

Vjetroturbina za pogon električnog generatora

Hrgovan, Iva

Master's thesis / Diplomski rad

2011

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:879371>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-15**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada:

Prof.dr.sc. Zvonimir Guzović

Iva Hrgovan

Zagreb, 2011

Sažetak

U okviru diplomskog rada napravljen je predprojekt vjetroturbine s naglaskom na aerodinamiku rotora. S obzirom na lokaciju odabran je klasični tip vjetroturbine uzgonskog tipa s horizontalnom osi rotacije i 3 lopatice. Željena snaga vjetroagregata iznosi 3 MW.

U radu je dan statistički pregled korištenja energije vjetra u svijetu i u Republici Hrvatskoj i opisani su mehanizmi nastajanja globalnih i lokalnih cirkulacija vjetra. Također je dan pregled osnovnih dijelova vjetroturbine s naglaskom na rotor.

S obzirom da je cilj izlazna snaga vjetroturbine od 3MW, u skladu s time izvršen je aerodinamski proračun lopatice. Na lopatici je provedena numerička simulacija strujanja u svrhu provjere karakterističnih aerodinamskih parametara, tlaka i brzina.

Aerodinamska simulacija je omogućila kritički osvrt na rezultate analitičkoga proračuna.

U radu je dan pregled sustava kontrole opterećenja lopatica s detaljnim osvrtom na aktivnu kontrolu korištenjem mikrotabova.

Sadržaj

| | |
|---|----|
| Sažetak | 1 |
| Popis slika | 4 |
| Popis tablica | 7 |
| Popis oznaka i mjernih jedinica..... | 8 |
| Lista indeksa | 9 |
| 1 Uvod..... | 10 |
| 1.1 Pregled stanja u svijetu..... | 10 |
| 1.2 Stanje elektroenergetskog sustava u Republici Hrvatskoj | 13 |
| 1.3 Povijesni razvoj..... | 15 |
| 1.4 Ostali koncepti vjetroturbina | 22 |
| 2 Vjetar | 23 |
| 2.1 Globalni vjetrovi | 23 |
| 2.2 Geostrofički vjetar | 25 |
| 2.3 Granični sloj | 25 |
| 2.4 Vjetrovi u hrvatskom priobalju | 28 |
| 2.4.1 Bura | 28 |
| 2.4.2 Jugo..... | 31 |
| 2.4.3 Maestral..... | 33 |
| 2.5 Vjetrovi cirkulacije obronka | 34 |
| 2.5.1.1 Učestalost obalne cirkulacije | 35 |
| 3 Osnovni elementi vjetroturbine..... | 36 |
| 3.1 Rotor | 38 |
| 3.1.1 Lopatice | 40 |
| 3.1.2 Glavina rotora..... | 42 |
| 3.2 Pogonski sustav | 43 |
| 3.3 Kućište, glavni okvir i toranj..... | 43 |
| 4 Određivanje geometrije rotora | 44 |
| 4.1 Teorijska osnova | 44 |
| 4.1.1 Osnove teorije diska | 44 |
| 4.1.2 Osnove teorije elementarnog kraka | 48 |
| 4.2 Kombinirana teorija elementarnog kraka i teorije diska | 50 |
| 4.3 Odabir profila | 51 |
| 4.4 Preliminarno određivanje promjera rotora | 54 |

| | | |
|-----------|---------------------------------------|----|
| 4.4.1 | Koeficijent snage | 55 |
| 4.4.1.1 | Gubitci uslijed otpora profila..... | 55 |
| 4.4.1.2 | Vršni gubitci | 57 |
| 4.4.1.3 | Gubitci uslijed vrtloženja traga..... | 58 |
| 4.5 | Raspodjela duljine tetive..... | 59 |
| 4.6 | Raspodjela kuta uvijanja | 61 |
| 5 | Proračun snage..... | 63 |
| 6 | Kontrola opterećenja i strujanja..... | 64 |
| 6.1 | Upravljanje turbinom | 66 |
| 6.2 | Kontrola strujanja..... | 67 |
| 6.2.1 | Aktivna kontrola strujanja | 67 |
| 6.2.1.1 | Zakrilca..... | 68 |
| 6.2.1.2 | Mikrotabovi | 70 |
| 6.2.1.2.1 | Mikrotabovi na pretlačnoj strani..... | 71 |
| 6.2.1.2.2 | Mikrotabovi na potlačnoj strani..... | 72 |
| 7 | 3D model lopatice..... | 74 |
| 8 | Numerička provjera strujanja | 76 |
| 8.1 | Rezultati analize | 78 |
| 9 | Zaključak..... | 85 |
| 10 | Popis literature | 86 |
| 11 | Izvor fotografija..... | 88 |
| 12 | Prilog 1..... | 89 |

