

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Marko Horvat, Borna Šojat i Josip Žužul

PRIMJENA TEHNOLOGIJE IZBOČINA NA
NAPADNOM BRIDU LOPATICA VJETROTURBINE

Zagreb, 2016.

Ovaj rad smo izradili na Katedri za energetska postrojenja i energetiku Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, pod vodstvom prof. dr. sc. Hrvoja Jasaka, dipl. ing. te je predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade za akademsku godinu 2015./2016.

Ovom prilikom zahvaljujemo se našem mentoru prof. dr. sc. Hrvoju Jasaku dipl. ing., koji je svojom iznimnom strpljivošću, iskustvom i znanjem uvelike doprinio uspješnoj izradi ovog rada. Također, željeli bismo se zahvaliti svima ostalima koji su nam nesebično pružali pomoć.

Sadržaj

1	Motivacija	1
2	Razvoj vjetroturbina kroz povijest	2
2.1	Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje	2
2.2	Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje	4
3	Moderne vjetroturbine	9
3.1	Razvoj modernih vjetroturbina	9
3.2	Vjetroturbine povezane na mrežu	11
3.2.1	Danski koncept	11
3.2.2	Njemački koncept	12
3.3	Samostalne vjetroturbine	12
4	Biomimikrija	13
4.1	Primjeri primjene biomimikrije u praksi	14
4.1.1	Pasivno hlađenje u zgradama	14
4.1.2	Samočisteće boje	14
4.1.3	Čičak	15
4.1.4	Nova vrsta ljepljive trake	15
4.1.5	Japanski superbrzi vlak	16
4.1.6	Poboljšanje iskoristivosti vjetroturbina oponašajući izbočine na napadnom bridu peraja grbavog kita	16
5	Proračun geometrije lopatice vjetroturbine	18
5.1	Odabir profila	18
5.2	Određivanje promjera rotora	18
5.3	Proračun gubitaka	19
5.3.1	Gubitci uslijed otpora profila	19
5.3.2	Vršni gubitci	20
5.3.3	Gubitci uslijed postojanja vrtložnog traga	20
5.4	Proračun raspodjela duljina tetiva	21
5.5	Proračun raspodjele kuteva uvijanja	22
6	Postupak generiranja geometrije	23
6.1	Generiranje geometrije lopatice	23
6.2	Generiranje geometrije glavčine	26
6.3	Generiranje modela vjetroturbine	27

7	Numerička simulacija	28
7.1	Matematički model	28
7.2	Višestruki rotacijski referentni koordinatni sustavi	29
7.3	Numerička mreža	29
7.4	Rubni i početni uvjeti	32
7.5	Rezultati	33
7.5.1	Vjetroturbina s konvencionalnim lopaticama	33
7.5.2	Vjetroturbina s izbočinama na 35% duljine napadnog brida lopatice	37
7.5.3	Vjetroturbina s izbočinama na 70% duljine napadnog brida lopatice	42
7.5.4	Raspodjela turbulentnih veličina na lopaticama s izbočinama na napadnom bridu	47
7.6	Usporedba rezultata	51
7.7	Zaključak rezultata	52
8	Zaključak rada	53
9	Sažetak	54
10	Summary	55

Popis slika

1	Vjetrenjače u Iranu [1]	2
2	Presjek rotora perzijske vjetrenjače [1]	3
3	Primjer kineske vjetrenjača [1]	3
4	Primjer vjetroturbine sa Savoniusovim rotorom [1]	4
5	Primjer vjetroturbine s Darrieusovim rotorom [1]	4
6	Primjer stupne vjetroturbine [1]	5
7	Shema stupne vjetroturbine s dva paralelno pogonjena kamena za mljevenje [1]	6
8	Primjer nizozemske vjetrenjače [1]	7
9	Primjer mediteranske vjetrenjače [1]	7
10	Primjer nizozemske vjetroturbine na više katova [1]	8
11	Primjer američke vjetroturbine na više katova [1]	8
12	Porast jedinične snage vjetroatregata s godinama istraživanja i razvoja [2]	10
13	Udio pojedinih instaliranih energetske kapaciteta na razini EU u 2015. godini [3]	10
14	Podjela vjetroturbina i njihova primjena [1]	11
15	Wind-pump sustav za direktno pumpanje vode u spremnik [1]	12
16	Eastgate Centre [4]	14
17	Čestice nečistoće nošene kapljicom vode [5]	14
18	Princip rada čička pomoću kuka i omči [6]	15
19	Jastučići na nogama tropskog guštera [7]	15
20	Prikaz kljuna vodomara i nosa vlaka Shinkansen serije 500	16
21	Prikaz grbavog kita pod morem [8]	17
22	Prikaz peraje [9] i ispitivanog modela peraje [10] grbavog kita	17
23	Model slobodnog razvoja vrtloga u nizvodnoj struji zraka [1]	21
24	NASA LANGLEY LS(1)-0421 MOD profil korišten na poprečnim presjecima lopatica konvencionalne i vjetroturbine s izbočinama na napadnom bridu na relativnim radijusima $\frac{r}{R} = 0.25 - 1$	23
25	WORTMANN FX 77-W-258 profil korišten na poprečnim presjecima lopatica konvencionalne i vjetroturbine s izbočinama, na relativnim radijusima $\frac{r}{R} = 0.2 - 0.25$	23
26	Konvencionalna lopatica vjetroturbine	25
27	Lopatica vjetroturbine s izbočinama na 35% korisne duljine lopatice	25
28	Lopatica vjetroturbine s izbočinama na 70% korisne duljine lopatice	26
29	Glavčina vjetroturbine	27
30	Prikaz spojeva glavčina s lopicama za promatrane geometrije	27
31	Prikaz mreže vjetroturbine bez izbočina na napadnom bridu	30
32	Prikaz domene oko rotora vjetroturbine bez izbočina na napadnom bridu	30
33	Prikaz domene oko lopatice vjetroturbine bez izbočina na napadnom bridu	31
34	Prikaz domene oko vrha lopatice vjetroturbine bez izbočina na napadnom bridu	31

35	Prikaz domene oko lopatice vjetroturbine s izbočinama na napadnom bridu	32
36	Prikaz domene oko vrha lopatice vjetroturbine s izbočinama na napadnom bridu	32
37	Oscilacija snage jedne konvencionalne lopatice vjetroturbine	34
38	Prikaz polja brzine na ulaznom presjeku rotora vjetroturbine	35
39	Prikaz vrtložnog traga iza rotora	35
40	Prikaz dijela vrtložnog traga iza rotora u blizini lopatice i glavčine	36
41	Prikaz polja brzine i tlaka na radijusu 1,5 m	36
42	Prikaz polja brzine i tlaka na radijusu 3 m	37
43	Prikaz polja brzine i tlaka na radijusu 6 m	37
44	Oscilacija snage jedne lopatice vjetroturbine s izbočinama na 35% duljine	38
45	Prikaz polja brzine na ulaznom presjeku rotora vjetroturbine s izbočinama na 35% duljine lopatica	39
46	Prikaz vrtložnog traga iza rotora vjetroturbine s izbočinama na 35% duljine napad- nog brida lopatice	39
47	Prikaz dijela vrtložnog traga iza rotora u blizini lopatice i glavčine vjetroturbine s izbočinama na 35% duljine napadnog brida lopatice	40
48	Prikaz polja brzine i tlaka na radijusu 1,5 m vjetroturbine s izbočinama na 35% duljine napadnog brida lopatice	41
49	Prikaz polja brzine i tlaka na radijusu 3 m vjetroturbine s izbočinama na 35% duljine napadnog brida lopatice	41
50	Prikaz polja brzine i tlaka na radijusu 6 m vjetroturbine s izbočinama na 35% duljine napadnog brida lopatice	41
51	Prikaz polja tlaka na potlačnoj strani lopatice s izbočinama na 35% duljine napad- nog brida lopatice	42
52	Prikaz polja tlaka na pretlačnoj strani lopatice s izbočinama na 35% duljine napad- nog brida lopatice	42
53	Oscilacija snage jedne lopatice vjetroturbine s izbočinama na 70% duljine napad- nog brida lopatice	43
54	Prikaz polja brzine na ulaznom presjeku rotora vjetroturbine s izbočinama na 70% duljine lopatica	44
55	Prikaz vrtložnog traga iza rotora vjetroturbine s izbočinama na 70% duljine napad- nog brida lopatice	44
56	Prikaz dijela vrtložnog traga iza rotora u blizini lopatice i glavčine vjetroturbine s izbočinama na 70% duljine napadnog brida lopatice	45
57	Prikaz polja brzine i tlaka na radijusu 1,5 m vjetroturbine s izbočinama na 70% duljine napadnog brida lopatica	45
58	Prikaz polja brzine i tlaka na radijusu 3 m vjetroturbine s izbočinama na 70% duljine napadnog brida lopatice	46

59	Prikaz polja brzine i tlaka na radijusu 6 m vjetroturbine s izbočinama na 70% duljine napadnog brida lopatica	46
60	Prikaz polja tlaka na potlačnoj strani lopatice s izbočinama na 70% duljine napadnog brida lopatica	47
61	Prikaz polja tlaka na pretlačnoj strani lopatice s izbočinama na 70% duljine napadnog brida lopatica	47
62	Prikaz polja specifične turbulentne kinetičke energije na potlačnoj strani lopatice s izbočinama na napadnom bridu	48
63	Prikaz polja specifične turbulentne kinetičke energije na pretlačnoj strani lopatice s izbočinama na napadnom bridu	48
64	Prikaz polja specifične brzine disipacije turbulentne kinetičke energije na potlačnoj strani lopatice s izbočinama na napadnom bridu	49
65	Prikaz polja specifične brzine disipacije turbulentne kinetičke energije na pretlačnoj strani lopatice s izbočinama na napadnom bridu	49
66	Prikaz polja specifične brzine disipacije turbulentne kinetičke energije na potlačnoj strani lopatice s izbočinama na napadnom bridu	50
67	Prikaz polja turbulentne viskoznosti na pretlačnoj strani lopatice s izbočinama na napadnom bridu	50
68	Prikaz vrtloga iza vjetroturbine s izbočinama na napadnom bridu	51

Popis tablica

1	Izabrani aeroprofil lopatice vjetroturbine	18
2	Vrijednosti gubitaka usljed otpora profila	20
3	Izračunane vrijednosti duljina tetiva i kuteva uvijanja u funkciji radijusa lopatice vjetroturbine	22
4	Broj ćelija za različite promatrane slučajeve	29
5	Parametri vjetroturbine s konvencionalnim lopaticama	33
6	Parametri vjetroturbine s izbočinama na 35% duljine lopatice	37
7	Parametri vjetroturbine s izbočinama na 70% duljine napadnog brida lopatice	43
8	Usporedba rezultata dobivenih simulacijom s proračunskim parametrima	51

1 Motivacija

Eksperimenti u zračnim tunelima pokazali su da lopatice izrađene prema modelu peraje grbavog kita povećavaju ukupnu silu uzgona (F_L) bez značajnog povećanja sile otpora (F_D). Također ovaj model lopatice s izbočinama na napadnom bridu prolazi kroz slom uzgona pri većoj vrijednosti napadnog kuta u usporedbi s modelom glatke lopatice [11]. Ispitivane lopatice u zračnom tunelu bile su bazirane na NACA 0020 aeroprofilu, gdje je osnovna lopatica izrađena s glatkim napadnim bridom, dok su na drugoj lopatici izbočine bile sinusoidno raspoređene, s time da se njihova amplituda smanjivala prema vrhu lopatice. Statička ispitivanja u zračnom tunelu provedena su za niz napadnih kutova (α) pri Reynoldsovom broju, $Re = 500\ 000$. Prilikom ispitivanja uočen je postepeni porast koeficijenta uzgona (c_L) i za lopaticu s izbočinama na napadnom bridu i za lopaticu s glatkim napadnim bridom pa sve do napadnog kuta pri kojem je nastupio slom uzgona. Prilikom sloma uzgona došlo je do skokovite promjene, odnosno do naglog pada koeficijenta uzgona [11]. Ukupni porast sile uzgona lopatice s izbočinama na napadnom bridu iznosio je 6% u usporedbi s lopaticom s glatkim napadnim bridom. Također, slom uzgona je nastupio na 40% većem napadnom kutu u odnosu na lopaticu bez izbočina, gdje je do toga došlo pri napadnom kutu od 11° . Koeficijent otpora (c_D) lopatice s izbočinama na napadnom bridu je pri napadnim kutovima $12^\circ < \alpha < 17^\circ$ bio manji u odnosu na lopaticu bez izbočina, nešto veći pri napadnim kutovima $10^\circ < \alpha < 12^\circ$ dok je pri nižima kutevima od $\alpha < 10^\circ$ bio jednak. Također, kod lopatica s izbočinama na napadnom bridu do sloma uzgona došlo postupnije, odnosno pada sile uzgona nije bio toliko izražen kao što je to bio slučaj kod lopatica s glatkim napadnim bridom [12].

Budući da ne postoji velik broj pasivnih tehnologija koje će dovesti do pojave sloma uzgona na većim vrijednostima napadnog kuta te istovremeno povećavati silu uzgona, a smanjiti silu otpora, ova tehnologija pokazuje izraziti potencijal. Tijekom izrade ovog rada pažnja je posvećena ispitivanju ponašanja lopatica s izbočinama na 35% i 70% efektivnog radijusa u usporedbi s klasičnom lopaticom vjetroturbine. Glavni fokus ovog rada je izračun ukupno postizive snage pri istim napadnim kutevima za istu neporemećenu brzinu nestrujavanja vjetra. Ovom bi se tehnologijom mogla smanjiti minimalno potrebna brzina vjetra za pokretanje vjetroturbine, čime bi se povećao kapacitativni faktor vjetroatregata. Do toga bi moglo doći budući da se stvaraju koncentrirane struje zraka koje na podtlačnoj strani formiraju mala područja još nižeg tlaka koja su dovoljno velika da proizvedu potrebnu silu uzgona za iniciranje rotacije rotora vjetroturbine.

Ovaj rad je podijeljen u nekoliko osnovnih cjelina. Na početku je iznesen povijesni razvoj vjetroturbina te njihovo trenutno stanje u svijetu, kao i uvod u ideju biomimikrije. Nakon toga slijedi razrada problema kroz proračun lopatice vjetroturbine, generiranje geometrije te prostornu diskretizaciju i numeričku simulaciju. U dijelu proračuna definirana je geometrija lopatice vjetroturbine prema zadanim projektnim parametrima. U sljedećem koraku je izvršeno generiranje geometrije u softverskom CAD programu *Solidworks*. Ta geometrija je dalje korištena za generiranje prostorno diskretiziranih mreža konačnih volumena za svaki analizirani slučaj te su postavljeni rubni i početni uvjeti za numeričku simulaciju koja je provedena u open-source CFD paketu *OpenFOAM*.

2 Razvoj vjetroturbina kroz povijest

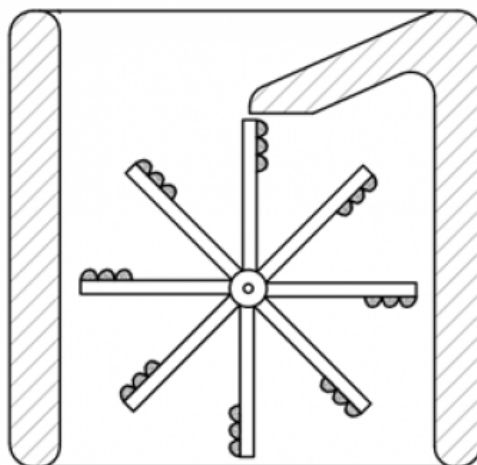
2.1 Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje

Prvi strojevi koji su za pogon koristili energiju vjetra nastali su u zemljama Dalekog i Bliskog istoka. Prema Hammurabiju (1700. g. pr. Kr.) vjetrenjače su korištene za pogon pumpi koje su navodnjavale ravnicu Mezopotamije. Postoje pisani dokumenti iz 700. g. koji potvrđuju postojanje vjetrenjača u Afganistanu. Ruševine takvih vjetrenjača mogu se i danas vidjeti u Iranu i Afganistanu. Takve vjetrenjače, osim za navodnjavanje, korištene su i za pogon mlinova. Na slici 1 mogu se vidjeti vjetrenjače iz Nashtifana, grada u Iranu blizu granice s Afganistanom [1].



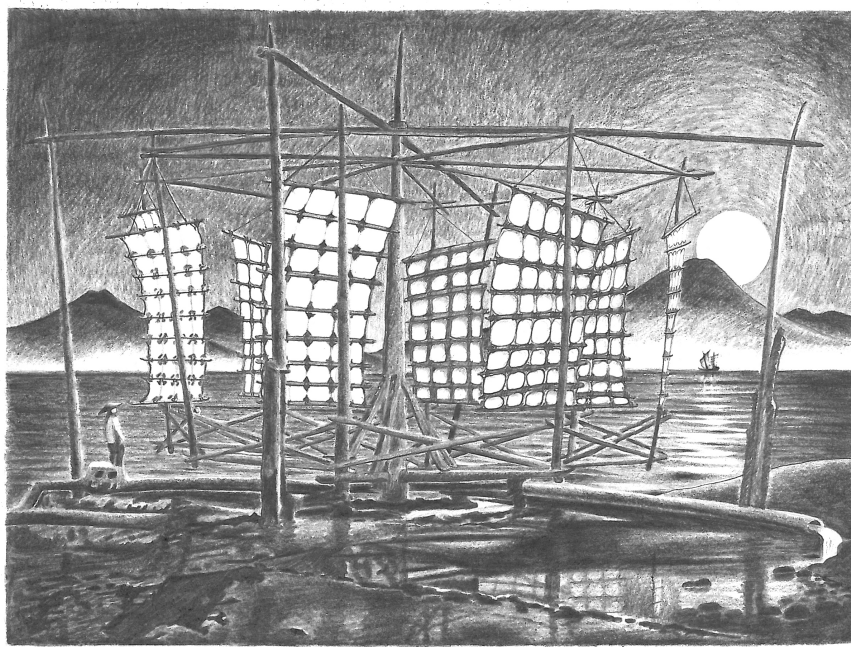
Slika 1: Vjetrenjače u Iranu [1]

Jedno od glavnih obilježja područja u kojem se nalazi taj grad su jaki vjetrovi. Prve vjetrenjače imale su vertikalnu os vrtnje i koristile su silu otpora za svoje pokretanje. Prirodni materijali od kojih su izgrađene su oni materijali koje su ljudi mogli pronaći u svojoj okolini. Obično je vratilo bilo izrađeno od drveta, a u njega su bile učvršćene "lopatice" od pletenih ili drvenih materijala. Prikazani tip vjetrenjača je perzijski tip. Kod takvih je vjetrenjača polovica rotora, koja se kod rotacije kreće u susret vjetru, prekrivena zidom. Na taj način je stvorena asimetričnost koja omogućava iskorištavanje energije vjetra. Shema rotora takve vjetrenjače je prikazana na slici 2 [1].



Slika 2: Presjek rotora perzijske vjetrenjače [1]

Takav tip vjetrenjača proširio se po većem dijelu Azije, no u pojedinim su područjima bile modificirane. Kineske vjetrenjače pojavljuju se oko 1000. g., a asimetričnost koja omogućuje iskorištavanje energije vjetra postignuta je pomoću platnenih jedara. Oblik jedra omogućava da se prilikom gibanja jedra, suprotno od smjera vjetra, javlja manja sila otpora od slučaja kad se jedro giba u smjeru vjetra. Kineske vjetrenjače, kao i perzijske, imaju vertikalnu os vrtnje i izgrađene su od prirodnih materijala. Prednost kineskih vjetrenjača je ta što mogu iskorištavati energiju vjetra neovisno o njegovom smjeru. Primjer takve vjetrenjače može se vidjeti na slici 3.



Slika 3: Primjer kineske vjetrenjača [1]

Kasnije konstrukcije vjetrenjača s vertikalnom osi vrtnje također su koristile oblik lopatica koji omogućuje pojavu različite sile otpora kad se lopatica giba u smjeru vjetra i suprotno od smjera vjetra. Vjetrenjače s vertikalnom osi vrtnje su se pojavile ranije od vjetrenjača s horizontalnom osi vrtnje jer je njihova izvedba jednostavnija i jednostavniji je postupak priključenja stroja koji

se pogoni vjetrenjačom. Od modernih vjetroturbina s vertikalnom osi mogu se izdvojiti vjetroturbine sa Savoniusovim i Darrieusovim rotorom. Darrieusov rotor je specifičan po tome jer koristi uzgonsku silu za pokretanje rotora. Na slikama 4 i 5 prikazani su rotori modernih vjetroturbina s vertikalnom osi vrtnje.



