove kitefoila koji će bili pojedinačno opisani, a oni su:

- prednje krilo,
- horizontalni nosač, *eng. fuselage,*
- vertikalni nosač, *eng. mast,*
- stražnje krilo.

Prednje krilo dio je s najvećom stalno uronjenom površinom na dasci za kitefoil i odgovoran je za većinu ostvarenih hidrodinamičkih sila pri vožnji. Smješten je ispred vertikalnog nosača kako bi se nalazio u neporemećenom strujanju fluida. Najčešće rješenje za spoj prednjeg krila i horizontalnog nosača je takvo da se krilo naslanja s donje strane na nosač kako bi se sila uzgona prenosila kontaktnim pritiskom, čime se smanjuje opterećenje na vijke tj. njihovu

podlogu. Pri korištenju vijčanih spojevima nisu rijetki problemi s čvrstoćom na mjestima kontakta glave vijka i materijala krila te problemi s metalnim umetcima za ženski dio navoja kada se krila izrađuju od kompozitnih materijala pa se izbjegavaju velike sile u vijcima. Krila se često izrađuju od kompozitnih materijala zbog težnje za malom masom uz veliku krutost.

Horizontalni nosač *eng. fuselage* spaja prednje i zadnje krilo te rezultantnu silu prenosi na vertikalni nosač. Kako se horizontalni nosač spaja na sva tri preostala dijela, nerijetko se izrađuje od punog komada nehrđajućeg čelika ili aluminijske legure postupkom strojne obrade odvajanjem čestica, što elegantno rješava problem izrade navoja za vijčane spojeve i jednostavna je izrada dosjeda za ostale dijelove. Sa stanovišta smanjenja mase izrada od nehrđajućeg čelika nije povoljna, ali navedeno se nadoknađuje time da nosač može biti manjeg poprečnog presjeka što povoljno utječe na smanjenje sile otpora pri strujanju fluida oko nosača te je manji utjecaj na strujanje oko stražnjeg krila koje se nalazi nizvodno.

Vertikalni nosač *eng mast* prenosi sile s obaju krila na dasku. Uslijed relativno velike visine pri konstrukciji pažnja se posvećuje na krutost. Zbog težnje da se smanje otpori koje uzrokuje vertikalni nosač pri strujanju fluida oko njega teži se što manjim dimenzijama presjeka, a naročito u smjeru okomitom na smjer strujanja fluida. Visinom vertikalnog nosača osigurava se prostor kako jedriličar nebi često u vožnji ostvario kontakt daske s površinom vode i s druge strane da uslijed valova i ostalih poremećaja ne dolazi do izlaženja površine krila izvan vode što ima za posljedicu gubitak hidrodinamičkih sila i stabilnosti. Dakle uslijed velike visine i malo poprečnog presjeka javljaju se problem s torzijskom krutosti i krutosti na izvijanje. To je razlog da se vertikalni nosači izrađuju od kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima, a jeftinije izvedbe od šupljih tankostjenih aluminijskih profila.

Stražnje krilo služi za stabilizaciju i povećanje upravljivosti nad krilima pri vožnji. Sa stanovišta čvrstoće i krutosti nema visoke zahtjeve na konstrukciju. Neki proizvođači pri konstrukciji spoja stražnjeg krila i horizontalnog nosača ostavljaju mogućnost promjene nagiba stražnjeg krila u odnosu na ostatak konstrukcije kako bi se djelovanje krila moglo prilagoditi željama jedriličara i uvjetima na vodi.

3. Analiza sila koje djeluju na jedriličara pri kitefoilingu

Jedriličareve aktivnosti pri kitefoilingu možemo podijeliti u dvije kategorije:

- upravljanje zmajem,
- upravljanje daskom.

3.1. Upravljanje zmajem

Svi suvremeni zmajevi spojeni su s jedriličarem pomoću četiri ili pet kontrolnih niti, pri čemu ako postoji peta nit ona služi samo za sigurnosne svrhe kako bi se omogućilo brže postavljanje zmaja u položaj s minimalnim aerodinamičkim silama. Peta nit pri normalnom radu zmaja nije napeta pa zmaj možemo promatrati kao da nje nema.

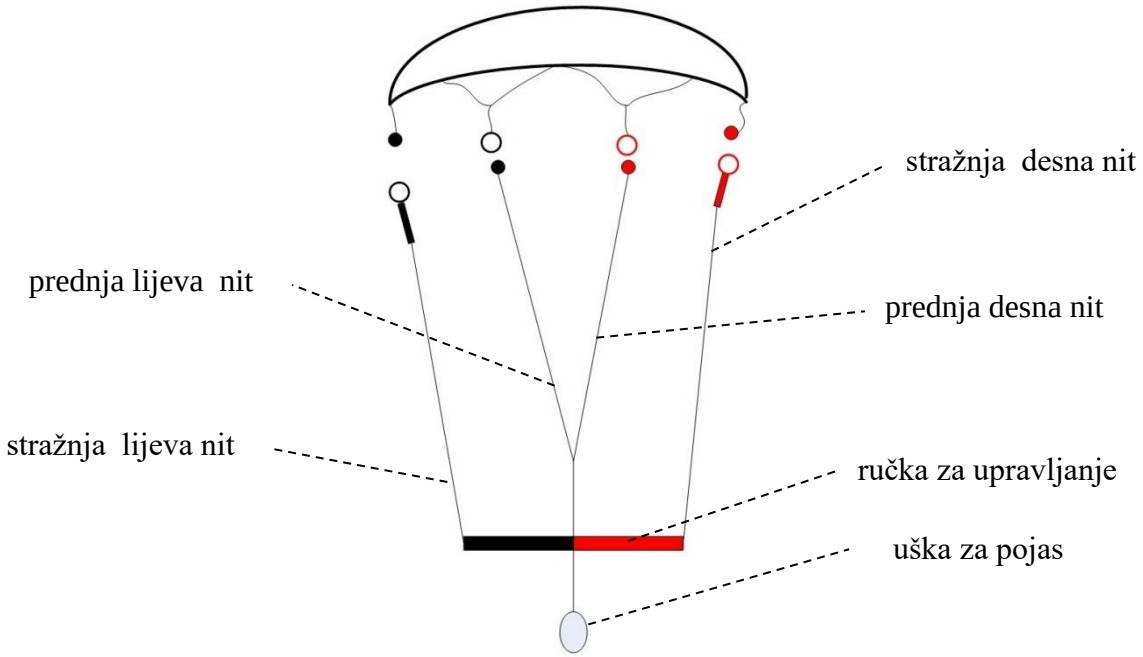


Slika 17. Položaj hvatišta kontrolnih niti na zmaju [19]

Slika 17 pokazuje položaj hvatišta kontrolnih niti na zmaju pa tako razlikujemo prednje i zadnje linije gdje je kao prednja strana definirana ona preko koje fluid dolazi do zmaja, te lijeve i desne linije koje su određene iz perspektive jedriličara.

Otpuštanjem stražnjih niti smanjuje se kut nastrujavanja fluida na tijelo zmaja što rezultira smanjenjem aerodinamičke sile uzgona, dok potezanjem stražnjih niti kut nastrujavanja se povećava te sila uzgona raste. Prednje linije preuzimaju veći dio ostvarenih sila te su kao što pokazuje Slika 17 prije prihvata na zmaj razgranate kako ne bi dolazilo do velikih deformacija tijela zmaja uslijed njegove male krutosti. Velike deformacije zmaja imaju za posljedicu promjenu aerodinamičkih sila što otežava upravljanje nad zmajem pa se pokušavaju izbjeći.

Potezanjem samo jedne od stražnjih niti zmaj se uvija te na toj strani zmaja gdje je nit potegnuta povećava se kut nastrujavanja fluida pa se i aerodinamičke sile povećavaju. Razlika u sili uzgona translatira zmaj prema onoj strani na kojoj je linija potegnuta, a sa stanovišta upravljanja zanimljivije je to da se uslijed razlike u sili otpora zmaj rotira oko osi koja spaja središte zmaja i jedriličara i to tako da zmaj skreće u onu stranu na kojoj je linija potegnuta. Nakon što je zmaj promijenio svoju orijentaciju u odnosu na vjetar nastavlja se gibati dok ne postigne novi ravnotežni položaj

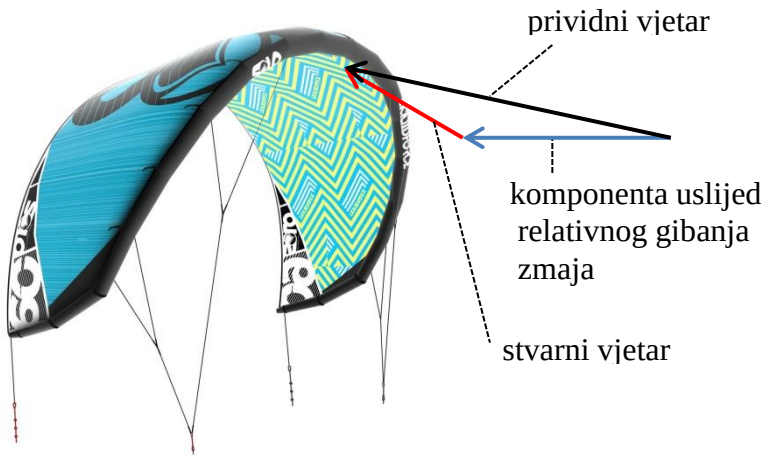


Slika 18. Tipični izgled ručke za upravljanje i raspored kontrolne užadi suvremenog zmaja [20]

Na slici [Slika 18] prikazana je uška za pojas koja omogućava jedriličaru jednostavno spajanje i odspajanje prednjih niti na trapezni pojas. Također vidimo ručku za upravljanje koja olakšava jedriličaru prijenos ručne sile na stražnje kontrolne niti. Ručka za upravljanje nije spojena s prednjim nitima već klizi po njima s ograničenim pomakom, što omogućava da prilikom ispuštanja kontrolne ručke iz ruku ona ostane dohvatljiva. Dakle prednje niti spojene su fiksno za trapezni pojas, a stražnje niti upravljaju se rukama.

Osim promjene kuta nastrujavanja fluida na zmaj pomoću stražnjih linija, jedriličar je u mogućnosti kratkotrajno manipulirati i s brzinom nastrujavanja fluida na zmaj („prividni vjetar“) relativnim gibanjem zmaja u odnosu na svoj položaj što uslijed dugačkih kontrolnih linija rezultira značajnom promjenom sile koju zmaj ostvaruje. Navedeno je dio upravljanja zmajem pri kitefoilingu jer kao što je pokazano rezultatima u narednim poglavljima sile

otpora pri stacionarnom gibanju daske nisu velike pa se pri pokretanju iz stanja mirovanja za što je potrebna veća sila koristi ovaj nestacionaran efekt.



Slika 19. Prikaz principa prividnog vjetra na zmaju [19]

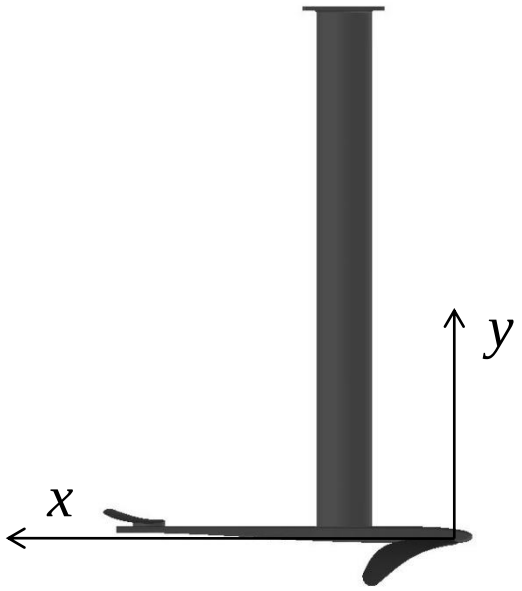
Na slici [Slika 19] prikazan je vektorski zbroj komponenata koje čine prividni vjetar tj. onaj koji zmaj osjeti u svom koordinatnom sustavu. Stvarni vjetar označava gibanje zraka u odnosu na mirujuću okolinu. Ovdje se pretpostavlja da jedriličar miruje u odnosu na okolinu, što i jest slučaj kada se jedriličar korištenjem efekta prividnog vjetra želi pokrenuti iz vode. Relativno gibanje zmaja u odnosu na jedriličara je sferno gibanje čiji radijus odgovara kontrolnim linijama pa je prema tome komponenta prikazana na slici okomita na njih.

3.2. Upravljanje daskom

Upravljanje daskom podrazumijeva sve aktivnosti jedriličara s ciljem da se daska:

- kreće u željenom smjeru,
- održava željenu visinu iznad vode,
- održava željeni bočni nagib.

Za opisivanje položaja daske koristit će se desni pravokutni koordinatni sustav sa središtem koje se nalazi u ravnini simetrije geometrije foila na prednjem rubu prednjeg krila, pri čemu je *z*-os okomita na ravninu simetrije, a *x*-os ostaje vodoravna[Slika 20].



Slika 20. Koordinatni sustav za opisivanje položaja daske

Položaj kada foil, a samim time i daska stoji vodoravno prikazan je slikom [Slika 20] pa će se gore navedene aktivnosti opisati za taj slučaj. Pri naginjanu daske princip rada ostaje isti ali se stvar treba promatrati iz zakrenutog koordinatnog sustava.

Jedriličar održava željeni smjer gibanja zakretanjem daske oko *y*-osi, pri čemu mora voditi računa da ne naruši svoju ravnotežu primarno oko *x*-osi jer se djelovanje hidrodinamičkih sila kojima upravlja nalazi na značajnoj udaljenosti u odnosu na njegovo težište. Za stvaranje momenta oko *y*-osi potrebnog za zakret jedriličar ima na raspolaganju korištenje ograničenog stabiliteta koji mu daje vučna sila u zmaju.

Za održavanje željene visine daske iznad vode jedriličar utječe prvenstveno na nagib daske oko *z*-osi, čime utječe na ostvarenu uzgonsku silu na foilu što integralnim djelovanjem dovodi do pomaka daske po *y-osi.* Za ostvarivanje ovog pomaka jedriličar ima na raspolaganju vlastitu težinu, a moment može prenijeti različitom raspodjelom na stopala koja se nalaze u raširenom stavu.

Za održavanje željenog bočnog nagiba oko *x*-osi jedriličar ima na raspolaganju primarno vučnu silu u zmaju kojom može upravljati na način prikazan u prethodnom poglavlju. Kao sekundarno rješenje preostaje mu „izmicanje“ daske ispod sebe skretanjem kako bi svoju težinu iskoristio za stvaranje momenta oko *x*-osi. Za ovo drugo rješenje na raspolaganju mu je ograničeni moment koji može prenijeti slobodno oslonjenim stopalima na površinu daske. Korištenje ranije spomenutih prihvata za stopala neće se promatrati.

Valjalo bi napomenuti da prethodno navedeni opisi načina upravljanja predstavljaju pojednostavljenje fizikalne prirode, ponajviše zato što nema niti jedne čvrste veze s okolinom, prostorni razmještaj sila je takav da su rezultirajući pomaci i zakreti po osima međusobno spregnuti, sami pomaci i zakreti utječu na aktivne sile, iz navedenog možemo zaključiti da je sustav po prirodi jako nestabilan.

3.3. Pojednostavljeni mehanički model kitefoil jedriličara i daske

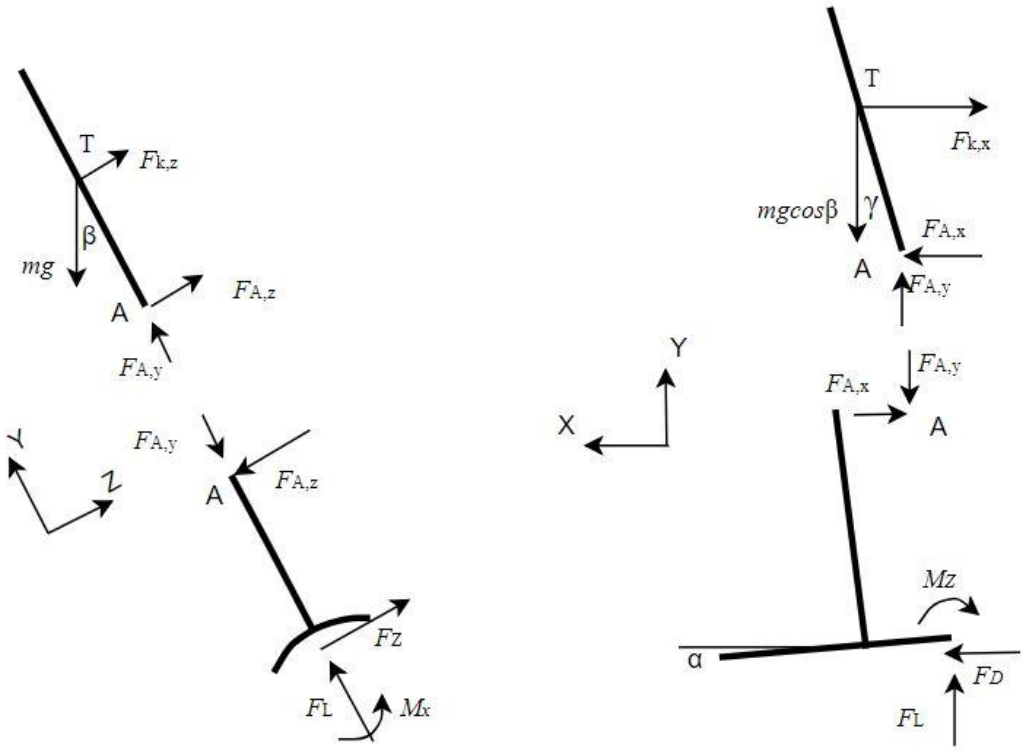
3.3.1. Pretpostavke mehaničkog modela

Za izradu mehaničkog modela poslužit ćemo se s nekoliko pretpostavki koje će ga značajno pojednostaviti uz za potrebe ovog rada prihvatljivu točnost.

- Promatra se gibanje konstantnom brzinom kako prikazanih tijela tako i neprikazanog zmaja, što znači da je sila kojom zmaj djeluje na jedriličara F_k konstantnog iznosa i smjera.
- Sila kojom zmaj djeluje na jedriličara F_k je rezultujuća sila kojom zmaj djeluje na jedriličara što uključuje utjecaj mase zmaja i i kontrolnih linija te aerodinamičke otpore na kontrolnim linijama Za F_k se pretpostavlja da s osi koja predstavlja položaj tijela jedriličara zatvara pravi kut gledano u *yz* ravnini. Također se pretpostavlja da prolazi kroz težište jedriličara, što je blizu realnog slučaja kada se koristi suvremeni trapezni pojas. Kako vučna sila zmaja i težina jedriličara prolaze kroz težište momenti tih sila oko *y*-osi su jednaki nuli tj. $M_Y = 0$.
- Pretpostavlja se da se os koja prolazi težištem jedriličara i težištem kontaktnog pritiska stopala na dasku (točka A) nalazi u ravnini simetrije geometrije foila. Ova pretpostavka opisuje okomit položaj jedriličara u odnosu na površinu daske gledano u *yz* ravnini, te da se stopala nalaze na simetrali daske i ne stvaraju moment oko *x* osi, $z(A) = 0$. Ovu pretpostavka se opravdava time da se u stvarnosti stopala nalaze blizu simetrale, a kontaktnim pritiskom površinom stopala na ravnoj podlozi nije moguće stvoriti značajan moment.
- Sva prikazana tijela smatraju se idealno krutima, pri čemu se masa daske zajedno s foilom zanemaruje.
- Zanemaruju se aerodinamički otpori, na neuronjenom dijelu daske i foila, te na tijelu jedriličara

3.3.2. Opis modela

Prema navedenim pretpostavkama napravljen je prikaz sila [Slika 21] koje djeluju na tijelo jedriličara te dasku za jedrenje zajedno s foilom, jedriličar i daska međusobno su oslobođeni veza u točki A koja predstavlja težište kontaktnog pritiska na dasku.



Slika 21. Prikaz sila koje djeluju u pojednostavljenom mehaničkom modelu

Na slici iznad [Slika 21] su:

α	kut nagiba daske oko *z*-osi u odnosu na horizontalnu ravninu,
β	kut otklona daske oko *x*-osi u odnosu na vertikalnu ravninu,
γ	kut otklona tijela jedriličara oko *z*-osi u odnosu na vertikalnu ravninu,
F_A	reakcijska sila između jedriličara i daske,
F_D	sila otpora gibanja uronjenog dijela daske kroz vodu,
F_L	sila uzgona pri gibanju uronjenog dijela daske,
M_X	moment oko *x*-osi na uronjenom dijelu daske,
M_Y	moment oko *y*-osi na uronjenom dijelu daske,
M_Z	moment oko *z*-osi na uronjenom dijelu daske
m	masa jedriličara.

Na slici iznad, hidrodinamičke reakcije F_{D}, F_{L}, M_{X} i M_{Z} djeluju u ishodištu koordinatnog sustava.

Iz sume momenata oko težišta jedriličara u ravnini *yz* proizlazi

$$\sum M_x = 0 \rightarrow F_{A,\mathrm{Z}} = 0. \quad \textbf{(1)}$$

Iz sume sila u smjeru osi *z* za dasku uz korištenje (1) proizlazi

$$\sum F_{\mathrm{Z}} = 0 \rightarrow F_{\mathrm{Z}} = F_{A,\mathrm{Z}} = 0. \quad \textbf{(2)}$$

Iz sume momenata oko ishodišta koordinatnog sustava u ravnini *yz* za dasku uz korištenje (2) proizlazi

$$\sum M_x = 0 \rightarrow M_X = -F_{A,\mathrm{Z}} \cdot \triangle y = 0. \quad \textbf{(3)}$$

Izrazi (2), (3) i pretpostavka $M_{\mathrm{y}} = 0$ pokazuju da su uz ovakave pretpostavke hidrodinamičke sile simetrične s obzirom na *xy* ravninu. Uz simetričnost uronjene geometrije možemo zaključiti da je i slika strujanja simetrična, valja napomenuti da se ovdje ne uzima u obzir utjecaj blizine slobodne površine.

Iz sume sila u smjeru osi *y* za jedriličara proizlazi

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_{A,\mathrm{y}} = mg\cos\beta. \quad \textbf{(4)}$$

Iz sume sila u smjeru osi *y* za dasku uz korištenje (4) proizlazi

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_L = F_{A,\mathrm{y}} = mg\cos\beta. \quad \textbf{(5)}$$

Dobiveni izraz omogućuje nam jednostavan izračun potrebnih vrijednosti F_{L} za održavanje stacionarne vožnje uz navedene pretpostavke.

Iz sume sila u smjeru osi *x* za jedriličara proizlazi

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F_{\mathrm{k},x} = F_{A,x}. \quad \textbf{(6)}$$

Iz sume sila u smjeru osi *x* za dasku uz korištenje prethodnog izraza proizlazi,

$$\sum F_x = 0 \rightarrow F_D = F_{\mathrm{A},x} = F_{\mathrm{k},x}, \quad \textbf{(7)}$$

što nam ukazuje na ravnotežu aerodinamičkih i hidrodinamičkih sila u smjeru vožnje.