Popis slika

| | |
|---|----|
| Slika 1.1 Ukupni instalirani kapacitet energije vjetra na globalnoj razini 1996. – 2010. | 10 |
| Slika 1.2 Godišnje instalirani kapacitet energije vjetra na globalnoj razini 1996. – 2010..... | 11 |
| Slika 1.3 Top 10 zemalja s ukupno instaliranom snagom (prosinac 2010.) | 11 |
| Slika 1.4 Top 10 zemalja s novo instaliranom snagom u protekloj godini (prosinac 2010.) | 12 |
| Slika 1.5 VE Vrataruša [9] | 14 |
| Slika 1.6 Primjer nizozemske vjetrenjače..... | 16 |
| Slika 1.7 Primjer američke vjetrenjače [A] | 17 |
| Slika 1.8 La Courove vjetrenjače [B] | 18 |
| Slika 1.9 Smith-Putnam vjetroturbina [C] | 19 |
| Slika 1.10 Gedserova vjetroturbina [D] | 19 |
| Slika 1.11 Darrieusov rotor [E]..... | 20 |
| Slika 1.12 Nizozemski „off-shore“ vjetropark „Prinses Amalia“ [F] | 21 |
| Slika 2.1 Cirkulacija globalnog vjetra [13] | 23 |
| Slika 2.2 Utjecaj površinske hrapavosti na profil brzine [12] | 26 |
| Slika 2.3 Usporedba srednjeg i realnog profila brzine [12] | 26 |
| Slika 2.4 Srednje godišnje brzine vjetra i potencijal vjetra za zemlje EU (1989.) [13] | 27 |
| Slika 2.5 Zapis bure u Senju zabilježen ultrasoničnim anemometrom s intervalom uzorkovanja 0.25 s [19] | 28 |
| Slika 2.6 Srednji broj dana s burom za pojedini mjesec za Split i Senj [19] | 29 |
| Slika 2.7 Srednji smjerovi i jačine bure duž Jadranske obale [19]..... | 30 |
| Slika 2.8 Srednji broj slučajeva s jugom koje je trajalo više od 24 sata za Dubrovnik, 1976 – 1980. [20]..... | 31 |
| Slika 2.9 Najveća srednja satna brzina juga po godišnjim dobima u Dubrovniku, Splitu i Puli, 1976 – 1980. [20]..... | 32 |
| Slika 2.10 Skica nastajanja obalne cirkulacije; dnevno strujanje [21] | 34 |
| Slika 2.11 Skica nastajanja obalne cirkulacije; noćno strujanje [21] | 34 |
| Slika 2.12 Učestalost obalne cirkulacije u ljetnim mjesecima (%) za deset postaja u Istri, Kvarneru i sjevernoj Dalmaciji [21]..... | 35 |
| Slika 3.1 Shematski prikaz dijelova vjetroturbina | 36 |
| Slika 3.2 Orijehtacija rotora u odnosu na položaj tornja [12]..... | 38 |