Slika 4: Primjer vjetroturbine sa Savoniusovim rotorom [1]



Slika 5: Primjer vjetroturbine s Darrieusovim rotorom [1]

2.2 Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje

Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje razvile su se u europskim zemljama. Njihovo glavno obilježje je rotacija lopatica u smjeru koji je okomit na smjer vjetra. To podrazumijeva da je uzgon

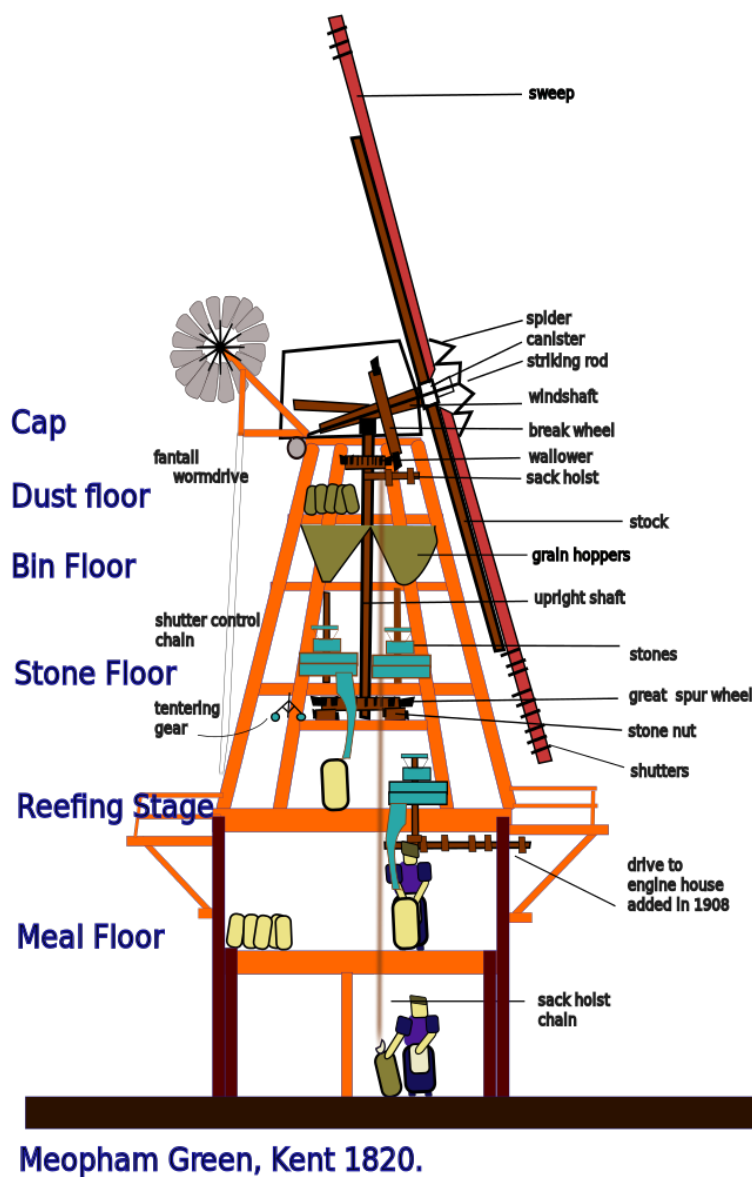
pogonska sila rotora takvih vjetroturbina. Iako su se takve vjetroturbine javile na početku prošlog tisućljeća, prvi teorijski opis sile uzgona na lopaticu datiraju u početak prošlog stoljeća. Najstarija konstrukcija vjetrenjače kojoj je rotor pokretan uzgonskom silom je stupna vjetrenjača. Njena slika je pronađena u knjigama za molitvu u Engleskoj iz 1100. g. Istovremeno je pronađen zapis i u pravnim dokumentima francuskoga grada Arles. Primjer takve vjetrenjače je prikazan na slici 6 [1].



Slika 6: Primjer stupne vjetroturbine [1]

Takav tip vjetrenjače proširio se po europskim zemljama, a povjesničari se slažu da su ih križari proširili u Siriji. Stupna vjetrenjača se sastoji od kvadratne konstrukcije koja se može rotirati oko svoje središnje osi pomoću poluge za zakretanje. Budući da je os rotacije rotora horizontalna, potreban je sustav zupčanika koji pretvara horizontalno gibanje u vertikalno. Vertikalno gibanje se

može jednostavnije iskorištavati za pogon mlinskog kamena. Od 1800. g. stupne vjetrenjače su imale dva zupčasta kola kako bi se omogućio paralelni pogon dva mlinska kamena [1].



Slika 7: Shema stupne vjetroturbine s dva paralelno pogonjena kamena za mljevenje [1]

U Nizozemskoj su se počele razvijati vjetrenjače za isušivanje površina prekrivenih vodom za proširenje obradivih površina. U tu svrhu je modificirana britanska stupna vjetrenjača, na način da se energija gibanja vratila prenosila do podnožja vjetrenjače gdje se spajala na pumpu. Vjetrenjača za pumpanje vode se prvi put koristila 300 godina nakon što je bila konstruirana prva stupna vjetrenjača. Kasnije se takva konstrukcija primijenila za mljevenje, jer se na takav način mljevenje moglo odvijati u prizemlju. To je omogućilo da se težak teret, kao npr. mlinski kamen i vreće žita, nije morao transportirati do prostorije u pokretnom dijelu vjetrenjače. Primjer takve vjetrenjače prikazan je na slici 8 [1].



Slika 8: Primjer nizozemske vjetrenjače [1]

U južnoj Europi bile su rasprostranjene vjetrenjače s tornjem koje datiraju u 1200. g. Glavna osobina mediteranske verzije vjetrenjače je cilindrična zgrada te rotor koji se sastoji od osam ili više lopatica. Kasnije verzije, uglavnom u južnoj Francuskoj, imale su rotirajuću kupolu i drveni rotor s četiri lopatice. Daljnjim razvojem takvih vjetrenjača je teška kamena konstrukcija zamijenjena lakšom drvenom. Primjer mediteranske vjetrenjače s četiri lopatice i rotirajućom kupolom prikazan je na slici 9.



Slika 9: Primjer mediteranske vjetrenjače [1]

U 17. i 18. st. upotreba energije vjetra je doživjela revoluciju. Velik broj izgrađenih vjetrenjača doveo je do standardizacije dijelova potrebnih za njihovu konstrukciju. Takav način proizvodnje je bio neobičan za to doba. Zbog toga su nizozemske vjetrenjače karakteristične, a njihov osnovni

tip je prepoznatljiv. Vjetrenjače su postajale više jer su se gradile na više katova. To je omogućilo povoljnije uvjete nastrojavanja vjetra na rotor, zbog toga što se rotor podigao u više dijelove atmosferskog graničnog sloja, gdje su brzine strujanja vjetra veće.



Slika 10: Primjer nizozemske vjetroturbine na više katova [1]

Zadnji tip povijesnih vjetrenjača je tzv. *farmerska vjetrenjača*. Takav tip vjetrenjače javio se sredinom 19. st. u Americi gdje su se one proizvodile za pumpanje vode. Glavne karakteristike takve vjetrenjače su rotor s promjerom od 3 do 5 metara koji se sastoji od oko 20 lopatica te visoki rešetkasti metalni toranj. Takav tip vjetrenjača se koristi u manje razvijenim područjima i danas, za pumpanje vode iz većih dubina. Na slici 11 je prikazan primjer takve vjetrenjače.



Slika 11: Primjer američke vjetroturbine na više katova [1]

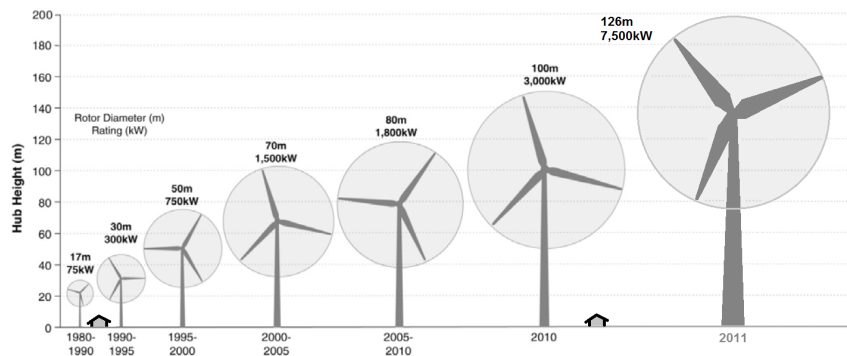
3 Moderne vjetroturbine

Energija vjetra, kao direktna posljedica najizdašnjeg izvora energije na našoj planeti - Sunčeve energije, koristi se od davnina. Ljudska su saznanja o iskorištavanju energije vjetra kroz stoljeća korištenja znatno napredovala, te su tako razvijeni razni tipovi vjetroturbinskih agregata različitih namjena koji su danas u masovnoj upotrebi. Unatoč svrstavanju energije vjetra u nekonvencionalne izvore energije, njeno iskorištavanje je danas u svakom pogledu daleko od tog pojma. Vjetroturbinska postrojenja su široko rasprostranjena tehnologija koja se pretežno koristi s ciljem proizvodnje električne energije te njenog odašiljanja u mrežu elektroenergetskog sustava. Dok je to najčešći slučaj u industrijski razvijenim zemljama, primjena vjetroturbina u zemljama u razvoju je često puta vezana uz ruralna područja te direktnu upotrebu dobivenog korisnog mehaničkog rada u nedostatku guste distribucijske mreže kao što je slučaj u zemljama Zapada. U takvim situacijama, vjetroturbine se koriste za razne namjene poput [1]:

- pogon pumpe za distribuciju pitke vode, za navodnjavanje,
- pogon glodalica, pila, čekića, preša te motora alatnih strojeva,
- punjenje baterija, za rasvjetu,
- pogon sustava grijanja i hlađenja,
- hibridni sustav: s Dieselovim agregatom ili fotonaponskim sustavom.

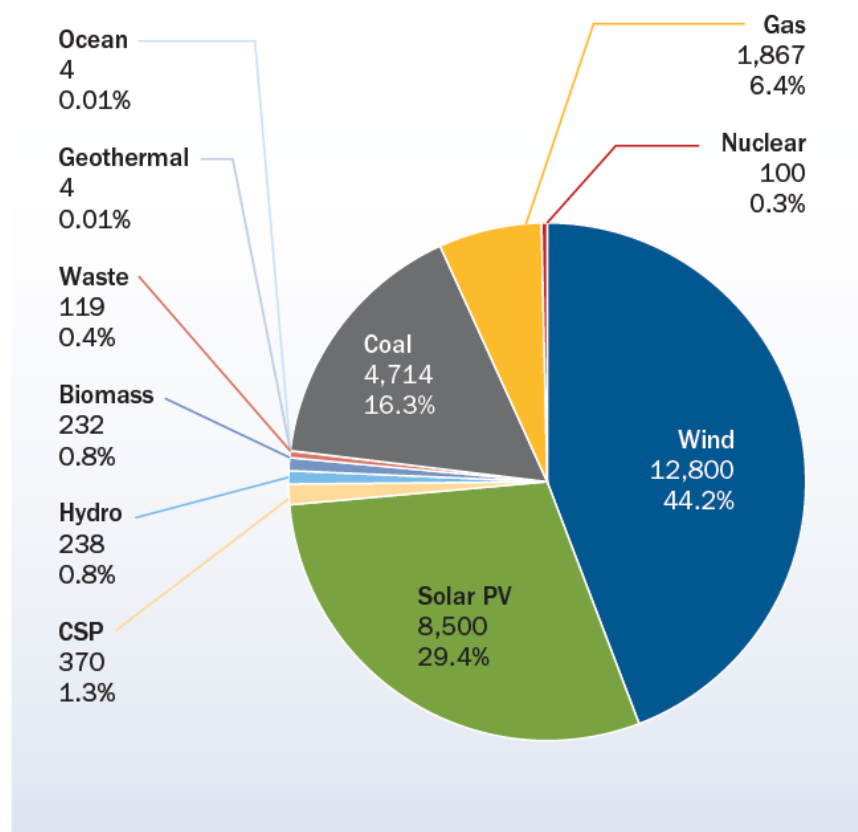
3.1 Razvoj modernih vjetroturbina

Nagli razvoj tehnologije modernih vjetroturbina usko je vezan uz naftnu krizu 70 - ih godina prošlog stoljeća kada su se zemlje - izvoznice nafte, članice organizacije OPEC udružile s ciljem namjernog smanjenja proizvodnje, što je izazvalo posljedice na tržištu te direktno utjecalo na povećanje cijene nafte na svjetskom tržištu. Nakon tih događaja postalo je jasno kako je proizvodnja električne energije isključivo iz fosilnih goriva izrazito podložna političkim faktorima u zemljama – izvoznicama nafte, te kako je nužno potražiti alternativu za osiguravanje stabilnosti opskrbe električne energije. Tako je s godinama korištenja, istraživanja i razvoja došlo do naglog povećanja jedinične snage vjetroatregata kao što se može vidjeti na slici 12. Prvotni vjetroatregati 80 - ih godina prošlog stoljeća imali su rotore manjih promjera i manjih nazivnih snaga, dok su vjetroturbine u 2011. godini bile znatno unapredovale – karakterizira ih promjer rotora od 126 m i nazivna snaga od 7,5 MW. Na temelju iznesenog se može uočiti snažan trend ulaganja u istraživanja i razvoj te u konačnici rasta jedinične snage vjetroatregata u relativno kratkom vremenskom periodu [1].



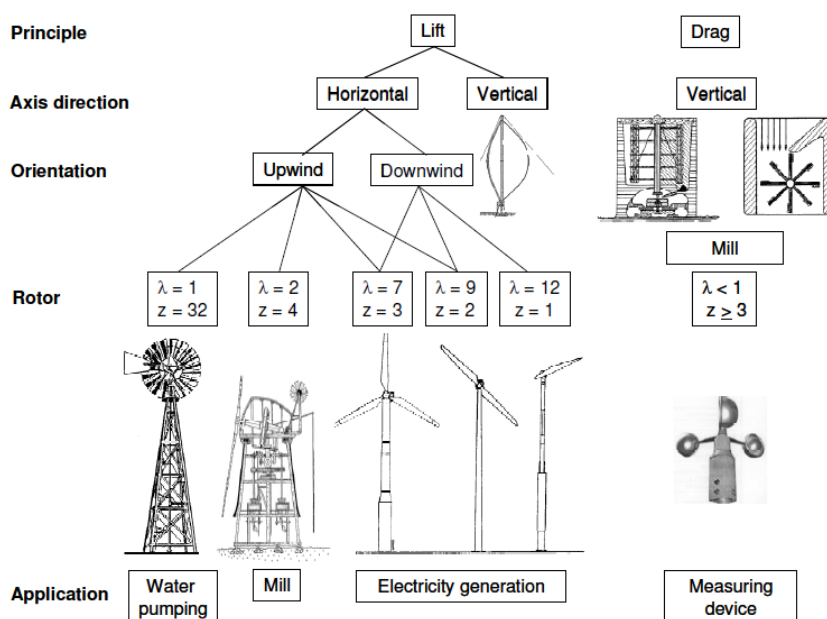
Slika 12: Porast jedinične snage vjetroagregata s godinama istraživanja i razvoja [2]

Time vjetroturbinska postojenja postaju jedan od nositelja novog vala instaliranih energetske kapaciteta s kraja 20. i tijekom 21. stoljeća, te općenito predvodnik implementacije nove energetske politike obnovljivih izvora energije širom EU i svijeta s ciljem smanjenja emisije stakleničkih plinova [1], [3].



Slika 13: Udio pojedinih instaliranih energetske kapaciteta na razini EU u 2015. godini [3]

Prema slici 13, vjetroturbine se mogu podijeliti na nekoliko načina: njihov princip rada može biti temeljen na sili uzgona ili sili otpora, mogu biti izvedene s horizontalnom ili vertikalnom osi vrtnje, rotor im može biti orijentiran uzvodno ili nizvodno u odnosu na stup, mogu imati različit broj lopatica te se mogu koristiti za različite namjene.



Slika 14: Podjela vjetroturbina i njihova primjena [1]

Ove navedene podjele su većinom povijesnog karaktera, budući da se s vremenom ustalio karakterističan tip vjetroturbina koji se najčešće susreće u komercijalnoj upotrebi. Tako su današnje vjetroturbine najčešće izvedene s horizontalnom osi vrtnje, rade na principu uzgona s uzvodno smještenim rotorom koji posjeduje tri lopatice te služe za proizvodnju električne energije.

3.2 Vjetroturbine povezane na mrežu

3.2.1 Danski koncept

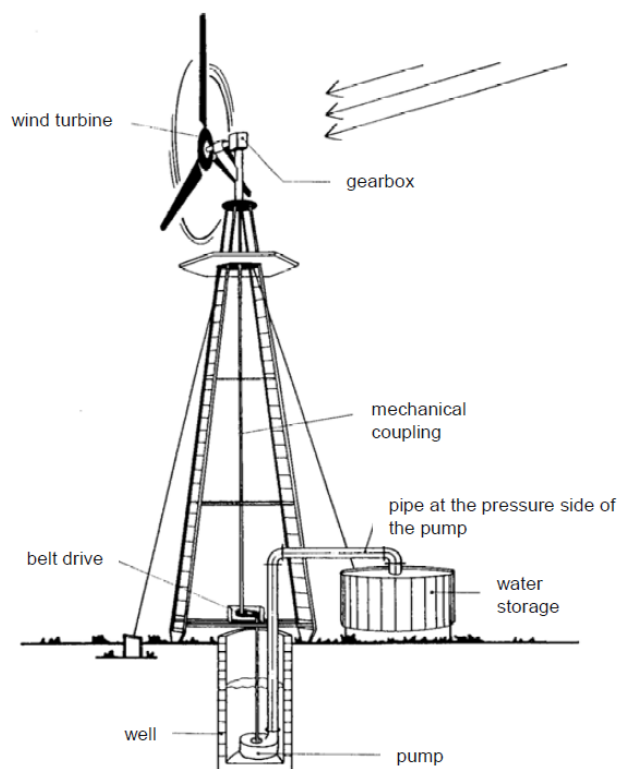
Danski koncept vjetroturbina je tehnički izraz poznat unutar krugova konstrukcija vjetroturbina vezan uz prvu generaciju komercijalno uspješnog koncepta vjetroturbina razvijen početkom 80-ih godina prošlog stoljeća. Danski koncept vjetroturbina predstavlja turbine s horizontalnom osi vrtnje rotora na kojem se nalaze tri lopatice kruto spojene na glavčinu. U pogonu rotor radi s konstantnom brzinom vrtnje te pomoću reduktora pokreće asinkroni generator koji proizvodi električnu energiju koju šalje u mrežu. Za ograničavanje izlazne snage, ovakve vjetroturbine koristile su efekt sloma uzgona, tzv. „stall regulation“. Danski koncept vjetroturbine karakteriziraju dva asinkrona generatora, jedan manji te jedan veći. Na taj se način postižu dvije optimalne radne točke pri samo dvije brzine vrtnje. Prilikom dovoljno velike brzine vjetra, asinkroni se generator spaja na mrežu te ubrzava u motornom režimu rada nakon čega se jednostavno prebacuje u generatorski režim. S daljnjim povećanjem brzine vjetra uključuje se veliki asinkroni generator, dok se mali asinkroni generator isključuje. Vjetroturbine danskih proizvođača u potpunosti su zavladaile tržištem 80-ih i prvom polovicom 90-ih godina prošlog stoljeća te se njihova standardna izvedba vjetroturbine s promjerom rotora od 15 do 17 metara i nazivne snage od 55 kW proširila širom svijeta, a pretežito u SAD-u [1].

3.2.2 Njemački koncept

Početkom 90-ih godina prošlog stoljeća u Njemačkoj, kompanija Enercon napušta komercijalno uspješan i uhodan danski koncept te postaje predvodnik novog dizajna, tzv. njemačkog koncepta. Enercon uvodi određene promjene u načinu funkcioniranja vjetroturbine: uvođenje promjenjive brzine vrtnje rotora vjetroturbine, rotor je kontroliran zakretom lopatica (tzv. pitch control), umjesto reduktorom pogonjenog asinkronog generatora uvodi se direktno pogonjen sinkroni generator, te uvode AC-DC-AC mrežni priključak. Uslijedio je velik tržišni uspjeh kojeg su u stopu nastojali pratiti i ostali proizvođači vjetroturbina. Konačno, postiglo se da su vjetroturbine s promjenjivom brzinom vrtnje tijekom rada u prednosti s obzirom na one s konstantnom brzinom vrtnje jer u mnogo širem radnom području rade s optimalnom iskoristivošću. Kao takve, mogu biti izvedene s ili bez reduktora što najčešće ovisi o filozofiji proizvođača [1].

3.3 Samostalne vjetroturbine

Kao što je već prethodno spomenuto, samostalne vjetroturbine su ili vezane uz neka prošla vremena ili uz ruralna područja u zemljama u razvoju koje ne posjeduju dovoljno gustu distribucijsku mrežu. Tako je moguće u ruralnim područjima manje razvijenih zemalja vidjeti tzv. wind-pump sustave, tj. sustave u kojima se korisna mehanička energija rotacije rotora dobivena u vjetroagregatu koristi za direktan pogon vodovodnih pumpi, pumpi za navodnjavanje ili pumpi za odvodnjavanje. U zabačenim područjima bez distribucijske mreže u kojima postoje zalihe nafte, ovakvi wind-pump sustavi imaju potencijal za upotrebu prilikom pumpanja nafte. Postoji mogućnost buduće popularizacije ovakvih sustava sa sve većom integracijom obnovljivih izvora energije u takozvanim hibridnim sustavima u slučaju nepostojanja ili neisplativnosti izgradnje distribucijskog sustava u zabačenim područjima (sprega foto-naponskog i vjetroturbinskog sustava sa spremnikom energije, sprega Dieselog agregata i vjetroturbinskog sustava sa spremnikom energije) [1].