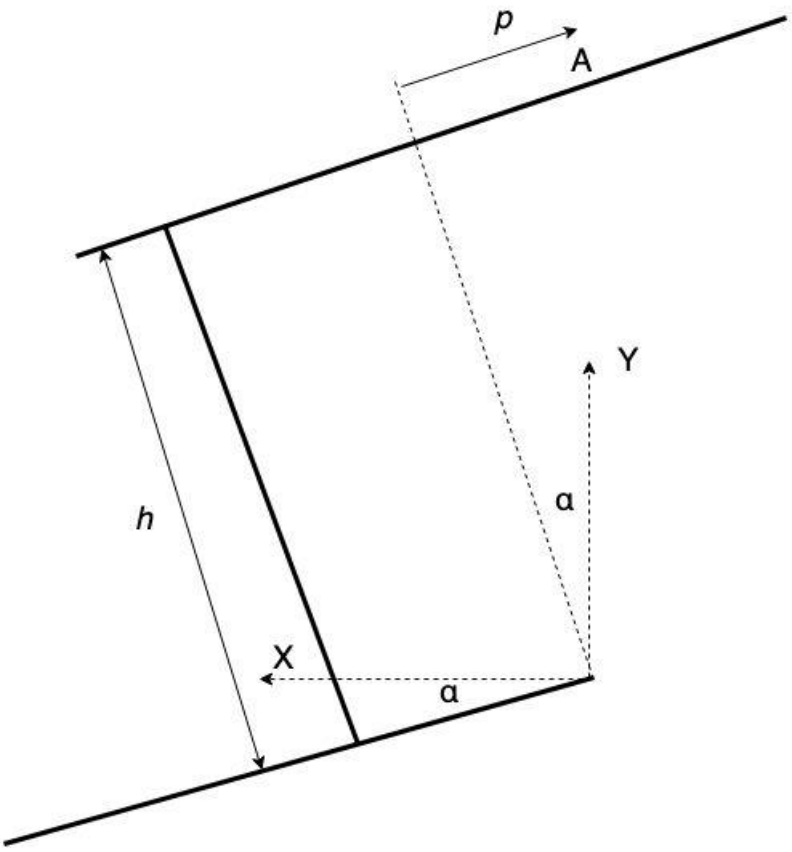
Iz sume momenata oko točke A u ravnini *xy* za dasku proizlazi

$$\sum M_z = 0 \rightarrow M_z - F_L \cdot x(\mathrm{A}) + F_D \cdot y(\mathrm{A}) = 0. \quad \textbf{(8)}$$

U gornjem izrazu prema prethodnoj slici [Slika 21] članovi F_{L} i F_{D} djeluju u ishodištu koordinatnog sustava daske, navedeno u stvarnosti nije slučaj pa je iz tog razloga dodan

moment M_Z koji odgovara momentu tih hidrodinamičkih sila u odnosu na ishodište koordinatnih sila.

Pri numeričkoj simulaciji članovi F_L i F_D računaju se numeričkim integriranjem tlaka po čitavoj uronjenoj površini daske u odgovarajućim smjerovima. Moment M_Z računa se numeričkim integriranjem momenta kojeg tlak ostvaruje oko osi z po čitavoj uronjenoj površini daske.



Slika 22. Skica položaja točke A

Uz pretpostavku da je gornja površina daske u ravnini simetrije paralelna sa horizontalnim nosačem krila, koordinate točke A mogu se prema slici [Slika 22] napisati kao

$$x(\mathrm{A}) = h\sin\alpha - p_A\cos\alpha, \qquad \textbf{(9)}$$

$$y(\mathrm{A}) = h\cos\alpha + p_A\sin\alpha \qquad \textbf{(10)}$$

gdje je

h visina gornje površine daske u odnosu na ishodište koordinatnog sustava daske,

p_A p koordinata točke A duž gornje površine daske.

Uvrštavanjem (9) i (10) u (8) te sređivanjem izraza po p_A proizlazi

$$p_A = \frac{M_Z - F_L h \sin\alpha + F_D h \cos\alpha}{-F_D \sin\alpha - F_L \cos\alpha}. \quad \textbf{(11)}$$

Pomoću izraza (11) možemo za poznatu visinu površine daske *h*, računanjem hidrodinamičkih sila odrediti položaj točke A za pojedini kut α i uvjete strujanja. Promjena položaja točke A daje nam informaciju o upravljivosti daske.

4. Matematički model

Matematički model za ovu numeričku simulaciju zasniva se na metodi konačnih volumena koja je ugrađena u računalni program Fluent koji je sastavni dio programskog paketa Ansys. Diskretizacija se vrši podjelom područja na određeni broj konačnih volumena gdje se volumenski i površinski integrali zamjenjuju približnim vrijednostima. Tako se za svaki volumen dobije diskretizirana algebarska jednadžba u kojoj su nepoznate varijable smještene u središnju točku i susjedne točke tog konačnog volumena.

Strujanje fluida opisano je osnovnim zakonima fizike, od kojih se ovdje koriste zakon očuvanja mase iz kojeg se izvodi jednadžba kontinuiteta koja govori da je brzina promjene mase unutar materijalnog volumena jednaka nuli i zakon očuvanja količine gibanja koji glasi: brzina promjene količine gibanja materijalnog volumena jednaka je sumi vanjskih masenih i površinskih sila koje djeluju na materijalni volumen.

4.1. Skup jednadžbi *k-ε* modela turbulencije za visoke vrijednosti *Re* [21]

Skup jednadžbi *k-ε* modela turbulencije za nestlačivo strujanje čine jednadžba kontinuiteta

$$\frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_j} = 0 \tag{12}$$

jednadžba količine gibanja

$$\frac{\partial\left(\rho\bar{v}_i\right)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\overline{v_j}\overline{v_i})}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\mu_t)\left(\frac{\partial \overline{v_j}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x_j}\right)\right] \tag{13}$$

gdje $\overline{p}$ označuje efektivni tlak. a koeficijent turbulentne viskoznosti je definiran izrazom:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\bar{k}^2}{\bar{\varepsilon}}. \tag{14}$$

Konačni oblik modelske jednadžbe za kinetičku energiju turbulencije je:

$$\frac{\partial\left(\rho\bar{k}\right)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\overline{v_j}\bar{k})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma^k}\right)\frac{\partial \bar{k}}{\partial x_j}\right] + G - \rho\bar{\varepsilon} \tag{15}$$

gdje je *G* generacija kinetičke energije turbulencije i glasi:

$$G = \mu_t\left(\frac{\partial \overline{v_j}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x_j}\right)\frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x_j} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \overline{v_j}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x_j}\right)\left(\frac{\partial \overline{v_j}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x_j}\right) = 2\mu_t D_{ij}^2. \tag{16}$$

Konačni oblik modelske jednadžbe za disipaciju kinetičke energije turbulencije je:

$$\frac{\partial\left(\rho\bar{\varepsilon}\right)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\overline{v_j}\bar{\varepsilon})}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma^{\varepsilon}}\right)\frac{\partial\bar{\varepsilon}}{\partial x_j}\right]+C_1G\frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{k}}-C_2\rho\bar{\varepsilon}\frac{\bar{\varepsilon}^2}{\bar{k}}. \qquad \textbf{(17)}$$

U korištenom modelu turbulencije za slučaj visokih vrijednosti *Re* koeficijenti su konstante, a njihove vrijednosti prema [22] dane su sljedećom tablicom.

Tablica 2. Vrijednosti konstanti turbulencijskog modela [22]

C_μ	σ^k	σ^ε	C_1	C_2
0,09	1,0	1,3	1,44	1,92

4.2. Strujanje u blizini čvrste stijenke (zidne funkcije)

Pri rješavanju prikazanog *k-ε* modela turbulencije trebamo poznavati rubne uvjete (vrijednosti varijabli na granici ili protok varijabli kroz granicu područja proračuna) za komponente brzine, kinetičku energiju turbulencije i disipaciju kinetičke energije turbulencije. Naime, navedeni model turbulencije vrijedi za visoke vrijednosti *Re* tj. u području u kojem je koeficijent turbulentne viskoznosti puno veći od koeficijenta molekularne viskoznosti. Ako promatramo opstrujavanje ravne ploče tada model neće biti primjenjiv u laminarnom graničnom sloju, kao i u tranzijentnom području u kojem turbulentna viskoznost još uvijek ne dominira. Kao što je rečeno, definirani *k-ε* model vrijedi samo za razvijeno turbulentno područje. [21]

Naime poznato je da se viskozni fluid lijepi uz stijenku, tako da je brzina fluida (dakle i pulsirajuća brzina) na stijenci jednaka nuli. Udaljavanjem od stijenke turbulentne pulsacije jačaju, ali uz samu stijenku su one male, što znači da je mala i turbulentna viskoznost , pa u tom području neće vrijediti niti definirani *k-ε* model turbulencije, o čemu treba voditi računa pri njegovoj primjeni. Postoje dvije mogućnosti za rješenje ovog problema: [21]

a) U neposrednoj blizini stijenke formulirati „specijalni" model turbulencije koji vrijedi za niske vrijednosti Re_t.

b) Premostiti područje u kojem ne vrijedi *k-ε* model turbulencije za visoke vrijednosti Re_t definiranjem rubnih uvjeta na rubu do kojeg još uvijek vrijedi model (definiranjem "unutarnjih" rubnih uvjeta).

Pri izradi ove simulacije odabran je pristup pod b) koji je ugrađen kao opcija u programu Fluent. Jednadžbe koje se pritom koriste su prema [23]:

$$U^+ = \frac{1}{\kappa}\ln(Ey^+), \tag{18}$$

$$U^+ \equiv \frac{U_P C_\mu^{0,25} k_P^{0,5}}{\tau_\omega / \rho}, \tag{19}$$

$$y^+ \equiv \frac{\rho C_\mu^{0,25} k_P^{0,5} y_P}{\mu}. \tag{20}$$

Pri čemu su :

κ - von Karman-ova konstanta (= 0,4187),

E - empirijska konstanta (= 9,793),

U_p - srednja vrijednost brzine fluida u točki P ,

k_p - kinetička energija turbulencija u točki P ,

y_p - udaljenost točke P od zida,

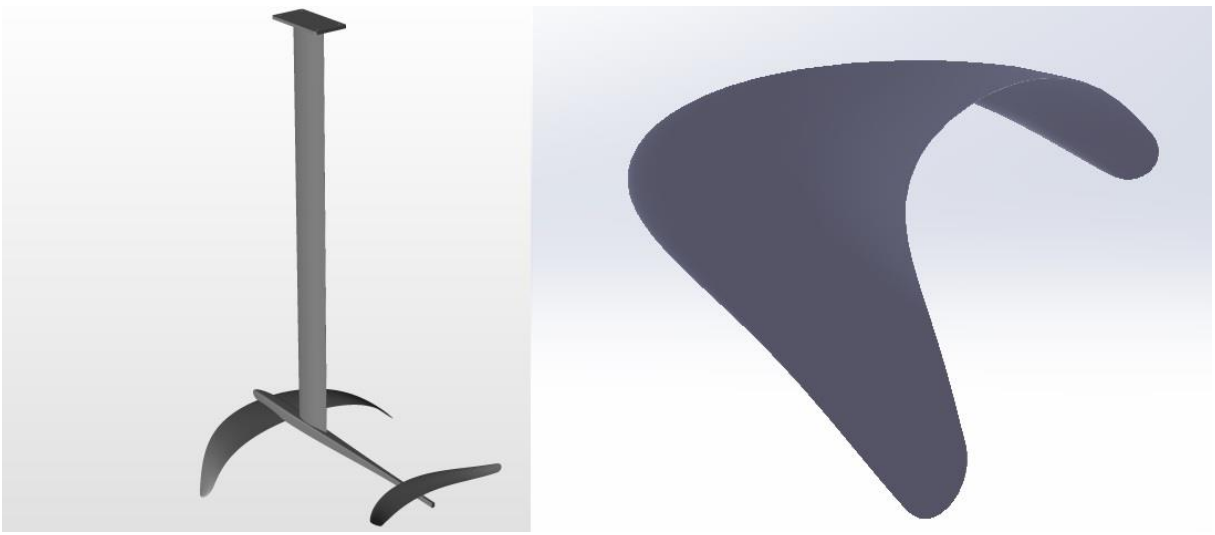
μ - dinamička viskoznost fluida.

5. Simulacija strujanja oko izdvojenog prednjeg krila

Ako zanemarimo lokalni utjecaj horizontalnog nosača, za prednje krilo možemo ustanoviti da se ono nalazi u neporemećenoj struji fluida, što znači da s dovoljnom točnošću možemo odrediti hidrodinamičke sile koje se na njemu javljaju bez simuliranja strujanja oko ostalih površina.

5.1. Modeliranje područja proračuna i prostorna diskretizacija

Model geometrije uronjenog dijela daske preuzet je iz [24]. Predmet ove simulacije jest samo prednje krilo prikazano na slici [Slika 23] desno, naime glavnina sile uzgona ostvaruje se preko njega dok ostatak konstrukcije služi za stabilizaciju i povećanje upravljivosti pri vožnji. Zbog načina na koji se ostvaruje stabilizirajući efekt pomoću stražnjeg krila ono pri stacionarnoj vožnji proizvodi uzgon koji je značajno manjeg iznosa od uzgona kojeg ostvaruje prednje krilo pa se u okviru ove simulacije neće promatrati, već je u fokusu strujanje oko prednjeg krila. Dakako da stražnje krilo kao i ostatak uronjene konstrukcije ostvaruju otpore pri strujanju medija oko njih međutim u okviru ove simulacije oni se neće promatrati.



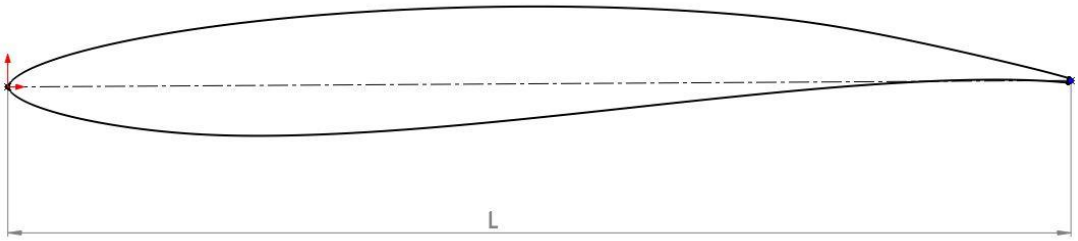
Slika 23. Geometrija uronjenog dijela daske [24]

Zbog činjenice da geometrija ima jednu vertikalnu uzdužnu ravninu simetrije te da je neporemećeno strujanje paralelno s tom istom ravninom simetrije (vidjeti opis uz izraz (3)) u simulaciji koristi se polumodel prednjeg krila prikazan na slici [Slika 24] kako bi se smanjio potrebni broj konačnih volumena, a time i vrijeme potrebno za proračun. Svi navedeni

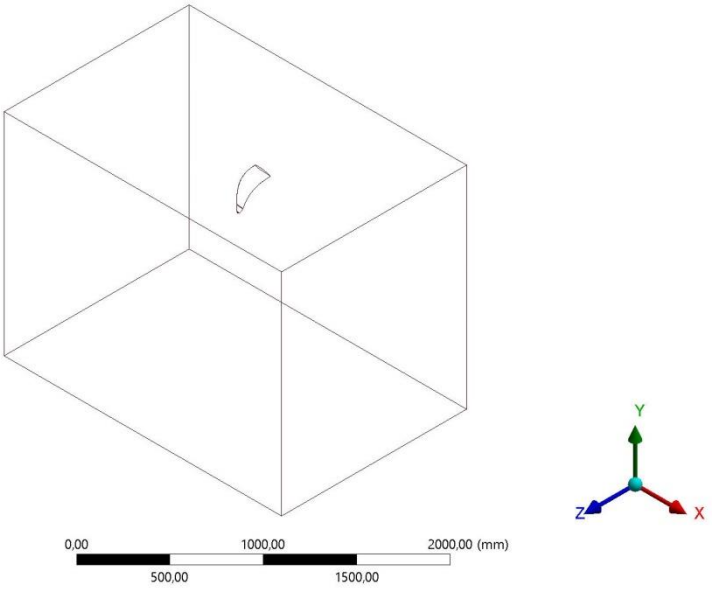
postupci u ovom poglavlju napravljeni su u programskim paketima Solidworks i Ansys Academic Student R19.2



Slika 24. Polumodel prednjeg krila



Slika 25. Poprečni presjek prednjeg krila u vertikalnoj ravnini simetrije



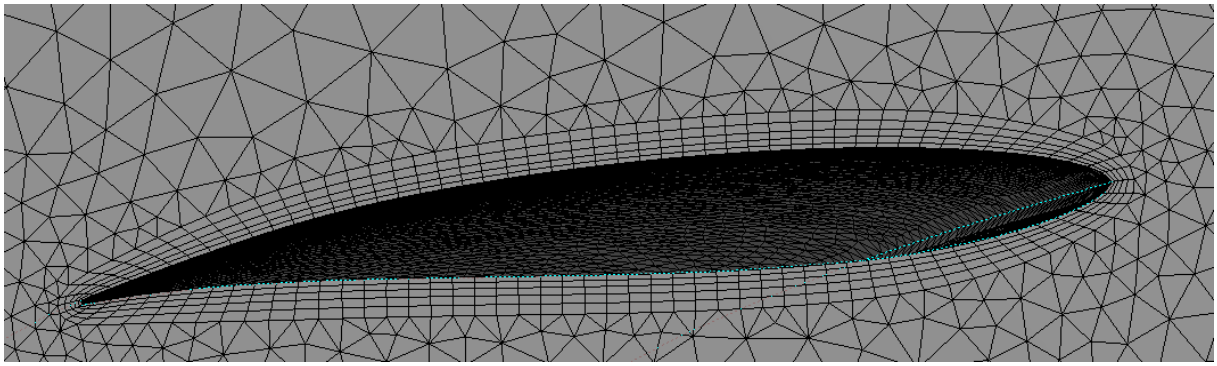
Slika 26. Prostorna domena simulacije prednjeg krila

Slika 26 prikazuje proračunsku domenu koja je oblika kvadra te su njene dimenzije dane tablicom [Tablica 3] u kojoj su u desnom stupcu dane vrijednosti u odnosu na dužinu izvodnice profila prikazanog slikom [Slika 25].

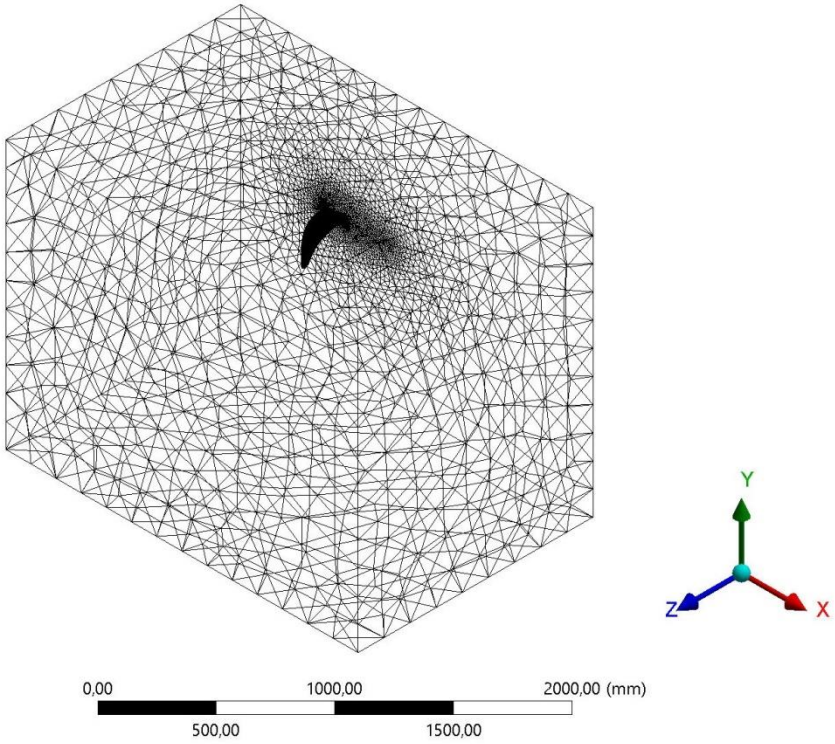
Tablica 3. Dimenzije domene proračuna

	[m]	relativno *x*/*L*
ukupna dužina domene (u smjeru osi *x*)	2,1	18,1
udaljenost ispred krila (u smjeru osi *x*)	0,5	4,3
širina domene (u smjeru osi *z*)	1,4	12,1
visina domene (u smjeru osi *y*)	1,6	13,8
L, duljina izvodnice poprečnog presjeka	0,116	1,0

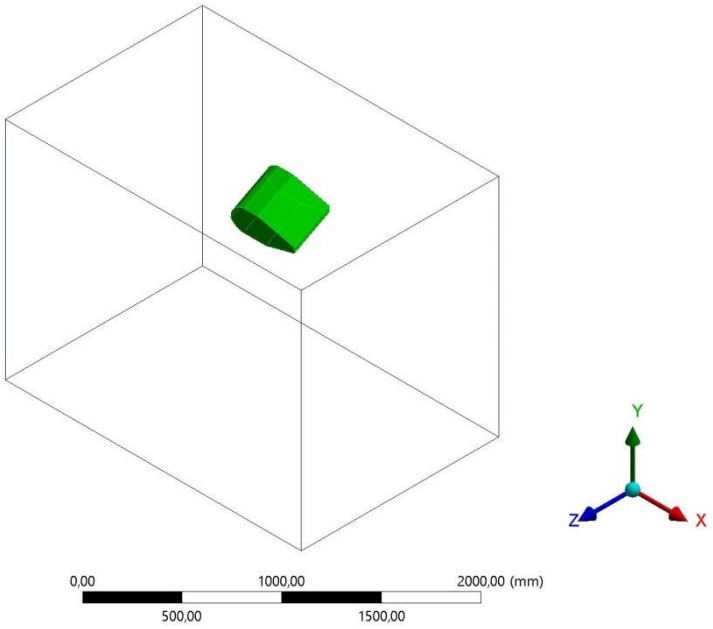
Prostorna diskretizacija područja proračuna provedena je pomoću tetraedarskih i trokutastih prizmatičnih konačnih volumena. Mreža je najgušća u blizini krila, a prorjeđuje se udaljavanjem od njega, kako prikazuju slike:[Slika 27], [Slika 28] i [Slika 29]. Razlog tome je veliki iznos gradijenata koji se očekuje u blizini površine krila gdje je potrebna gušća mreža kako bi se dovoljno dobro opisale promjene koje se odvijaju u tom području. Provedbom ovog postupka diskretizacije, područje proračuna je diskretizirano pomoću 505153 (podatak za jednu izdvojenu vrijednost parametra α) konačna volumena što je jako blizu ograničenja studentske verzije programskog paketa koja iznosi 512000 konačnih volumena. Prema tome daljnje progušćivanje mreže unutar ovog programskog paketa nije moguće.



Slika 27. Prizmatični konačni volumeni uz površinu krila dobiveni korištenjem opcije „inflation“



Slika 28. „Žičani“ prostorni prikaz mreže konačnih volumena po granicama domene



Slika 29. Korištena opcija „Body of influence“

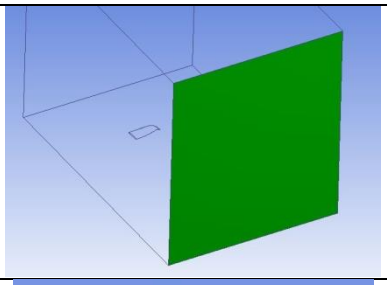
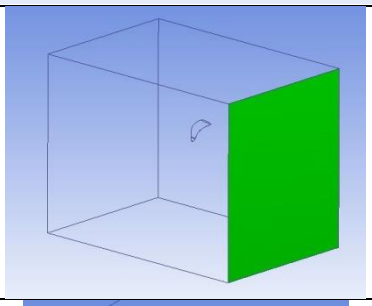
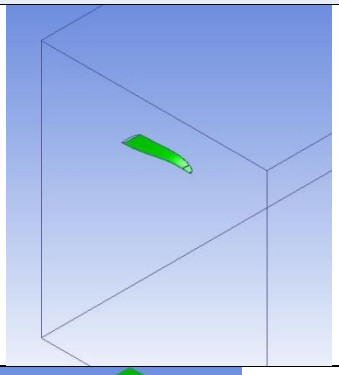
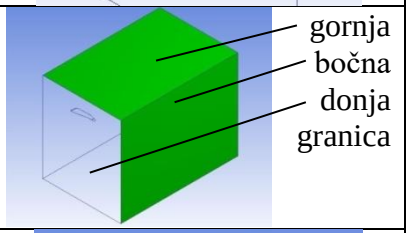
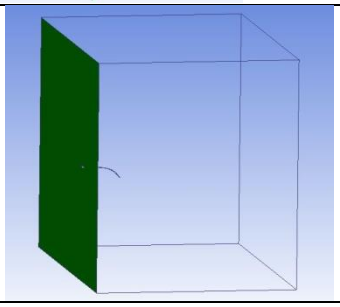
5.2. Postavke simulacije

Prethodno opisani model preuzet je u procesorski dio programskog paketa Ansys, program Fluent, gdje je strujanje definirano kao trodimenzijsko turbulentno nestlačivo i stacionarno. Odabran je viskozni model strujanja s konstantnom viskoznosti i konstantnom gustoćom koji su preuzeti iz Fluentove baze materijala. Viskoznost za vodu iznosi $1{,}003 \cdot 10^{-3}$ kg/(ms) dok gustoća vode iznosi 998,2 kg/m^3. Za model turbulencije odabran je standardni k-ε model, gdje su korištene vrijednosti konstanti iz tablice navedene u prethodnom poglavlju [Tablica 2]. Inicijalizacija rješenja napravljena je tako da su vrijednosti koje su zadane na granici domene gdje fluid ulazi usvojene za čitavo područje domene. Odabran je algoritam za rješavanje SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations). Svako rješenje simulacije je dobiveno nakon 300 iteracija korištenjem uzvodne sheme diskretizacije drugog reda pri čemu su se reziduali bili reda veličine 10^{-3} za kontinuitet, a 10^{-6} za brzine.