| | |
|--|----|
| Slika 3.3 Učinak promjene faktora ispunjenosti na koeficijent snage [14] | 40 |
| Slika 3.4 Raspodjela tetiva po rasponu [12] | 41 |
| Slika 3.5 Raspodjela debljine profila t po rasponu [26] | 41 |
| Slika 3.6 Pogled u unutrašnjost glavine rotora na vjetroturbini Enercon E126 [G] | 42 |
| Slika 4.1 Idealni rotor – akutator disk i strujna cijev za vjetroturbinu [14] | 44 |
| Slika 4.2 Koeficijenti snage i potiska za idealni rotor [12] | 47 |
| Slika 4.3 Odsječak kraka opisuje kružni vijenac infinitezimalne širine [14] | 48 |
| Slika 4.4 Brzine i sile na odsječku kraka [14] | 49 |
| Slika 4.5 Usporedba maksimalnog koeficijenta uzgona za profile serije NACA i NASA LS. M=0.15, Re=6·10 ⁶ , glatke površine [25] | 52 |
| Slika 4.6 Usporedba profila serija AH-93-W-xxx i FX 77-W-xxx | 53 |
| Slika 4.7 Teoretski maksimalni koeficijent snage kao funkcija koeficijent vršne brzine sa i bez vrtloženja traga [12] | 58 |
| Slika 4.8 Raspodjela relativnih duljina tetiva po rasponu | 60 |
| Slika 4.9 Raspodjela kuta uvijanja po rasponu | 62 |
| Slika 5.1 Krivulja snage u ovisnosti o brzini | 63 |
| Slika 6.1 Podjela tehnika kontrole opterećenja | 65 |
| Slika 6.2 Područja rada vjetroturbine s promjenjivom brzinom vrtnje | 66 |
| Slika 6.3 Usporedba otklona zakrilca s duljinom izvačenja mikrotaba | 70 |
| Slika 6.4 Strujnice oko izlazne ivice za profil s mikrotabom, $h/c=0.01$, , $Re=1 \times 10^6$, $\alpha=0^\circ$ | 71 |
| Slika 6.5 Usporedba eksperimentalne i numeričke učinkovitosti tabova, $Re=1 \times 10^6$, $x/c=0.95$, $h/c=0.01$ [29] | 72 |
| Slika 6.6 Usporedba dobivene snage sa i bez tabova, brzina vjetra 8 m/s [31] | 73 |
| Slika 6.7 Usporedba momenta savijanja sa i bez tabova, brzina vjetra 8 m/s [31] | 73 |
| Slika 7.1 Izometrija, vidljiva donjaka | 74 |
| Slika 7.2 Pogled na napadnu ivicu | 75 |
| Slika 7.3 Pogled na izlaznu ivicu | 75 |
| Slika 7.4 Pogled iz korijena s vektorom brzina | 75 |
| Slika 8.1 Strukturirana mreža lopatice | 76 |
| Slika 8.2 Miješana poliedarska nestrukturirana 'hex-core' mreža | 77 |
| Slika 8.3 Heksaedarska nestrukturirana mreža na periferiji | 77 |

| | |
|---|----|
| Slika 8.4 Prikaz strujanja oko donjake lopatice..... | 78 |
| Slika 8.5 Prikaz strujanja oko gornjake lopatice..... | 78 |
| Slika 8.6 Detalj oko korijenskog dijela lopatice..... | 79 |
| Slika 8.7 Prikaz odvajanja struje na gornjaci lopatice, $R=10$ m | 79 |
| Slika 8.8 Prikaz strujnica na donjaci lopatice..... | 80 |
| Slika 8.9 Prikaz strujnica na gornjaci lopatice | 80 |
| Slika 8.10 Prikaz strujnica na donjaci lopatice, detalj..... | 80 |
| Slika 8.11 Prikaz vrtloženja na vrhu lopatice..... | 81 |
| Slika 8.12 Prikaz vrtloženja na vrhu lopatice, pogled iz drugog kuta..... | 81 |
| Slika 8.13 Raspodjela tlaka na donjaci lopatice..... | 82 |
| Slika 8.14 Raspodjela tlaka na gornjaci lopatice | 82 |
| Slika 8.15 Prikaz relativnih brzina, $R=10$ m | 83 |
| Slika 8.16 Prikaz relativnih brzina, $R=25$ m | 83 |
| Slika 8.17 Prikaz relativnih brzina, $R=45$ m | 84 |

Popis tablica

| | |
|---|----|
| Tablica 1.1 Ukupno instalirana snaga | 12 |
| Tablica 1.2 Novo instalirana snaga u 2010. | 12 |
| Tablica 1.3 Proizvodnja električne energije u RH [1] | 14 |
| Tablica 4.1 Odabrane debljine profila po rasponu lopatice..... | 51 |
| Tablica 4.2 Karakteristike odabranih profila | 53 |
| Tablica 4.3 Iskoristivosti profila | 56 |
| Tablica 4.4 Izračunate relativne duljine tetiva i kutovi uvijanja | 62 |
| Tablica 6.1 Kategorizacija uređaja za aktivnu kontrolu strujanja | 68 |