Slika 15: Wind-pump sustav za direktno pumpanje vode u spremnik [1]

4 Biomimikrija

Biomimikrija se može opisati kao ideja u kojoj se održiva rješenja problema s kojima se čovječanstvo suočava pronalaze u prirodi. Tijekom povijesti su ljudi na različite načine proizvodili koristan mehanički rad, kao naprimjer korištenjem vodenica ili vjetrenjača isto kao što su i problem grijanja rješavali uporabom biomase. U posljednjih nekoliko stoljeća, čovječanstvo se intenzivno okrenulo uporabi fosilnih goriva u svrhu grijanja i proizvodnje korisnog mehaničkog rada, a naknadno i el. energije. To je dovelo do znatnog onečišćenja zraka kao i okoliša u cijelini, a što je dovelo do podizanja globalne temperature i galopirajućih klimatskih promjena. Svjetska javnost je prvi put demonstrirala značajnu razinu zabrinutosti 1952. g. kada je uslijed velike uporabe ugljena za grijanje u Londonu došlo do pojave višednevnog smoga koji je bio odgovoran za smrt najmanje 4000 ljudi. Spaljivanjem ugljena emitirana je značajna količina SO_x spojeva koji su, spojivši se s molekulama vode, transformirani u sumporastu i sumpornu kiselinu. Osobe koje su udisale smog doživjele su oštećenje respiratornog sustava, dok je to za preko 4000 ljudi bilo fatalno. Kao rezultat tog događaja između 50-ih i 70-ih godina prošlog stoljeća dolazi do potpisivanja velikog broja zakona diljem svijeta u svrhu zaštite zraka, vodnih tokova i vode [13]. Međuvladin panel o klimatskim promjenama je 2007. zbirno prezentirao radove od preko 2500 znanstvenika iz više od 130 zemalja svijeta koji su jasno i jedinstveno iskazali stav da je čovječanstvo samostalno odgovorno za klimatske promjene i podizanje prosječne temperature Zemlje od 1950. pa do danas.

Borba sa zagađenjem zraka i podizanjem prosječne temperature se pokušala dobiti razvijanjem nuklearnog programa i snažnim razvitkom vjetroagragata i solarnih elektrana. Zbog incidenta na otoku Tri milje kao i nuklearne katastrofe u Černobilu veliki projekti u vidu izgradnji nuklearnih postrojenja bili su zaustavljeni uslijed protivljenja šire javnosti sve do 2005. godine kada ponovo započinje povećanje instaliranih kapaciteta. Nakon katastrofe u Japanu, gdje je uslijed tsunamia došlo do uništenja nuklearne elektrane Fukushima Daiichi budućnost nuklearne energije je izrazito upitna. Upravo zato je bitno obratiti pozornost na novu granu u znanosti koja postoji od 1997. godine, a koju nazivamo biomimikrijom. Idejna začetnica je Janine M. Benyus koja je prva objavila knjigu na temu "Biomimicry: Innovation Inspired by Nature". U ovoj knjizi se kombinira biologija i inženjerstvo, a sve u svrhu kopiranja i poboljšanja prirodnih procesa kao rješenja za neke od problema s kojima čovječanstvo danas susreće. Zato je i bitno da preostale tehnologije (tehnologije za proizvodnju energije iz vjetra i sunca) budu u suglasnosti s prirodom u vidu održivog razvoja i ekonomije nulte emisije štetnih plinova.

Kada se govori o biomimikriji treba dobro voditi računa da se ne pomiješa s uporabom životinjskih i biljnih vrsta u industrijske svrhe. Biomimikrija samo koristi ideje iz prirode kao jedno od mogućih rješenja ili poboljšanja, a konstruktor tog rješenja je zapravo evolucija koja je kroz 3.8 milijardi godina, metodom pokušaja i promašaja, došla do učinkovitih i održivih rješenja različitih problema. Ono što se obavezno mora naučiti iz biomimikrije je cirkularna ekonomija (proizvodnja), odnosno sve se međusobno mora koristiti i ciklus mora biti zatvoren bez proizvodnje smeća [13].

4.1 Primjeri primjene biomimikrije u praksi

4.1.1 Pasivno hlađenje u zgradama

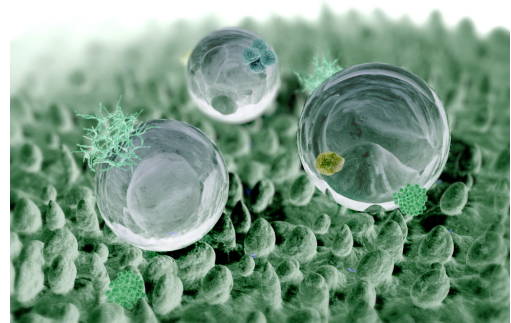


Slika 16: Eastgate Centre [4]

Prilikom konstrukcije Eastgate Complex zgrade u kojoj se nalaze i uredski prostori i shopping centar, glavna zadaća bila je osigurati mogućnost pasivnog hlađenja. Budući da je zgrada izgrađena u Harareu u Zimbabweu, gdje dnevna temperatura tijekom godine varira između 2 – 40 °C opterećenje klimatizacijskog sustava je izrazito veliko pa je i samim time potrošnja energije značajna. Da bi se postigao željeni cilj pasivnog hlađenja, arhitekt Mick Pearce je inspiraciju proašao u termitnjacima gdje se temperatura tijekom cijelog dana zadržava približno konstantnom. Upotrijebivši prozore sa mogućnošću zasjenjenja, svijetle boje zidova te varijaciju debljina istih, opterećenje klimatizacijskog sustava ove zgrade je 90% niže u usporedbi s konvencionalnim zgradama iste veličine na istom prostoru.

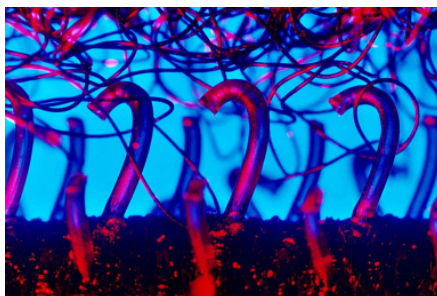
4.1.2 Samočišćeće boje

Njemačka kompanija, Sto AG, je razvila samočišćeće boje s hidrofobnom površinom imitirajući mikroskopsku strukturu lista lopoča. Do otkrića uzroka hidrofobnosti lista lopoča došao je prof. Wilhelm Barthlott sa Sveučilišta u Bonnu u svojem istraživanju o mogućnostima zamjene sredstava za čišćenje s nekim mehanizmom koji ima manji utjecaj na okoliš. Budući da u prirodnom svijetu niti jedna biljna ili životinjska vrsta ne koriste sredstva za čišćenje, čistoća površine se održava procesom samočišćenja uslijed gibanja kapljica vode kao rezultata hidrofobnosti površina. Kapljice vode tijekom svojeg gibanja po listu lopoča pakupe čestice onečišćenja i odnose ih dalje. Koristeći saznanja prof. Bartholtt, razvijena je nova generacija boja i premaza koji zahtjevaju značajno manju uporabu sredstava za čišćenje.



Slika 17: Čestice nečistoće nošene kapljicom vode [5]

4.1.3 Čičak



Slika 18: Princip rada čička pomoću kuka i omči [6]

Švicarski inovator George de Mestral je 1940. godine otkrio princip rada čička. Vraćajući se iz šetnje s psom zamijetio je cvijetove čička zakvačene za krzno psa kao i za svoje hlače. Promotivši ispod mikroskopa površinu cvijeta čička zamijetio je da postoje sitne kukice koje se zakvače za mekani materijal tkanine, odnosno za male omče. Svoje otkriće je patentirao i pretočio u komercijalno poznati proizvod čičak.

4.1.4 Nova vrsta ljepljive trake



Slika 19: Jastučići na nogama tropskog guštera [7]

Znanstvenici sa Sveučilišta u Manchesteru su razvili novi tip adhezivnog materijala oponašajući površinu jastučića na nogama tropskog guštera. Novo razvijeni adhezivni materijal koji se naziva *Gecko tape* ima na površini milijarde malih plastičnih vlakana promjera manjeg od mikrometra. Zbog postojanja tih plastičnih vlakana dolazi do stvaranja elektrodinamičke adhezije na mikroskopskoj razini (Van der Waalsova sila se razvije između vrha vlakna i površine) približnog iznosa od $4\mu\text{N}$ [14]. *Gecko tape* može izdržati uteg od jednog kilograma po svakom cm^2 površine te je u potpunosti upotrebljiva u vakuumu (proizvodnja mikročipova), a ono što je najbitnije, budući da se koristio prirodni dizajn, ovaj adhezivni materijal ne koristi toksične kemikalije .

4.1.5 Japanski superbrzi vlak

Vlakovi koji voze Sanyo Shinkansen linijom (od Osakae to Hakatae) prolaze kroz veliki broj tunela. Prilikom ulaska velikom brzinom vlaka u tunel dolazi do nagle kompresije zraka i stvaranja tlačnog poremećaja koji biva dodatno guran jurećim vlakom slično kao stap u cilindru. Na izlasku iz tunela brzina tlačnog poremećaja je često dosezala brzinu zvuka, a koji je onda generirao nisko-frekventne valove i aerodinamičke vibracije na koje su se žalili stanovnici udaljeni i preko 400 m od tunela. Zbog toga je brzina vlaka morala biti ograničena na 350 km/h. Rješenje ovog problema je pronađeno u obliku kljuna Vodomara. Vodomar je ptica koja se hrani ribom te da bi mogla uloviti svoj plijen evolucija joj je podarila oblik kljuna koji prilikom prolaska iz fluida manje gustoće u fluid veće gustoće (zrak u vodu) uzrokuje minimalni poremećaj (mreškanje vodne površine) koji bi mogao alarmirati plijen [15]. Taj oblik kljuna bio je početni oblik nosa vlaka koji su inženjeri ispitivali računalnim simulacijama te u konačni dobili oblik koji puno ne odstupa od prvobitnog dizajna. Uporabom ovog oblika nosa vlaka postigla se 15 postotna ušteda električne energije pri 10 % većim brzinama vlakova.



(a) Vodomar [16]



(b) Japanski superbrzi vlak Shinkansen serija 500 [17]

Slika 20: Prikaz kljuna vodomara i nosa vlaka Shinkansen serije 500

4.1.6 Poboljšanje iskoristivosti vjetroturbina oponašajući izbočine na napadnom bridu peraja grbavog kita

Peraje grbavog kita (*Megaptera novaeangliae*) imaju izbočine (kvržice) po svojem napadnom bridu za razliku od uobičajeno glatkih peraja koje učavamo kod drugih životinja. Ono što te izbočine omogućavaju je zapravo evolucijski korak u naprijed jer životinja duga 12-15 metara i teška 35 tona može kružiti u vodi stvarajući spiralne vrtloge promjera od samo 1.5 m. Na taj si način grbavi kit prikuplja hranu (kril) koji onda usiše u usta i filtrira usima. Demonstracija ovakve izrazite agilnosti je nešto što je zainteresiralo znanstvenike te su u istraživanjima došli do zaključka da je to sve posljedica izbočina na napadnom bridu. Kod glatkih peraja se tok vode prelaskom preko napadnog brida razbija u veliki broj vrtloga dok se prilikom prelaska preko napadnog brida peraje s izbočinama fluid formira u određeni broj snažni struja koje omogućavaju bolju kontrolu pokreta.



Slika 21: Prikaz grbavog kita pod morem [8]

Kada je model peraje testiran u zračnom tunelu došlo se do zadivljujućih rezultata, a to je da su izbočine zaslužne za 8% veći uzgon, 32% smanjenja otpora strujanju i povećavanje napadnog kuta za 40% prije nego što nastupi slom uzgona [18]. Ideju izbočina na napadnom bridu je prva počela testirati kanadska firma *Whale power* koja sada već i proizvodi industrijske ventilatore čije lopatice postižu bolje rezultate zahvaljujući ovom otkriću.



(a)



(b)

Slika 22: Prikaz peraje [9] i ispitivanog modela peraje [10] grbavog kita

5 Proračun geometrije lopatice vjetroturbine

U ovom radu je prilikom proračuna lopatice korištena kombinirana teorija elementarnog kraka i teorije diska (u daljnjem tekstu BEM metoda, eng Blade Element-Momentum theory) i Betzova metoda [1]. Proračun po Betzu je izvršen kako bi se izračunale vrijednosti brzohodnosti i promjera rotora, a proračun duljina tetiva i zakrivljenosti lopatice po relativnom radijusu je izvršen pomoću BEM teorije.

5.1 Odabir profila

Lopatica je podijeljena na 2 dijela po promjeni relativnog radijusa te su korištena dva različita aeroprofila iz dvije različite serije. Pri dnu lopatice korišten je WORTMANN-ov FX 77-W-258 aeroprofil, a pri vrhu NASA/LANGLEY-ev LS(1)-0421 MOD aeroprofil. Profili iz serije WORTMANN FX dizajnirani su prvenstveno za vjetroturbine i karakterizira ih velika zakrivljenost i izražena konkavnost donjaka [19]. Upravo zbog svoje debljine oni su izrazito povoljni kao aeroprofil za prijelaz s okruglog spoja glavčine na lopaticu, odnosno prema tanjim vršnim profilima. Profili serije NASA LS razvijeni su za opće zrakoplovstvo, odnosno za primjenu pri malim brzinama, gdje se u pravilu razvija turbulentni granični sloj. Karakteristike profila su mali otpor pri brzinama krstarenja, veliki omjer koefijenta uzgona i otpora (ϵ), veliki maksimalni koeficijent uzgona c_L i predvidljivo ponašanje pri slomu uzgona [20]. Izabrani profili su:

Tablica 1: Izabrani aeroprofil lopatice vjetroturbine

Profil	Koeficijent uzgona c_L	Koeficijent otpora c_D	c_M
WORTMANN FX 77-W-258	1,2876	0,01637	-0,0916
NASA/LANGLEY LS(1)-0421 MOD	1,2638	0,01971	-0,0723

5.2 Određivanje promjera rotora

Prema teoriji diska snaga vjetroturbine se izračunava prema [19]:

$$P = \frac{1}{2} \rho R^2 \pi u^3 c_p, \quad (1)$$

gdje je c_p koeficijent snage, ρ gustoća zraka te u neporemećena brzina strujanja zraka dovoljno daleko ispred rotora. U prvom koraku se duljina lopatice rotora R izračunava koristeći pretpostavku granične vrijednosti koeficijenta snage $c_{P,Betz} = \frac{16}{27}$, za traženu snagu vjetroturbine od 30 kW, gustoću zraka od $\rho = 1,2 \frac{kg}{m^3}$ i nazivnu brzinu vjetra od $u = 10 \frac{m}{s}$. Koristeći, na gore opisan način, vrijednost izračunatog polumjera ulazimo u drugi dio proračuna, odnosno proračun brzohodnosti $\lambda_D = \omega \frac{R}{u} = 4,638$. Vrijednost kutne brzine (ω) se izračunava iz pretpostavljene brzine vrtnje

vjetroturbine od $70 \frac{o}{min}$ kao vrijednosti koja je dana od strane svjetskih proizvođača malih vjetroturbina kao gornja optimalna granica brzine vrtnje. Cijeloukupni proračun je izrađen za napadni kut od $\alpha = 7^\circ$.

5.3 Proračun gubitaka

Proračun gubitaka se vrši radi dobivanja korekcijskog faktora Betzovog koeficijenta snage, odnosno u svrhu proračuna realne duljine lopatice vjetroturbine.

5.3.1 Gubitci uslijed otpora profila

Gubitke uslijed otpora profila možemo izračunati iz omjera koeficijenta uzgona i otpora te napadnog kuta lopatice. Promatrajući dio lopatice, koji ćemo nazvati dr na ukupnom polumjeru r , možemo odrediti vrijednosti sile uzgona dL i sile otpora dD koristeći iduće izraze [1]:

$$dL = \frac{\rho}{2} w^2 c dr c_L(\alpha), \quad (2)$$

$$dD = \frac{\rho}{2} w^2 c dr c_D(\alpha), \quad (3)$$

gdje je w brzina nastrojavanja fluida, a c_L i c_D su koeficijenti uzgona i otpora profila. Budući da su sile otpora i uzgona paralelne s tetivom profila, moguće je izraziti tangencijalnu komponentu sile preko kuta γ (kuta između neporemećene brzine i stvarne brzine nastrojavanja):

$$dF_T = \frac{\rho}{2} w^2 c dr [c_L(\alpha) \cos \gamma - c_D(\alpha) \sin \gamma]. \quad (4)$$

Uvrštavajući gore izvedeni izraz u formulu:

$$dP = z dF_T \omega r, \quad (5)$$

dobivamo iznos snage na promatranoj sekciji dr . Budući da je ovo stvaran iznos snage dobiven za sekciju dr preostaje nam još izračunati idealani slučaj bez otpora:

$$dP_{id} = n \omega \frac{\rho}{2} w^2 r dr c_L(\alpha) \cos \gamma. \quad (6)$$

Upravo omjer stvarno postizive i idealno postizive snage predstavlja gubitak uslijed otpora profila, odnosno možemo pisati da je

$$\eta_{profil} = \frac{dP}{dP_{id}} = \frac{z \frac{\rho}{2} w^2 c dr [c_L(\alpha) \cos \gamma - c_D(\alpha) \sin \gamma] \omega r}{n \omega \frac{\rho}{2} w^2 r dr c_L(\alpha) \cos \gamma}, \quad (7)$$

$$\eta_{profil} = 1 - \frac{3 r \lambda_D}{2 R \epsilon}, \quad (8)$$

gdje je

$$\varepsilon = \frac{c_L}{c_D}, \quad (9)$$

a z broj lopatica vjetroturbine.

Tablica 2: Vrijednosti gubitaka usljed otpora profila

Profil	η_{profil}
WORTMANN FX 77-W-258	0,9768
NASA/LANGLEY LS(1)-0421 MOD	0,9417

5.3.2 Vršni gubitci

Vršni gubitci nastaju kao posljedica prestrujavanja fluida s pretlačne na podtlačnu stranu, tj. prestrujavanja zraka s donjaka na gornjak. Kako bi se ti gubitci uračunali, Betz je uveo pojam efektivnog promjera D' [1, 21]:

$$D' = D \left(1 - \frac{0.92}{z\sqrt{(\lambda_D^2 + \frac{4}{9})}} \right). \quad (10)$$

Kako je snaga proporcionalna kvadratu vrijednosti polumjera, a tako onda i promjera možemo pisati da je:

$$\eta_{vrh} = \left(\frac{D'}{D} \right)^2 = \left(1 - \frac{0.92}{z\sqrt{(\lambda_D^2 + \frac{4}{9})}} \right)^2. \quad (11)$$

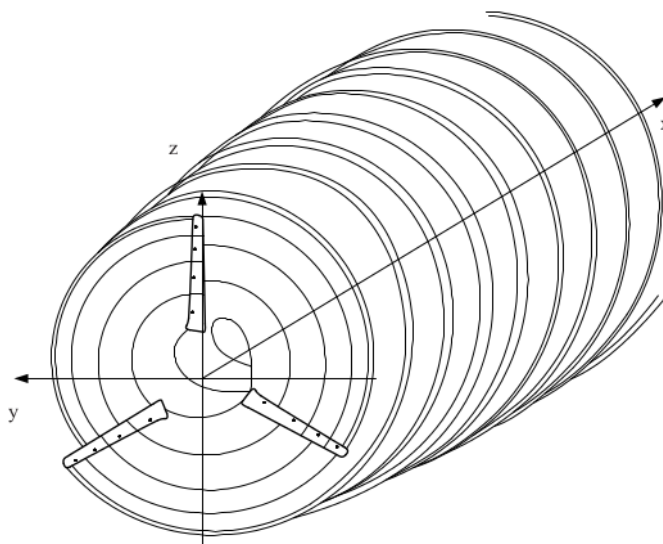
Vršni gubitci za lopaticu vjetroturbine koja je proračunata u ovom radu iznosi $\eta_{vrh} = 0,8724$.

5.3.3 Gubitci usljed postojanja vrtložnog traga

Gubitke koji nastaju kao posljedica postojanja vrtložnog traga Betz nije opisao nikakvim empirijskim izrazom, niti je predložio neki iskustveni faktor. Ti gubitci nastaju kao posljedica reakcije na okretni moment, odnosno prema trećem Newtonovom zakonu tanagencijalna sila dF_T mora stvarati suprotstavljeni moment u nizvodnom strujanju zraka zbog postojanja kraka r . Što je manji iznos brzohodnosti, time je shodno i moment veći. To se jasno može razmotriti iz sljedećeg izraza:

$$dP = z dF_T \omega r. \quad (12)$$

Turbine s visokim iznosom brzohodnosti (λ_D) „izvlače“ snagu iz struje zraka pri visokoj vrijednosti kutne brzine (ω) pa je i time moment ($dF_T r$) maleni. U suprotnom slučaju, tj. kod turbina s malim iznosom brzohodnosti, „izvlačenje“ snage iz struje zraka se događa pri niskoj vrijednosti kutne brzine, pa posljedično tome i moment mora biti velik [1].



Slika 23: Model slobodnog razvoja vrtloga u nizvodnoj struji zraka [1]

Za proračunatu lopaticu pretpostavljena vrijednost faktora gubitka zbog postojanja vrtložnog traga iznosi $\eta_{vrtlog} = 0,835$.