5.3. Rubni uvjeti

Pregled rubnih uvjeta po svim granicama koje su primijenjene u svim proračunima dan je u tablici [Tablica 4]

Tablica 4. Fizikalni rubni uvjeti korišteni u svim računalnim simulacijama

Ime granice	Rubni uvjet	Prikaz
ULAZ	VELOCITY-INLET, ulaz fluida, zadana ulazna brzina fluida za pojedinu simulaciju te parametri k-ε modela, prema [25] slučaj br.3 Turbulence Intensity = 0,5% , Turbulent Viscosity Ratio = 5	
IZLAZ	PRESSURE-OUTLET, izlaz fluida, zadan tlak fluida p = 0 i parametri k-ε modela prema [25] slučaj br.3 Turbulence Intensity = 0,5% , Turbulent Viscosity Ratio = 5	
POVRŠINA KRILA	WALL, mirujući zid , „No slip“ uvjet, standardne zidne funkcije, ciljana vrijednost za srednji slučaj strujanja po ulaznoj brzini y^+ = 100	
UZDUŽNE GRANICE DOMENE	SYMMETRY, treba napomenuti da se ovaj uvjet odnosi na gornju, bočnu te na donju granicu domene koja ovdje nije naznačena jer grafično sučelje kod odabira promjeni boju samo na strani plohe gdje je normala pozitivna	
RAVNINA SIMETRIJE	SYMMETRY	

5.4. Rezultati

Napravljen je niz simulacija koje se međusobno razlikuju po dva ulazna parametra, brzini v_s koja predstavlja brzinu kojom fluid ulazi u domenu proračuna koja je paralelna s osi x geometrijskog modela i konstantnog je iznosa cijelom površinom ulazne plohe. Njene

vrijednosti mogu se vidjeti u tablici [Tablica 5]. Navedeni raspon vrijednosti odgovara tipičnim vrijednostima brzine koje jedriličar ostvaruje na „kitefoil“ dasci pri ustaljenoj vožnji.

Drugi ulazni parametar je kut α između izvodnice profila krila L i pozitivnog dijela osi x, navedeni kut mjeri se u xy ravnini. I njegov raspon iterativno je prilagođen kako bi se izračunate sile uzgona nalazile u području koje odgovara realnom režimu ustaljene vožnje.

5.4.1. Određivanje orijentacijske vrijednosti sile uzgona na polumodelu krila

Poslužit ćemo se izrazom (5) iz prethodnog poglavlja modificiranim za činjenicu da se ovdje simulira polumodel krila,

$$F_L / 2 = \frac{1}{2} mg \cos \beta. \qquad \textbf{(21)}$$

$F_\mathrm{L}/2$ predstavlja silu uzgona na polumodelu prednjeg krila, a ovdje će se uvećati za 5% kako bi se uzelo u obzir činjenica da stabilizirajući efekt stražnjeg krila ima negativan utjecaj na ukupnu silu uzgona u smjeru osi y. Kako se u ovoj simulaciji zadnje krilo ne uzima u obzir korigirat ćemo očekivanu silu na prednjem krilu, kasnijom simulacijom obaju krila vidjet ćemo koliko se ovakva korekcija pokazala opravdanom. Također se pretpostavlja nagib daske od $\beta = 30°$ u ravnini yz što je primjerena vrijednost pri tipičnoj vožnji. Navedeni nagib nužan je pri vožnji kako bi se uravnotežila sila kojom zmaj djeluje na jedriličara. Odabrana je masa jedriličara $m = 90$ kg, prema tome $F_\mathrm{L}/2$ iznosi:

$$F_L / 2 = 1.05 \frac{1}{2} mg \cos \beta \approx 400\mathrm{N}. \qquad \textbf{(22)}$$

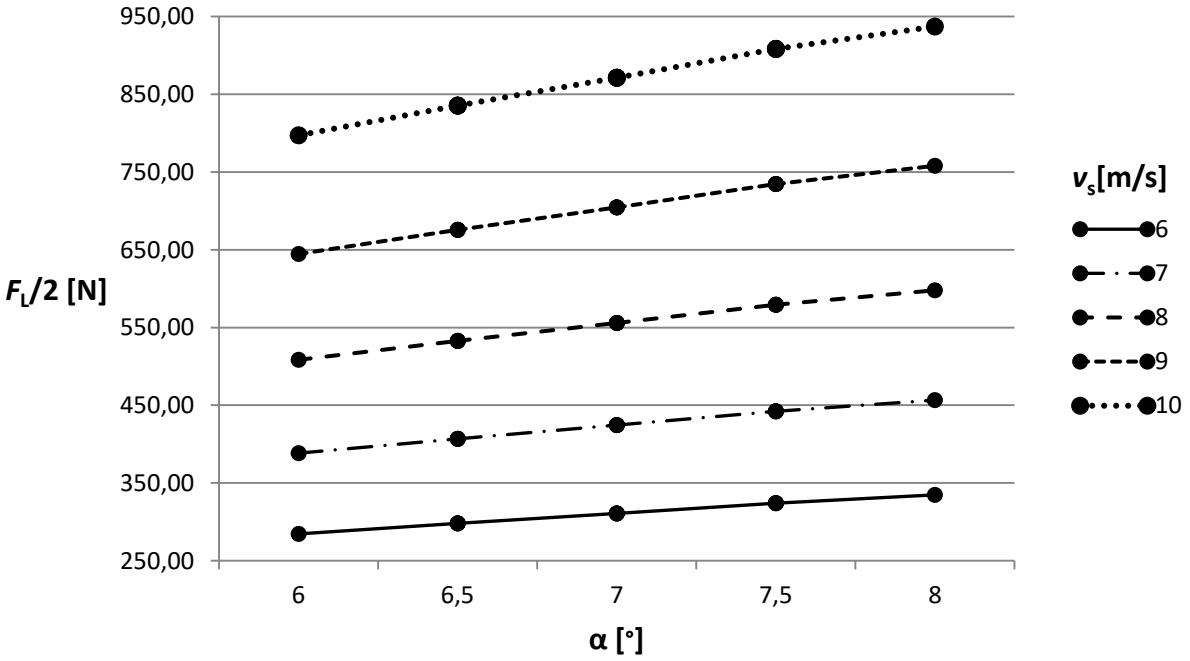
Navedena vrijednost predstavlja orijentacijsku vrijednost sile uzgona na polumodelu krila za idealno stacionarni režim vožnje, za realne vrijednosti sile uzgona očekuju se sile manjih i većih iznosa.

5.4.2. Prikaz i analiza rezultata računalnih simulacija

Narednom tablicom [Tablica 5] su dani numerički rezultati sile uzgona $F_\mathrm{L}/2$ koja djeluje u smjeru osi y za sve vrijednosti ulaznih parametara v_s i α . Koji su zatim prikazani na slici[Slika 30].

Tablica 5. Vrijednosti sile uzgona $F_L/2$ za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida

$F_L/2$ [N]		v_s[m/s]				
		6	7	8	9	10
α [°]	6	284,71	388,57	508,62	644,72	797,35
	6,5	298,20	406,98	532,79	675,66	835,52
	7	311,15	424,66	555,89	704,72	871,55
	7,5	324,39	442,49	579,27	734,64	908,45
	8	334,73	456,71	597,82	757,98	937,22



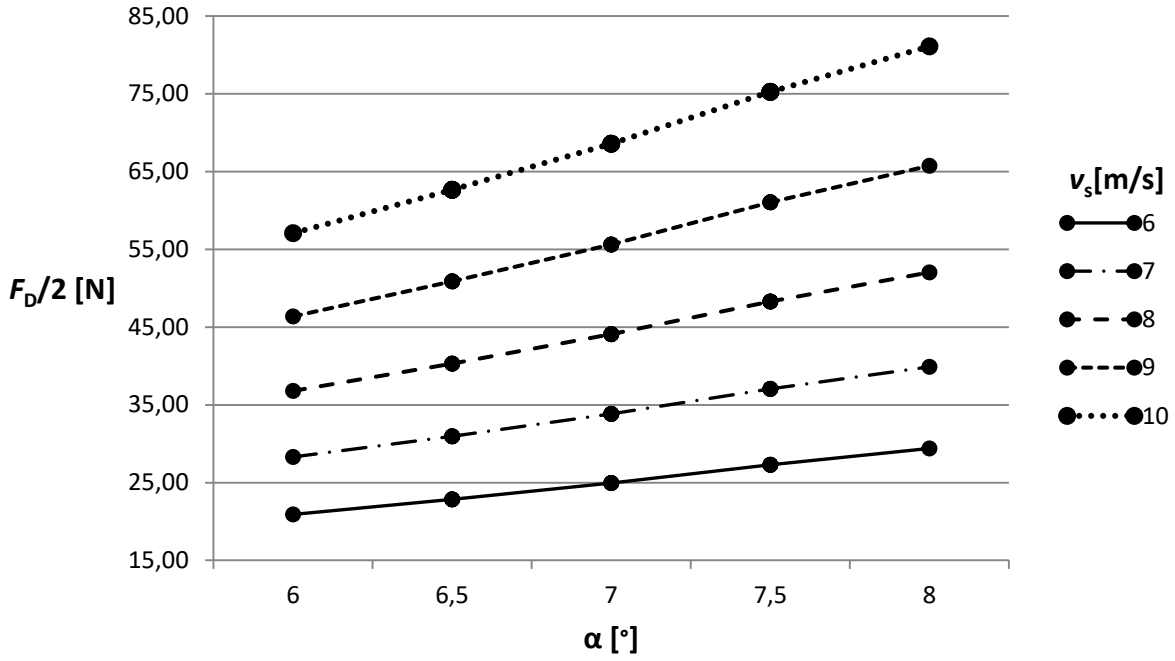
Slika 30. Dijagramski prikaz sile uzgona $F_L/2$ za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida

Na slici [Slika 30] je vidljivo da za različite brzine strujanja povećanjem upadnog kuta strujanja na profil sila uzgona slijedi isti vrlo sličan trend. Pri višim vrijednostima brzine strujanja vidljiva je veća promjena rezultata za različite vrijednosti upadnog kuta strujanja za što se može reći da se poklapa s osjećajem veće osjetljivosti daske na uzdužni nagib pri vožnji većim brzinama.

U tablici [Tablica 6] dani su numerički rezultati sile otpora $F_D/2$ koja djeluje u smjeru osi x za sve vrijednosti ulaznih parametara v_s i α, koji su zatim prikazani slikom [Slika 31].

Tablica 6. Vrijednosti sile otpora $F_D/2$ za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida

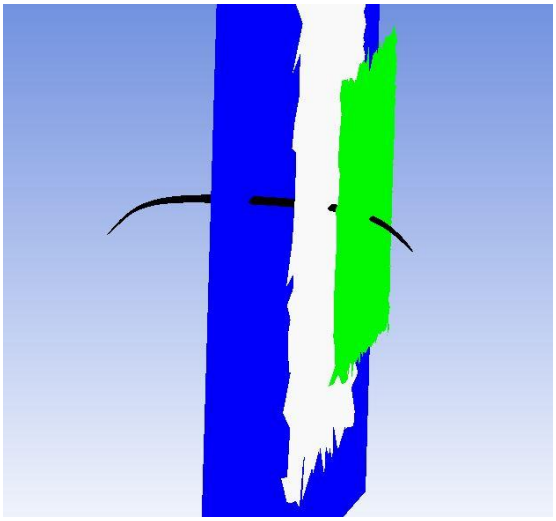
$F_D/2$ [N]		v_s[m/s]				
		6	7	8	9	10
α [°]	6	20,90	28,29	36,79	46,37	57,07
	6,5	22,85	30,97	40,31	50,88	62,66
	7	24,94	33,83	44,07	55,63	68,57
	7,5	27,31	37,04	48,29	61,03	75,25
	8	29,39	39,90	52,02	65,75	81,09



Slika 31. Dijagramski prikaz sile otpora $F_D/2$ za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida

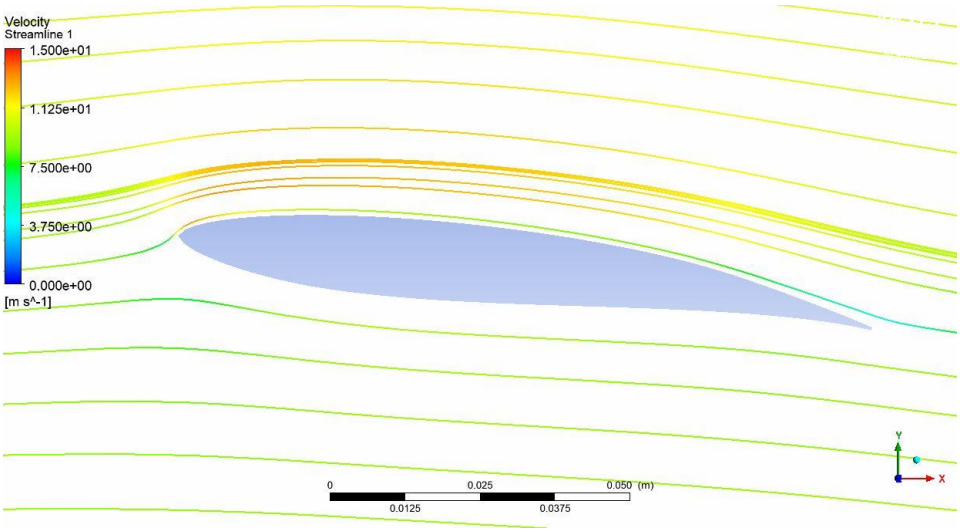
Na slici [Slika 31] je vidljivo da za različite brzine strujanja povećanjem upadnog kuta strujanja na profil sila otpora također slijedi isti vrlo sličan trend. Pri višim vrijednostima brzine strujanja vidljiva je veća ovisnost rezultata o upadnom kutu strujanja odnosno veći nagib krivulje otpora.

Rezultati simulacije su promatrani po područjima gdje su prethodno definirani rubni uvjeti kao što su površina krila i ravnina simetrije geometrijskog modela krila. Dodatno su definirane još dvije ravnine paralelne s ravninom *xy*, a udaljene od nje za polovinu širine polumodela *w* odnosno tri četvrtine širine polumodela kao što se može vidjeti na slici [Slika 32].

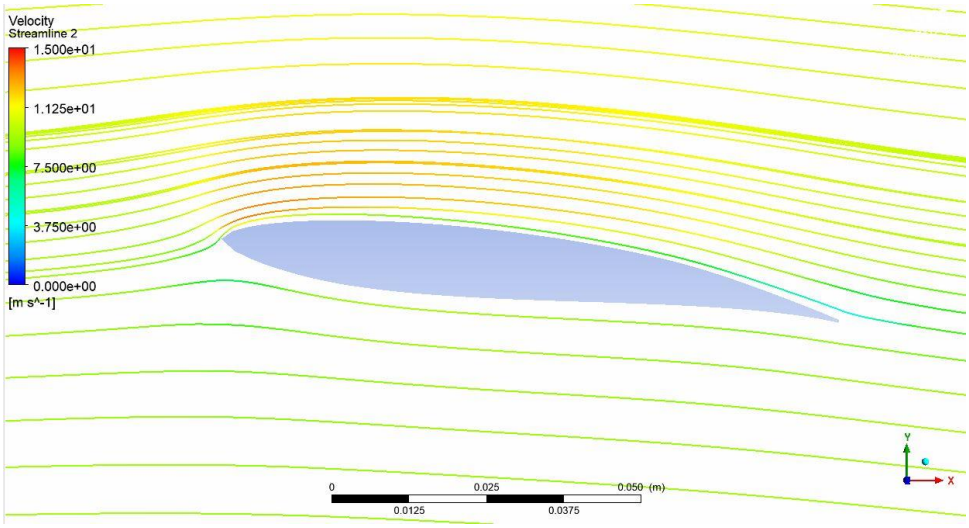


Slika 32. Dodatne ravnine za prikaz rezultata simulacije

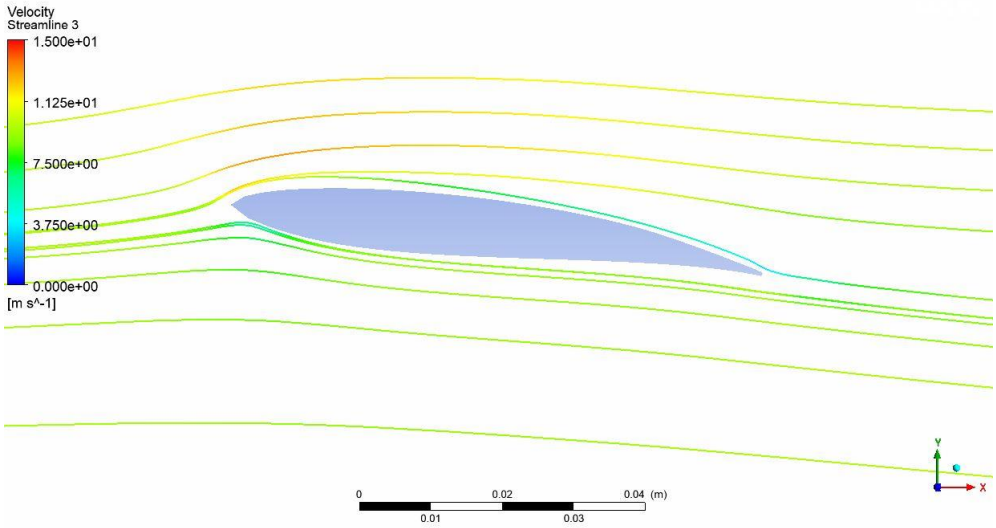
Na slikama [Slika 33, Slika 34, Slika 35] je prikaz strujnica za slučaj najveće brzine i najvećeg upadnog kuta strujanja u ravnini simetrije modela te dvije dodatne prethodno prikazane ravnine.



Slika 33. Strujnice α = 8°, v_s = 10 m/s, ravnina z = 0



Slika 34. Strujnice α = 8°, v_s = 10 m/s, ravnina z = 0,5w

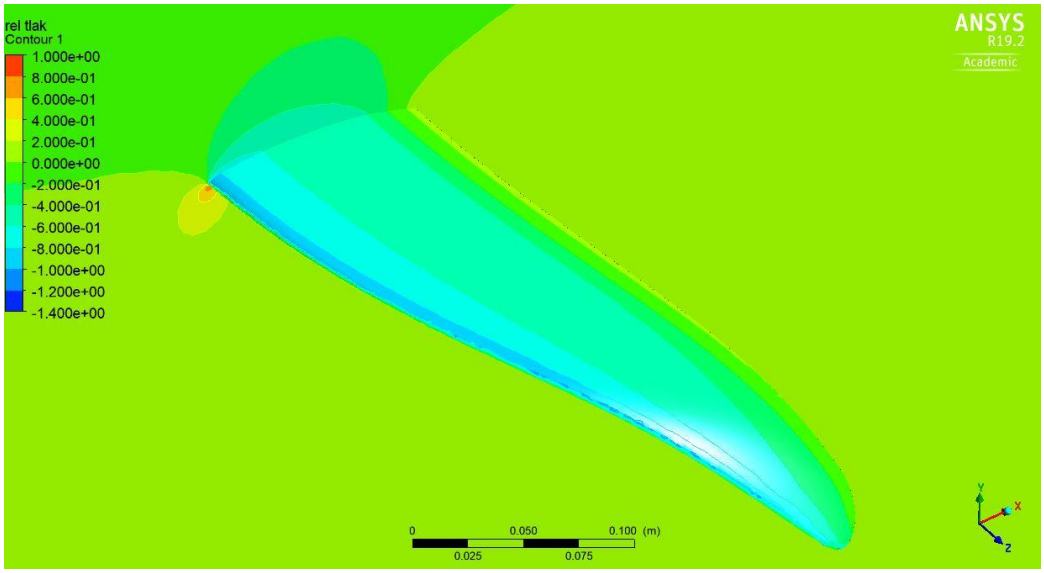


Slika 35. Strujnice α = 8°, v_s=10 m/s, ravnina z = 0,75w

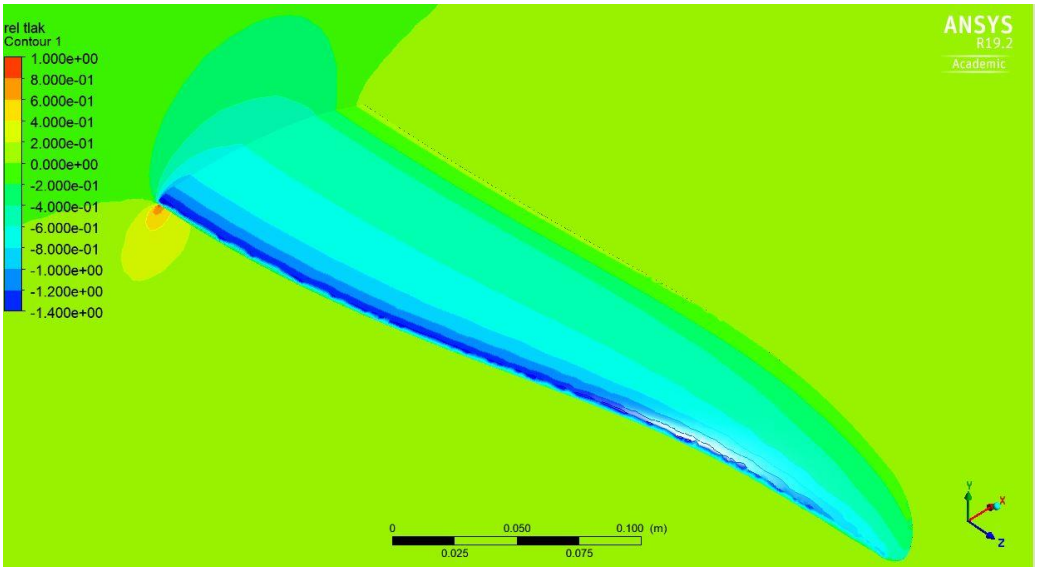
Na slikama [Slika 36, Slika 37, Slika 38, Slika 39] je prikaz polja bezdimenzijskog koeficijenta tlaka za slučaj najveće brzine i najvećeg upadnog kuta strujanja te slučaj najmanje brzine i najmanjeg upadnog kuta strujanja konture su iscrtane po površini krila te u ravnini simetrije kako bi se dobio prostorni dojam raspodjele veličine, gdje je bezdimenzijski koeficijent tlaka definiran kao

$$C_p = \frac{p - p_{izlaz}}{\frac{1}{2}\rho v_s^2}, \tag{23}$$

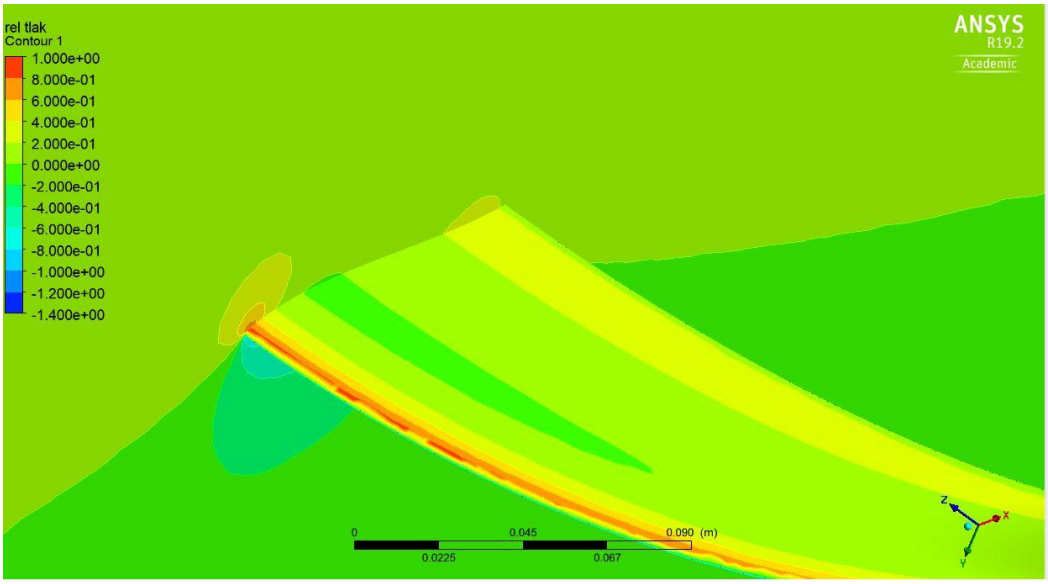
pri čemu se v_s odnosi na brzinu fluida na ulaznoj granici za svaki pojedini slučaj simulacije. Prikazan je pogled s gornje i donje strane krila kako bi se vidjela razlika tlakova po površini krila koja je direktni uzročnik sile uzgona ostvarene na krilu.