Popis oznaka i mjernih jedinica

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|-----------------|------------------|---|
| A | m ² | površina |
| a | - | koeficijent indukcije |
| a' | - | tangencijalni koeficijent indukcije |
| a _{tr} | m/s ² | akceleracija sile trenja |
| B | - | broj lopatica |
| c | m | duljina tetive |
| C _p | - | koeficijent snage |
| c _i | - | koeficijent uzgona profila |
| c _d | - | koeficijent otpora profila |
| C _T | - | koeficijent momenta sile |
| D | N | sila otpora |
| D | m | promjer rotora |
| D' | m | ekvivalentni promjer rotora |
| P | W | snaga |
| dr | m | debljina odsječka na rotoru |
| g | m/s ² | gravitacijsko ubrzanje |
| h | m | visina taba |
| h | m | debljina graničnog sloja |
| h ₀ | m | visina hrapavosti |
| I | - | stupanj turbulencije |
| K | - | von Karmanova konstanta |
| L | N | sila uzgona |
| n | o/min | broj okretaja |
| n | | koeficijent za izračun atmosferskog graničnog sloja |
| p | Pa | tlak |
| P | W | snaga |
| R | m | polumjer rotora |
| Re | - | Reynoldsov broj |
| t | s | vrijeme |
| U | m/s | nazivna brzina |
| v | m/s ² | neporemećena brzina |
| W, w | m/s | relativna brzina |
| α | ° | napadni kut |
| β | ° | kut uvijanja |
| γ | ° | kut između neporemećene i relativne brzine |
| λ _D | | projektni koeficijent vršne brzine |
| μ | | relativni radijus |

| | | |
|----------|-------------------|-----------------------------------|
| μ | Pa s | dinamički koeficijent viskoznosti |
| ρ | kg/m ³ | gustoća |
| Φ | ° | kut relativne brzine |
| Ω | s ⁻¹ | kutna brzina |

Lista indeksa

| | |
|---------|---------------|
| l | uzgon |
| d | otpor |
| max | maksimalno |
| profili | |
| vršni | |
| vtlog | |
| P | snaga |
| id | idealni |
| r | realni |
| lin | linearizirani |

1 Uvod

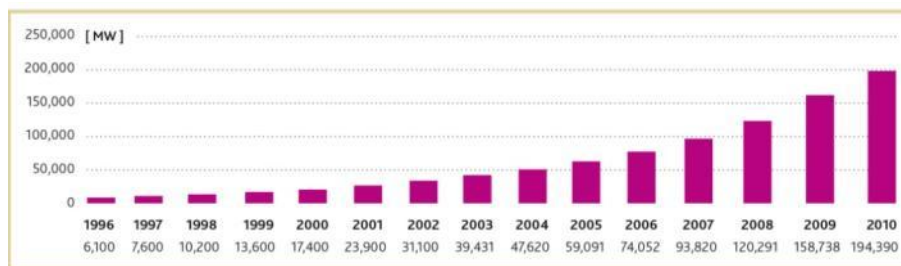
Energija vjetra koristi se već tisućama godina. Najstarija upotreba su osim za pogon jedrenjaka, pogon vodenih pumpi, mlinova i drugih agrikulturnih primjena. U novije vrijeme, energija vjetra primarno se koristi za proizvodnju električne energije.

Energija vjetra je među najjeftinijim obnovljivim izvorima energije. Cijena proizvodnje električne energije danas je usporediva cijeni proizvodnje struje dobivene iz fosilnih goriva. U nekim slučajevima, cijena je još i niža ako se uzmu u obzir emisije stakleničkih plinova jer u operativnom dijelu životnog ciklusa nema emisija. Kao dodatak, vjetar je dostupan u svim zemljama svijeta.

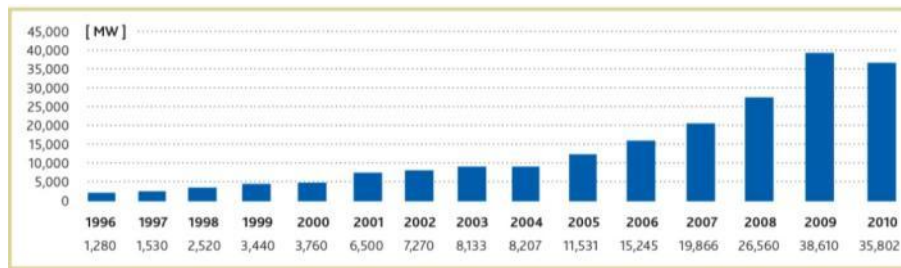
Vjetroagregati su dostupni u širokom rasponu snaga, od malih agregata do vjetroelektrana. Prednost energije vjetra je i da se vjetroturbine mogu koristiti za napajanje područja bez pristupa električnoj mreži.

1.1 Pregled stanja u svijetu

Podaci dani u ovom odlomku su preuzeti iz godišnjeg izvještaja vijeća za energiju vjetra Global Wind Energy Council za 2010. godinu. Prema tom izvještaju, ulaganja u energiju vjetra u 2010. godini iznosila su 47,3 milijarde €, a projekcija za 2011. godinu je 70,4 milijarde €. Na slikama (Slika 1.1 i Slika 1.2) dan je pregled porasta instaliranih kapaciteta vjetroagregata u svijetu kroz period od 15 godina. Protekle godine porast instaliranih kapaciteta je smanjen što je bilo uzrokovano globalnim stanjem tržišta.