Korištenjem ova tri korekcijska faktora izračunava se ukupna iskoristivost, odnosno:

$$\eta_{ukupno} = \eta_{vrtlog} \eta_{vrh} \eta_{profil} \quad (13)$$

Valja napomenuti da je u ovom radu korišten još jedan korekcijski faktor, odnosno dodatni korekcijski faktor sigurnosti zbog načina izvedbe prijelaza spoja lopatice i glavčine, kao i izvedbe vrha lopatice. Drugi bitni razlog primjene dodatnog korekcijskog faktora je i činjenica da je izvršena linearizacija duljina tetiva, kako će to biti kasnije i prikazano. Stoga je izračunata vrijednost

$$\eta_{ukupno} = 0,653, \quad (14)$$

pomoću koje se onda izračunava vrijednost stvarnog koeficijenta snage c_P , tj. korigirana vrijednost duljine lopatice vjetroturbine:

$$c_{P, stvarni} = c_{P, Betz} \eta_{ukupno}, \quad (15)$$

$$R = \sqrt{\frac{2P}{c_{P, stvarni} \rho R^2 \pi u^3}} = 6,5m. \quad (16)$$

5.4 Proračun raspodjela duljina tetiva

Koristeći pretpostavku linearnog suženja lopatice pomoću BEM teorije izračunata je raspodjela duljina tetiva za optimalni rad. Nakon što se izračunaju vrijednosti duljina tetiva po radijusu preporučljivo je izvesti dodatnu linearizaciju metodom najmanjih kvadrata da bi se izbjegla skokovita promjena vrijednosti na mjestima prelaska s jednog na drugi aeroprofil. Posebno do izražaja dolazi navedeni problem kada je riječ o prelasku s jedne na drugu familiju aeroprofila. Proračun je u radu

proveden koristeći sljedeći izraz [19]:

$$c_r = R \left[\frac{16\pi}{9z\lambda_D^2 c_{L0,8}} \left(2 - \frac{r}{R} \right) \right]. \quad (17)$$

5.5 Proračun raspodjele kuteva uvijanja

Nagib nastrojavanja zraka Φ se isto mijenja po rasponu. Uzme li se u obzir indukcijski faktor za optimalni rad $a = \frac{1}{3}$ može se transformirati izraz za proračun nagiba nastrojavanja zraka

$$\tan \Phi = \frac{1 - a}{\lambda_D \frac{r}{R} (1 + a)}, \quad (18)$$

u iduću:

$$\tan \Phi_{idealno} = \frac{\frac{2}{3}}{\lambda_D \frac{r}{R} \left(1 + \frac{2}{9\lambda_D^2 \left(\frac{r}{R}\right)^2} \right)}. \quad (19)$$

Blizu korijena lopatice nagib struje zraka je vrlo velik što može uzrokovati slom uzgona. "Da bi koeficijent otpora bio minimalan, potrebno je konstruirati lopaticu s kutom uvijanja koji će osigurati optimalni napadni kut za odabrane profile" [19]. Stoga se kut uvijanja lopatice računa prema sljedećem izrazu:

$$\beta = \Phi_{idealno} - \alpha. \quad (20)$$

Dakako, za lopaticu vjetroturbine u ovom radu korištena vrijednost napadnog kuta je, kako je to već ranije napomenuto, 7° .

Tablica 3: Izračunane vrijednosti duljina tetiva i kuteva uvijanja u funkciji radijusa lopatice vjetroturbine

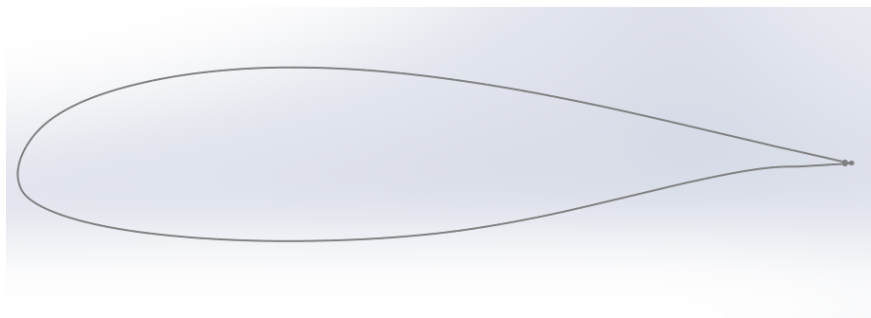
Profil	Relativni radijus $\frac{r}{R}$	Duljina tetive [mm]	Kut uvijanja [$^\circ$]
FX 77-W-258	0,2	972,5	22,7
FX 77-W-258	0,25	938,8	19,3
LS(1)-0421 MOD	0,3	905,1	16,3
LS(1)-0421 MOD	0,4	837,7	11,7
LS(1)-0421 MOD	0,5	770,3	8,4
LS(1)-0421 MOD	0,6	702,9	6,1
LS(1)-0421 MOD	0,7	635,6	4,4
LS(1)-0421 MOD	0,8	568,2	3,0
LS(1)-0421 MOD	0,9	500,8	2,0
LS(1)-0421 MOD	1	433,4	1,1

6 Postupak generiranja geometrije

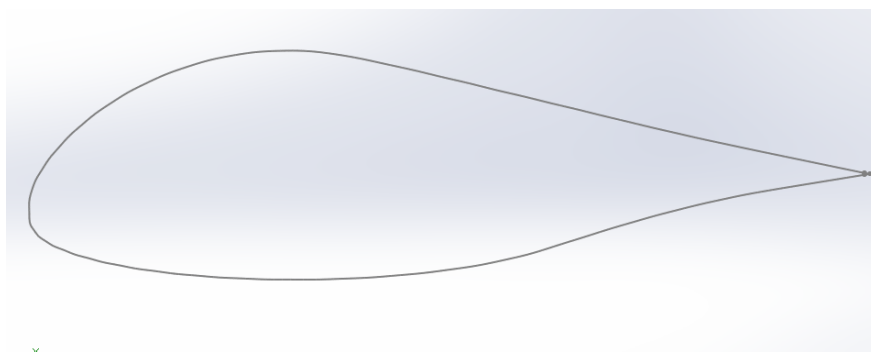
Nakon dovršetka postupka proračuna osnovnih parametara konvencionalne vjetroturbine, tj. nakon što su izračunate vrijednosti duljina tetiva i kuteva uvijanja lopatice u funkciji radijusa, slijedi korak generiranja geometrije u nekom od poznatih CAD (*Computur Aided Design*) računalnih paketa. Kao CAD paket, odabran je *Solidworks* u kojem je generirana geometrija i za konvencionalne i za vjetroturbine s lopaticama s izbočinama na napadnom bridu. Detaljan postupak generiranja geometrije bit će opisan u nastavku.

6.1 Generiranje geometrije lopatice

Budući da su aerodinamički profili lopatica već odabrani u fazi proračuna, potrebno je dobiti pristup koordinatama tih odabranih profila. Koordinate profila su uzete s web stranice [22]. Nakon jednostavnih modifikacija koordinata profila u *Microsoft Excel-u* zbog zahtjeva samog CAD paketa, profili su spremni za implementaciju u softwareskom paketu *Solidworks* s ciljem generiranja geometrije.



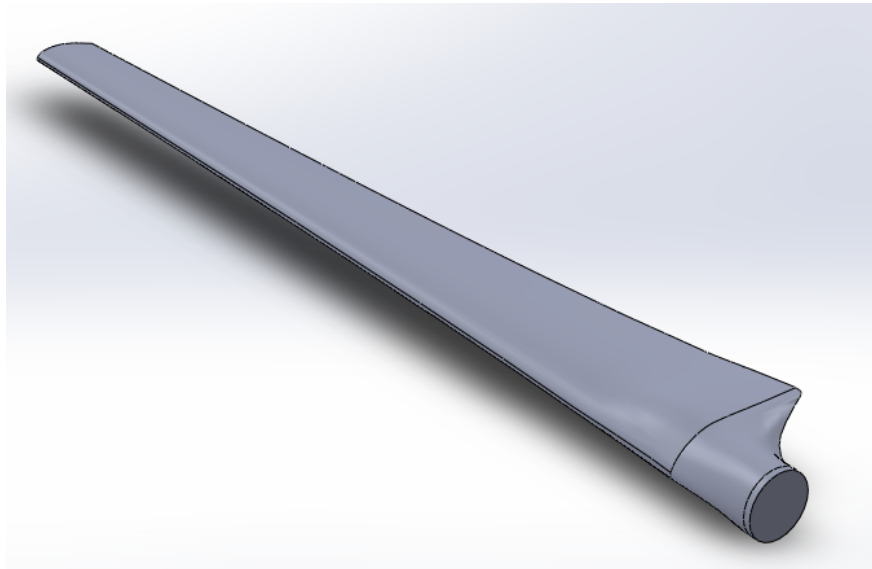
Slika 24: NASA LANGLEY LS(1)-0421 MOD profil korišten na poprečnim presjecima lopatica konvencionalne i vjetroturbine s izbočinama na napadnom bridu na relativnim radijusima $\frac{r}{R} = 0.25$ - 1



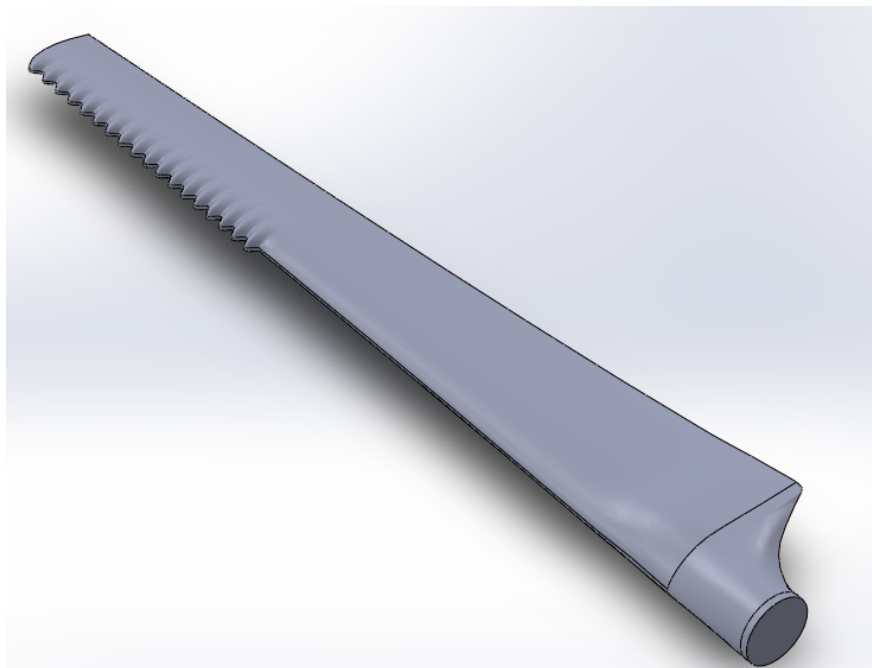
Slika 25: WORTMANN FX 77-W-258 profil korišten na poprečnim presjecima lopatica konvencionalne i vjetroturbine s izbočinama, na relativnim radijusima $\frac{r}{R} = 0.2 - 0.25$

Budući da su vrijednosti duljina tetiva i kuteva uvijanja na više poprečnih presjeka duž lopatice vjetroturbine poznate, krivulje s profilima su ubačene u određene ravnine, skalirane na zahtijevanu duljinu tetive (profili krivulja u izvornom obliku imaju jediničnu tetivu) i zarotirane oko težišta

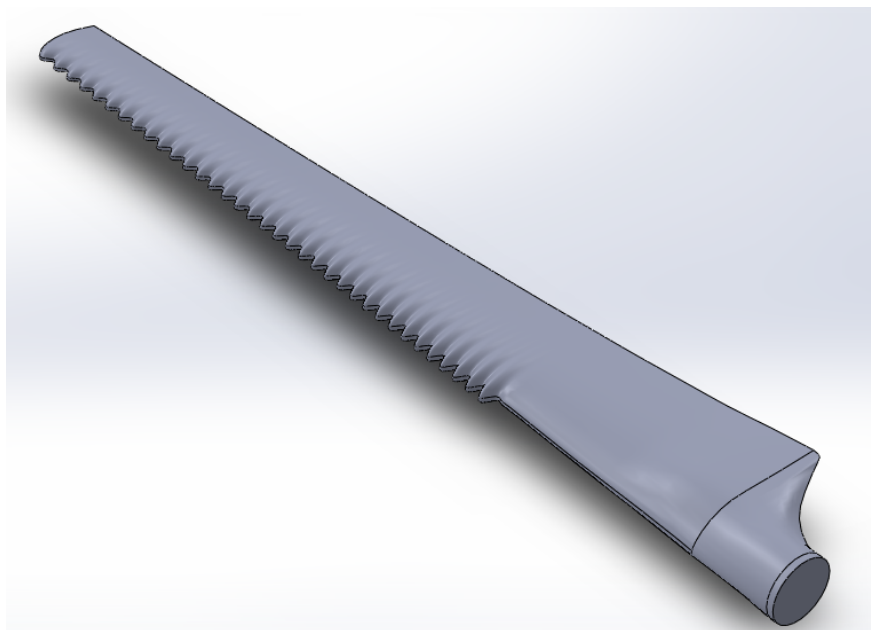
profila kako bi se postigao zahtijevani kut uvijanja u upravo toj određenoj ravnini. Razmak između ravnina u koje su profili ubacivani je proizvoljno uzet 52 mm , što predstavlja 1% korisne duljine lopatice vjetroturbine čime je definirana frekvencija pojavljivanja izbočenih dijelova lopatice kod vjetroturbine s izbočinama na napadnom bridu lopatica. Postupak ubacivanja većih profila, odnosno konveksnih dijelova lopatica s izbočinama na napadnom bridu se sastoji od još jednog koraka, tj. dodatnog skaliranja cijelog profila oko izlaznog brida za faktor 1.1 čime je definirana amplituda izbočenih dijelova kod vjetroturbine s izbočinama na napadnom bridu lopatica. Korištenjem *Solidworks Loft* funkcije, interpolacijom točaka između krivulja u određenim ravninama povezuju su svi profili u svim ravninama duž lopatice u čvrsti model. Kod vjetroturbine s izbočinama na napadnom bridu pozadina priče je ista, no zbog naizmjenice većeg pa manjeg profila generira se sinusoidalni oblik napadnog brida čime se postiže željeni oblik lopatice. Kako su frekvencija pojavljivanja i amplituda između konveksnih i konkavnih dijelova lopatice s izbočinama na napadnom bridu uzete proizvoljno, ostavljeno je još mnogo mjesta za optimizaciju. Tetiva konkavnih dijelova lopatice s izbočinama na napadnom bridu je jednaka tetivi konvencionalne lopatice, a amplituda je definirana kao 5% vrijednosti duljine tetive lopatice na određenom poprečnom presjeku. Frekvencija pojavljivanja korištena u ovoj CFD simulaciji je dakle uzeta na način da jedan period pojavljivanja izbočina zauzima 2% korisne duljine lopatice. Kako je uzeto da radijus lopatice R i korisna duljina lopatice L iznose $R = 6500\text{mm}$ i $L = 5200\text{mm}$, jedan period pojavljivanja izbočine je jednak $T = 104\text{mm}$. Nakon generiranja modela same lopatice, potrebno je generirati *Solidworks* skice kojima se definira prijelazni dio lopatice s korisnog dijela na korijen same lopatice kružnog poprečnog presjeka koji služi za učvršćenje na glavčinu. Naposljetku su kreirani profili spojeni u jedan model pomoću *Solidworks Loft* funkcije. Kako je zbog želje za boljim i točnijim rezultatima CFD simulacije, tako i zbog lakšeg postupka izrade mreže u sljedećoj fazi ovog rada odlučeno korištenje konačne duljine izlaznog brida, na predlošcima već postojećih skica profila duž lopatice su kreirane nove skice s ciljem eliminacije oštrog izlaznog brida. *Solidworks Loft Cut* funkcijom navedene se skice povezuju čime je odrezan mali dio izlazne ivice profila te je tako lopatica u potpunosti definirana. U konačnici, generirana su tri tipa lopatica za vjetroturbine: konvencionalna lopatica te dva tipa lopatica s izbočinama na napadnom bridu.



Slika 26: Konvencionalna lopatica vjetroturbine



Slika 27: Lopatica vjetroturbine s izbočinama na 35% korisne duljine lopatice

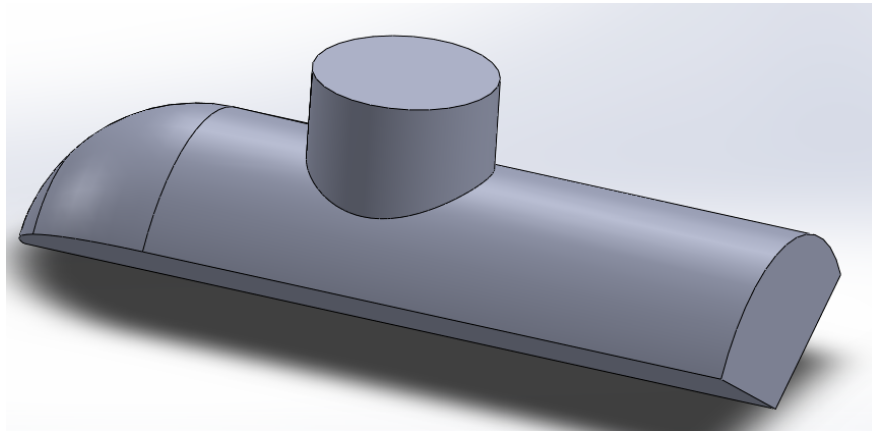


Slika 28: Lopatica vjetroturbine s izbočinama na 70% korisne duljine lopatice

Proračunom je obuhvaćena samo konvencionalna lopatica vjetroturbine, no svi parametri dobiveni početnim proračunom su korišteni i za konvencionalnu i za lopaticu s izbočinama na napadnom bridu. Usporedbom konvencionalne i modificirane, tj. lopatice s izbočinama na napadnom bridu može se zaključiti da se konvencionalna lopatica sastoji samo od aerodinamičkih profila „konkavnih“ dijelova lopatice s izbočinama na napadnom bridu. Lopaticu s izbočinama na napadnom bridu na slici 27 karakteriziraju izbočine smještene na 35 % korisne duljine lopatice, dakle na relativnim radijusima $\frac{r}{R}$ u rasponu od 0.65 do 1, dok su konvencionalni profili smješteni duž lopatice u smjeru korijena. Druga lopatica s izbočinama na napadnom bridu prikazana na slici 28 veoma je slična prethodnoj te je karakterizirana izbočinama smještenima na 70 % korisne duljine lopatice, dakle na relativnim radijusima $\frac{r}{R}$ u rasponu od 0.3 do 1, dok su konvencionalni profili smješteni duž lopatice u smjeru korijena.

6.2 Generiranje geometrije glavčine

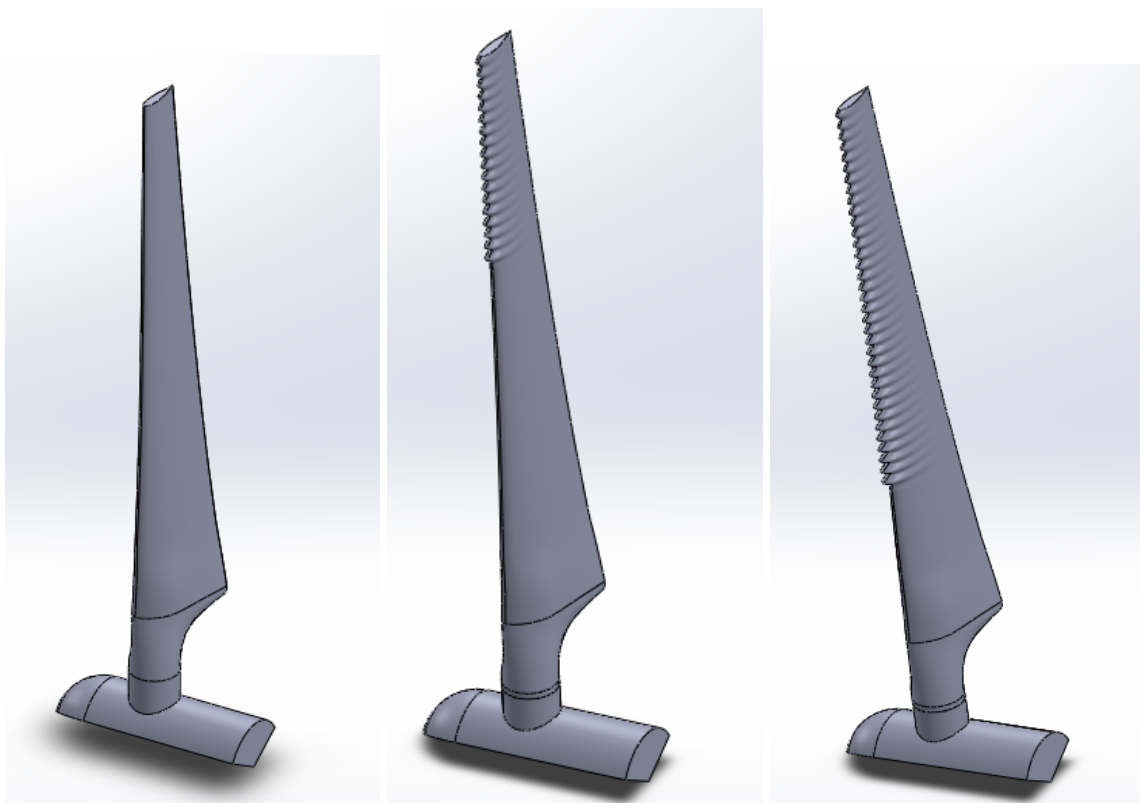
Za potpuno definiranje modela vjetroturbine, uz generirane lopatice potrebna je još samo glavčina. Model glavčine je generiran kao zaseban *Solidworks part* s namjerom da se omogući što veća sloboda pri namještanju napadnog kuta na proračunsku vrijednost. S ciljem smanjenja broja ćelija unutar proračunske domene tj. mreže, generirana je trećina glavčine odnosno trećina same vjetroturbine zbog simetričnog uzorka s obzirom na os simetrije. Generiranjem trećine modela vjetroturbine točnost numeričkog rješenja nije ugrožena, dok su uštede na računalnim resursima i vremenu potrebnom za provođenje numeričke simulacije drastično smanjeni.