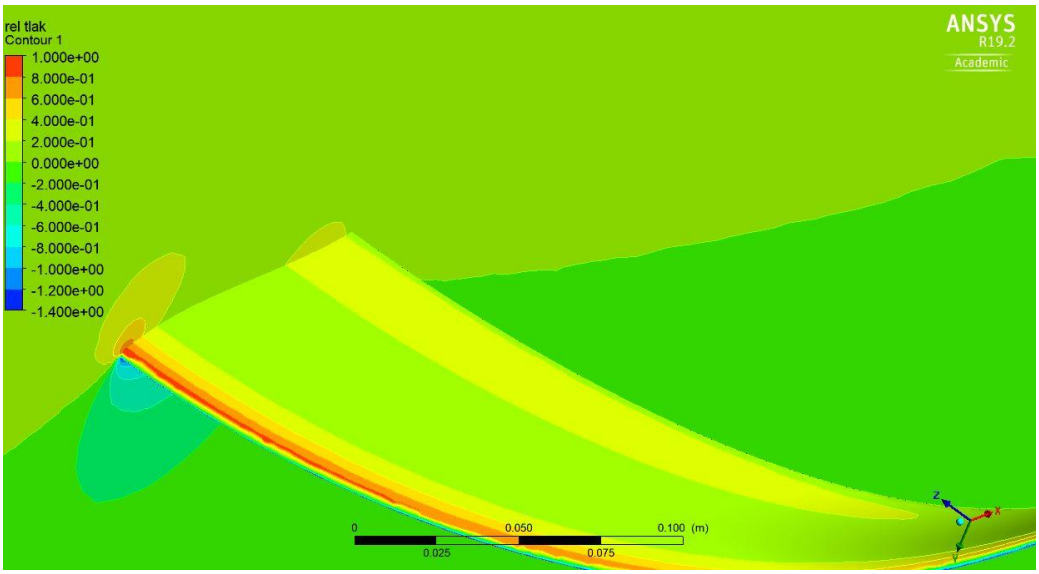
Slika 36. Polje bezdimenzijskog koeficijenta tlaka C_p pogled na gornju stranu krila, α = 6°, v_s = 6 m/s



Slika 37. Polje bezdimenzijskog koeficijenta tlaka C_p pogled na gornju stranu krila, α = 8°, v_s = 10 m/s



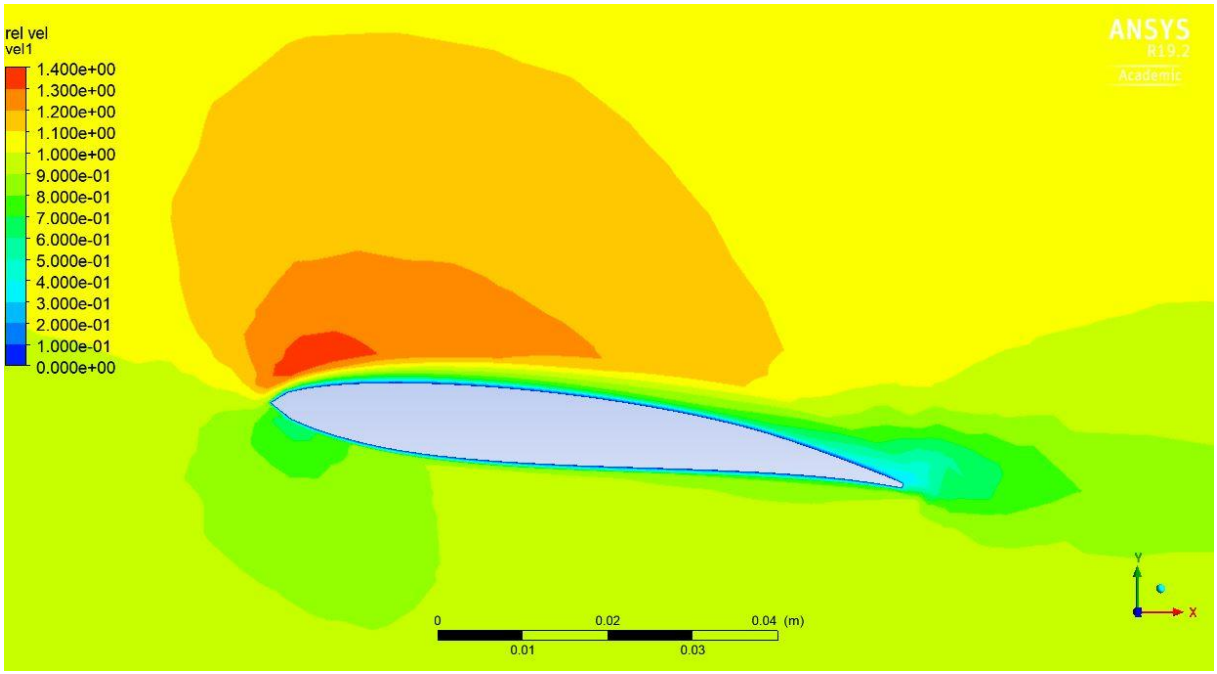
Slika 38. Polje bezdimenzijskog koeficijenta tlaka C_p pogled na donju stranu krila, α = 6°, v_s = 6 m/s



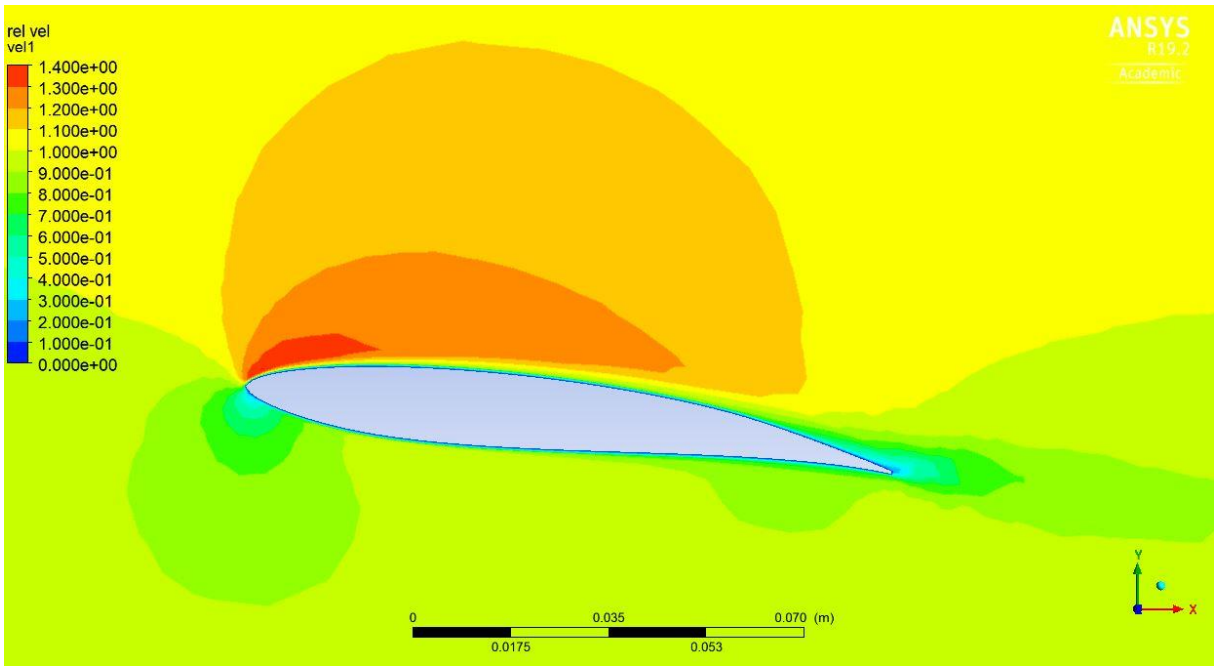
Slika 39. Polje bezdimenzijskog koeficijenta tlaka C_p pogled na donju stranu krila, α = 8°, v_s = 10 m/s

Promatranjem kontura bezdimenzijskog koeficijenta brzine (definiran izrazom ispod) za različite slučajeve mogu se uočiti tri pojave pa su prema tome izdvojena tri para slika, a to su [Slika 40 i Slika 41, Slika 42 i Slika 43, Slika 44 i Slika 45].

$$C_v = \frac{v}{v_s}, \tag{24}$$

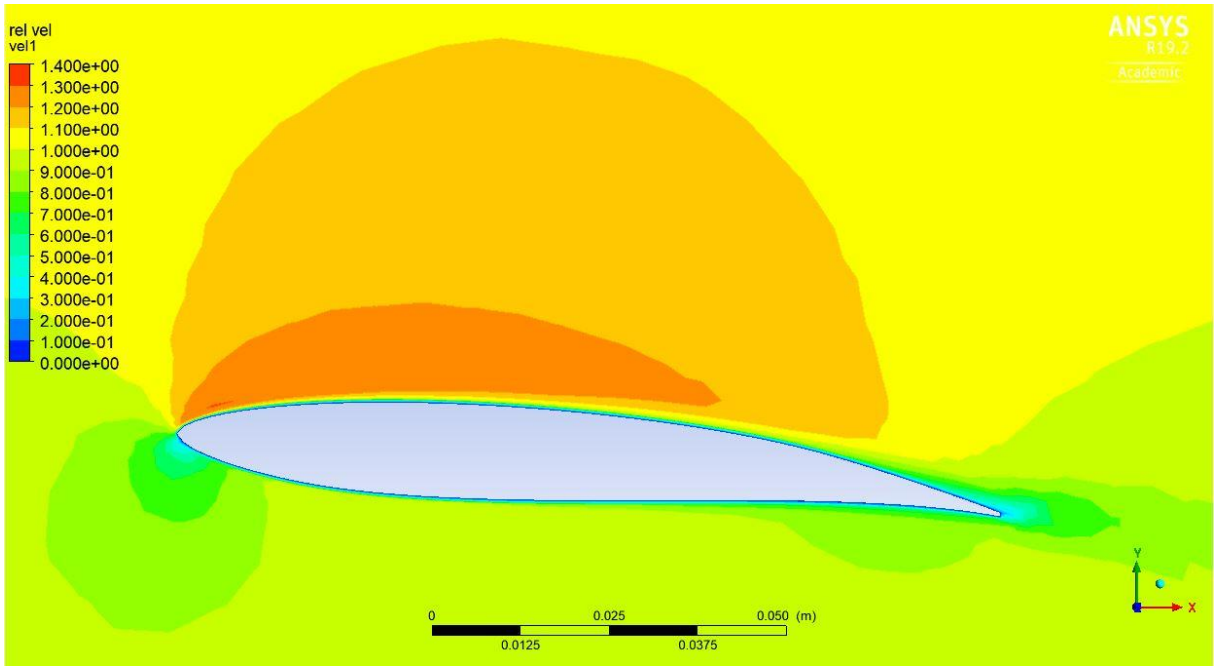


Slika 40. Polje bezdimenzijskog koeficijenta brzine $C_v = v/v_s$, $\alpha = 8°$, $v_s = 10$ m/s, ravnina $z = 0{,}75\ w$

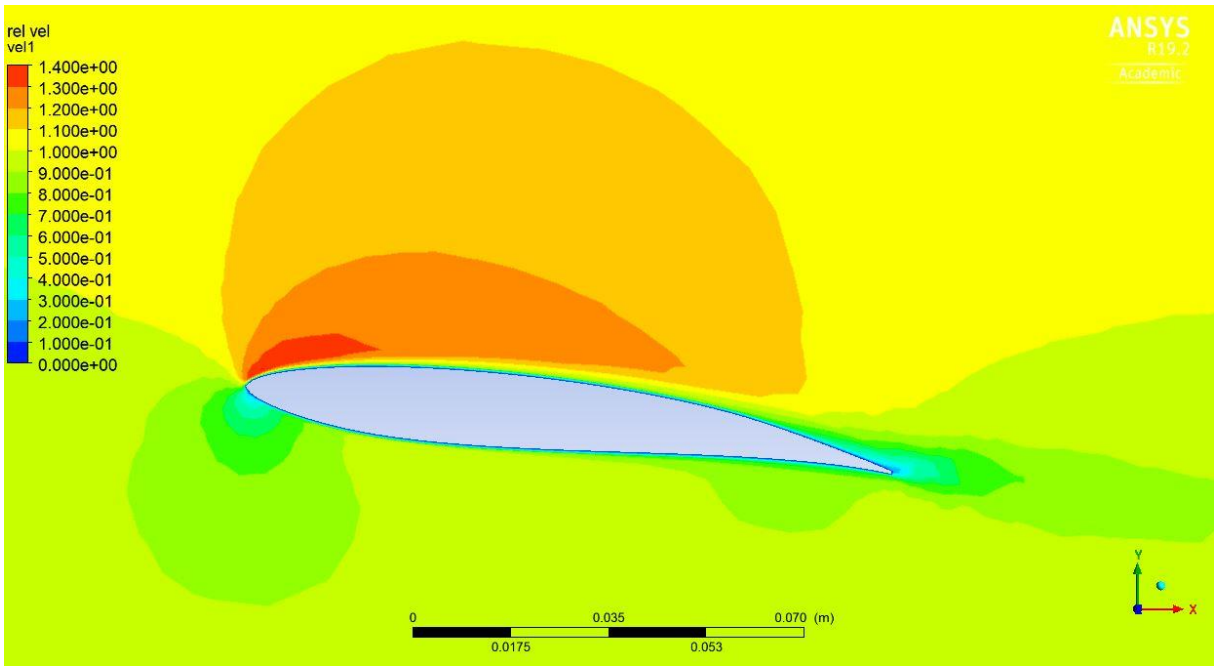


Slika 41. Polje bezdimenzijskog koeficijenta brzine $C_v = v/v_s$, $\alpha = 8°$, $v_s = 10$ m/s, ravnina $z = 0$

Usporedbom dviju slika iznad čija je osnovna razlika da je u ravnini $z = 0{,}75w$ duljina izvodnice profila kraća, na gornjoj slici [Slika 40] možemo vidjeti manje izraženi utjecaj usporenja fluida s donje strane krila neposredno prije stražnjeg ruba te izraženije usporenje fluida s gornje strane krila također neposredno prije stražnjeg ruba.

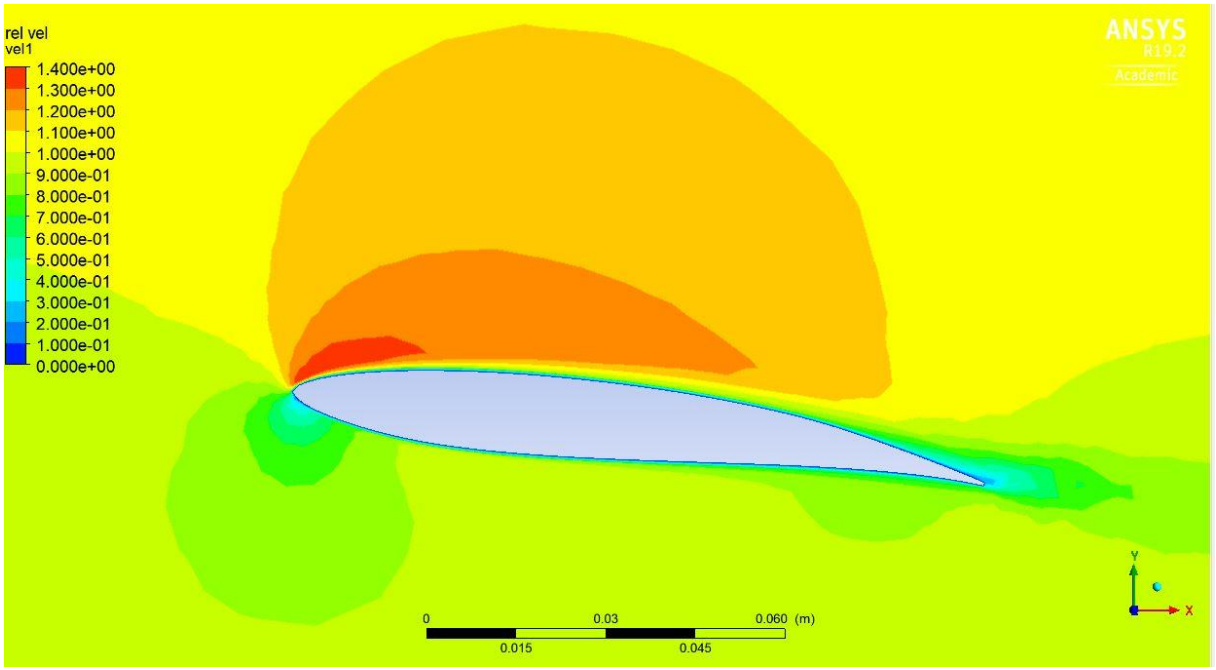


Slika 42. Polje bezdimenzijskog koeficijenta brzine $C_v = v/v_s$, $\alpha = 6°$, $v_s = 10$ m/s, ravnina $z = 0$

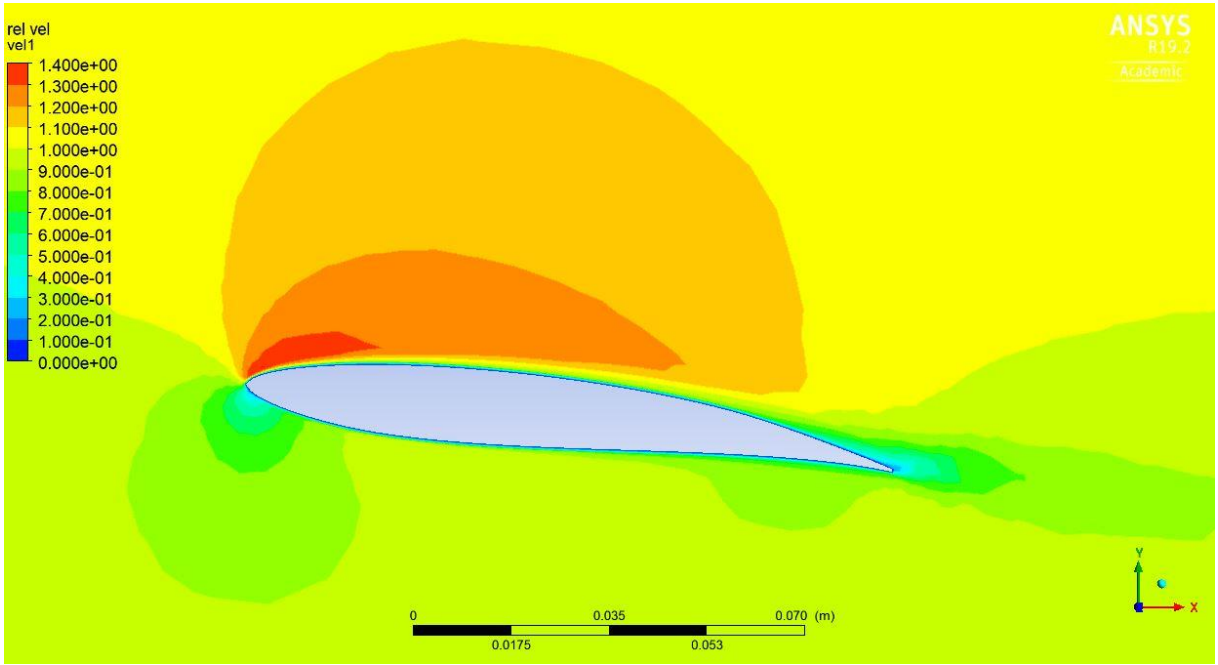


Slika 43. Polje bezdimenzijskog koeficijenta brzine $C_v = v/v_s$, $\alpha = 8°$, $v_s = 10$ m/s, ravnina $z = 0$

Usporedbom dviju slika iznad čija je osnovna razlika u vrijednosti kuta α, na slici gdje vrijedi $\alpha = 8°$ [Slika 43] možemo vidjeti jače izraženi utjecaj ubrzanja fluida s gornje strane krila neposredno iza prednjeg ruba.



Slika 44. Polje bezdimenzijskog koeficijenta brzine $C_v = v/v_s$, $\alpha = 8°$, $v_s = 6$ m/s, ravnina $z = 0$



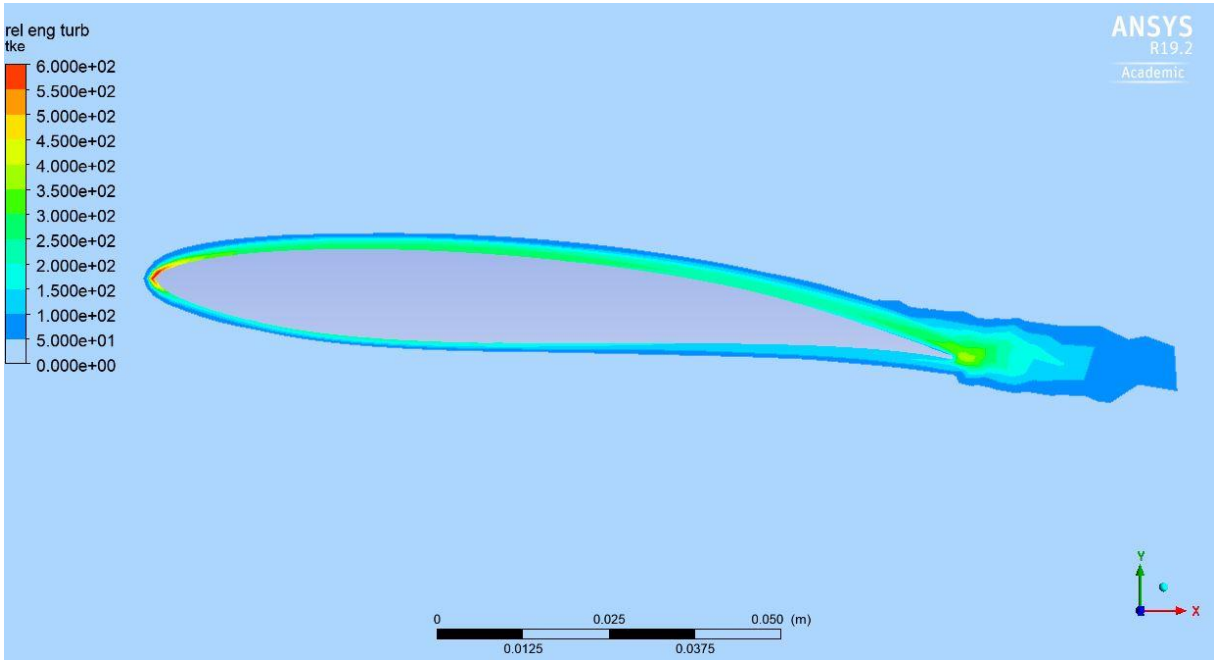
Slika 45. Polje bezdimenzijskog koeficijenta brzine $C_v = v/v_s$, $\alpha = 8°$, $v_s = 10$ m/s, ravnina $z = 0$

Usporedbom dviju slika iznad čija je osnovna razlika u vrijednosti brzine strujanja na ulazu v_s, možemo vidjeti da na slikama nema uočljivih razlika u raspodijeli bezdimenzijskog koeficijenta brzine.