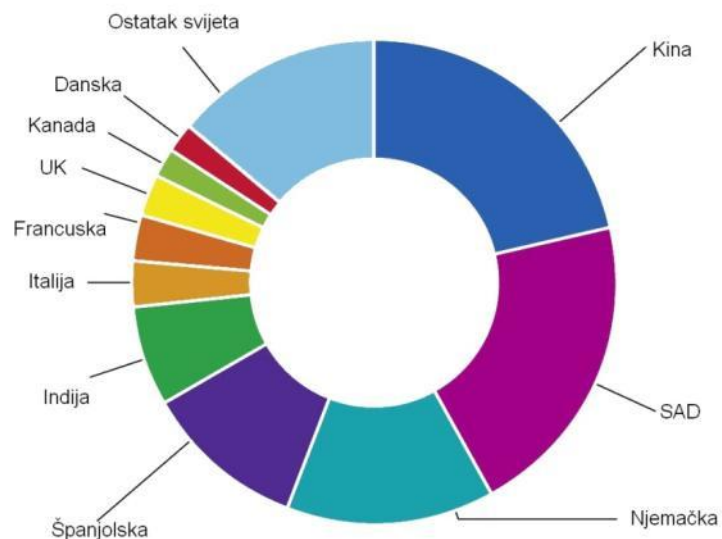


Slika 1.1 Ukupni instalirani kapacitet energije vjetra na globalnoj razini 1996. – 2010.

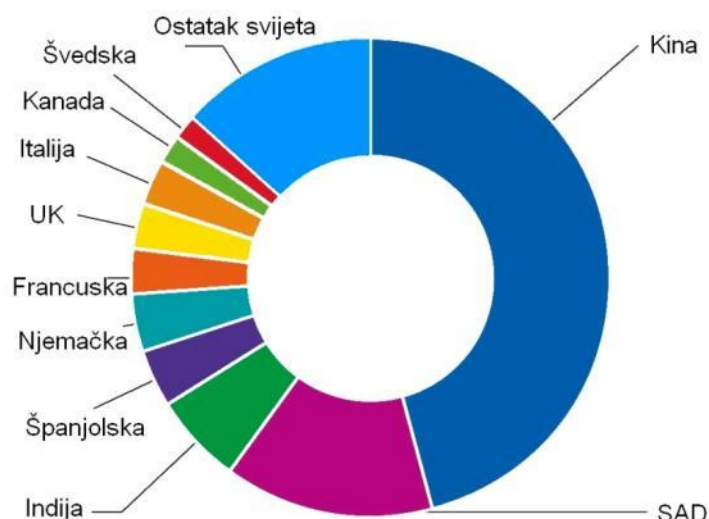


Slika 1.2 Godišnje instalirani kapacitet energije vjetra na globalnoj razini 1996. – 2010.

Na slikama (Slika 1.3 i Slika 1.4) i tablicama (Tablica 1.1 i Tablica 1.2) dani su udjeli u instaliranim snagama pojedinačno po zemljama koje predvode po broju instalirane snage.



Slika 1.3 Top 10 zemalja s ukupno instaliranom snagom (prosinac 2010.)



Slika 1.4 Top 10 zemalja s novo instaliranom snagom u protekloj godini (prosinac 2010.)

Tablica 1.1 Novo instalirana snaga u 2010.

| Zemlja | MW | % |
|-----------------|--------|------|
| Kina | 16 500 | 46,1 |
| SAD | 5 115 | 14,3 |
| Indija | 2 139 | 6,0 |
| Španjolska | 1 516 | 4,2 |
| Njemačka | 1 493 | 4,2 |
| Francuska | 1 086 | 3,0 |
| UK | 962 | 2,7 |
| Italija | 948 | 2,6 |
| Kanada | 690 | 1,9 |
| Švedska | 603 | 1,7 |
| Ostatak svijeta | 4 750 | 13,3 |
| Ukupno top 10 | 31 052 | 86,3 |
| Ukupno svijet | 35 802 | 100 |