Slika 29: Glavčina vjetroturbine

6.3 Generiranje modela vjetroturbine

Konačno, svaka lopatica i glavčina spojene su u *Solidworks assembly* kao jedno tijelo (trećina vjetroturbine) te su izvezene i spremljene u univerzalnom i neutralnom STL CAD formatu te proslijeđene na sljedeći korak – generaciju proračunske domene, odnosno mreže.



Slika 30: Prikaz spojeva glavčina s lopaticama za promatrane geometrije

7 Numerička simulacija

Postoje različiti načini na koje se mogu simulirati turbostrojevi, ovisno o željenim rezultatima. Budući da turbostrojevi imaju rotirajuće dijelove i dijelove koji miruju, pojave u takvim strojevima su tranzijentne. Modeliranje tranzijentnih procesa zahtijeva više računalnih resursa i više vremena od simuliranja stacionarnih pojava. Matematički model, kojim se rješavaju tranzijentne pojave u hidrauličkim turbostrojevima, može se prilagoditi na način da se rješavaju stacionarni procesi. Na takav način se dobivaju približna rješenja u kraćem vremenskom periodu. Budući da se u takvoj simulaciji promatra samo jedan položaj rotora, vrtložni trag iza rotorskih lopatica nije fizikaln. Metode koje se koriste za stacionarni pristup simuliranja hidrauličkih strojeva su MRF (Multiple reference frame) i SRF (Single reference frame). U ovom radu proučavati će se primjena MRF metode na tri različite geometrije vjetroturbine; jedna bez izbočina na napadnom bridu lopatica, i dvije s izbočinama.

7.1 Matematički model

Matematički model koji se koristi za modeliranje strujanja poznat je pod nazivom Navier-Stokesove jednačbe. To je sustav koji se sastoji od vektorskih jednačbi količine gibanja i jednačbe očuvanja mase. Za nestlačivo strujanje, u odnosu na inercijski koordinatni sustav, za koje se pretpostavlja konstantna molekularna viskoznost sustav jednačbi, prema [23], glasi:

$$\frac{d\mathbf{u}_I}{dt} + \nabla \cdot (\mathbf{u}_I \otimes \mathbf{u}_I) = -\nabla\left(\frac{p}{\rho}\right) + \nu \nabla \cdot \nabla(\mathbf{u}_I), \quad (21)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_I = 0. \quad (22)$$

Jednačba 21 predstavlja jednačbu količine gibanja za nestlačivo strujanje. Član $\frac{d\mathbf{u}_I}{dt}$ predstavlja vremenski član, koji je u stacionarnim simulacijama jednak 0. Član $\nabla \cdot (\mathbf{u}_I \otimes \mathbf{u}_I)$ predstavlja konvektivni član. Indeks I označuje inercijski koordinatni sustav u odnosu na koji je definiran vektor brzine \mathbf{u}_I . Član $-\nabla\left(\frac{p}{\rho}\right)$ je izvorski član, a $\nu \nabla \cdot \nabla(\mathbf{u}_I)$ je difuzijski član. Jednačba 22 proizlazi iz jednačbe količine gibanja za nestlačivo strujanje. Ako se sustav jednačbi 21 i 22 prilagodi relativnom koordinatnom sustavu s apsolutnom brzinom dobije se sustav jednačbi koji se koristi u MRF modelu simulacije. Takav sustav jednačbi, prema [23] glasi:

$$\frac{d\mathbf{u}_R}{dt} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u}_I + \nabla \cdot (\mathbf{u}_R \otimes \mathbf{u}_I) = -\nabla\left(\frac{p}{\rho}\right) + \nu \nabla \cdot \nabla(\mathbf{u}_I), \quad (23)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_I = 0. \quad (24)$$

U jednačbama 23 i 24 indeks R predstavlja relativni (rotacijski) koordinatni sustav u odnosu na koji se definira vektor brzine \mathbf{u}_R . Član $\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{u}_I$ uzima u obzir brzinu vrtnje rotacijskog koordinatnog sustava.

7.2 Višestruki rotacijski referentni koordinatni sustavi

Metoda višestrukih rotacijskih referentnih koordinatnih sustava (Multiple reference frame) je metoda kojom se mogu rješavati tranzijente pojave u hidrauličkim turbostrojevima na stacionarni način. Kod takve metode domena se dijeli na više dijelova. U promatranom slučaju su geometrije vjetroturbina podijeljene na dva dijela. Ti dijelovi su rotor vjetroturbine te *farfield*. Za domenu koja rotira (rotor) definirana je brzina vrtnje koja iznosi $70 \frac{o}{min}$. Matematički model je opisan jednadžbama 23 i 24 iz prethodnog poglavlja u kojima se zanemaruju vremenski članovi. Granice pojedinih domena trebaju biti posebno opisane. U promatranom slučaju se u tu svrhu koristio GGI (General grid interface). GGI je tip sučelja kojim se može definirati granica između domena u slučaju kada površinske numeričke mreže na granici domena nisu komforme [24]. Iako je MRF aproksimacija stvarnosti, korištenjem takve numeričke metode mogu se dobiti dobri rezultati u relativno kratkom vremenu.

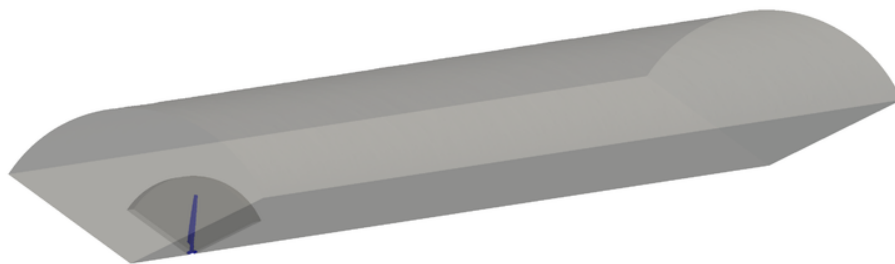
7.3 Numerička mreža

Numerička mreža izrađena je softverskom paketu *Pointwise* na STL formatu geometrije iz *Solidworks-a*. Površinska mreža na lopatici je strukturirana, osim na dijelu lopatice s izbočinama na napadnom bridu, gdje je nestrukturirana. Površinska mreža na glavčini je također nestrukturirana. Volumenska mreža koja okružuje rotor vjetroturbine je nestrukturirana i sastoji se od tetraedara i piramida. Piramidalne ćelije nastaju kada površinska strukturirana mreža prelazi u nestrukturiranu volumensku mrežu, a tetraedarska mreža nastaje kada nestrukturirana mreža prelazi u nestrukturiranu volumensku mrežu. Granični sloj uz površinu lopatice i glavčine je strukturiran i napravljen je uz pomoć opcije *T-Rex* (skraćeno od anisoTropic tetRahedral EXtrusion [25]) koja omogućuje distribuciju piramidalnih i tetraedarskih ćelija na način da se one mogu spojiti u strukturirani sloj. Na takav način se kombinira jednostavnost izrade nestrukturirane mreže i bolja kvaliteta strukturirane mreže. Ukupna domena podijeljena je na dva dijela; dio oko rotora, i *farfield* koji se nalazi podalje od rotora. Iza rotora ostavljen je prostor numeričke mreže za razvoj vrtložnog traga od 200 m, a ulazni brid, s druge strane, je udaljen 20 m od rotora. Dio domene oko rotora diskretiziran je gušćom mrežom i taj dio se sastoji od 2 do 3 milijuna ćelija, dok se *farfield* sastoji od oko 3 milijuna ćelija. Točni podaci nalaze se u tablici 4.

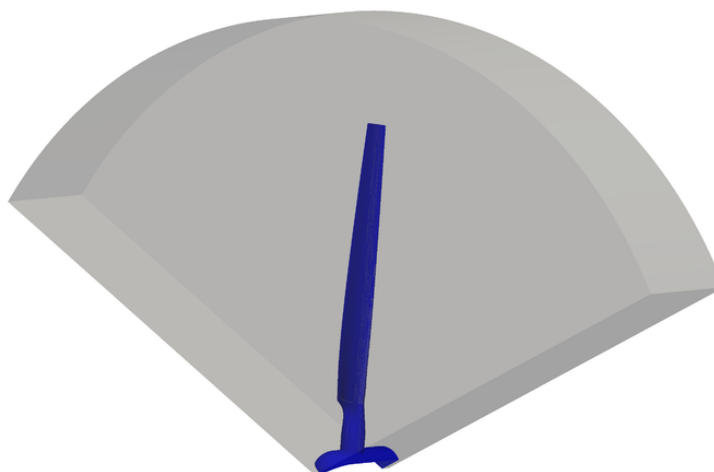
Tablica 4: Broj ćelija za različite promatrane slučajeve

Udio lopatice pokriven izbočinama	Broj ćelija oko rotora	Broj ćelija <i>farfield-a</i>
bez izbočina	2 230 178	3 022 607
35 %	3 597 186	3 022 607
70 %	3 109 689	3 022 607

Pojedini dijelovi mreže i njihov međusobni položaj može se vidjeti na slikama 31 i 32.

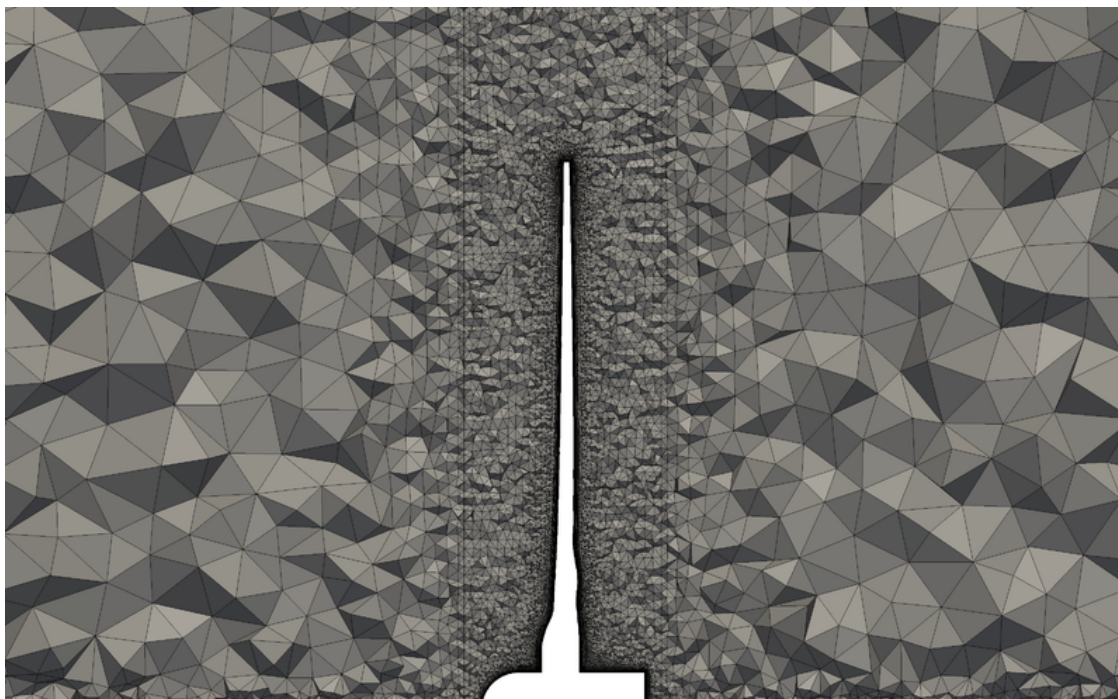


Slika 31: Prikaz mreže vjetroturbine bez izbočina na napadnom bridu

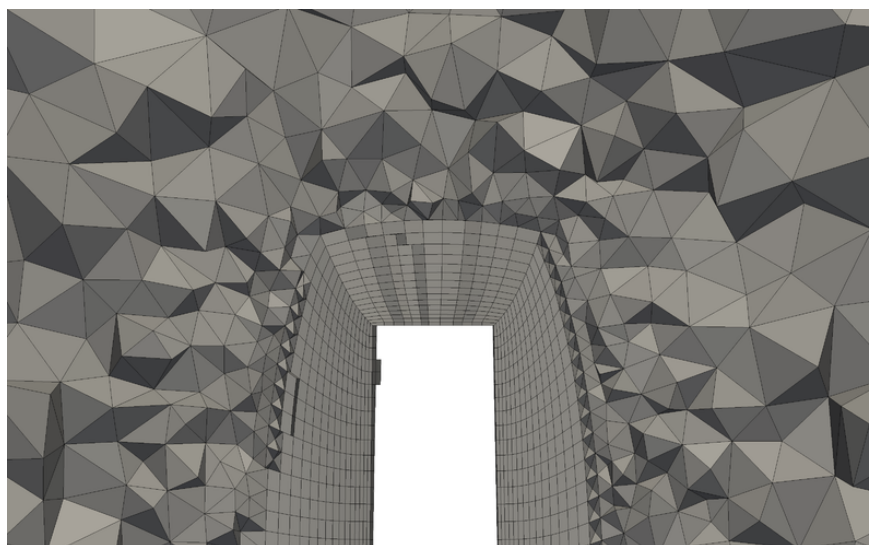


Slika 32: Prikaz domene oko rotora vjetroturbine bez izbočina na napadnom bridu

Na slikama 33 i 34 može se vidjeti strukturirana mreža oko lopatice vjetroturbine bez izbočina na napadnom bridu.

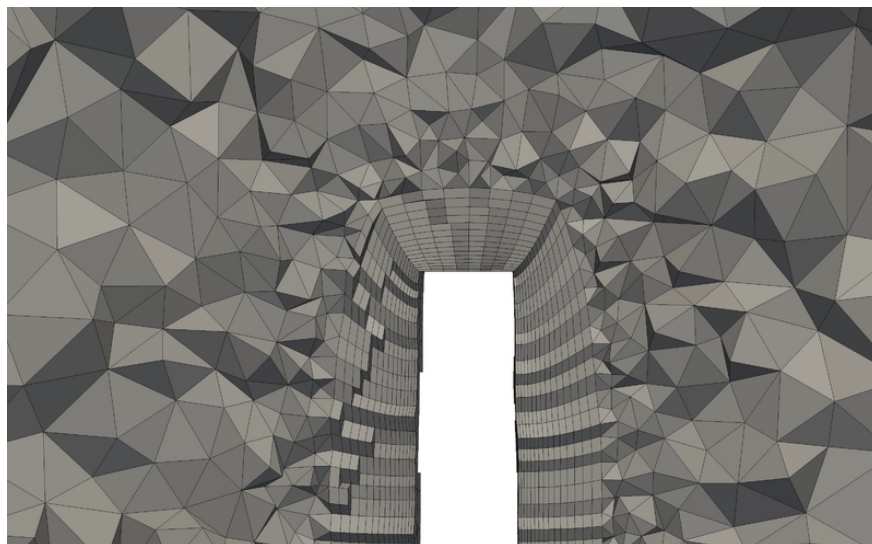


Slika 33: Prikaz domene oko lopatice vjetroturbine bez izbočina na napadnom bridu

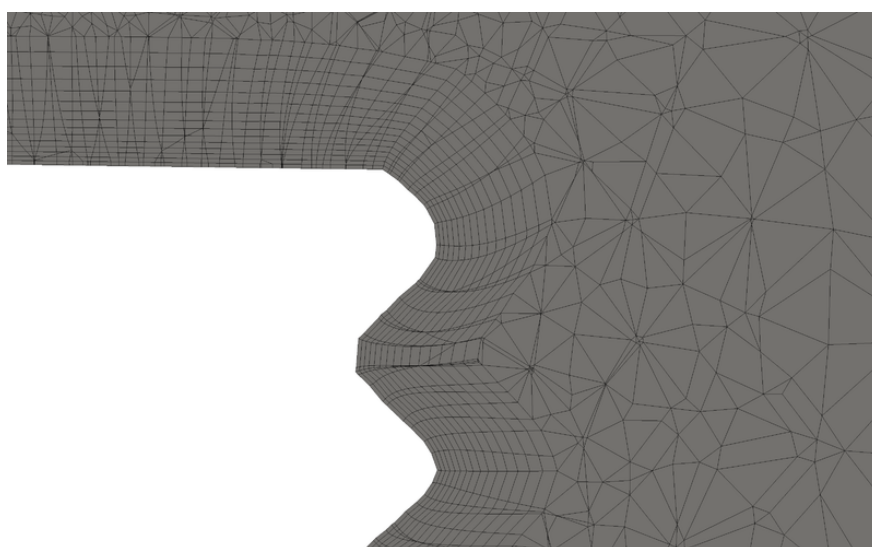


Slika 34: Prikaz domene oko vrha lopatice vjetroturbine bez izbočina na napadnom bridu

Na slikama 35 i 36 prikazana je mreža vjetroturbine oko lopatica s izbočinama na napadnom bridu.



Slika 35: Prikaz domene oko lopatice vjetroturbine s izbočinama na napadnom bridu



Slika 36: Prikaz domene oko vrha lopatice vjetroturbine s izbočinama na napadnom bridu

7.4 Rubni i početni uvjeti

Rubni i početni uvjeti su potrebni za rješavanje diferencijalnih jednadžbi u svakoj ćeliji numeričke mreže. Rubni uvjeti su postavljeni na način da se zadaje na ulazu domene iznos apsolutne brzine, a na izlazu domene iznos tlaka proizvoljnog iznosa koji predstavlja tlak neporemećene struje zraka. Iznos tlaka u svakoj ćeliji nakon simulacije je relativan u odnosu na postavljeni tlak neporemećene struje zraka. Budući da je simulirana samo trećina rotora, odnosno samo jedna lopatica koja se periodički ponavlja oko osi rotacije, potrebno je definirati periodičke rubne uvjete na rubu domene. U tu svrhu se koristio periodični rubni uvjet *cyclicGGI*. Početni iznos brzine zadan je pretpostavljenom brzinom zraka od $10 \frac{m}{s}$ u smjeru strujanja. Početni uvjet tlaka zadan je iznosom tlaka neporemećene struje u svakoj ćeliji numeričke mreže. Iako o početnim uvjetima ne ovisi konačno stacionarno rješenje, njihovo pravilno postavljanje doprinosi brzini konvergencije.

7.5 Rezultati

Numerička simulacija je provedena za tri različita slučaja; vjetroturbina s konvencionalnim lopaticama, vjetroturbina s 35% napadnog brida lopatica pokriveno izbočinama i vjetroturbina sa 70% napadnog brida lopatica pokriveno izbočinama. Za svaki slučaj izračunat je moment oko osi rotacije, što pomnoženo s kutnom brzinom vrtnje daje snagu vjetroturbine.

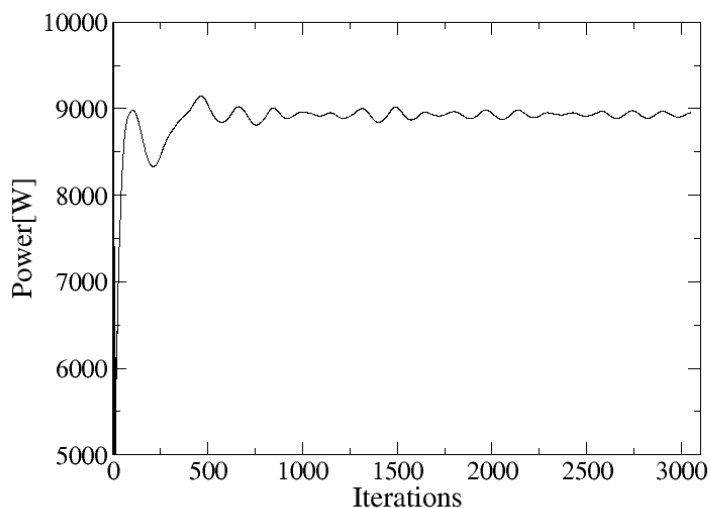
7.5.1 Vjetroturbina s konvencionalnim lopaticama

Kao kriterij konvergencije rješenja promatrana je oscilacija snage za jednu lopaticu turbine. Kad je oscilacija snage postala zanemariva rješenja simulacije za zadnji trenutak uzeta su kao reprezentativna. Na slici 37 prikazana je oscilacija snage jedne lopatice vjetroturbine.

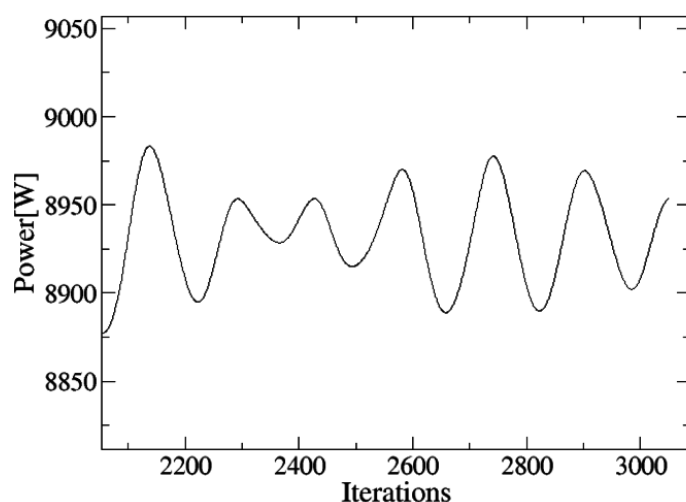
Za 3045. iteraciju simulacije može se reći da je rješenje iskonvergiralo, jer relativna oscilacija snage jedne lopatice vjetroturbine iznosi 0,56%. Rješenja za 3045. iteraciju uzeta su kao reprezentativna i prikazana su u tablici 5.