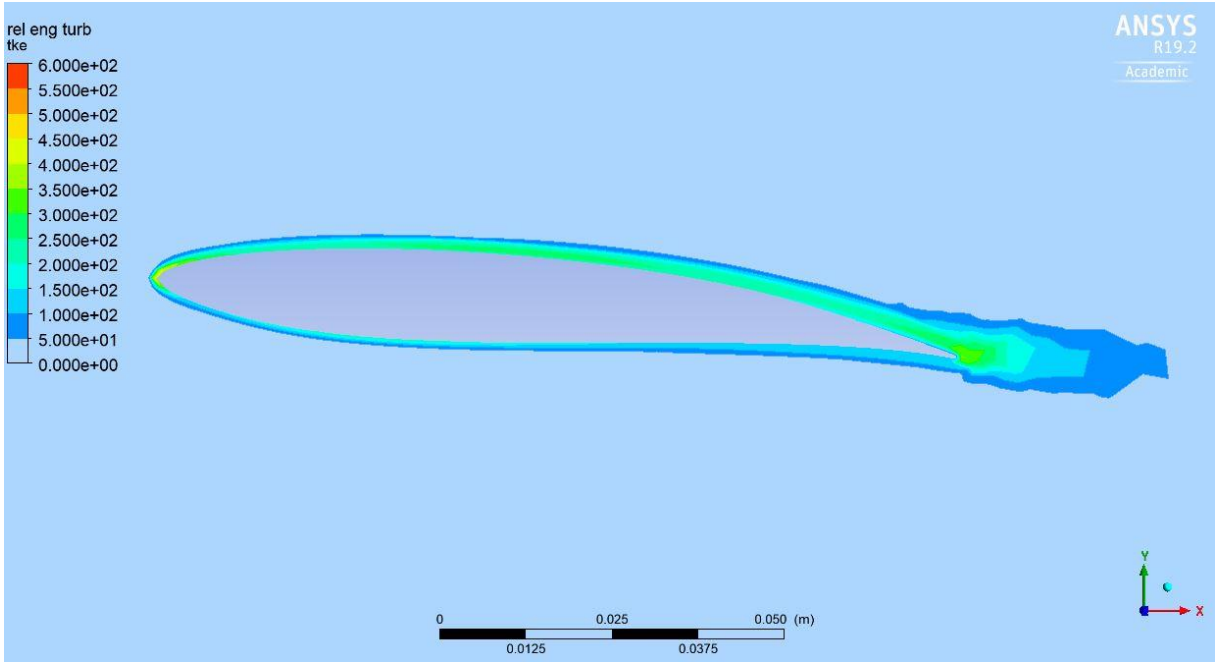
Na sljedećim slikama [Slika 46, Slika 47, Slika 48] dani su prikazi polja bezdimenzijskog koeficijenta kinetičke energije turbulencija za slučaj najmanje brzine i najmanjeg upadnog

kuta strujanja, slučaj najveće brzine i najmanjeg upadnog kuta strujanja te slučaj najveće brzine i najvećeg upadnog kuta strujanja, konture su iscrtane u ravnini simetrije .

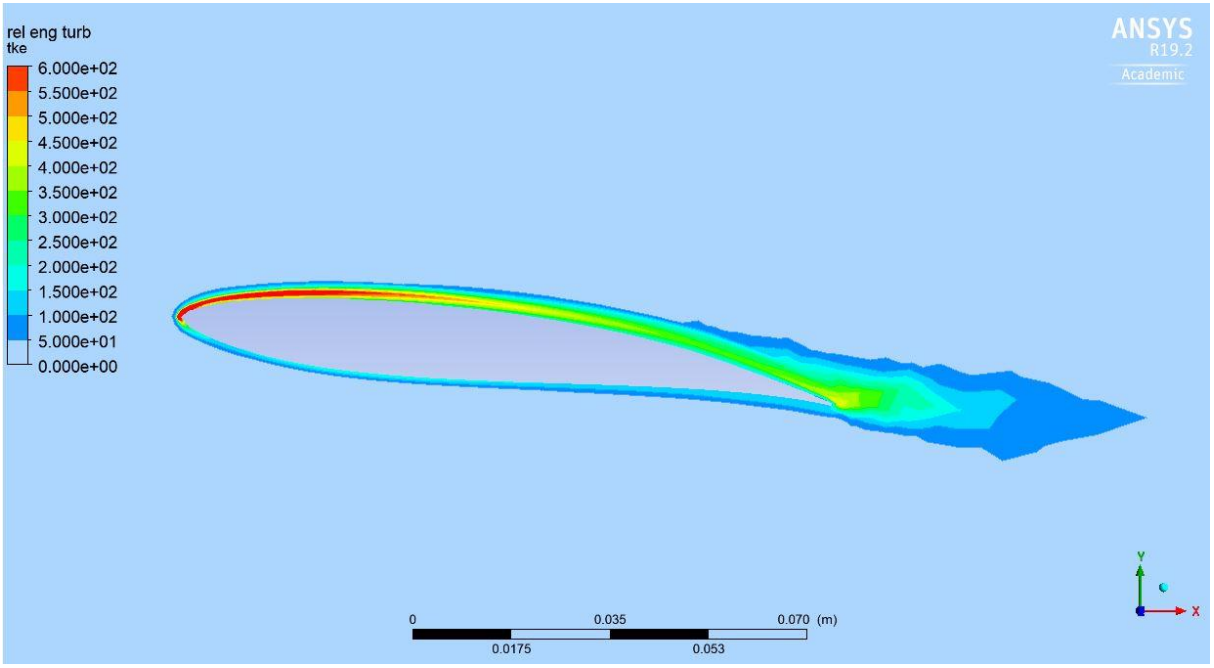
$$C_{TKE} = \frac{k}{k_{ulaz}}, \tag{25}$$



Slika 46. Polje bezdimenzijskog koeficijenta kinetičke energije turbulencija $C_{TKE} = k/k_{ulaz}$, $\alpha = 6°$, $v_s = 6$ m/s, ravnina $z = 0$



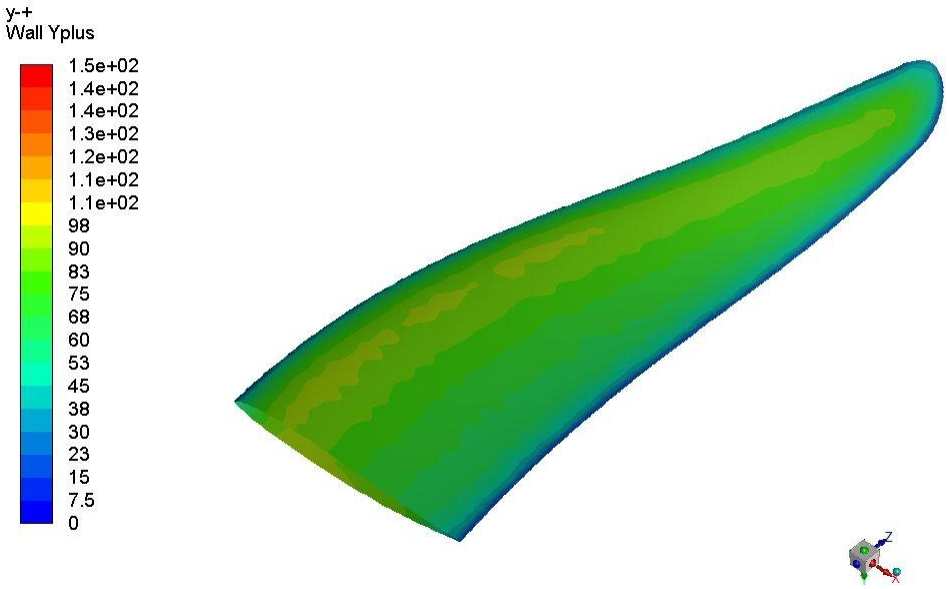
Slika 47. Polje bezdimenzijskog koeficijenta kinetičke energije turbulencija $C_{TKE} = k/k_{ulaz}$, $\alpha = 6°$, $v_s = 10$ m/s, ravnina $z = 0$



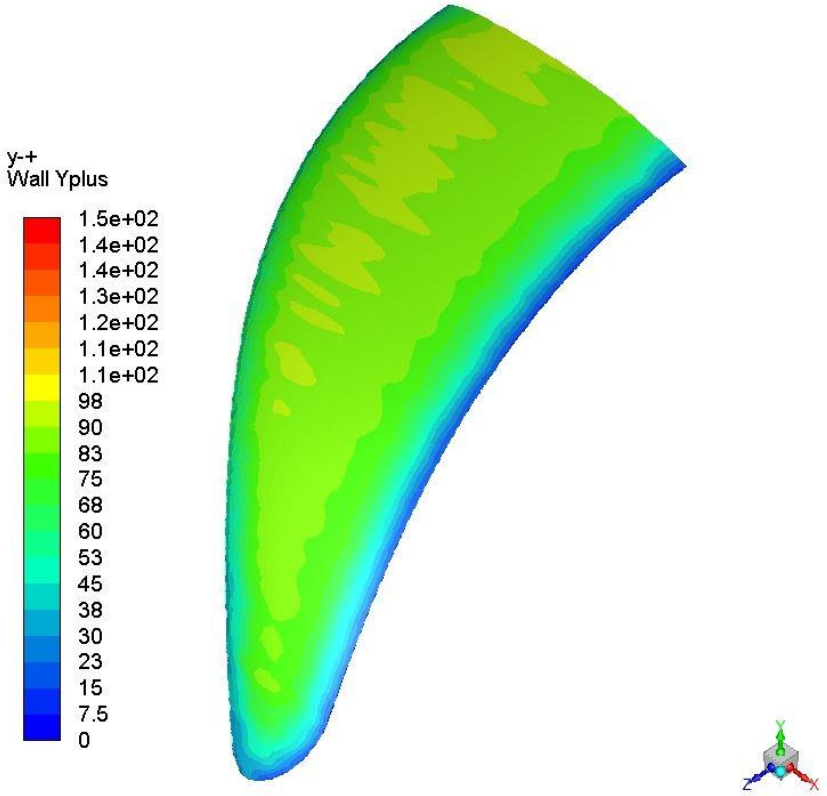
Slika 48. Polje bezdimenzijskog koeficijenta kinetičke energije turbulencija $C_{TKE} = k/k_{ulaz}$, $\alpha = 8°$, $v_s = 10$ m/s, ravnina $z = 0$

Usporedbom slika iznad možemo vidjeti da na slikama nema značajnih razlika u raspodijeli bezdimenzijskog koeficijenta kinetičke energije turbulencije pri povećanju brzine strujanja, dok se pri povećanju upadnog kuta strujanja vrijednosti povećavaju uz gornju površinu krila.

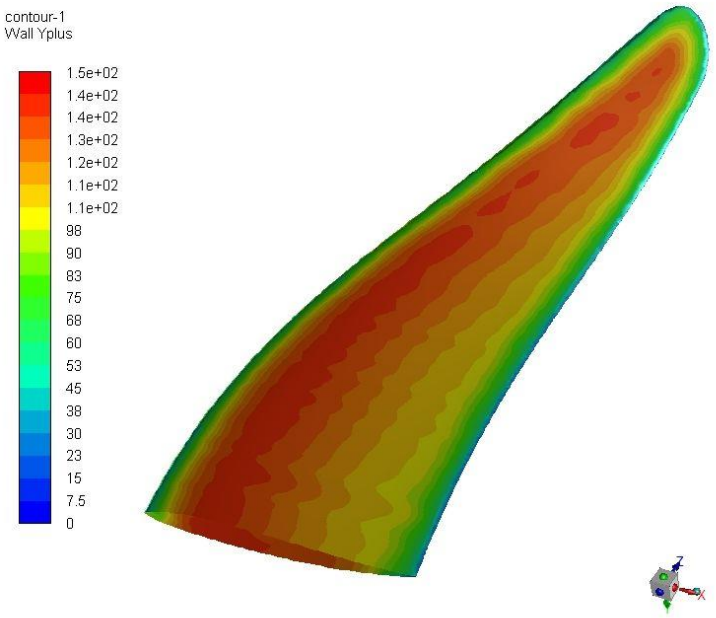
Naredne slike [Slika 49, Slika 50, Slika 51, Slika 52] prikazuju raspodjelu parametra y^+ po površini krila, prikazana su po dva pogleda za svaki od dva slučaja strujanja. Prije provedbe simulacije pri modeliranju mreže konačnih volumena postavljena je vrijednost visine prvog reda volumena prema online kalkulatoru [26] pri čemu je ciljana vrijednost $y^+ = 100$, a uvrštena je brzina $v_s = 8$ m/s što predstavlja sredinu raspona simuliranih vrijednosti.



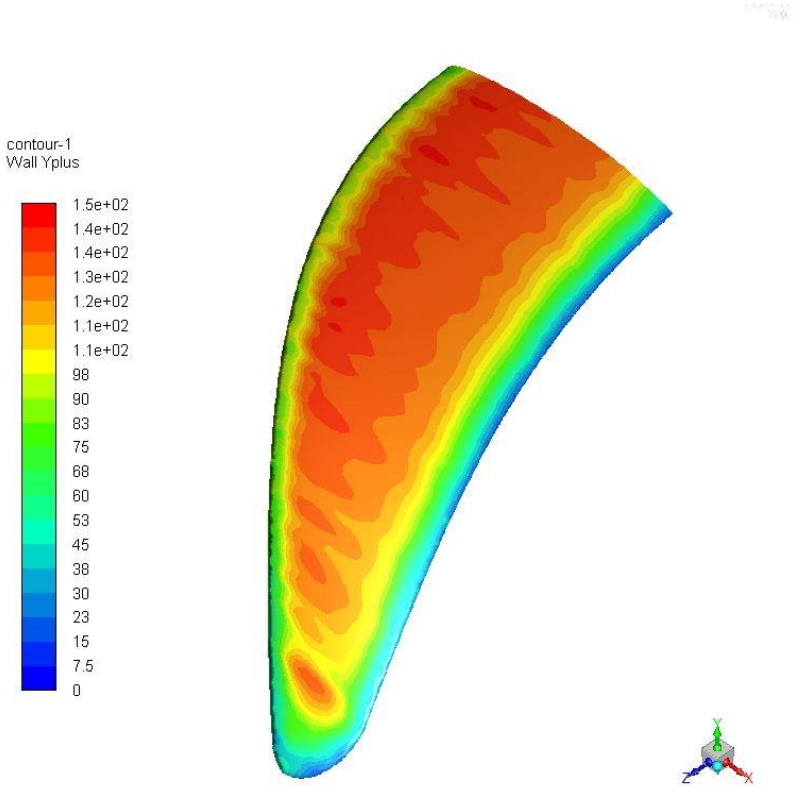
Slika 49. Polje vrijednosti y^+ po površini prednjeg krila, α = 6°, v_s = 6 m/s, pogled odozdo



Slika 50. Polje vrijednosti y^+ po površini prednjeg krila, α = 6°, v_s = 6 m/s, pogled odozgo



Slika 51. Polje vrijednosti y^+ po površini prednjeg krila, α = 8°, v_s = 10 m/s, pogled odozdo



Slika 52. Polje vrijednosti y^+ po površini prednjeg krila, α = 8°, v_s = 10 m/s, pogled odozgo

6. Razmatranje deformiranja prednjeg krila pri vožnji

Rezultat simulacije u prethodnom poglavlju je između ostalog i polje tlaka kojim fluid djeluje na površinu krila, koje je grafički prikazano slikama [Slika 36 do Slika 39]. Jedna od dobrih strana programskog paketa Ansys je mogućnost relativno jednostavnog korištenja rezultata dobivenih jednom simulacijom kao ulazni podatak za drugu simulaciju. Pa je prethodno izračunato polje tlaka u fluidu zadano kao opterećenje za statičku mehaničku simulaciju primjenom metode konačnih elemenata unutar istog programskog paketa.

Valjalo bi napomenuti da cilj ove simulacije nije točno računanje deformacija već potvrda fizikalnosti rezultata prethodne simulacije.

6.1. Postavke računalne simulacije

Odabrano je polje tlaka iz prethodne simulacije koje vrijedi za parametre α = 6,5°, v_s = 7 m/s te rezultira silom uzgona $F_D/2$ = 407 N.

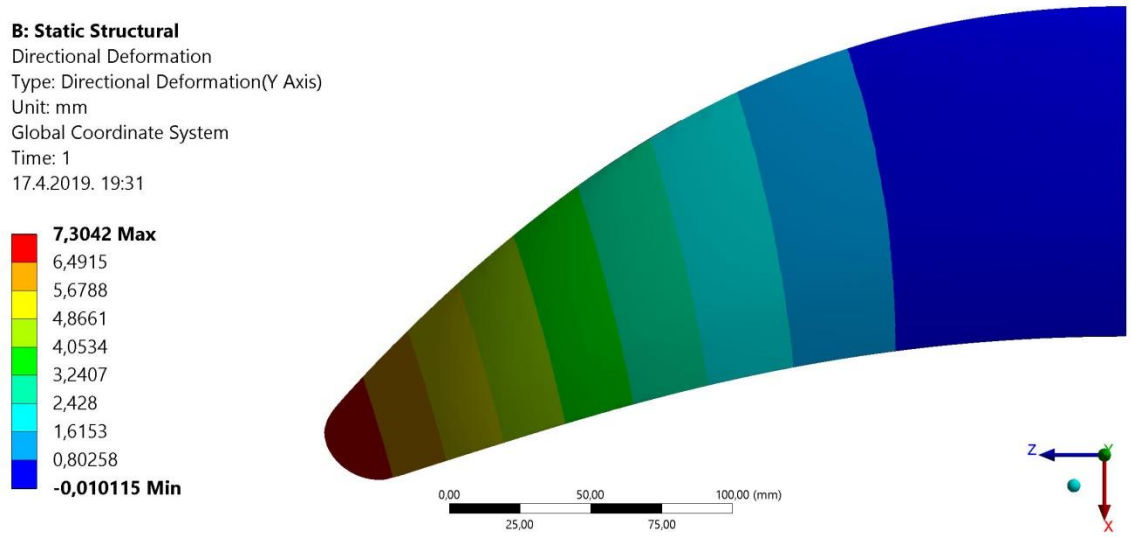
Stvarna krila najčešće se izrađuju u *sandwich* konstrukciji od vlaknima ojačanih kompozitnih materijala kore te polimerne jezgre, međutim ovdje je pretpostavljen materijal aluminij mehaničkih svojstava E = 70 Gpa i ν= 0,33 kako bi se izbjegla potreba za opisivanjem i modeliranjem neizotropnih mehaničkih svojstava kompozita i postavnih kuteva slojeva vlakana. Kao dodatni razlog tu je i teoretska mogućnosti izrade krila od aluminija strojnom obradom u kojem slučaju bi se postupak proizvodnje pojednostavio izbjegavanjem potrebe za izradom kalupa pri malim proizvodnim serijama. Kao i mogućnost naknadne dorade gotovog proizvoda.

Geometrija je opisana istim polumodelom koji je korišten u prethodnom poglavlju te je diskretizirana mrežom od 17993 tetraedarska konačna elementa i 30277 čvorova, što je blizu ograničenja u korištenoj verziji programskog paketa.

Kao rubni uvjet zadano je uklještenje u *xy* ravnini.

6.2. Rezultati

Na sljedećim slikama grafički su prikazani rezultati simulacije.



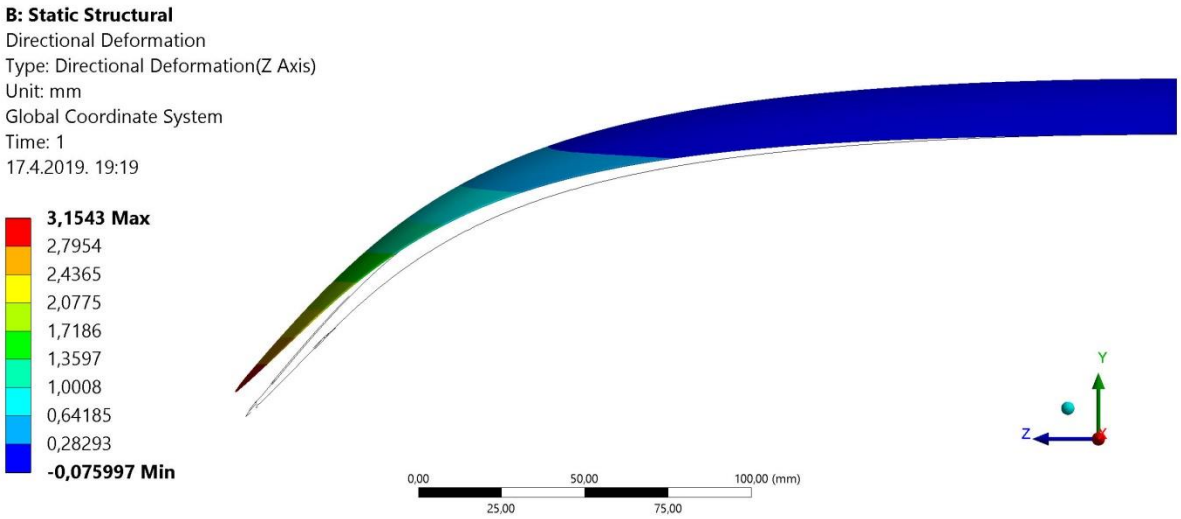
Slika 53. Grafički prikaz raspodijele pomaka krila u smjeru *y*-osi po površini krila

Promatranjem slike [Slika 53] može se uvidjeti da krivulje jednakih pomaka nisu paralelne s *x*-osi, prema tome možemo ustanoviti da za istu *z*-koordinatu stražnji rub krila ima veći pomak po *y*-osi nego prednji rub. Krivulje jednakih pomaka nisu ravne prvenstveno uslijed debljine krila i činjenice da su konture crtane po površini krila. Kako fluid na krilo nastrujava u smjeru *x*-osi to nam govori da prema ovoj simulaciji deformiranjem krila dolazi do smanjenja upadnog kuta nastrujavanja. Drugim riječima na opterećenje uslijed strujanja krilo odgovara efektom koji smanjuje silu uzgona.

Usporedbom deformiranog i nedeformiranog oblika krila (prikazana je linija ruba nedeformiranog krila) [Slika 54] i prema vrijednosti pomaka vrha krila po *x*-osi od 3,15 mm može se ustanoviti da deformiranjem dolazi do povećanja projicirane površine krila u *xz*-ravnini što predstavlja drugi efekt koji ukazuje na povećanje sile uzgona uslijed deformiranja. Primjereni naziv bio bi efekt „otvaranja“ krila

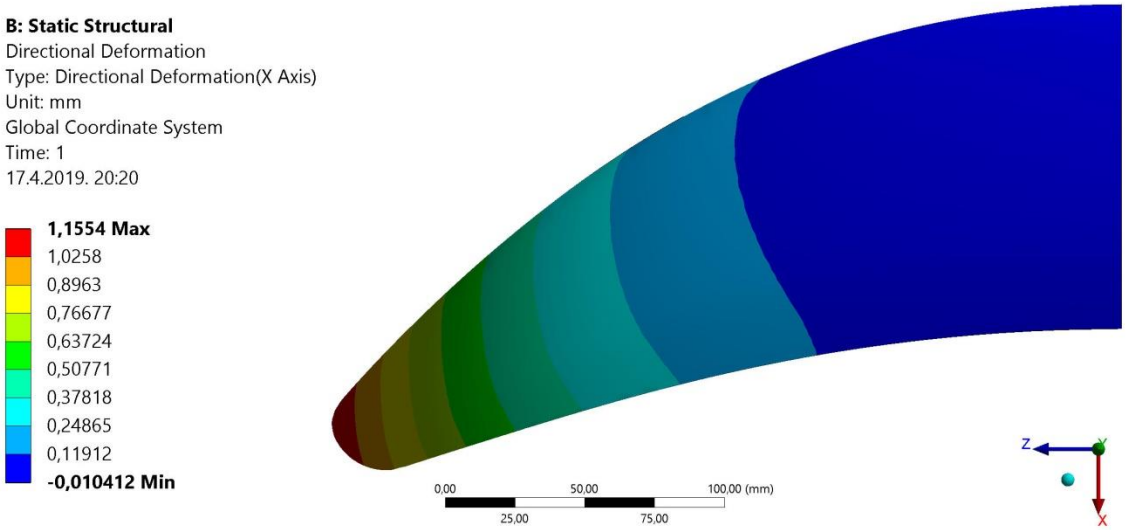
Odgovor na pitanje da li se deformiranjem krila ostvarena sila uzgona povećava ili smanjuje i u kojoj mjeri dala bi *two-way-fluid-structure-interaction* analiza. Pri izvođenju navedene uspostavlja se povratna veza koja sliku strujanja prilagođava izračunatim pomacima u statičkoj analizi i tako iterativno u krug dok se razlika novoizračunatih pomaka i prethodno izračunatih pomaka ne smanji ispod tražene vrijednosti. [27]

U ovom poglavlju opisan je primjer *one-way-fluid-structure-interaction* simulacije gdje je uspostavljen jednosmjeran utjecaj strujanja na deformiranje konstrukcije preko polja tlaka.