Tablica 1.2 Ukupno instalirana snaga

| Zemlja | MW | % |
|-----------------|---------|------|
| Kina | 42 287 | 21,8 |
| SAD | 40 180 | 20,7 |
| Njemačka | 27 214 | 14,0 |
| Španjolska | 20 676 | 10,6 |
| Indija | 13 065 | 6,7 |
| Italija | 5 797 | 3,0 |
| Francuska | 5 660 | 2,9 |
| UK | 5 204 | 2,7 |
| Kanada | 4 009 | 2,1 |
| Danska | 3 752 | 1,9 |
| Ostatak svijeta | 26 546 | 13,7 |
| Ukupno top 10 | 167 844 | 86,3 |
| Ukupno svijet | 194 390 | 100 |

Unatoč velikim prednostima, energija vjetra ima neke nedostatke. Proizvodnja energije ovisi o uvjetima vjetra i ekonomski je isplativa u područjima s brzinama većim od 6,5 m/s na visini od 50 m. U većini slučajeva, područja izdašna vjetrom nisu naseljena tako da je potrebna distribucijska mreža. Vjetrovni parkovi imaju i negativan utjecaj na okoliš iako većina studija ukazuje da je taj utjecaj minimalan. Jedan od nedostataka je i ovisnost o državnim poticajima, ali s vremenom kako se uračunavaju troškovi emisije stakleničkih plinova, državni poticaji više neće biti potrebni.

1.2 Stanje elektroenergetskog sustava u Republici Hrvatskoj

Ukupna snaga elektroenergetskih objekata priključenih na distribucijsku mrežu Republike Hrvatske iznosi 4206 MW, od čega snaga priključenih vjetroelektrana (VE) iznosi 72 MW [1]. U Hrvatskoj je operativno 6 vjetroelektrana. To su :

| Naziv | Lokacija | Nazivna snaga [MW] | Planirana godišnja proizvodnja [GWh] | Broj i snaga pojedinog agregata [MW] |
|--|----------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| VE Ravna 1 [2] | Pag | 5,9 | 9,48 (2005. god) | 7 |
| VE Trtar Krtolin [3] | Šibenik | 11,2 | 30 | 14 x 0,8 |
| VE Orlice | Šibenik | 9,6 | 24 | 8 x 0,9 |
| | | | | 3 x 0,8 |
| VE Vrataruša (probni rad) [9] | Senj | 42 | 125 | 14 x 3 |
| VE Velika Popina [4] | Gračac | 9,2 | 26 | 4 x 2,3 |
| VE Pometeno Brdo | Klis | 1 (17,5 u planu) | 30,8 | 15 x 1 |
| | | | | 1 x 2,5 |
| <i>VE Crno Brdo (završena gradnja)</i> | <i>Šibenik</i> | <i>10,5</i> | <i>2,5</i> | <i>7 x 1,5</i> |
| | Ukupno | 105,9 | 247,78 | |

Prema [5] u planu je priključenje na distribucijsku mrežu još 11 vjetroparkova ukupne nazivne snage 264 MW.

Vlada Republike Hrvatske predvidjela je da će do 31. prosinca 2010. godine minimalni udio električne energije proizvedene iz postrojenja koja koriste obnovljive izvore energije čija se proizvodnja potiče, iznositi 5,8% u ukupnoj potrošnji električne energije [6]. Prema podacima HEP OPS (tablica 1.1) vidljivo je da taj cilj nije dostignut. Novi cilj za 31. prosinac 2020. iznosi 13,6% [7] što bi se trebalo postići u skladu sa Strategijom energetskog razvoja RH [8] u kojoj stoji da će 2020. godine u Hrvatskoj biti instalirano 1200 MW iz energije vjetra.

Tablica 1.3 Proizvodnja električne energije u RH [1] ¹

| | Proizvodnja [GWh] | | | Snaga [MW] |
|---------------------------------|-------------------|-------|-------|------------|
| | 2008. | 2009. | 2010. | |
| Hidroelektrane | 5277 | 6767 | 8316 | 2111 |
| Termoelektrane | 6075 | 5178 | 4805 | 1811 |
| Vjetroelektrane | 40 | 45 | 138 | 72 |
| Industrijske | 27 | 25 | 23 | 212 |
| Ukupno proizvedeno u Hrvatskoj* | 11419 | 12015 | 13282 | 4206 |

* električna energija preuzeta u prijenosnu i distribucijsku mrežu



Slika 1.5 VE Vrataruša [9]

¹ Stanje na dan 31.12.2010.