Tablica 5: Parametri vjetroturbine s konvencionalnim lopaticama

Parametar	Iznos
Sila na lopaticu [N]	(1617,87 46,06 358,86)
Moment na lopaticu [Nm]	(1221,25 -295 -6734,74)
Snaga jedne lopatice [W]	8952,2
Ukupna snaga [W]	26775,6
Raspoloživa snaga vjetra [W]	79639,5
Koeficijent snage	0,337



(a) Graf oscilacije



(b) Detalj oscilacija

Slika 37: Oscilacija snage jedne konvencionalne lopatice vjetroturbine

U tablici 5 su vidljivi parametri koji opisuju rad vjetroturbine. Snaga jedne lopatice izračunata je kao umnožak momenta oko osi vrtnje lopatice (x -os) i kutne brzine lopatice, kao što je prikazano u jednadžbi 25:

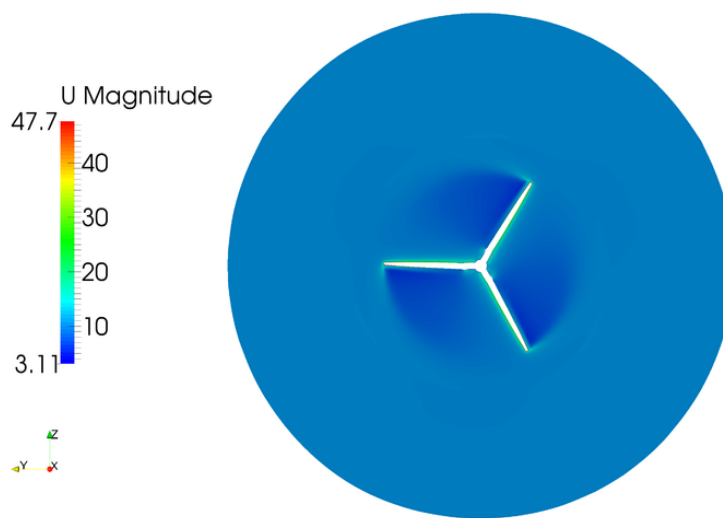
$$P = M_x \omega. \quad (25)$$

Budući da je rješenje za ostale lopatice vjetroturbine simetrično, može se zaključiti da je ukupna snaga vjetroturbine tri puta veća od snage koju generira jedna lopatica. Koeficijent snage vjetroturbine prikazuje koji udio snage se proizvodi vjetroturbinom od ukupno raspoložive snage, tj. snage

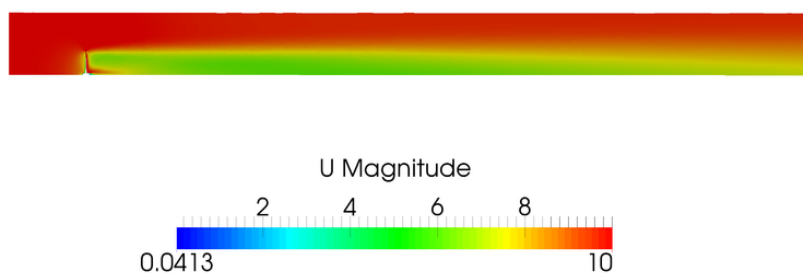
vjetra. Snaga vjetra se izračunava prema izrazu 26:

$$P_{wind} = \frac{\rho u^2}{2} Au. \quad (26)$$

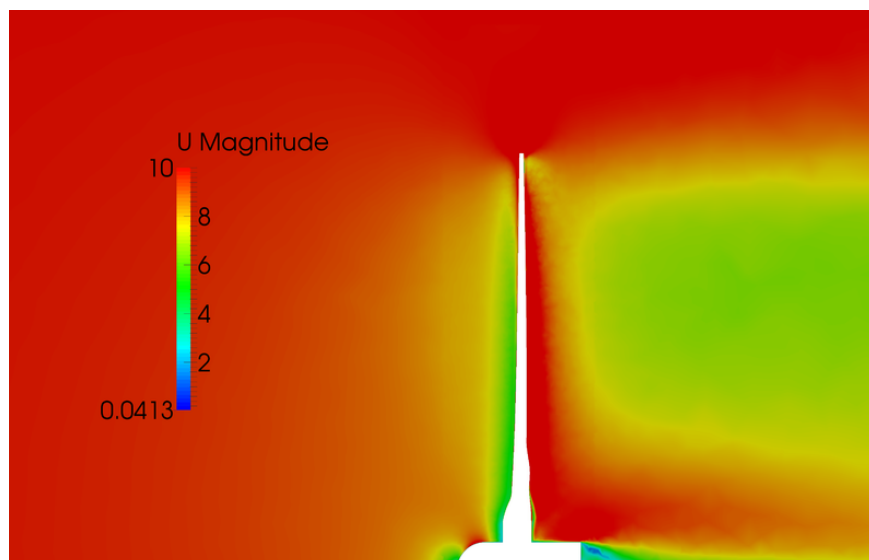
U izrazu 26 član $\frac{\rho u^2}{2}$ predstavlja kinetičku energiju, tj. dinamički tlak, vjetra koji struji brzinom u i ima gustoću ρ , a član Au predstavlja volumenski protok zraka kroz rotor vjetroturbine. Koeficijent snage se računa kao omjer snage vjetroturbine i snage vjetra. Na sljedećim slikama prikazana su polja tlaka i brzine.



Slika 38: Prikaz polja brzine na ulaznom presjeku rotora vjetroturbine

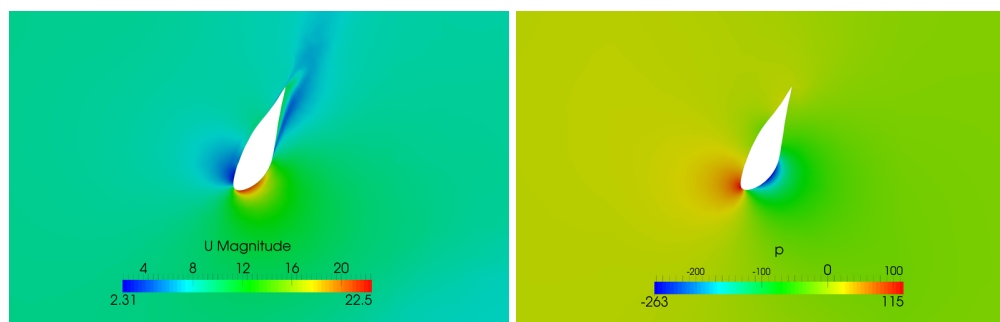


Slika 39: Prikaz vrtložnog traga iza rotora

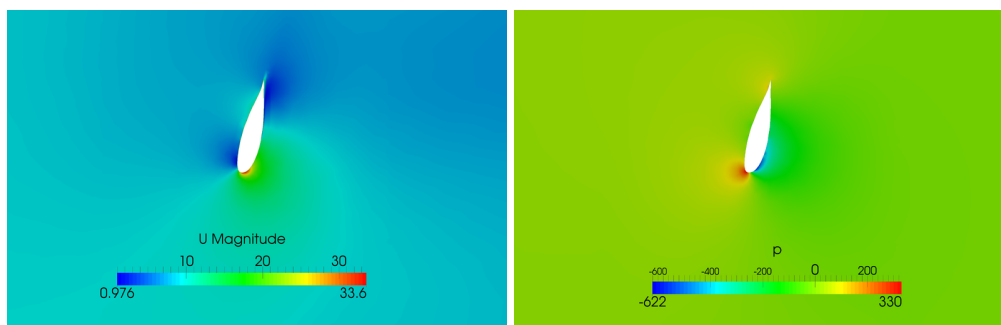


Slika 40: Prikaz dijela vrtložnog traga iza rotora u blizini lopatice i glavčine

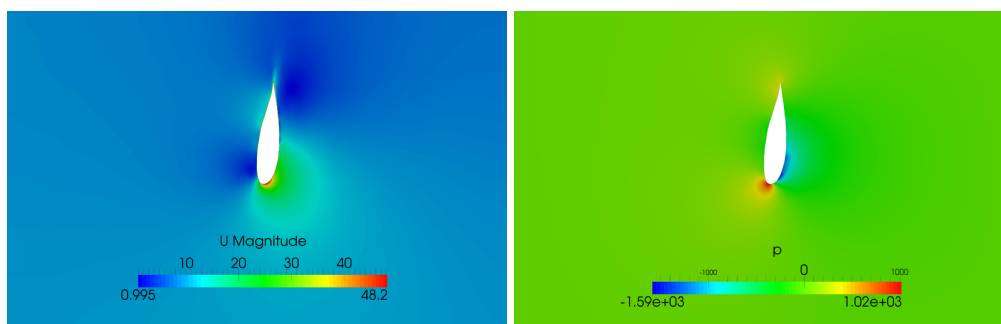
Na slikama 39 i 40 prikazan je vrtložni trag koji se javlja iza rotora vjetroturbine i prikazuje poremećaj koji vjetroturbina unosi u strujanje zraka. Slika 39 prikazuje ukupnu duljinu vrtložnog traga. Može se zaključiti da je vrtložni trag duži od 200 m budući da domena mreže iza rotora ima duljinu 200 m. Na slici 41 prikazana su polja tlaka i brzine oko profila vjetroturbine koji se nalazi na radijusu koji iznosi 1,5 m. Na slici 42 prikazana su polja tlaka i brzine na radijusu koji iznosi 3 m. Budući da je na većem radijusu veća obodna brzina vidljivo je da se javljaju veće brzine oko profila, a također se javlja i veća razlika tlaka. Na radijusu od 6 m taj efekt je još izraženiji. Iz toga proizlazi da se najveći dio snage vjetroturbine generira na dijelovima lopatica koji se nalaze na većem radijusu. Polja tlaka i brzine na profilu koji se nalazi na radijusu od 6 m nalaze se na slici 43.



Slika 41: Prikaz polja brzine i tlaka na radijusu 1,5 m



Slika 42: Prikaz polja brzine i tlaka na radijusu 3 m



Slika 43: Prikaz polja brzine i tlaka na radijusu 6 m

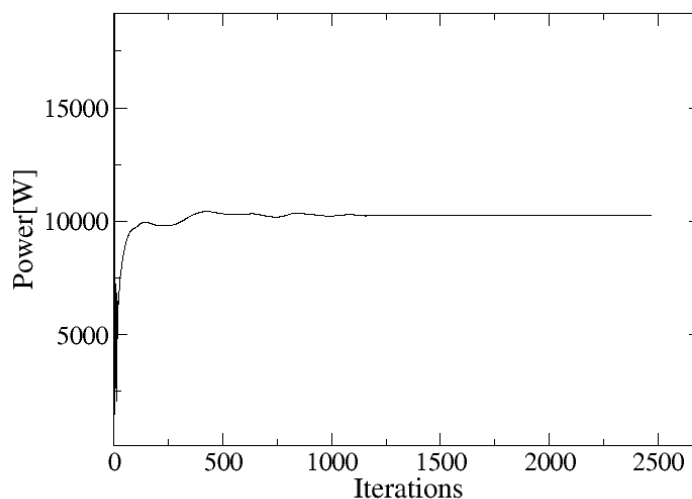
7.5.2 Vjetroturbina s izbočinama na 35% duljine napadnog brida lopatice

Kao kriterij konvergencije rješenja promatrana je oscilacija snage za jednu lopaticu turbine. Kad je oscilacija snage postala zanemariva, rješenja simulacije za zadnji trenutak uzeta su kao reprezentativna. Na slici 44 prikazana je oscilacija snage jedne lopatice vjetroturbine.

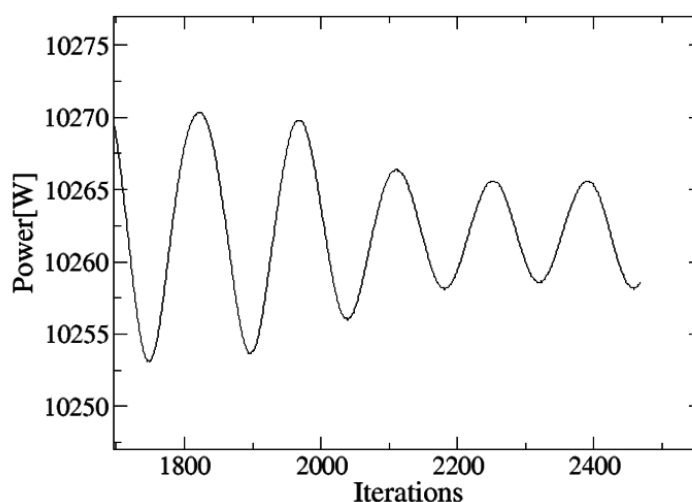
Za 2465. iteraciju simulacije može se reći da je rješenje iskonvergiralo jer relativna oscilacija snage jedne lopatice vjetroturbine iznosi 0,19% u odnosu na snagu izračunatu u toj iteraciji. Rješenja za 2465. iteraciju uzeta su kao reprezentativna i prikazana su u tablici 6.

Tablica 6: Parametri vjetroturbine s izbočinama na 35% duljine lopatice

Parametar	Iznos
Sila na lopaticu [N]	(1674,67 45,1 385,75)
Moment na lopaticu [Nm]	(1399,44 -301,83 -7034,51)
Snaga jedne lopatice [W]	10258,4
Ukupna snaga [W]	30775,2
Raspoloživa snaga vjetra [W]	79639,5
Koeficijent snage	0,386



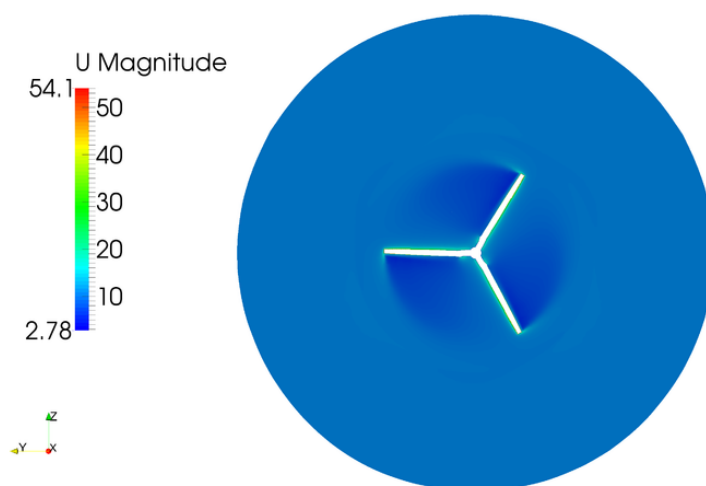
(a) Graf oscilacije



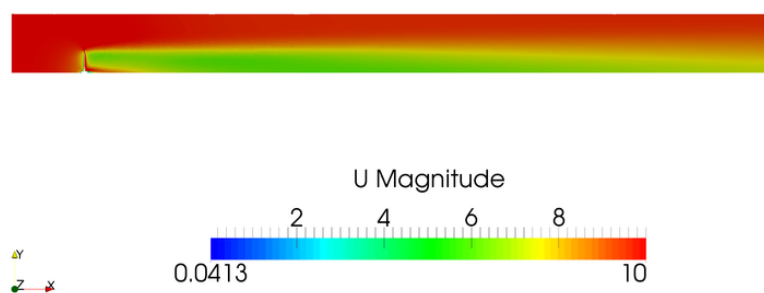
(b) Detalj oscilacija

Slika 44: Oscilacija snage jedne lopatice vjetroturbine s izbočinama na 35% duljine

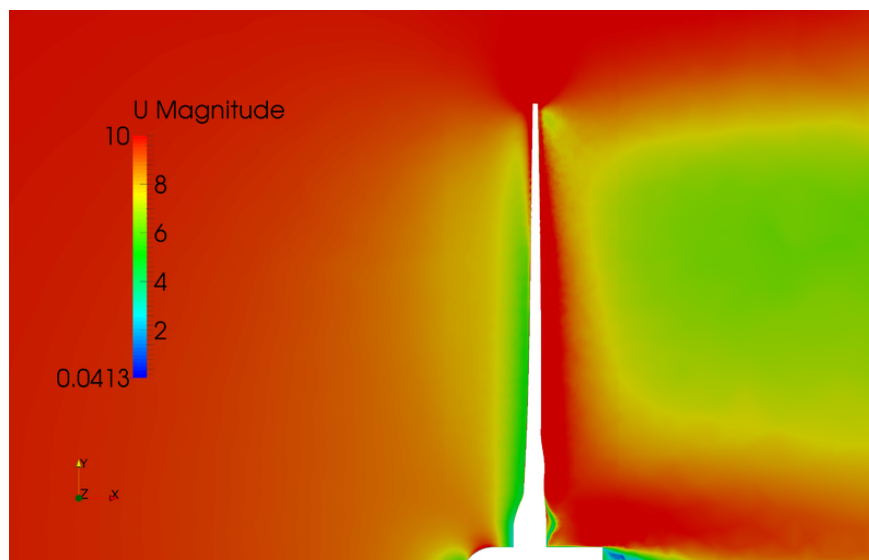
U tablici 6 su vidljivi parametri koji opisuju rad vjetroturbine. Iz prikazane tablice je također vidljivo da je snaga vjetroturbine s izbočinama na 35% duljine napadnog brida lopatice veća od snage vjetroturbine s konvencionalnim lopaticama. Budući da je raspoloživa snaga vjetra ostala nepromijenjena koeficijent snage je narastao za isti postotak kao i snaga. Snaga vjetroturbine s izbočinama na 35% duljine napadnog brida lopatice je 15% veća od snage vjetroturbine s konvencionalnim lopaticama u optimalnoj radnoj točki. Na sljedećim slikama prikazana su polja tlaka i brzine.



Slika 45: Prikaz polja brzine na ulaznom presjeku rotora vjetroturbine s izbočinama na 35% duljine lopatica

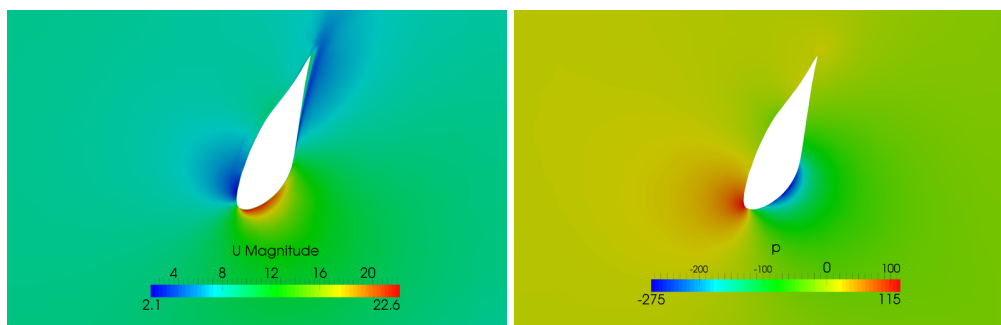


Slika 46: Prikaz vrtložnog traga iza rotora vjetroturbine s izbočinama na 35% duljine napadnog brida lopatice

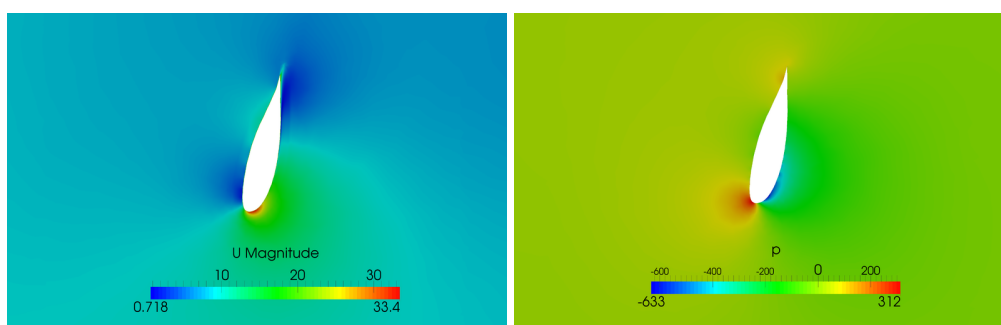


Slika 47: Prikaz dijela vrtložnog traga iza rotora u blizini lopatice i glavčine vjetroturbine s izbočinama na 35% duljine napadnog brida lopatice

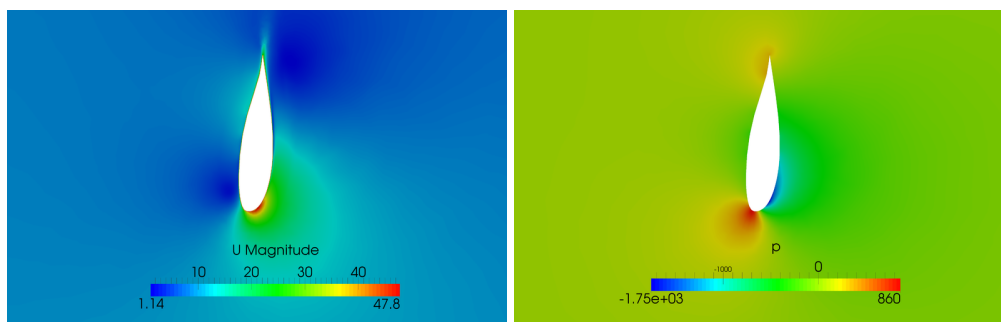
Na slikama 46 i 47 prikazan je vrtložni trag koji se javlja iza rotora vjetroturbine i prikazuje poremećaj koji vjetroturbina unosi u strujanje zraka. Slika 46 prikazuje ukupnu duljinu vrtložnog traga. Može se zaključiti da je vrtložni trag duži od 200 m budući da domena mreže iza rotora ima duljinu 200 m. Na slici 48 prikazana su polja tlaka i brzine oko profila vjetroturbine koji se nalazi na radijusu koji iznosi 1,5 m. Na slici 49 prikazana su polja tlaka i brzine na radijusu koji iznosi 3 m. Budući da je na većem radijusu veća obodna brzina vidljivo je da se javljaju veće brzine, a također i veća razlika tlaka. Na radijusu od 6 m taj efekt je još izraženiji. Polja tlaka i brzine na profilu koji se nalazi na radijusu od 6 m nalaze se na slici 50. Na radijusu od 6 m nalaze se izbočine na napadnom bridu profila.