Slika 54. Grafički prikaz raspodijele pomaka krila u smjeru *z*-osi po površini krila

Na slici [Slika 54] prikazane vrijednosti pomaka po *z*-osi posljedica su primarno savijanja („otvaranja“) krila, a ne aksijalnog razvlačenja krila duž *z*-osi. Naime izračunata rezultantna sila u smjeru z-osi na polumodel krila za parametre ove simulacije iznosi $F_{Z,P}$ = 88,2 N, navedena sila se u stvarnosti poništava sa silom jednakog iznosa ali suprotne orijentacije koja djeluje na polumodelu druge strane krila, tako da pretpostavke navedene u prijašnjim poglavljima nisu narušene.



Slika 55. Grafički prikaz rasodijele pomaka krila u smjeru *x*-osi po površini krila

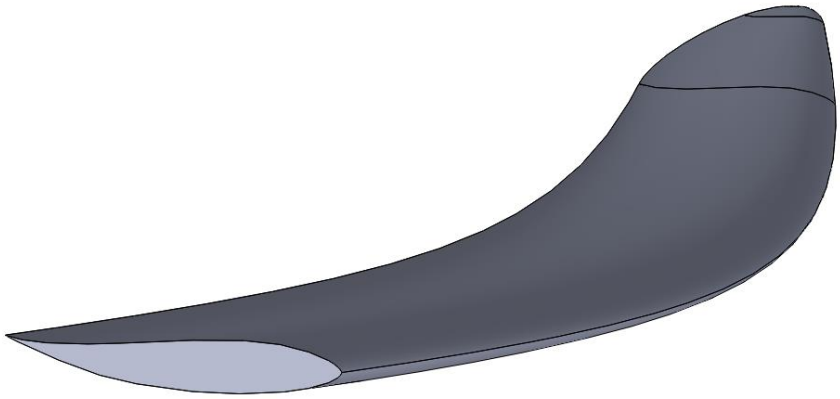
Slika 55 prikazuje raspodjelu pomaka po *x*-osi gdje se očekivano najveća vrijednost pojavila na vrhu krila.

7. Simulacija strujanja oko stražnjeg krila u neporemećenoj struji fluida

Za bolje shvaćanje utjecaja prednjeg krila na strujanje oko stražnjeg krila u poremećenoj struji korisno je prvo upoznati se sa svojstvima stražnjeg krila. S takvim ciljem napravljena je simulacija koja je opisana u ovom poglavlju. Postupak je proveden po uzoru na simulaciju opisanu u prethodnom poglavlju br. 5 „Simulacija strujanja oko izdvojenog prednjeg krila“ također unutar programskog paketa Ansys Academic Student R19.2.

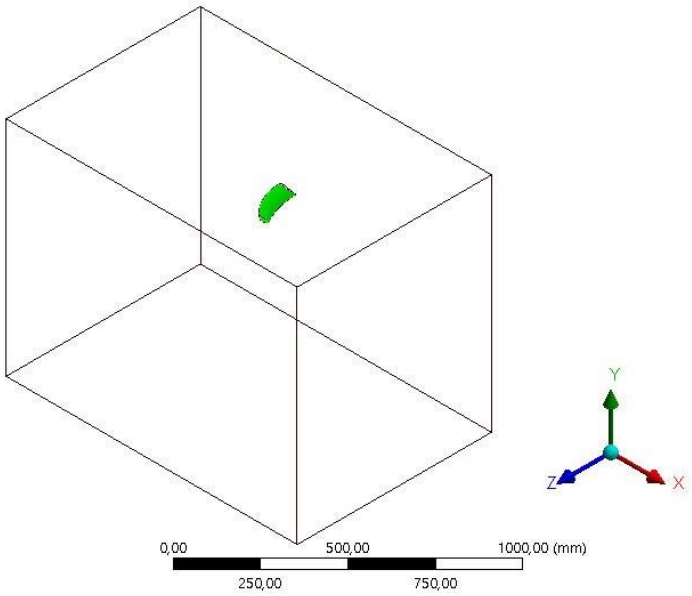
7.1. Modeliranje područja proračuna i prostorna diskretizacija

Model geometrije preuzet je također iz [24] prikazanog na slici [Slika 23] lijevo u prijašnjem poglavlju. Kao i u prethodnom slučaju poslužit ćemo se polumodelom geometrije koji dijeli istu ravninu simetrije s ostatkom konstrukcije, a prikazan je slikom [Slika 56].



Slika 56. Prostorni prikaz geometrijskog polumodela stražnjeg krila

Stražnje krilo služi za stabilizaciju i povećanje upravljivosti daske pri vožnji. Zbog načina na koji se ostvaruje stabilizirajući efekt, stražnjeg krilo pri stacionarnoj vožnji proizvodi uzgon koji je značajno manjeg iznosa od uzgona kojeg ostvaruje prednje krilo. Sila uzgona na stražnjem krilu pri stacionarnoj vožnji gleda u suprotnom smjeru u odnosu na onu na prednjem krilu. Shodno tome na prethodnoj slici vidljiv je asimetrični presjek u *xy* ravnini koji je orijentiran prema tome kako stoji u vožnji.



Slika 57. Prostorna domena simulacije stražnjeg krila

Dimenzije domene odabrane su na način da se zadrže relativni odnosi s duljinom izvodnice presjeka u *xy* ravnini prema tablici u prijašnjem poglavlju [Tablica 3].

Prostorna diskretizacija područja proračuna provedena je pomoću tetraedarskih i trokutastih prizmatičnih konačnih volumena. Mreža je najgušća u blizini krila, a prorjeđuje se udaljavanjem od njega, analogno prethodno prikazanim slikama:[Slika 27], [Slika 28] i [Slika 29]. Područje proračuna je diskretizirano pomoću 488756 (podatak za jednu izdvojenu vrijednost parametra α) konačna volumena što je blizu ograničenja studentske verzije programskog paketa koja iznosi 512000 konačnih volumena.

7.2. Postavke simulacije

Postavke simulacije su preuzete iz poglavlja br.5.2 .

Svako rješenje simulacije je dobiveno nakon 600 iteracija korištenjem uzvodne sheme diskretizacije drugog reda pri čemu su se reziduali bili reda veličine 10^{-5} za kontinuitet, a 10^{-7} za brzine.

7.3. Rubni uvjeti

Rubni uvjeti postavljeni su analogno tablici [Tablica 4] u poglavlju 5.3 .

7.4. Rezultati

Napravljen je niz simulacija koje se međusobno razlikuju po dva ulazna parametra, brzini v_s koja predstavlja brzinu kojom fluid ulazi u domenu proračuna koja je paralelna s osi *x* geometrijskog modela i konstantnog je iznosa cijelom površinom ulazne plohe. Njene vrijednosti mogu se vidjeti u narednoj tablici [Tablica 7]. Navedeni raspon vrijednosti odgovara onome pri simulaciji prednjeg krila.

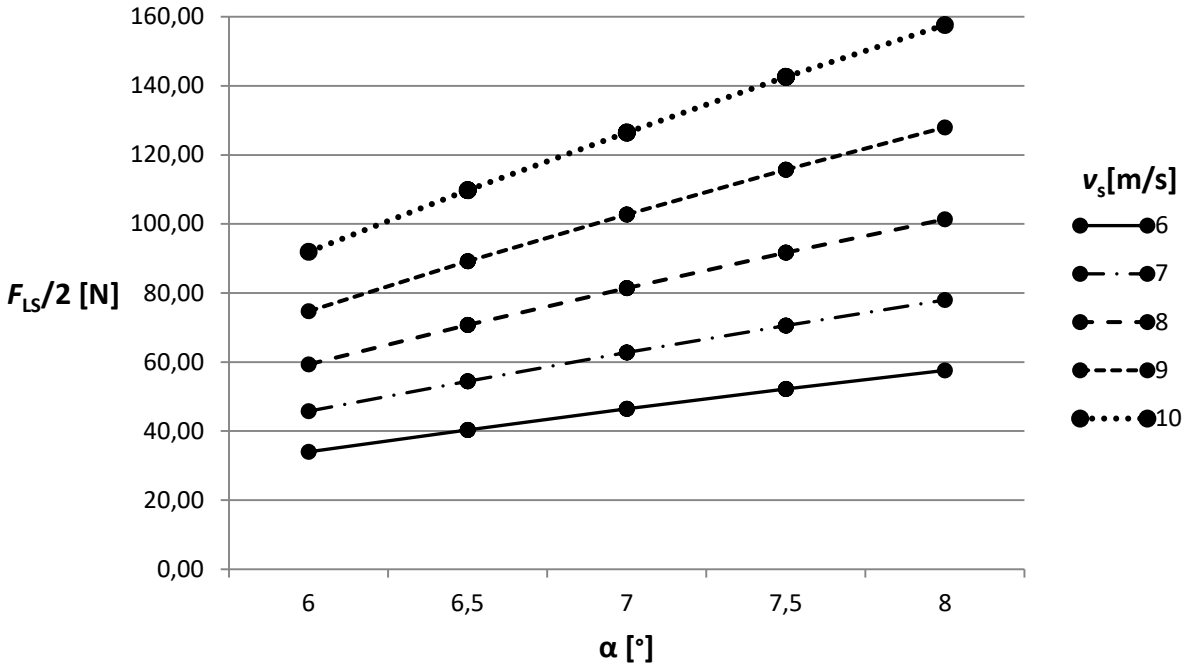
Drugi ulazni parametar je kut α između izvodnice profila krila *L* i pozitivnog dijela osi *x*, navedeni kut mjeri se u *xy* ravnini. I njegov raspon je također identičan onome pri simulaciji prednjeg krila jer oba krila dijele isti nosač za koji se pretpostavlja da je idealno krut. Za geometriju modela korištenoj u ovom radu vrijedi da su izvodnice profila prednjeg i zadnjeg krila u xy ravnini paralelne, međutim to ne mora uvijek biti slučaj o čemu valja voditi računa pri izradi zasebnih simulacija. Dapače međusobni kut dviju izvodnica pri pojedinim izvedbama krila može se podešavati.

7.4.1. Prikaz i analiza rezultata računalnih simulacija

Tablicom [Tablica 7] su dani numerički rezultati sile uzgona $F_{LS}/2$ koja djeluje u smjeru osi *y* za sve vrijednosti ulaznih parametara v_s i α . Koji su zatim prikazani na slici[Slika 58].

Tablica 7. Vrijednosti sile uzgona na izdvojenom stražnjem krilu $F_{LS}/2$ za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida

$F_{LS}/2$ [N]		v_s [m/s]				
		6	7	8	9	10
α [°]	6	33,98	45,76	59,30	74,71	91,92
	6,5	40,35	54,43	70,68	89,14	109,72
	7	46,44	62,71	81,36	102,68	126,42
	7,5	52,18	70,55	91,66	115,72	142,56
	8	57,60	77,95	101,31	127,91	157,59



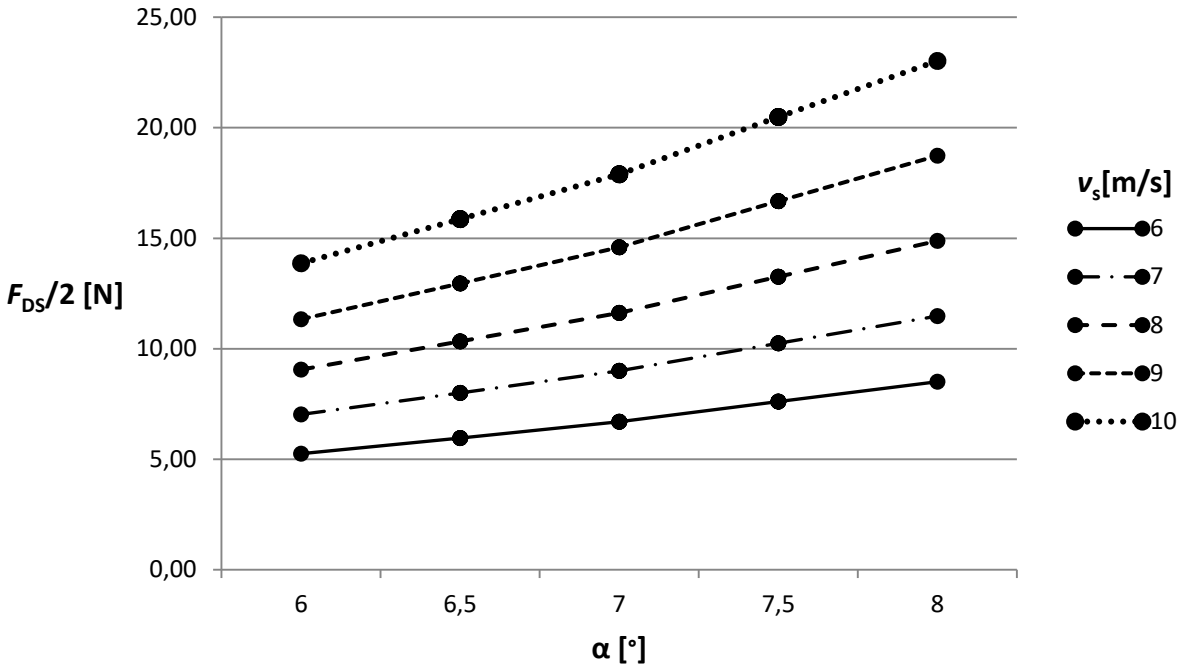
Slika 58. Dijagramski prikaz sile uzgona na izdvojenom stražnjem krilu $F_{LS}/2$ za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida

Na slici [Slika 58] je vidljivo da za različite brzine strujanja povećanjem upadnog kuta strujanja na profil sila uzgona slijedi isti vrlo sličan trend. Pri višim vrijednostima brzine strujanja vidljiva je veća promjena rezultata za različite vrijednosti upadnog kuta strujanja.

U tablici [Tablica 8] dani su numerički rezultati sile otpora $F_{DS}/2$ koja djeluje u smjeru osi x za sve vrijednosti ulaznih parametara v_s i α, koji su zatim prikazani slikom [Slika 59].

Tablica 8. Vrijednosti sile otpora $F_{DS}/2$ za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida

$F_{DS}/2$ [N]		v_s[m/s]				
		6	7	8	9	10
α [°]	6	5,25	7,02	9,05	11,33	13,86
	6,5	5,95	7,99	10,32	12,95	15,86
	7	6,69	8,99	11,62	14,59	17,90
	7,5	7,60	10,24	13,26	16,68	20,48
	8	8,50	11,47	14,88	18,73	23,02

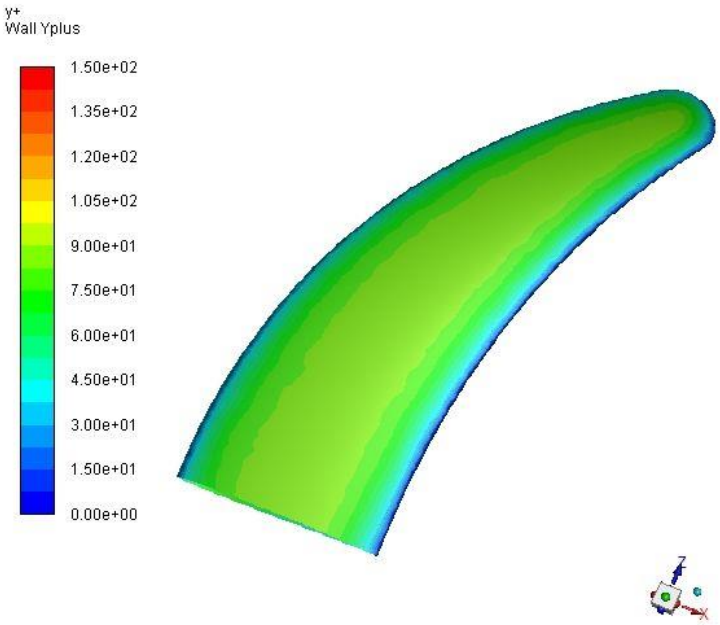


Slika 59. Dijagramski prikaz sile otpora $F_D/2$ za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida

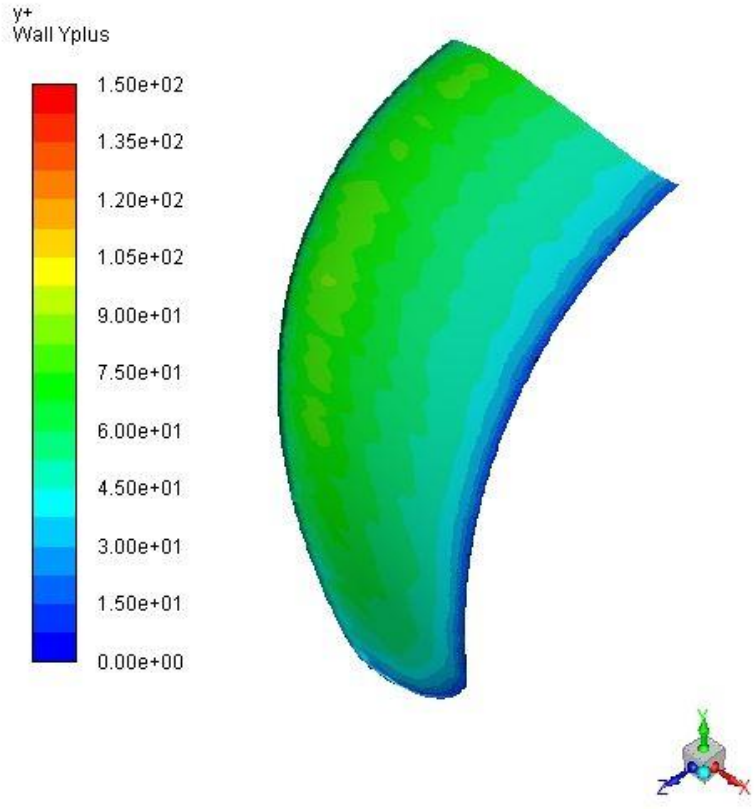
Na slici [Slika 59] je vidljivo da za različite brzine strujanja povećanjem upadnog kuta strujanja na profil sila otpora također slijedi isti vrlo sličan trend. Pri višim vrijednostima brzine strujanja vidljiva je veća ovisnost rezultata o upadnom kutu strujanja odnosno veći nagib krivulje otpora.

Iz prikazanog možemo zaključiti da se prema provedenim simulacijama prednje i zadnje krilo u neporemećenim strujama fluida ponašaju vrlo slično.

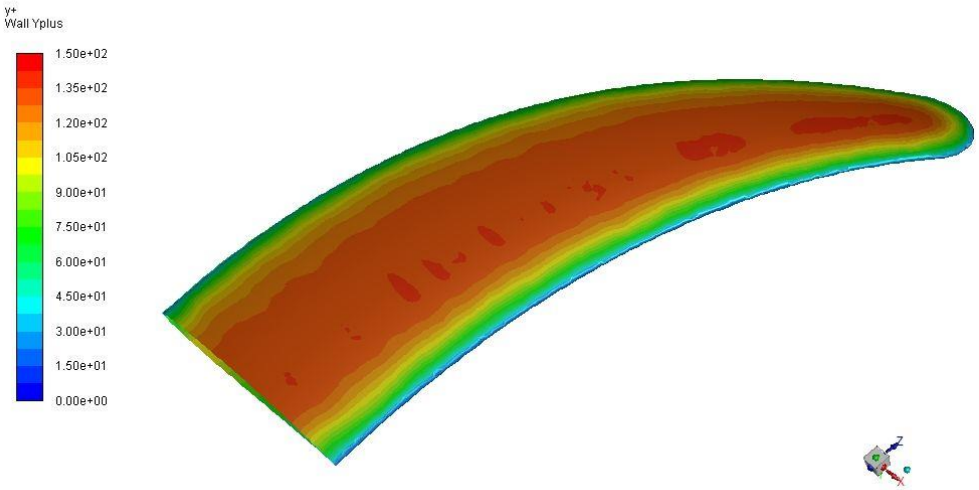
Naredne slike [Slika 60, Slika 61, Slika 62, Slika 63] prikazuju raspodjelu parametra y^+ po površini stražnjeg krila, prikazana su po dva pogleda za svaki od dva slučaja strujanja. Prije provedbe simulacije pri modeliranju mreže konačnih volumena postavljena je vrijednost visine prvog reda volumena prema online kalkulatoru [26] pri čemu je ciljana vrijednost $y^+ = 100$, a uvrštena je brzina $v_s = 8$ m/s što predstavlja sredinu raspona simuliranih vrijednosti.