1.3 Povijesni razvoj

Prvi zapis o vjetrenjačama datira iz Perzije oko 10.st. Radilo se uređaju otporničkog tipa s vertikalnom osi vrtnje koji se koristio za mljevenje žita. Vjetrenjače se u Europi pojavljuju u Srednjem vijeku i ostaju glavni izvor energije sve do Prve industrijske revolucije kada je glavni energetska izvor postao ugljen. Ugljen je imao mnoge prednosti pred vjetrom jer je mogao biti transportiran do mjesta potrošnje, koristiti se u bilo koje vrijeme, a izlazna snaga parnog stroja mogla se prilagođavati po potrebi.

Vjetrenjače su se koristile za mljevenje žita, pumpanje vode, piljenje drva odnosno za vršenje bilo koje radnje za koji je trebala mehanička energija. Ti uređaji bili su uzgonskog tipa, rotora horizontalne osi s četiri lopatice te su se ispočetka cijele vjetrenjače okretale, a kasnije samo se rotor okretao u vjetar. Veličina i broj lopatica su bili određeni empirijski na temelju jednostavnosti konstrukcije i faktora ispunjenosti rotora (omjer površina lopatice i ukupne površine rotora).

Do 18. stoljeća europske vjetrenjače su bile vrlo sofisticirane kako konstrukcijski tako i upravljački. Rotor se mogao zakretati odvojen od ostatka vjetrenjače, lopatice su imale presjek sličan aeroprofilu i kut zakreta, a razvijen je bio i sustav automatske regulacije. Lopatice su bile prekrivene malim zakrilcima povezanih s regulatorom koji je u slučaju ubrzavanja rotora na brzinu veću od nominalne otvarao zakrilca i time smanjivao snagu. Kada je bilo potrebno više snage, zakrilca bi se ponovno zatvorila.



Slika 1.6 Primjer nizozemske vjetrenjače

Značajan doprinos razvoju vjetrenjača pridonio je John Smeaton sredinom 18. st kad je proveo testiranja na vjetrenjačama. Smeaton je izmjerio snagu vjetrenjača čime je shvatio da postoje ograničenja na maksimalno dobivenu snagu (kasnije „Betzov“ limit) te postavio tri osnovna zakona koji i danas stoje :

- obodna brzina vrha lopatice je proporcionalna brzini vjetra,
- maksimalni moment je proporcionalan kvadratu brzine vjetra,
- maksimalna snaga proporcionalna je kubu brzine vjetra.

Također je definirao kutove uvijanja lopatica (18 na korijenu, 7 na vrhu) koji koreliraju modernim.

Izuzev europskih vjetrenjača, bitno je spomenuti i američki tip vjetrenjača odnosno vodenih pumpi. Sredinom 18. stoljeća konstruirana je prva takva samo-regulacijska vjetrenjača s lopaticama promjenjivog postavnog kuta. Kasnije je razvijen rotor s fiksnim

lopaticama na koji je bio pričvršćen rep kojim se rotor poput vjetrokaza okretao u vjetar [10]. Paralelno s rotorom je bila manja lopatica kojom se u slučaju presnažnog vjetra zakretao rotor dalje od struje i time vršila regulacija brzine. Korištenje metala za izradu lopatica omogućilo je konstrukciju kompleksnije zakrivljene geometrije. Inovacija je bila i uvođenje multiplikatora čime su operativne brzine postale mnogo manje, a iskoristivost veća. I danas se na udaljenim mjestima bez pristupa električnoj energiji koristi ovaj tip vjetrenjača za pokretanje pumpi.



Slika 1.7 Primjer američke vjetrenjače [A]

Generiranje električne energije

Ispočetka korištenje vjetra za proizvodnju električne energije činilo se lošom idejom radi male iskoristivosti i nemogućnosti pohrane struje. Međutim, danski znanstvenik Poul La Cour prihvatio je izazov i konstruirao 1891. godine vjetroturbinu s električnim generatorom koja je ušla u serijsku proizvodnju (proizvedeno ih je preko stotinu s rasponom snaga od 20 do 35 kW). Fascinantna značajka jest da je La Cour iskoristio dobivenu električnu energiju za elektrolitičku proizvodnju vodika te time riješio problem

pohranjivanja energije. Također je ugradio i diferencijalne regulatore kako bi održao konstantni broj okretaja generatora.



Slika 1.8 La Courove vjetrenjače [B]

U prvoj polovici 20. stoljeća nije pokazan veliki interes za razvoj vjetroturbina izuzev nekoliko primjera. 1941. godine u SAD-u je instalirana prva velika turbina s dvije lopatice, promjera rotora od 53 m (turbina je držala rekord veličine sljedećih 40 godina) i davala je snagu 1.25 MW. Konstrukcija rotora je uključivala upravljanje postavnim kutovima lopatica koje su imale i mogućnost mahanja čime je smanjeno opterećenje rotora.