Slika 48: Prikaz polja brzine i tlaka na radijusu 1,5 m vjetroturbine s izbočinama na 35% duljine napadnog brida lopatice

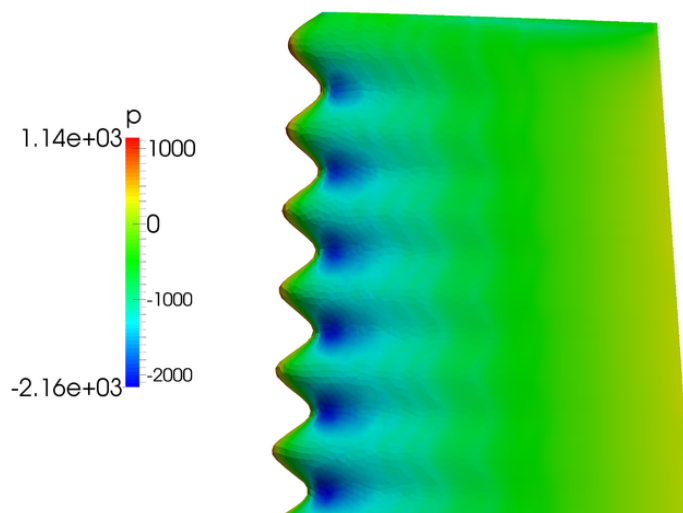


Slika 49: Prikaz polja brzine i tlaka na radijusu 3 m vjetroturbine s izbočinama na 35% duljine napadnog brida lopatice

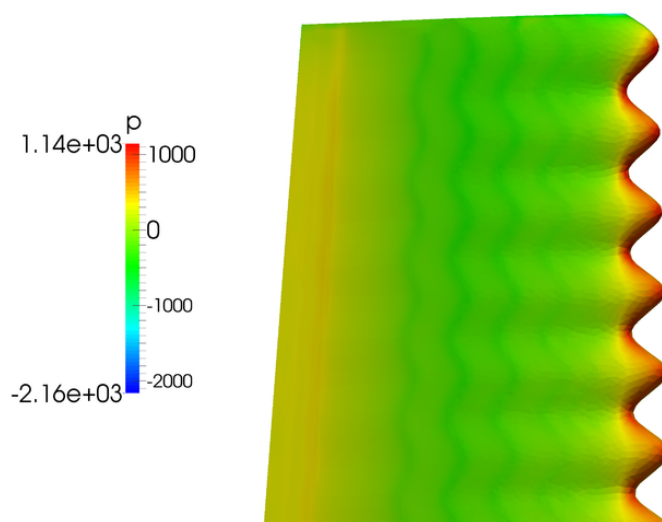


Slika 50: Prikaz polja brzine i tlaka na radijusu 6 m vjetroturbine s izbočinama na 35% duljine napadnog brida lopatice

Polja tlaka na pretlačnoj i potlačnoj strani lopatice na mjestu gdje se nalaze izbočine prikazana su na slikama 51 i 52.



Slika 51: Prikaz polja tlaka na potlačnoj strani lopatice s izbočinama na 35% duljine napadnog brida lopatice

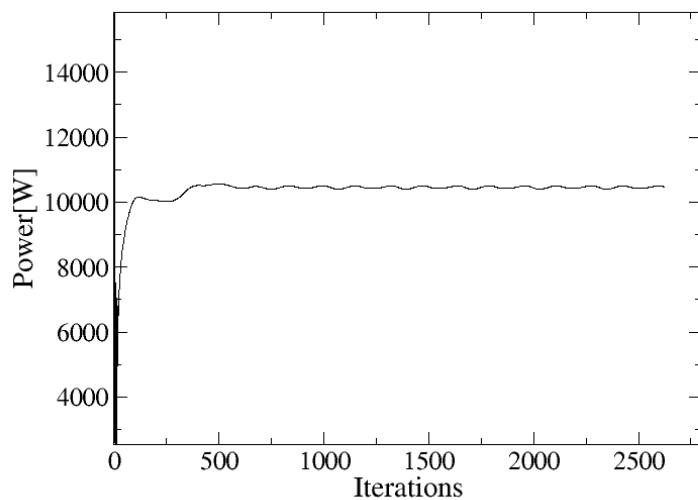


Slika 52: Prikaz polja tlaka na pretlačnoj strani lopatice s izbočinama na 35% duljine napadnog brida lopatice

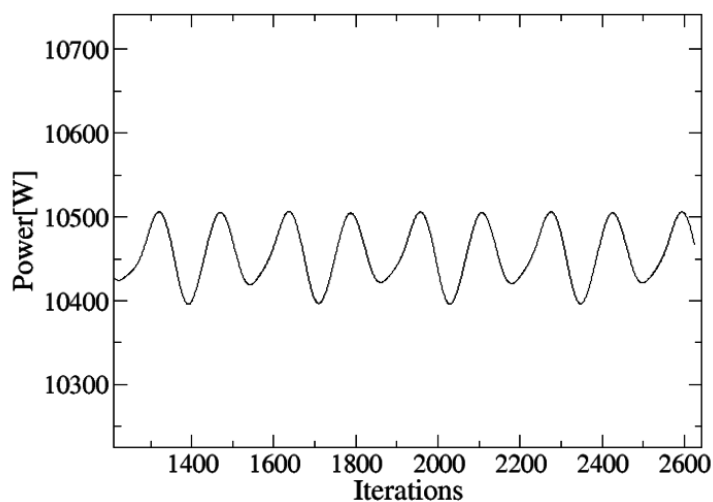
7.5.3 Vjetroturbina s izbočinama na 70% duljine napadnog brida lopatice

Kao kriterij konvergencije rješenja promatrana je oscilacija snage za jednu lopaticu turbine. Kad je oscilacija snage postala zanemariva, rješenja simulacije za zadnji trenutak uzeta su kao reprezentativna. Na slici 53 prikazana je oscilacija snage jedne lopatice vjetroturbine.

Za 2620. iteraciju simulacije može se reći da je rješenje iskonvergiralo jer relativna oscilacija snage jedne lopatice vjetroturbine iznosi 0,96% u odnosu na snagu izračunatu u toj iteraciji. Rješenja za 2620. iteraciju uzeta su kao reprezentativna i prikazana su u tablici 7.



(a) Graf oscilacije



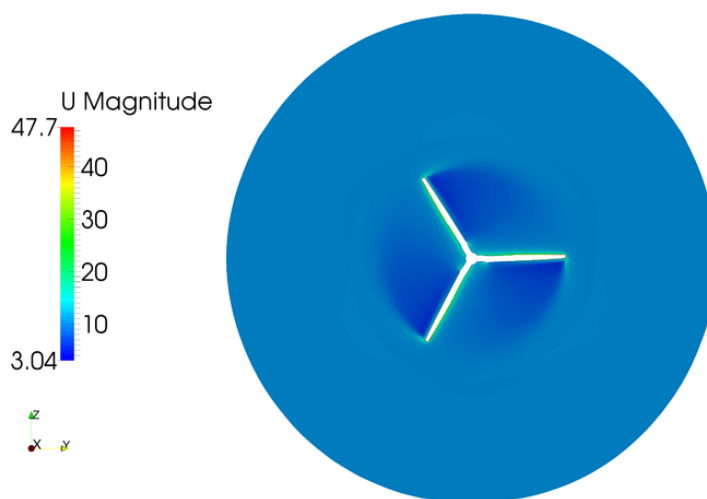
(b) Detalj oscilacija

Slika 53: Oscilacija snage jedne lopatice vjetroturbine s izbočinama na 70% duljine napadnog brida lopatice

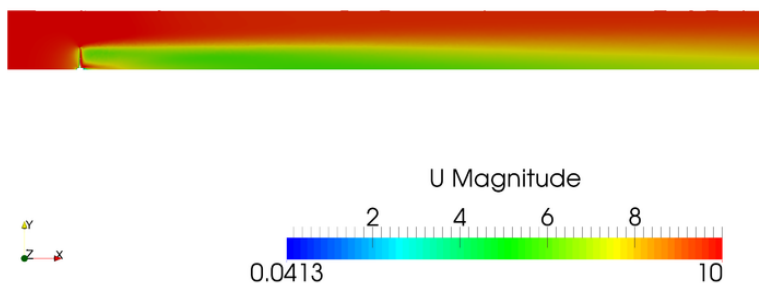
Tablica 7: Parametri vjetroturbine s izbočinama na 70% duljine napadnog brida lopatice

Parametar	Iznos
Sila na lopaticu [N]	(1708,36 51,32 408,44)
Moment na lopaticu [Nm]	(1429,22 -307,16 -7147,31)
Snaga jedne lopatice [W]	10476,7
Ukupna snaga [W]	31430,1
Raspoloživa snaga vjetra [W]	79639,5
Koeficijent snage	0,395

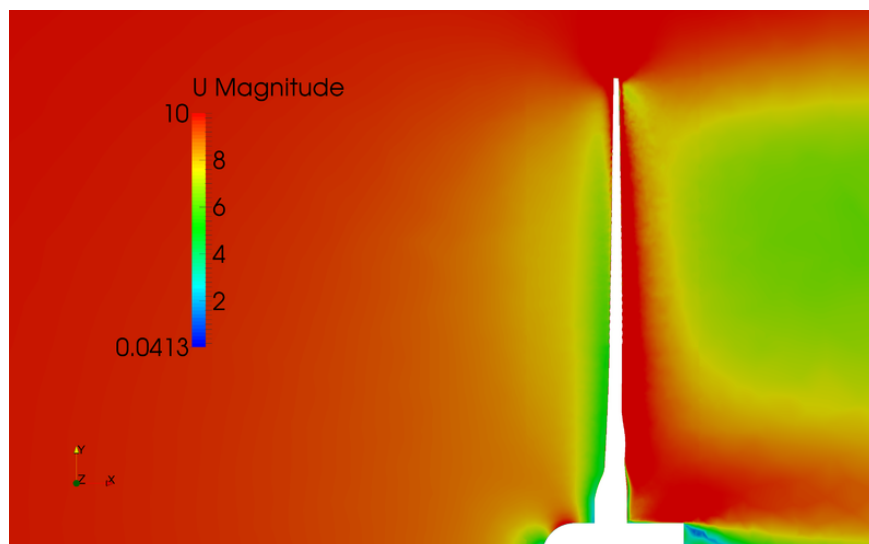
U tablici 7 su vidljivi parametri koji opisuju rad vjetroturbine. Iz prikazane tablice se također može vidjeti da je snaga vjetroturbine s izbočinama na 70% duljine napadnog brida lopatice veća od snage vjetroturbine s konvencionalnim lopaticama. Budući da je raspoloživa snaga vjetra ostala nepromijenjena koeficijent snage je narastao za isti postotak kao i snaga. Snaga vjetroturbine s izbočinama na 70% duljine napadnog brida lopatice je 17% veća od snage vjetroturbine s konvencionalnim lopaticama u optimalnoj radnoj točki. To je dodatno povećanje snage, u odnosu na vjetroturbinu s izbočinama na 35% duljine lopatica, od 2%. Na sljedećim slikama prikazana su polja tlaka i brzine.



Slika 54: Prikaz polja brzine na ulaznom presjeku rotora vjetroturbine s izbočinama na 70% duljine lopatica

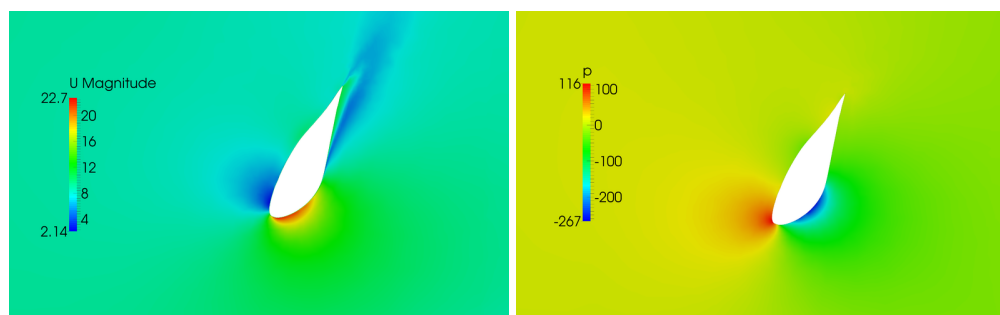


Slika 55: Prikaz vrtložnog traga iza rotora vjetroturbine s izbočinama na 70% duljine napadnog brida lopatice

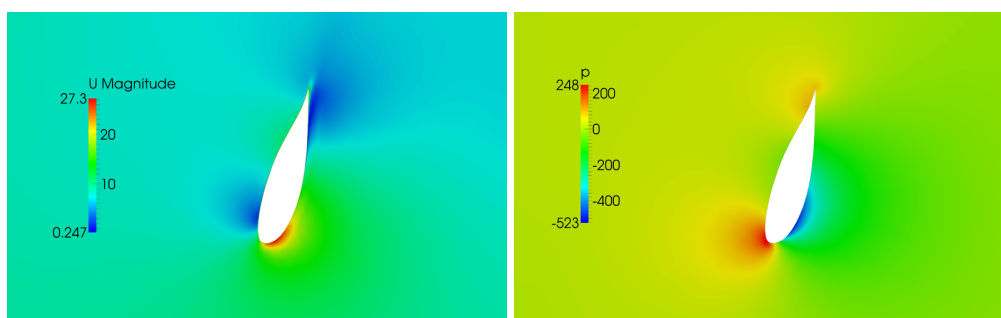


Slika 56: Prikaz dijela vrtložnog traga iza rotora u blizini lopatice i glavčine vjetroturbine s izbočinama na 70% duljine napadnog brida lopatice

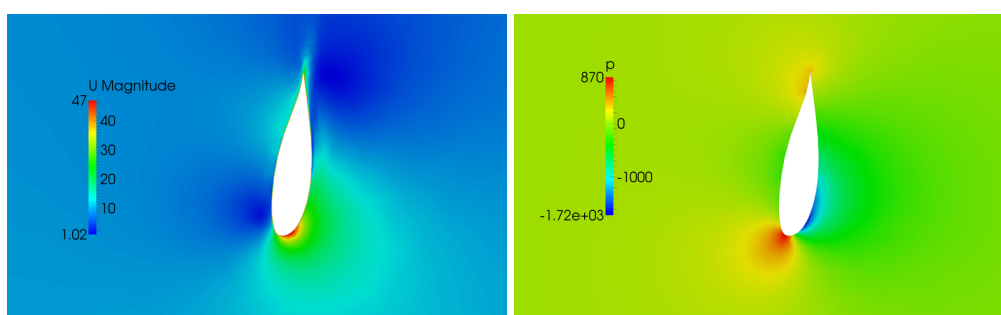
Na slikama 55 i 56 prikazan je vrtložni trag koji se javlja iza rotora vjetroturbine i prikazuje poremećaj koji vjetroturbina unosi u strujanje zraka. Slika 55 prikazuje ukupnu duljinu vrtložnog traga. Može se zaključiti da je vrtložni trag duži od 200 m budući da domena mreže iza rotora ima duljinu 200 m. Na slici 57 prikazana su polja tlaka i brzine oko profila vjetroturbine koji se nalazi na radijusu koji iznosi 1,5 m. Na slici 58 prikazana su polja tlaka i brzine na radijusu koji iznosi 3 m. Polja tlaka i brzine na profilu koji se nalazi na radijusu od 6 m nalaze se na slici 59. Na radijusu od 6 m nalaze se izbočine na napadnom bridu profila.



Slika 57: Prikaz polja brzine i tlaka na radijusu 1,5 m vjetroturbine s izbočinama na 70% duljine napadnog brida lopatice

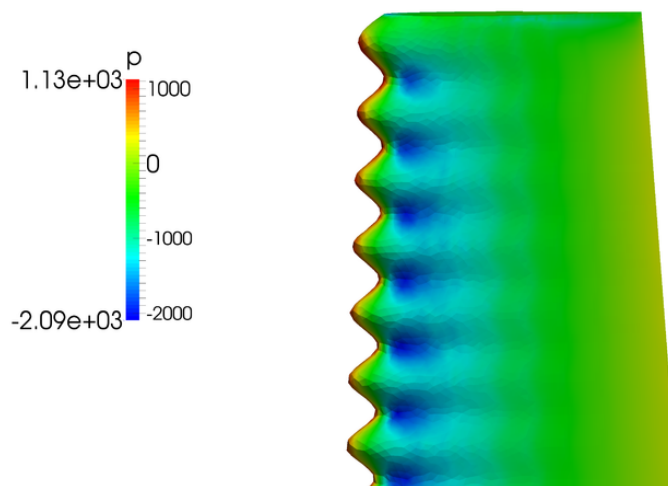


Slika 58: Prikaz polja brzine i tlaka na radijusu 3 m vjetroturbine s izbočinama na 70% duljine napadnog brida lopatica

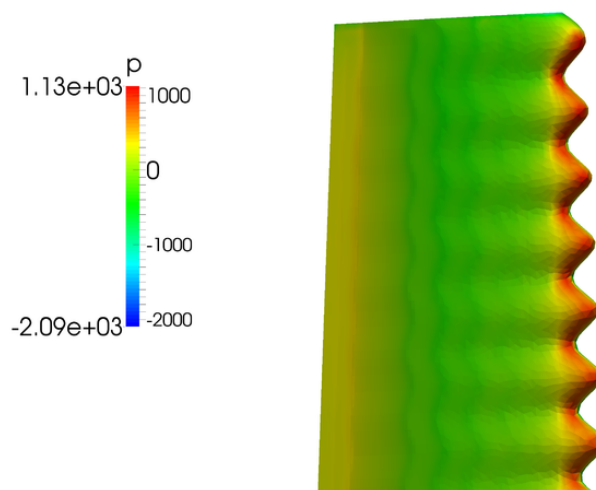


Slika 59: Prikaz polja brzine i tlaka na radijusu 6 m vjetroturbine s izbočinama na 70% duljine napadnog brida lopatica

Polja tlaka na pretlačnoj i potlačnoj strani lopatica na mjestu gdje se nalaze izbočine prikazana su na slikama 60 i 61.



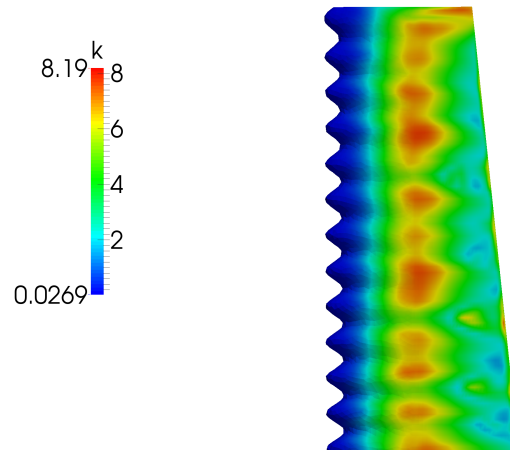
Slika 60: Prikaz polja tlaka na potlačnoj strani lopatice s izbočinama na 70% duljine napadnog brida lopatica



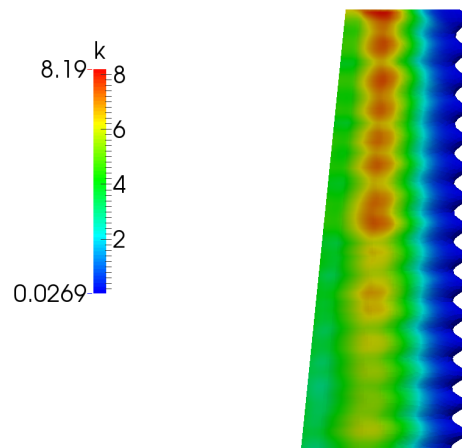
Slika 61: Prikaz polja tlaka na pretlačnoj strani lopatice s izbočinama na 70% duljine napadnog brida lopatica

7.5.4 Raspodjela turbulentnih veličina na lopaticama s izbočinama na napadnom bridu

Model turbulencije koji je korišten za modeliranje turbulencije u numeričkim proračunima ovog rada naziva se k-omega SST. To je model koji je definiran s dvije diferencijalne jednačbe koje se računaju u svakoj iteraciji zajedno sa sustavom Navier-Stokesovih jednačbi. Jednačbe modela turbulencije su povezane s jednačbom količine gibanja preko turbulentne viskoznosti koja se izračunava preko specifične turbulentne kinetičke energije i specifične brzine disipacije turbulentne kinetičke energije [26].