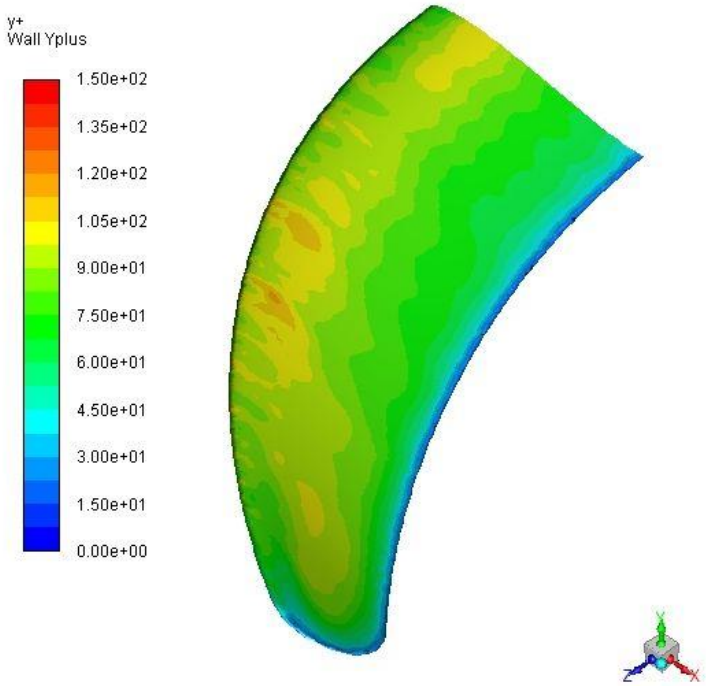
Slika 60. Polje vrijednosti y^+ po površini stražnjeg krila, α = 6°, v_s = 6 m/s, pogled odozdo



Slika 61. Polje vrijednosti y^+ po površini stražnjeg krila, α = 6°, v_s = 6 m/s, pogled odozgo



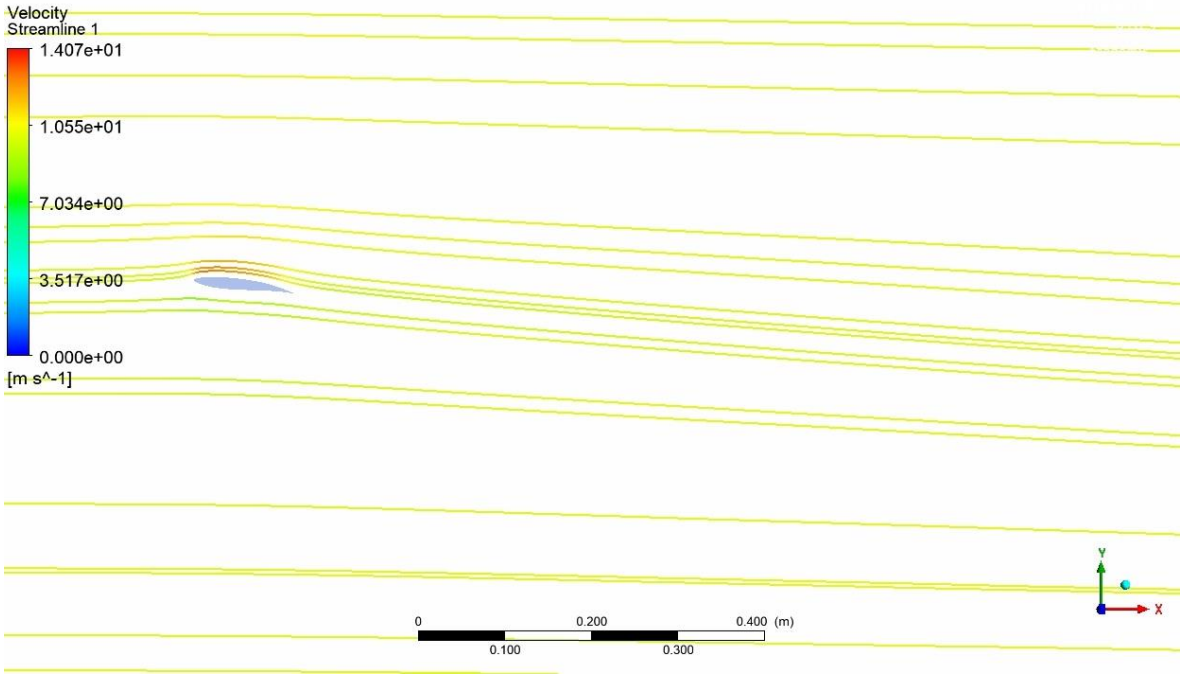
Slika 62. Polje vrijednosti y^+ po površini stražnjeg krila, α = 8°, v_s = 10 m/s, pogled odozdo



Slika 63. Polje vrijednosti y^+ po površini stražnjeg krila, α = 8°, v_s = 10 m/s, pogled odozgo

8. Simulacija strujanja oko oba krila

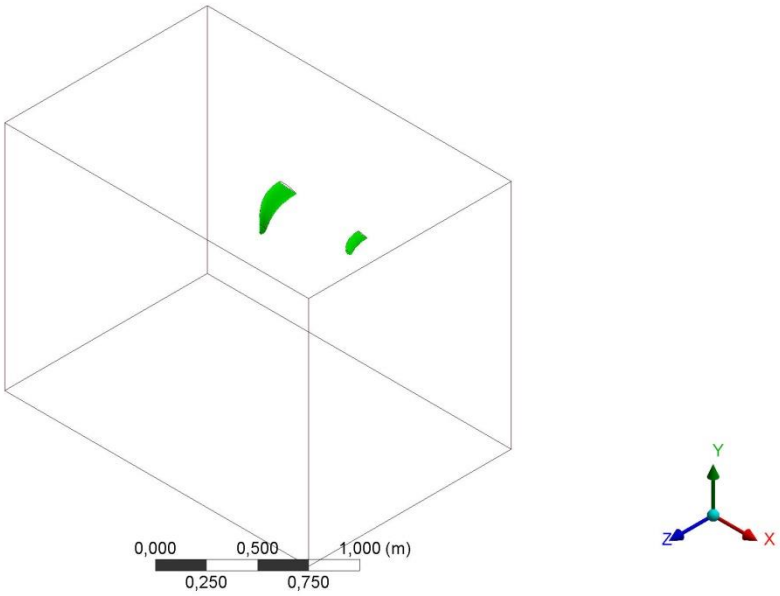
Potreba za promatranjem zajedničkog strujanja oko oba krila jasno se potvrdila u poglavlju 5. promatranjem strujnica u području iza krila, kao što to prikazuje Slika 64. Rubni uvjet na ulaznoj površini domene definira smjer brzine paralelno s *x*-osi, za što je i sa slike vidljivo da u području iza krila ne vrijedi. Valjalo bi napomenuti kako se radi o trodimenzionalnom strujanju pa efekt prikazan slikom ima različit intenzitet u različitim ravninama.



Slika 64. Izgled strujnica za slučaj izdvojenog strujanja oko prednjeg krila u ravnini $w = 0$

8.1. Modeliranje područja proračuna i prostorna diskretizacija

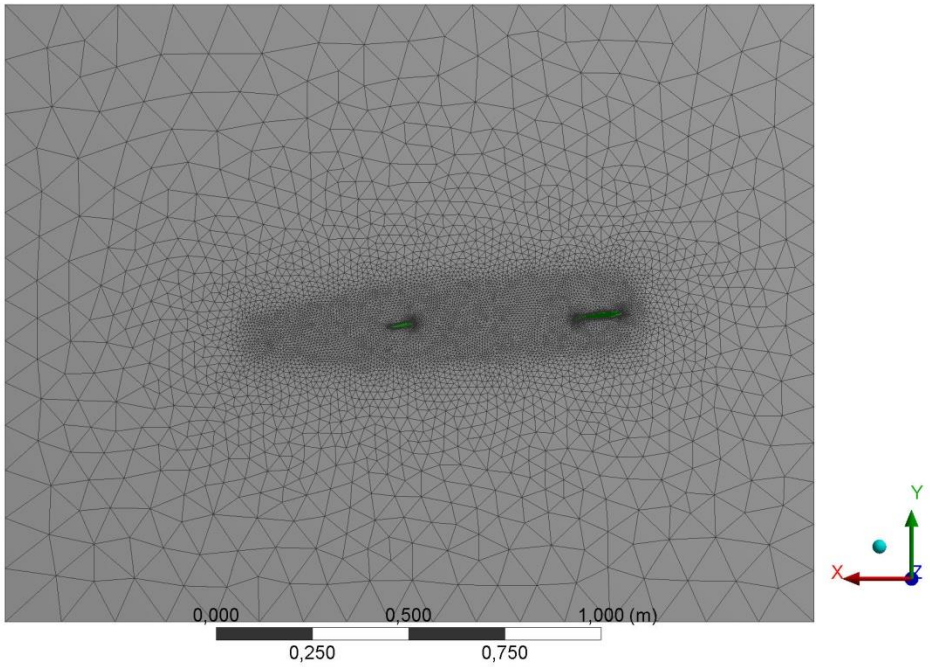
Za ovu simulaciju geometrijski model se sastoji od prednjeg i stražnjeg krila koji su postavljeni u međusobni položaj koji odgovara ranije spomenutom ukupnom modelu [24] [Slika 23 lijevo]. Pri tome udaljenost prednjih rubova krila u smjeru *x*-osi iznosi l_F = 540 mm (mjereno u ravnini simetrije), prednje krilo također je pomaknuto za 50 mm u pozitivnom smjeru *y*-osi. Izvodnice profila prednjeg i stražnjeg krila u ravnini simetrije su paralelne.



Slika 65. Prostorna domena simulacije oba krila

Cjelokupna domena proračuna za stražnje krilo iz poglavlja 7.1 kada se postavi u položaj koji odgovara udaljenosti l_F= 540 mm nalazi se unutar domene opisane tablicom [Tablica 3] u poglavlju 5.1. Pa su prema tome dimenzije domene preuzete iz navedene tablice te je domena prikazana slikom iznad [Slika 65]. Geometrije horizontalnog i vertikalnog nosača nisu modelirane jer oni imaju značajno manju širinu od krila pa se pretpostavlja mali utjecaj na ukupne hidrodinamičke sile, čime se smanjuje vrijeme potrebno za izračun pojedine simulacije.

Prostorna diskretizacija područja proračuna provedena je pomoću tetraedarskih i trokutastih prizmatičnih konačnih volumena. Mreža je najgušća u blizini krila, a prorjeđuje se udaljavanjem od njega, analogno prethodno prikazanim slikama:[Slika 27], [Slika 28] i [Slika 29]. Područje proračuna je diskretizirano pomoću $2.48 \cdot 10^6$ (podatak za jednu izdvojenu vrijednost parametra α) konačnih volumena što je otprilike 5 puta više u odnosu na prethodne simulacije. Zadržane su iste vrijednosti parametara mreže uz površine krila i na granicama domene, a najveći doprinos porastu broja konačnih volumena ima progušćivanje mreže u prostoru između dva krila kao što prikazuje Slika 66. Porast broja konačnih volumena omogućen je korištenjem verzije programskog paketa Ansys 15.0 Academic Research za simulaciju opisanu u ovom poglavlju.



Slika 66. Prikaz mreže konačnih volumena u ravnini *z*=0 za strujanje oko oba krila

8.2. Postavke simulacije

Postavke simulacije su preuzete iz poglavlja br.5.2 .

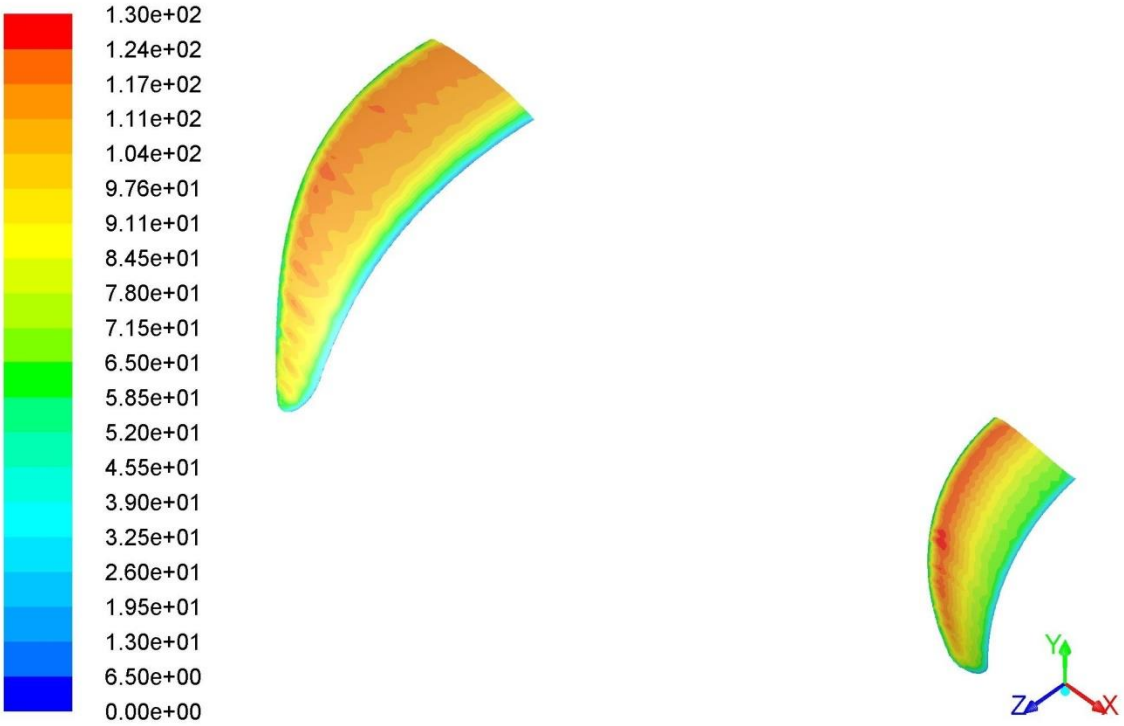
Svako rješenje simulacije je dobiveno nakon 600 iteracija korištenjem uzvodne sheme diskretizacije drugog reda pri čemu su reziduali bili reda veličine 10^{-4} za kontinuitet, a 10^{-8} za brzine.

8.3. Rubni uvjeti

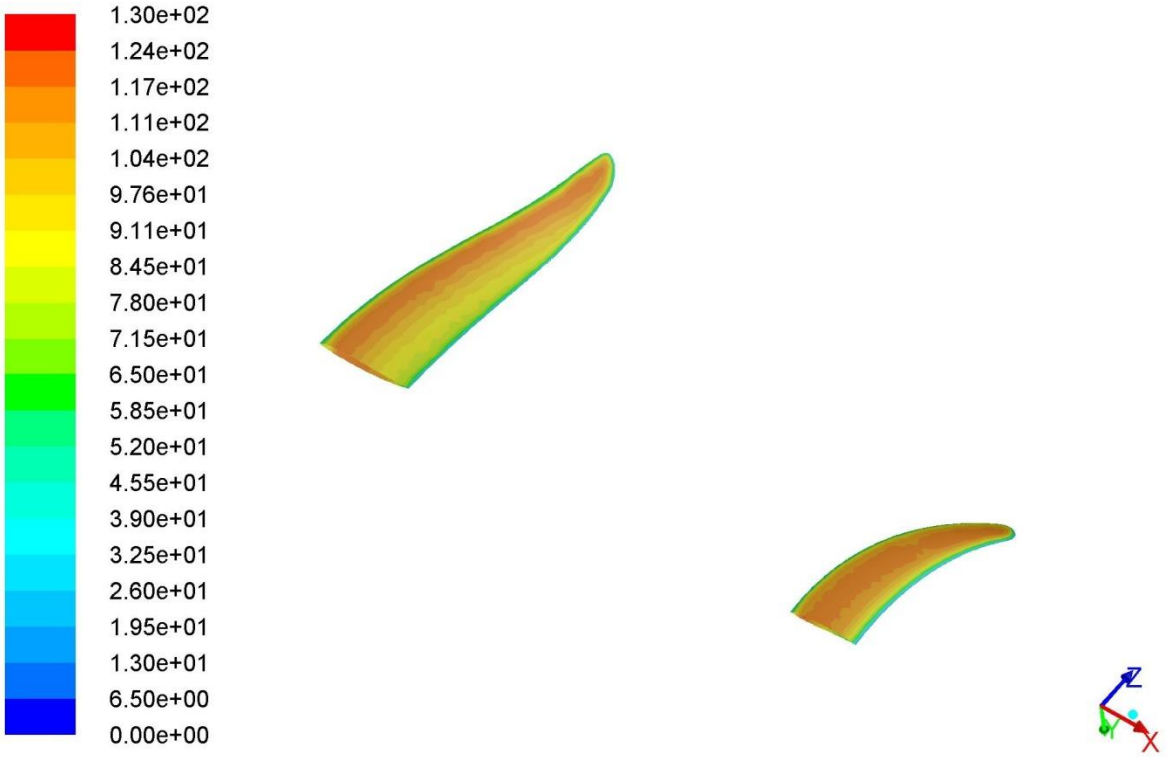
Rubni uvjeti postavljeni su analogno tablici [Tablica 4] u poglavlju 5.3 .

8.4. Rezultati

Naredne slike [Slika 67 i Slika 68] prikazuju raspodjelu parametra y^+ po površini oba krila, prikazana su dva pogleda. Prije provedbe simulacije pri modeliranju mreže konačnih volumena postavljena je vrijednost visine prvog reda volumena prema online kalkulatoru [26] pri čemu je ciljana vrijednost $y^+ = 100$, a uvrštena je brzina $v_s = 8$ m/s.



Slika 67. Polje vrijednosti y^+ po površini oba krila, α = 7.5°, v_s = 8 m/s, pogled odozgo



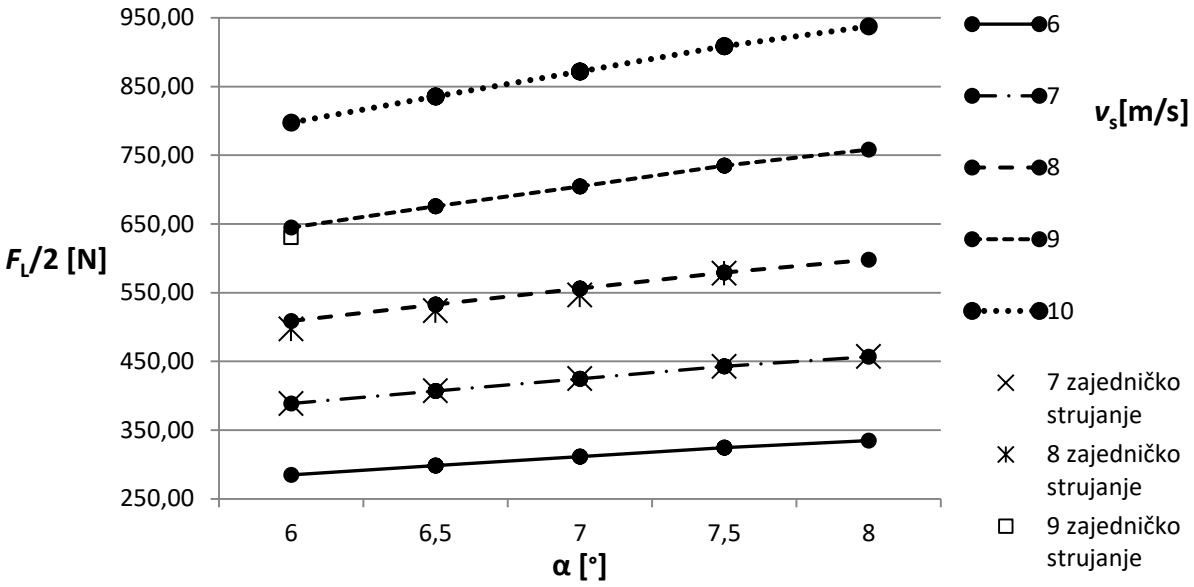
Slika 68. Polje vrijednosti y^+ po površini oba krila, α = 7.5°, v_s = 8 m/s, pogled odozdo

8.4.1. Usporedba rezultata na prednjem krilu

Simulacija je provedena za neke od kombinacija parametara α i v_s iz tablice u poglavlju 5.4.2 [Tablica 5] koje se po izračunatom iznosu sile uzgona nalaze blizu očekivanih vrijednosti pri korištenju daske. Sljedećom tablicom [Tablica 9] prikazane su vrijednosti sile uzgona ostvarene na prednjem krilu za slučaj zajedničkog strujanja. Vrijednosti iz tablice također su prikazane na zajedničkom dijagramu [Slika 69] zajedno s vrijednostima iz simulacije izdvojenog prednjeg krila.

Tablica 9. Vrijednosti sile uzgona $F_L/2$ na prednjem krilu za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida pri strujanju oko oba krila

$F_L/2$ [N]		v_s [m/s]				
		6	7	8	9	10
α [°]	6		379,7	497,0	630,2	
	6,5		400,0	523,6		
	7		417,5	546,4		
	7,5		441,8	578,1		
	8		449,2			



Slika 69. Dijagramski prikaz sile uzgona $F_L/2$ na prednjem krilu za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida s vrijednostima za izdvojeno strujanje oko prednjeg krila i za slučaj zajedničkog strujanja

Iz prikazanog možemo zaključiti da razlika između rezultata dobivenih iz dvije različite simulacije nije velika, na izračunatim slučajevima ne prelazi 2,4%. Izračunatu razliku možemo pripisati korištenju mreže s više konačnih volumenu za slučaj zajedničkog strujanja.

Možemo zaključiti da se potvrđuje intuitivna pretpostavka da stražnje krilo nema značajan utjecaj na strujanje oko prednjeg krila.

8.4.2. Usporedba rezultata na stražnjem krilu

Tablica 10 prikazuje rezultate sile uzgona na stražnjem krilu, možemo vidjeti da su značajno manjeg iznosa nego sa slučaj strujanja u neporemećenom strujanju [Tablica 7]. Također za većinu promatranih vrijednosti parametra α izračunata je sila u negativnom smjeru osi y, to nam ukazuje na ispravnu pretpostavku o tome da stražnje krilo pri vožnji ostvaruje negativan uzgon. Navedenu veliku razliku treba svakako pripisati u ovoj simulaciji vidljivom utjecaju prednjeg krila na sliku strujanja oko stražnjeg krila.

Tablica 10. Vrijednosti sile uzgona $F_{LS}/2$ na stražnjem krilu za različite upadne kuteve i brzine nastrujavanja fluida pri strujanju oko oba krila

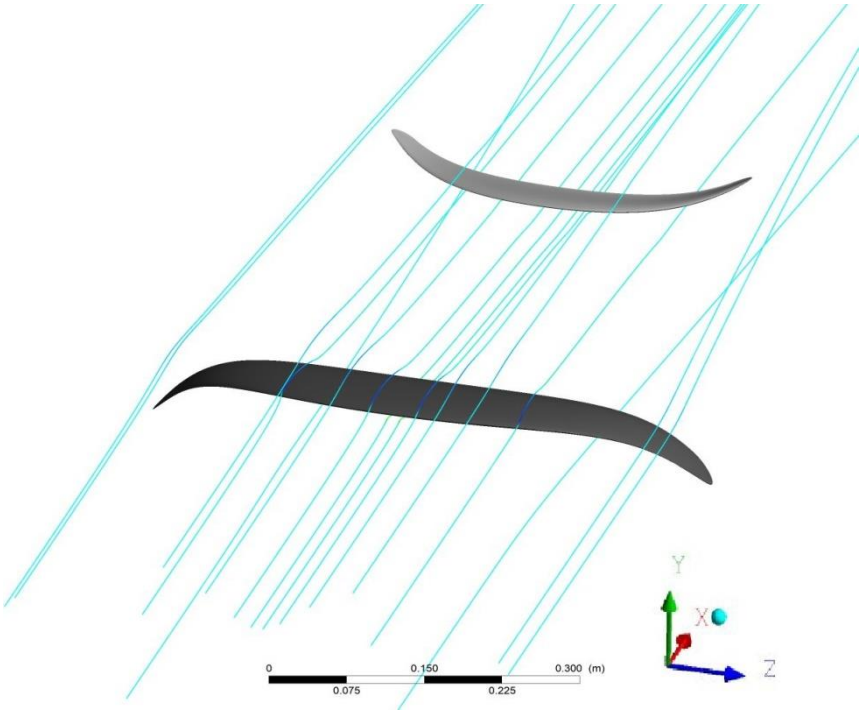
$F_{LS}/2$ [N]		v_s [m/s]				
		6	7	8	9	10
α [°]	6		-11,0	-14,9	-19,6	
	6,5		-5,5	-7,8		
	7		-0,7	-1,5		
	7,5		3,7	4,3		
	8		9,9			

Za potrebe usporedbe rezultata umjetno je proširen je raspon upadnog kuta α kako bi se pokazalo da se promjenom kuta nastrujavanja fluida mogu postići negativne vrijednosti uzgona na stražnjem krilu u izdvojenom strujanju, a rezultati su prikazani sljedećom tablicom [Tablica 11].

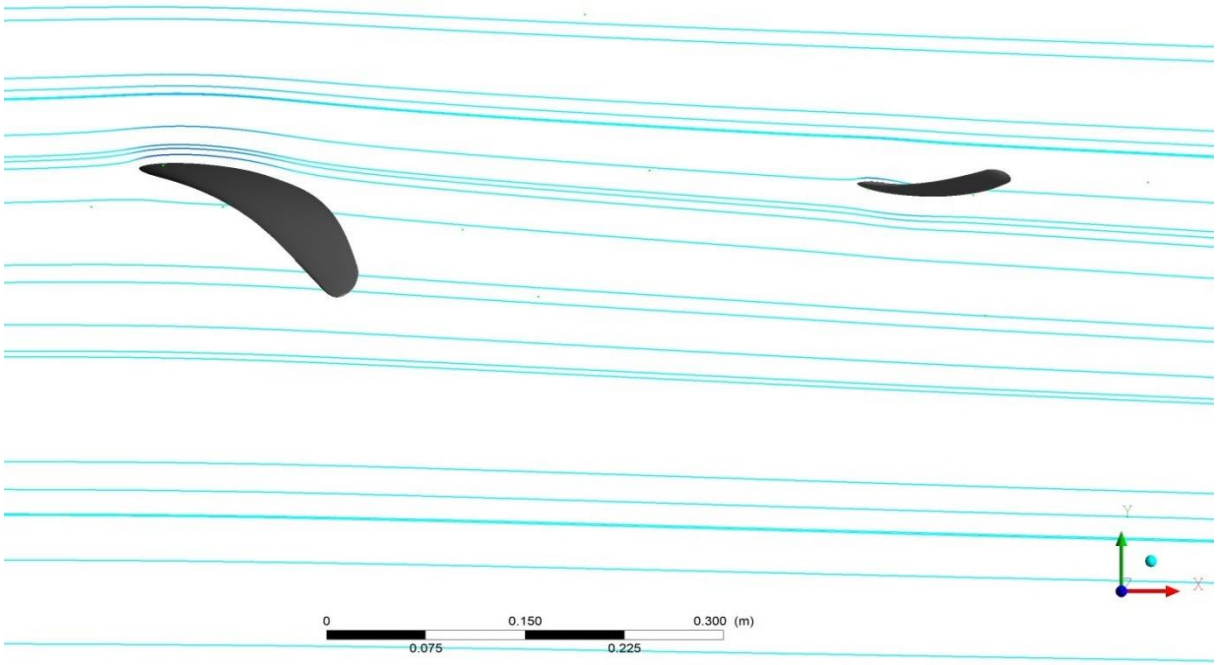
Tablica 11. Vrijednosti sile uzgona $F_{LS}/2$ na stražnjem krilu za proširenu raspon upadnih kuteva fluida pri strujanju oko izdvojenog stražnjeg krila

$F_{LS}/2$ [N]		v_s [m/s]				
		6	7	8	9	10
α [°]	3		-8,31			
	3,5		0,94			
	4		9,73			
	4,5		18,77			
	5		27,82			
	5,5		36,85			
	6	33,98	45,76	59,30	74,71	91,92
	6,5	40,35	54,43	70,68	89,14	109,72
	7	46,44	62,71	81,36	102,68	126,42
	7,5	52,18	70,55	91,66	115,72	142,56
	8	57,60	77,95	101,31	127,91	157,59

Na sljedećim slikama [Slika 70 i Slika 71] dan je prikaz strujnica za slučaj zajedničkog strujanja kako bi se lakše predočio utjecaj prednjeg krila na sliku strujanja.



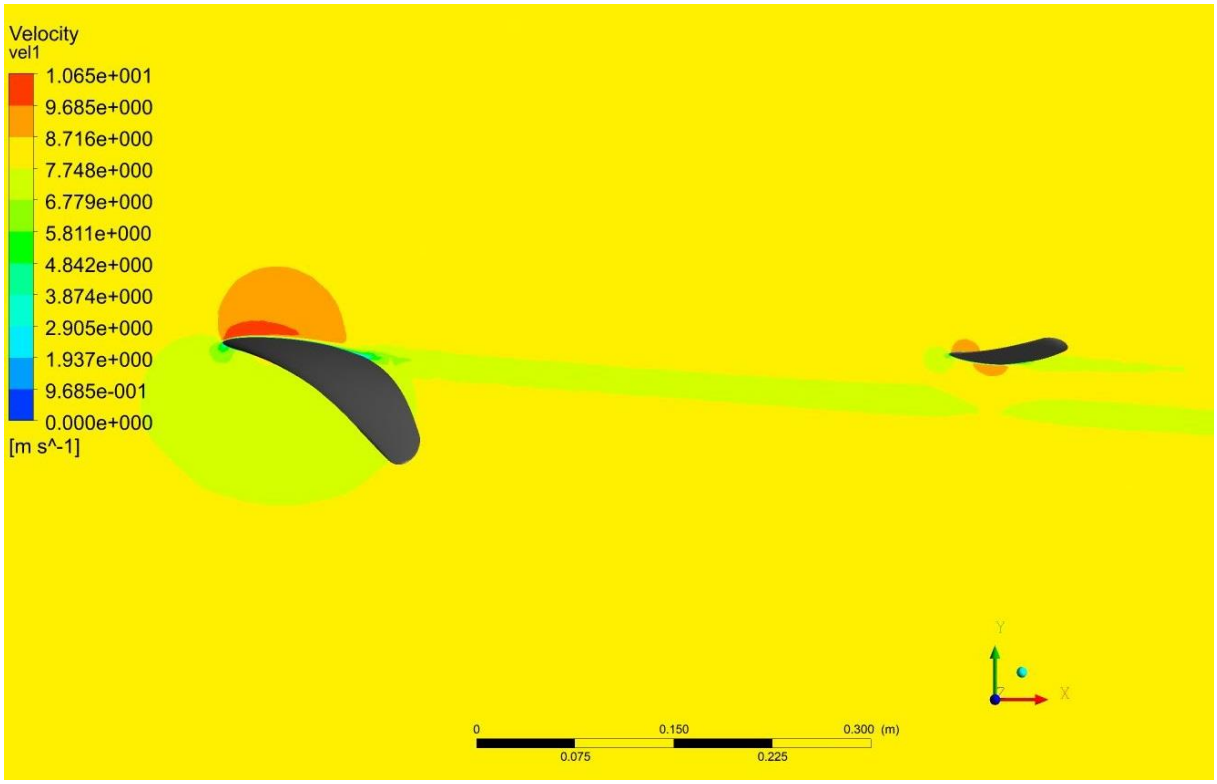
Slika 70. Prostorni prikaz prostornih strujnica pri strujanju oko oba krila α = 6.5°, v_s = 8 m/s



Slika 71. Ravninski prikaz z = 0 ravninskih strujnica pri strujanju oko oba krila, α = 6.5°, v_s = 8 m/s

Na prethodne dvije slike možemo jasno vidjeti kako prednje krilo zakreće strujnice koje prolaze blizu njega, generalno gledano prednje krilo skreće strujanje fluida prema dolje što se slaže s činjenicom da sila uzgona na prednjem krilu gleda u pozitivnom smjeru osi y. To skretanje fluida prema dolje ima za posljedicu smanjivanje kuta nastrujavanja fluida na stražnje krilo što rezultira smanjenjem odnosno promjenom smjera sile uzgona.

Kako se ovdje radi o trodimenzionalnom strujanju nije moguće kut nastrujavanja fluida na stražnje krilo jednostavno izraziti, a izračunate vrijednosti sila predstavljaju sumarno djelovanje duž čitave površine krila. Također vidimo da su vrhovi krila zakrenuti u različite smjerove, što upućuje na to da utjecaj prednjeg krila slabi približavanjem prema vrhu krila. Prema tome nije moguće uspoređivanje s rezultatima dobivenim za slučaj izdvojenog strujanja već samo promatranje pojava i trendova.

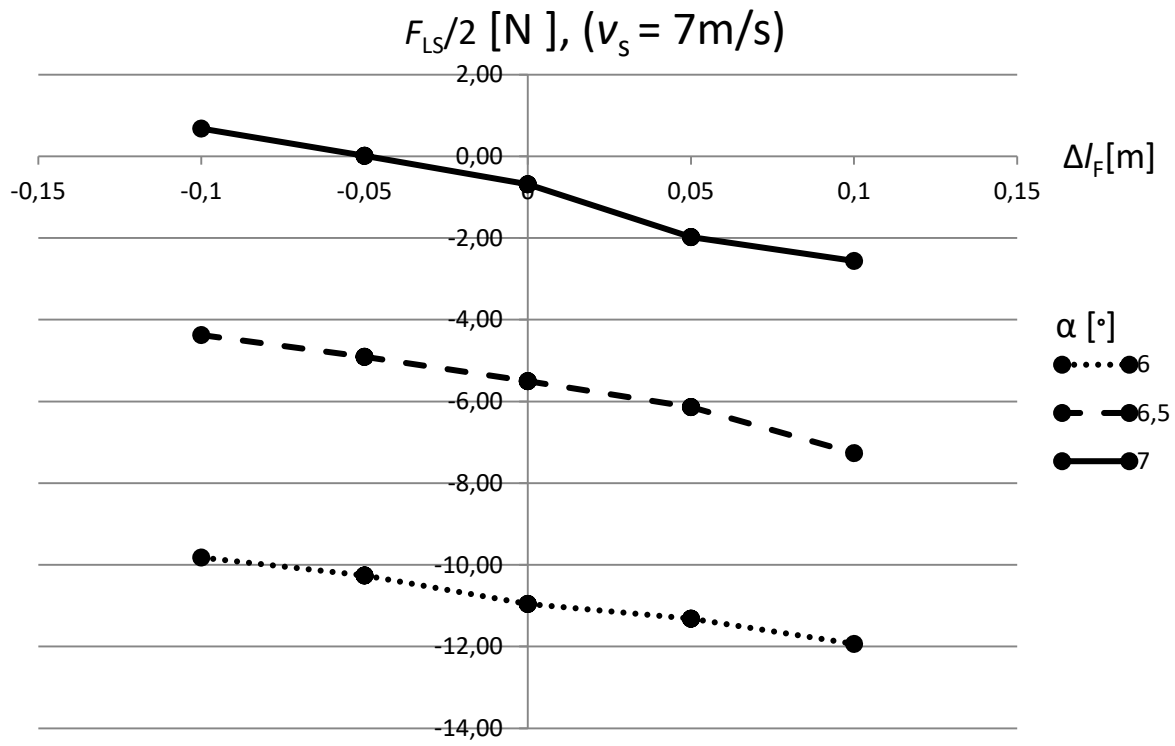


Slika 72. Ravninski prikaz z = 0 polja brzine pri strujanju oko oba krila, α = 6.5°, v_s = 8 m/s

Slika 72 prikazuje polje brzine u ravnini simetrije u kojoj se vidi trag usporenog fluida kojeg prednje krilo ostavlja za sobom, navedeni trag na slici se doima da nestaje u blizini stražnjeg krila pa opet nastaje. Navedena pojava posljedica je lokalnog ubrzavanja fluida uslijed strujanja oko stražnjeg krila.

8.4.3. Prikaz rezultata sile uzgona na stražnjem krilu

Osim dosad korištenih parametara α i v_s, uveden je i parametar Δl_F koji označava promjenu duljine l_F , a definiran je translatornim pomakom stražnjeg krila u pozitivnom smjeru osi x. Kako bi pomak Δl_F odgovarao promjeni duljine horizontalnog nosača pri stvaranju geometrije za pojedini slučaj strujanja prvo je stražnje krilo pomaknuto za iznos Δl_F te su zatim oba krila zakrenuta za iznos parametra α. Na sljedećim slikama [Slika 73 i Slika 75] dijagramski su prikazani rezultati simulacija u ovisnosti o prethodno navedenim parametrima.

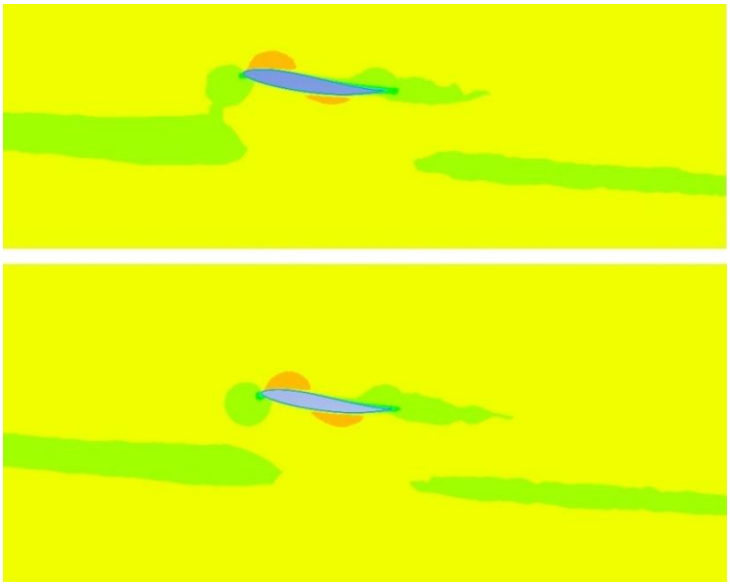


Slika 73. Dijagramski prikaz rezultata sile uzgona na polumodelu stražnjeg krila u ovisnosti o parametru Δl_F za različite vrijednosti parametra α pri v_s = 7 m/s

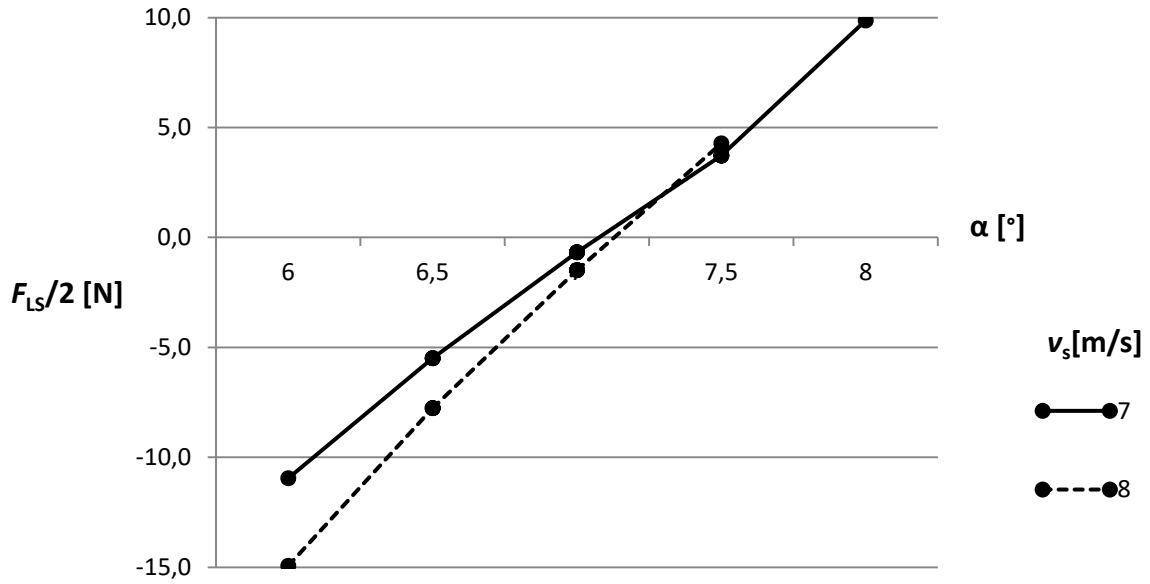
Slika 73 pokazuje nam da međusobnim udaljavanjem sila uzgona na stražnjem krilu raste u negativnom smjeru. Iz dijagramskog prikaza vidimo da se razlika u sili uzgona za dva krajnja slučaja reda veličine 3 N. Za izračunatu razliku možemo reći da pri stacionarnom uvjetu vožnje koji je ovdje pretpostavljen ne uzrokuje značajnu promjenu u ponašanju daske.

Na dijagramskom prikazu također je vidljivo da povećanjem kuta nastrujavanja na uronjenu geometriju sila uzgona na stražnjem krilu mijenja se prema pozitivnim vrijednostima. Usporedbom s rezultatima dobivenim za izdvojeno strujanje možemo vidjeti da se raspon sile uzgona pomaknuo u negativno područje, ali i dalje prati isti trend.

Narednom slikom [Slika 74] usporedno je prikazano polje brzine u blizini stražnjeg krila za krajnje slučajeve vrijednosti Δl_F.



Slika 74. Usporedni ravninski prikaz z = 0 polja brzine oko stražnjeg krila za Δl_F = +0,1m (gore) i Δl_F = -0,1m (dolje), α = 7°, v_s = 7 m/s



Slika 75. Dijagramski prikaz rezultata sile uzgona na polumodelu stražnjeg krila u ovisnosti o parametru α pri v_s = 7 m/s i v_s = 8 m/s, Δl_F = 0

Dijagramski prikaz [Slika 75] ovisnosti sile uzgona na stražnjem krilu o promjeni kuta α pokazuje nam da krivulja koja odgovara većoj brzini strujanja ima veći nagib što je i očekivano. Navedeno se pri vožnji manifestira većom osjetljivosti daske na uzdužni nagib.

Na slici sjecište krivulje sile uzgona i apscise predstavlja točku neutralnog uzgona, koje su ovdje dobivene linearnom interpolacijom između izračunatih točaka na krivulji. Međusobna

udaljenost tih sjecišta na apscisi govori nam o sličnosti strujanja za dvije prikazane brzine strujanja fluida.

Pojednostavljenim promatranjem stabiliteta daske tj. promatranjem samo utjecaja stražnjeg krila i to za stacionaran slučaj strujanja te zanemarivanjem kraka koji ima sila otpora može se uočiti da postoji stabilizirajući efekt stražnjeg krila. Naime ako promatramo liniju uzgona u blizini apscise vidimo da povećanjem kuta α dolazi do pozitivnih vrijednosti sile uzgona koje stvaraju moment koji dasku zakreće u smjeru koji smanjuje kut α. Isti stabilizirajući efekt prisutan je i u području ispod apscise, ali su predznaci sile i momenta promijenjeni.

Za stabilizirajući efekt možemo reći da je najizraženiji upravo u blizini apscise jer za istu promjenu kuta α daje najveću relativnu promjenu sile uzgona. Izračunate krivulje sile uzgona sijeku apscisu u području oko vrijednost $\alpha = 7°$ koja se u prethodnim simulacijama pokazala kao očekivana vrijednost tog parametra pri realnim uvjetima vožnje. Navedeno ukazuje na to da se ovakvim pojednostavljenim promatranjem korištena geometrija može opisati kao uspješno dimenzionirana.

8.4.4. Računanje položaja težišta kontaktnog pritiska stopala na dasku

Računanje položaja težišta kontaktnog pritiska za različite parametre vožnje dati će nam informaciju o tome koliko su različiti položaji koje jedriličar treba zauzeti kako bi uravnotežio dasku u različitim uvjetima stacionarne vožnje. Valja napomenuti da će ovdje rezultat ovisiti o odabiru kombinacija parametara za koje se smatra da su primjereni za stacionarnu vožnju pa odabiru parametara i ocjeni rezultata treba pristupiti kritički. Također ovdje se poštuju sve pretpostavke iz poglavlja gdje je izveden izraz koji će se ovdje koristiti, što u općem slučaju vožnje ne mora biti u potpunosti ispunjeno.

Poslužit ćemo se izrazom (11) izvedenim u poglavlju 3.3.2 koji glasi:

$$p_A = \frac{M_Z - F_L h \sin\alpha + F_D h \cos\alpha}{-F_D \sin\alpha - F_L \cos\alpha}.$$

Visina h sastoji se od visine foil-a i debljine daske, visina foil-a poznata je iz geometrijskog modela i iznosi 985 mm, a za debljinu daske pretpostavljeno je 80 mm pa je prema tome h = 1065 mm. Ostale veličine na desnoj strani izraza su dobivene računalnom simulacijom. Izraz je izveden na osnovi punog mehaničkog modela daske, a predmet računalne simulacije je polumodel uronjenog dijela daske. Međutim ako pogledamo izraz vidimo da se

raspisivanjem članova za polumodel faktori ispred fizikalnih veličina međusobno pokrate, što odgovara fizikalnom smislu.

Za odabir primjerenih parametara vožnje poslužit će Tablica 9 u kojoj se nalaze vrijednosti uzgona na prednjem krilu. Tablica 10 nam pokazuje da su sile uzgona na stražnjem krilu puno manjeg iznosa pa se odabir parametara može zasnivati samo na rezultatima za prednje krilo.

Odabrani su parametri u skladu s orijentacijskom vrijednosti $F_L/2 = 400$ N iz poglavlja 5.4.1.

Tablica 12. Prikaz ulaznih vrijednosti i rezultata za izračun položaja težišta kontaktnog pritiska na dasku *p*(A)

α [°]	**v_S [m/s]**	**F_D /2 [N]**	**F_L /2 [N]**	**M_Z/2 [Nm]**	***p*(A)[mm]**
6	7	31,7101	368,7234	19,7893	-33,37
6,5	7	34,9340	394,5245	24,1629	-34,32
7	7	38,2919	416,8448	27,8814	-34,14
7,5	7	41,8862	445,5040	31,9445	-31,92
8	7	45,2861	459,0350	35,6411	-33,41
6	8	41,1055	482,0763	25,5562	-31,95

Za izračun korišteni su ulazni podaci koji se odnose na oba krila zbrojeno te su prikazani u tablici [Tablica 12]. U zadnjem stupcu tablice dani su rezultati položaja točke A *p(*A) koji je definiran u ranijem poglavlju [Slika 22]. Među rezultatima javljaju se vrlo mala odstupanja što je sa stanovišta upravljanja daskom vrlo dobro, međutim postavlja se pitanje dovoljne točnosti rezultata simulacije za proračun ovakvog tipa.

9. ZAKLJUČAK

U ovom radu su analizirane hidrodinamičke sile na uronjenim dijelovima „kite foil“ daske. Rezultati pojednostavljene simulacije deformiranja prednjeg krila pod utjecajem hidrodinamičkih sila potvrdili su fizikalni smisao rješenja simulacije izdvojenog strujanja. Ovi rezultati poslužili su i za precizniji odabir raspona parametara strujanja u narednim simulacijama.

Pri usporedbi rezultata simulacije strujanja oko oba krila s rezultatima simulacije za izdvojeno strujanje na prednjem krilu, za različite brzine gibanja i različite uzdužne nagibe daske, razlika u iznosu hidrodinamičkih sila bila je mala pa se može zaključiti da nema značajnog utjecaja stražnjeg krila na strujanje oko prednjeg krila.

Strujanje oko prednjeg krila ima veliki utjecaj na strujanje oko stražnjeg krila jer sila uzgona na stražnje krilo ima različit predznak kada se analiziraju strujanje oko oba krila i izdvojeno strujanje oko stražnjeg krila. Time je potvrđena pretpostavka o stabilizirajućem učinku stražnjeg krila pri gibanju daske. Stražnje krilo ima nulti uzgon za vrijednosti uzdužnog nagiba daske oko 7°, što upravo odgovara očekivanim vrijednostimatog nagiba pri stacionarnoj vožnji. Utjecaj stražnjeg krila se smatra stabilizirajućim jer se, povećanjem upadnog kuta strujanja, moment uslijed djelovanja stražnjeg krila mijenja tako da nastoji smanjiti upadni kut strujanja.

Rezultati simulacija pokazuju da u stacionarnom strujanu pri promjeni parametara u rasponu vrijednosti koje bi se pojavile pri realnom gibanju daske nema velikih promjena u slici strujanja. Međutim za definiranje vremenskog odziva daske na brzu promjenu parametara strujanja i analizu stabilnosti daske, nužno je strujanje promatrati kao nestacionarno. Taj pristup bi bio logičan nastavak istraživanja provedenih u ovom radu.

LITERATURA

[1] http://inventors.about.com/od/wstartinventions/a/windsurfing.htm

[2] https://www.seabreeze.com.au/forums/Windsurfing/General/Windsurfing-in-the-80s?page=1

[3] http://www.goodwp.com/sports/16611-ocean-wave-windsurfing.html

[4] https://luderitz-speed.com/world-sailing/

[5] https://www.windsurf.co.uk/foil-buyers-guide/foil-guide-action-naish-681px/

[6] https://www.nationalgeographic.com/travel/intelligent-travel/2015/02/03/adventure-101-kitesurfing-in-turks-and-caicos/#/kitesurfing-turks-and-caicos-590.jpg

[7] http://www.kitesurfgrenadines.com/wp-content/uploads/2015/04/Foil-Jeremie-Tronet-2.png

[8] https://chicagokitesurfing.com/getting-started/kite-dynamics/

[9] https://www.skysails.info/en/skysails-marine/skysails-propulsion-for-cargo-ships/

[10] https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-4544542/Kites-power-5-000-British-homes-2020.html

[11] https://forcekiteandwake.com/products/2018-slingshot-turbine

[12] http://www.solsticesports.com/Peter-Lynn-Aero-Closed-Cell-Foil-Kite_p_241.html

[13] https://www.oceansource.net/cabrinha-double-agent-kite-foil-board-2019

[14] http://sailing-news.com/fr/1/permanent/30212/1-30295-1-0-ac-72-americas-cup-2013-san-francisco-ca-usa-day-16-oracle-emirates-8-8-!html

[15] https://www.ansys.com/-/media/ansys/corporate/resourcelibrary/article/faster-than-the-wind-aa-v10-i3.pdf

[16] https://www.ansys.com/blog/emirates-team-new-zealand-wins-2017-americas-cup,.

[17] https://www.sailingscuttlebutt.com/2016/11/08/history-of-the/

[18] https://levitaz.com/shop/product/element

[19] https://liquidforcekites.com/product/solo-v3-kite/

[20] http://kitesurfing-handbook.peterskiteboarding.com/progression/line-rigging-comparison

[21] I. Džijan, *Računalna dinamika fluida*., podloge uz predavanja, FSB Zagreb, 2010

[22] https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node478.htm

[23] https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node512.htm

[24] https://grabcad.com/library/kitefoil-hydrofoil-1

[25] https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity

[26] https://www.cfd-online.com/Tools/yplus.php

[27] https://www.ansys.com/products/platform/multiphysics-simulation/fluid-structure-interaction