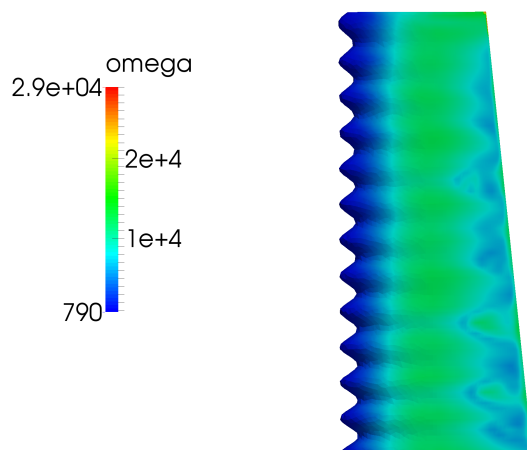


Slika 62: Prikaz polja specifične turbulentne kinetičke energije na potlačnoj strani lopatice s izbočinama na napadnom bridu

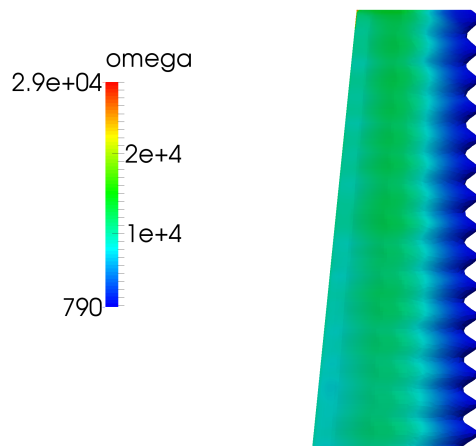


Slika 63: Prikaz polja specifične turbulentne kinetičke energije na pretlačnoj strani lopatice s izbočinama na napadnom bridu

Na prethodnim slikama prikazana je raspodjela turbulentne kinetičke energije na potlačnoj i pretlačnoj strani lopatice s izbočinama na napadnom bridu. Na mjestima gdje je kinetička turbulentna energija veća, veća je i energija vrtloga koji se javljaju. Vidljivo je da je turbulencija izraženija u kanalima koje stvaraju izbočine te na većim radijusima zbog veće obodne brzine.

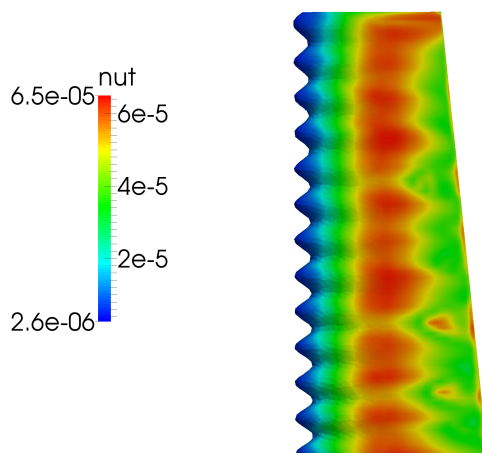


Slika 64: Prikaz polja specifične brzine disipacije turbulentne kinetičke energije na potlačnoj strani lopatice s izbočinama na napadnom bridu

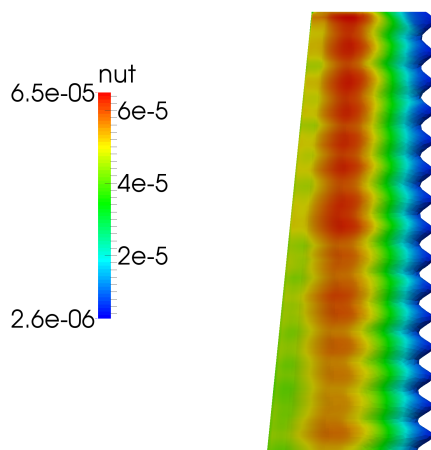


Slika 65: Prikaz polja specifične brzine disipacije turbulentne kinetičke energije na pretlačnoj strani lopatice s izbočinama na napadnom bridu

Na slikama 64 i 65 je prikazana raspodjela specifične brzine disipacije turbulentne kinetičke energije na lopatici vjetroturbine. Ta veličina predstavlja koliko brzo se vrtlozi raspadaju i veća je tamo gdje je snažnije vrtloženje.

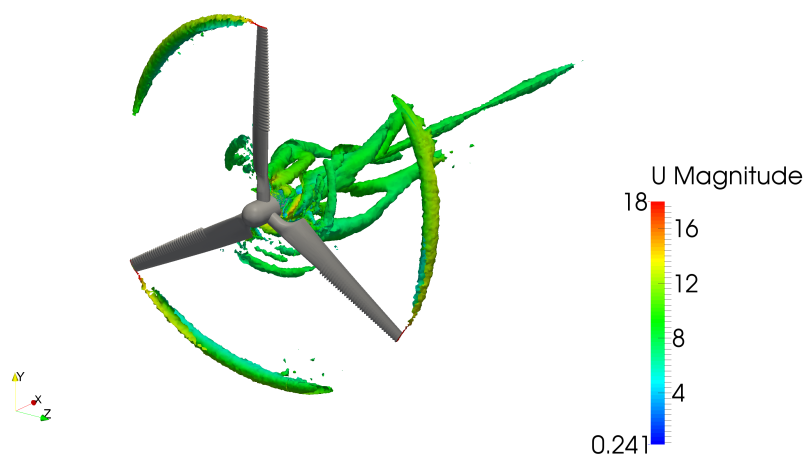


Slika 66: Prikaz polja specifične brzine disipacije turbulentne kinetičke energije na potlačnoj strani lopatice s izbočinama na napadnom bridu



Slika 67: Prikaz polja turbulentne viskoznosti na pretlačnoj strani lopatice s izbočinama na napadnom bridu

Turbulentna viskoznost je veličina koja uzima u obzir gubitak energije strujanja, a uzima se u obzir u difuzijskom članu Navier Stokesovih jednadžbi na način da se pridodaje molekularnoj viskoznosti. Ona je proporcionalna kinetičkoj turbulentnoj viskoznosti i obrnuto proporcionalna specifičnoj brzini disipacije turbulentne kinetičke energije [26].



Slika 68: Prikaz vrtloga iza vjetroturbine s izbočinama na napadnom bridu

Na slici 68 prikazan je vrtlog koji turbina ostavlja u nizvodnom strujanju. On se sastoji od dva dijela. Prvi dio je vrtlog koji se javlja kao posljedica prestrujavanja zraka s pretlačne na potlačnu stranu lopatice i on se javlja na vrhu lopatice. Drugi dio je posljedica vrtložnog traga koji lopatica ostavlja iza sebe. Gubici uzrokovani vrtlogom u nizvodnoj struji pobjiže su opisani u poglavlju 5.3.3.

7.6 Usporedba rezultata

Budući da je proračun konvencionalne lopatice vjetroturbine izvršen primjenom BEM teorije i Betzove metode, određena greška prilikom proračuna snage bila je i očekivana. Ona nastaje kao posljedica činjenice da je za odabrane korekcijske faktore potrebno dugogodišnje inženjersko iskustvo i znanje, tj. tijekom niza godina ti su koeficijenti optimizirani. Budući da su ti koeficijenti dio poslovne tajne svake tvrtke, u ovom proračunu su korištene orijentacijske vrijednosti dane u literaturi [1]. Relativna pogreška snage koja je dobivena proračunom, prema provedenoj simulaciji za vjetroturbinu s konvencionalnim lopicama iznosi 10% u odnosu na snagu konvencionalne vjetroturbine uzete u proračunu.

Tablica 8: Usporedba rezultata dobivenih simulacijom s proračunskim parametrima

Tip vjetroturbine	Snaga, P [kW]	Moment, M_x [Nm]	Koeficijent snage, c_p
Konvencionalna (proračun)	30	4092,6	0,377
Konvencionalna (simulacija)	26,8	3652,7	0,337
Izbočine na 35% duljine napadnog brida	30,8	4198,3	0,386
Izbočine na 70% duljine napadnog brida	31,4	4287,7	0,395

U tablici 8 su prikazani rezultati proračuna svih provedenih simulacija. Usporedbom dobivenih vrijednosti prikazanih u tablici može se primjetiti da se primjenom ideja iz prirode, odnosno korištenjem biomimikrije i biomimetike može ostvariti značajan porast snage za iste projektne parametre i to primjenom pasivne tehnologije.

7.7 Zaključak rezultata

Rezultati provedene simulacije slažu se s tvrdnjama koje su navedene u znanstvenim člancima koji obrađuju tematiku izbočina na napadnom bridu. Povećanje snage, odnosno koeficijenta snage vjetroturbine, ovisno je o postotku pokrivenosti napadnog brida lopatic vjetroturbine izbočinama. Povećanje snage vjetroturbine direktno je povezano s porastom koeficijenta uzgona lopatica. Numerička simulacija je provedena za tri različita slučaja: vjetroturbina s konvencionalnim lopaticama (bez izbočina), vjetroturbina s lopaticama kod koje je 35% vršnog dijela napadnog brida lopatice pokriveno izbočinama i vjetroturbina kod koje je 70% vršnog dijela napadnog brida lopatice pokriveno izbočinama. Iz rezultata simulacija proizlazi da je za pokrivenost lopatic s izbočinama na 35% vršnog dijela napadnog brida lopatic, snaga veća u odnosu na konvencionalne lopatice za 15%. Za slučaj kod kojeg je 70% vršnog dijela napadnog brida lopatice pokriveno izbočinama, snaga je veća za 17%. Iz toga se može zaključiti da je učinkovitije stavljati izbočine na veće radijuse. To je posljedica činjenice da se najviše energije kod vjetroturbina generira iz vršnih dijelova lopatica. Budući da efekt povećanja snage nije jako izražen na manjim radijusima, postoji neki postotak pokrivenosti koji je s ekonomskog stajališta optimalan. Povećanje snage podrazumijeva i povećanje proizvodnje električne energije iz vjetroturbine istog promjera.

8 Zaključak rada

Biomimikrija je u prošlosti rezultirala brojnim, na prvi pogled neobećavajućim, rješenjima u inženjerskoj praksi. Jedno od tih rješenja je inspirirano izbočinama na perajama grbavog kita. Ljudi su primijetili da je grbavi kit, unatoč svojoj masi, brz i okretan u vodi, što mu omogućuje lakši lov hrane. Izbočine se, po uzoru na grbavog kita, za poboljšanje aerodinamičkih svojstava stavljaju na napadni brid krila i lopatica. To omogućuje povećanje koeficijenta uzgona, smanjenje koeficijenta otpora i pojavu odvajanja strujanja pri većim napadnim kutevima, čija je direktna posljedica povećanje izlazne snage vjetroturbine.

U ovom radu prikazani su rezultati numeričke simulacije utjecaja izbočina na napadnom bridu lopatica vjetroturbine nazivne snage 30 kW i promjera rotora 13 m te njihova usporedba s rezultatima konvencionalne vjetroturbine. S obzirom na tu pretpostavljenu nazivnu snagu koja je kao parametar zadana u inicijalnom proračunu, konvencionalna vjetroturbina prema rezultatima dobivenim u okviru ovog rada generira manju snagu. Razlog tome leži u činjenici što su određeni iskustveni faktori potrebni u proračunu uzeti proizvoljno, čime se otvara prostor za nepodudaranje vrijednosti snage u inicijalnom proračunu i rezultatima numeričkog proračuna. Numerički proračun vjetroturbine koja umjesto konvencionalnih ima lopatice s izbočinama na 35% duljine napadnog brida lopatice, pokazuje porast snage za 15% s obzirom na konvencionalnu vjetroturbinu. Kako je u slučaju vjetroturbine s lopaticama koje imaju izbočine na 70% duljine napadnog brida lopatice porast snage u odnosu na konvencionalnu vjetroturbinu 17%, dodatne analize su potrebne kako bi se utvrdila ekonomska opravdanost ugradnje izbočina na većim duljinama napadnog brida. Kako je cijena rotora s 3 lopatice unutar ukupne cijene same vjetroelektrane 20% [1], ugradnja lopatica s izbočinama bi zahtijevala dodatno povećanje cijene investicije. Stoga je upitna ekonomska isplativost ugradnje lopatica s izbočinama na 70% ukupne duljine u odnosu na lopatice s izbočinama na 35% duljine, budući da je generirana snaga uvećana za samo 2%, dok je cijena također porasla. Upravo ta osnovna tehno-ekonomska analiza stavlja lopatice s izbočinama na 35% vršne duljine u povoljniji položaj s obzirom na onu sa 70%. To je i direktna potvrda činjenice da većina generirane snage dolazi sa samog vrha lopatice zbog pojave većih brzina na većim radijusima, pa je stoga i porast snage s postavljanjem izbočina na manje radijuse znatno umanjen. Porastom pokrivenosti vršnog dijela napadnog brida lopatica vjetroturbine izbočinama, raste iznos generirane snage. S druge strane, implementacijom ove tehnologije značajno bi se povećala cijena vjetroagregata. Stoga se za daljnja istraživanja predlaže detaljna tehno-ekonomska analiza u svrhu utvrđivanja optimalne pokrivenosti vršnog dijela napadnog brida lopatica vjetroturbine izbočinama, tj. utvrđivanja maksimalno opravdanog iznosa povećanja investicije na račun povećanja snage.

U ovom radu nije promatran utjecaj frekvencije pojavljivanja izbočina. Također, nije promatran utjecaj broja izbočina te sama veličina izbočina na radne karakteristike vjetroturbine. Time se ostavlja još mnogo prostora za daljnja istraživanja navedene problematike i traženje optimalne izvedbe izbočina.

9 Sažetak

Naslov ovog rada je Primjena tehnologija izbočina na napadnom bridu lopatica vjetroturbine kojom su autori Marko Horvat, Borna Šojat i Josip Žužul.

Čovječanstvo je oduvijek inspiraciju za svoja tehnološka dostignuća tražilo imitacijom određenih pojava iz prirode. Jedan od takvih primjera je i relativno nedavno otkriće jedne kanadske kompanije, koja je promatranjem i istraživanjem ponašanja grbavog kita u oceanu došla do zaključka kako izbočine na njegovoj peraji unapređuju njegove aerodinamičke karakteristike. U skladu s tim saznanjima su modificirali konvencionalnu lopaticu vjetroturbine ugradnjom pravilnih sinusoidalnih izbočina na napadnom bridu. Time se povećava sila uzgona te sukladno tome i izlazna snaga, za iste projektne parametre, u odnosu na konvencionalnu vjetroturbinu. Kako je ovaj fenomen relativno nedavno primjećen, ne postoji mnogo znanstvenih radova navedene tematike unatoč njegovom velikom potencijalu. Stoga se kao osnovna ideja ovog rada nameće potvrđivanje ili opovrgavanje teze da se postavljanjem izbočina na napadni brid lopatice vjetroturbine može povećati snaga. Odgovor na iznesenu tezu tražen je umjesto skupim ispitivanjima u zračnim tunelima, na jedan nov i moderan način – pomoću numeričkih simulacija računalne dinamike fluida (CFD). Numeričke simulacije pružaju mogućnost rješavanja i vizualizacije kompleksnih strujanja u prirodi pomoću matematičkih modela osnovnih konzervacijskih zakona, pri čemu je jedino ograničenje raspoloživi računalni resursi. Tako su simulirana strujanja vjetra oko konvencionalne vjetroturbine i modificirane vjetroturbine s izbočinama te su uspoređene njihove radne karakteristike i izlazne snage.

Dodatno, unutar ovog rada dan je kratak pregled razvoja vjetroturbina kroz povijest, počevši od primitivnih vjetrenjača s područja drevnih država Bliskog i Dalekog istoka pa sve do današnjih modernih vjetroturbina. Prikazane su vrste modernih vjetroturbina te način na koji se danas koriste u raznim dijelovima svijeta.

Centralni dio ovog rada podijeljen je u nekoliko cjelina. U prvoj je cjelini dan proračun lopatice vjetroturbine s obzirom na zadane projektne parametre, kojim je definirana geometrija vjetroturbine. Sljedeći korak predstavlja postupak generiranja geometrije u *Solidworks* CAD programu. Ta geometrija dalje je korištena za generiranje mreže konačnih volumena u software paketu *Pointwise*. Nakon generiranja prostorno diskretiziranih mreža konačnih volumena za svaki pojedini analizirani slučaj, postavljeni su rubni i početni uvjeti za numeričku simulaciju koja je provedena u open-source CFD paketu *OpenFOAM*. U konačnici su izneseni dobiveni rezultati koji potvrđuju da vjetroturbina s izbočinama na napadnom bridu lopatice daje veću snagu u odnosu na konvencionalnu vjetroturbinu pri istoj neporemećenoj brzini vjetra.

Ključne riječi: računalna dinamika fluida, vjetroturbina, izbočine na napadnom bridu, biomimikrija, obnovljivi izvori energije.

10 Summary

Title of this work is Design and numerical simulation of tubercle technology on wind turbine blades by Marko Horvat, Borna Šojat and Josip Žužul.

Mankind has always been searching for the inspiration for their technological achievements imitating the certain phenomena found in the nature. One such example is the recent discovery of Canadian company *Whale power*, whose observations and study of the humpback whale's behaviour in the ocean resulted in conclusion that the bumps on its fin improve its aerodynamic characteristics. Therefore, in accordance to the findings, company modified the conventional wind turbine blade using the embedded sinusoidal bumps on the leading edge of the blade, which consequently increases the lift and output power with same design parameters compared to conventional wind turbine. As of the recent observation of this phenomenon, a very few scientific papers on this subject exist despite its great potential. With that in mind, the basic idea of this paper imposes confirmation or refutation of the thesis that the existence of bumps on the leading edge of wind turbine blade increases the output power.

Instead of the expensive and limited tests in the wind tunnels, the answer to the presented idea was attempted to be resolved by the implementation of the new and modern way – numerical simulations (CFD). Numerical CFD simulations provide an opportunity to solve and visualize the complex fluid flows in nature by implementing the mathematical models of basic conservative laws, where the only limit is the available computing resource. Thus, the wind flow around the conventional and modified wind turbine with bumps (so-called tubercle wind turbine) was simulated and their respective operating characteristics and output powers were compared. In addition, in this paper a short overview of the historic development of wind turbines was given, starting from the primitive windmills of ancient Middle and Far East states all the way toward the modern wind turbines. The types of modern wind turbines and how they are used in various parts of the world is also discussed.

The main part of the study is divided into several sections. In the first section, the basic calculation of wind turbine blade is given according to the design parameters, which completely define the wind turbine geometry. Second section describes the method of generating a geometry in *Solidworks* CAD software. Likewise, this 3D geometry is used to generate a grid of finite volumes in the process called meshing for each analysed case in the *Pointwise* software package. After the spatially discretized grid of finite volumes for each analysed case was generated, the initial and boundary conditions for numerical simulations could be set. Numerical simulations were performed using the open-source CFD package *OpenFOAM*. Finally, obtained results that confirmed the greater power output of tubercle wind turbine compared to the conventional wind turbine at the same incoming wind speed were presented.

Key words: computational fluid dynamics, wind turbine, tubercle blade, biomimicry, renewable energy sources.

Literatura

- [1] Gasch R., Twele J., Wind Power Plants - Fundamentals, Design, Construction and Operation (2002).
- [2] Wikipedia.
URL https://en.wikipedia.org/wiki/File:Wind_turbine_size_increase_1980-2011.png
- [3] EWEA, The European Wind Energy Association: Wind in power, 2015 European statistics, February (2016).
- [4] Wikipedia.
URL https://en.wikipedia.org/wiki/Eastgate_Centre,_Harare#/media/File:Eastgate_Centre,_Harare,_Zimbabwe.jpg
- [5] Wikipedia.
URL <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Lotus3.jpg>
- [6] Wikipedia.
URL [https://en.wikipedia.org/wiki/Hook_and_loop_fastener#/media/File:Micrograph_of_hook_and_loop_fastener_\(Velcro_like\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Hook_and_loop_fastener#/media/File:Micrograph_of_hook_and_loop_fastener_(Velcro_like).jpg)
- [7] Wikipedia.
URL https://en.wikipedia.org/wiki/Gecko#/media/File:Gecko_foot_on_glass.JPG
- [8] Wikipedia.
URL https://en.wikipedia.org/wiki/Humpback_whale#/media/File:Humpback_Whale_underwater_shot.jpg
- [9] Wikipedia.
URL https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9a/Tubercle_model_Humpback_whale_flipper.jpg
- [10] Wikipedia.
URL https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9a/Humpback_flipper.jpg
- [11] Miklošović DS, Murray MM, Howle LE, Fish FE, Leading-edge tubercles delay stall on humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) flippers. *Physics Fluids* 16:L39–42. (2004).
- [12] Frank E. Fish, Paul W. Weber, Mark M. Murray and Laurens E. Howle, The Tubercles on Humpback Whales' Flippers: Application of Bio-Inspired Technology. *Integrative and Comparative Biology*, volume 51, number 1, pp. 203–213 (2011).

- [13] Pétur Örn Arnarson, Biomimicry (2011).
- [14] Stanford.
URL <http://web.stanford.edu/group/mota/education/Physics%2087N%20Final%20Projects/Group%20Gamma/gecko.htm>
- [15] Ask nature.
URL <http://www.asknature.org/strategy>
- [16] Wikipedia.
URL https://hr.wikipedia.org/wiki/Vodomar#/media/File:Common_Kingfisher_Alcedo_atthis.jpg
- [17] Wikipedia.
URL https://en.wikipedia.org/wiki/500_Series_Shinkansen#/media/File:JRW-500_V2_inHimeji.jpg
- [18] Ask nature.
URL <http://www.asknature.org/strategy>
- [19] I. Hrgovan, Vjetroturbina za pogon električnog generatora, Master's thesis, Fakultet strojarstva i brodogradnje (2011).
- [20] McGhee R.J., Beasley W.D., Whitcomb R.T., NASA Low- and Medium-Speed Airfoil Development (1979).
- [21] G. S., Wind Turbines (2009).
- [22] UIUC Applied Aerodynamics Group, Department of Aerospace Engineering (2016).
URL http://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html#N
- [23] See the MRF development (2009).
URL http://openfoamwiki.net/index.php/See_the_MRF_development
- [24] H. Jasak, M. Beaudoin, Development of Generalized Grid Interface for Turbomachinery simulations with *OpenFOAM* (2008).
- [25] T-Rex Hybrid Meshing in *Pointwise*.
URL <http://www.pointwise.com/theconnector/July-2011/T-Rex-Hybrid-Meshing-in-Pointwise.shtml>
- [26] SST k-omega model.
URL http://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model#Turbulence_Kinetic_Energy