Slika 1.9 Smith-Putnam vjetroturbina [C]



Slika 1.10 Gedserova vjetroturbina [D]

Ubrzo nakon Drugog svjetskog rata, instalirana je u Danskoj Gedserova vjetroturbina promjera rotora 24 m i nazivne snage 200 kW čija je konstrukcija uključivala nekoliko inovacija. Rotor je imao tri lopatice i kontrolu sloma uzgona, a generator je bio indukcijski umjesto dosadašnjeg sinkronog. Ta dva koncepta su bila temelj daljnjem danskom razvoju i prevlasti u 80-tima jer je slom uzgona jednostavan način za kontrolu snage, a indukcijski generator je mnogo jednostavnije spojiti na mrežu od sinkronog.

Tek krajem 60-tih godina s pojavom svijesti o posljedicama industrijskog razvoja (korištenjem fosilnih goriva i nuklearne energije) počeo je jači interes javnosti za obnovljive izvore energije pa time i za vjetroelektrane. Stvarni interes za obnovljivim izvorima kulminirao je naftnom krizom 1973. koja je dovela do naglog porasta cijena energenata te time utjecala na ubrzani razvoj vjetroelektrana i ostalih obnovljivih izvora energije. Mnoge države poput SAD-a, Njemačke i Švedske financirale su razvojne programe koji su rezultirali konstrukcijom inovativnih prototipova. Međutim, i dalje nije bilo poznato

koja je arhitektura najisplativija te su tako testirani mnogi koncepti. Npr. u Kanadi je instalirana Darriuesova turbina od 4 MW, a u UK alternativna turbina od 500 kW s vertikalnom osi vrtnje i ravnim lopaticama („H-tip“ rotora).



Slika 1.11 Darrieusov rotor [E]

S obzirom da se radilo o vrlo velikim vjetroagregatima, njihove performanse u realnim i teškim klimatskim uvjetima često su bile podcijenjene, a pouzdanost vrlo mala čime nisu bili ekonomski isplativi. Zbog toga su mnoge američke privatne kompanije započele komercijalnu prodaju manjih jednostavnijih vjetroturbina koje su unatoč konstrukcijskim problemima bile jednostavnije za održavanje i popravak, a time i isplativije.

U SAD-u su državni poticaji, nova regulativa i povoljna porezna politika omogućili rast broja instaliranih turbina i ukupne snage. Najveći vjetroparkovi otvoreni su u Kaliforniji čija je ukupna instalirana snaga dosegla 1500 MW (ti parkovi su i danas najveći u svijetu). Na tržištu su, osim američkih turbina, bile prisutne i kvalitetnije danske vjetroturbine koje su sredinom 80-tih nakon propasti američkih proizvođača uslijed povlačenja državnih investicijskih kredita potpuno preuzele tržište. Time se većina proizvodnje seli u Europu, najvećim dijelom u Njemačku, Dansku i Španjolsku.

Kako su 1973. glavni pokretači razvoja vjetroelektrana bili cijena nafte i ograničenost resursa fosilnih goriva, danas su to mala emisija ugljičnog dioksida kroz cijeli životni ciklus i potencijalni pozitivni utjecaj na klimatske promjene. Kroz zadnjih 25 godina znatno su se povećale veličine rotora i snage komercijalnih vjetroagregata. Vjetroturbine su postale isplativije, pouzdanije i tiše. Mnoga dostignuća iz drugih područja tehnike poput materijala, automatizacije i elektronike te aerodinamike primijenjeni su na konstrukciju vjetroturbina. Razvijeni senzorski sustavi omogućuju bolji uvid u stvarne performanse stroja. Koncepti istraživani ranije, sada postaju standard. Razvijaju se i tzv. „off-shore“ vjetrofarmovi.



Slika 1.12 Nizozemski „off-shore“ vjetrofarm „Prinses Amalia“ [F]

U Europi ih je instalirano 45 s ukupnom snagom od 2946 MW i godišnjom produkcijom od 11.5 TWh, a samo 2010. godine instalirano je i priključeno 308 turbina ukupne snage 883 MW (porast od 51% s obzirom na prethodnu godinu) [11]. Cijena električne energije dobivene iz vjetra pala je na razinu one dobivene iz uobičajenih izvora, na ponekim mjestima čak bez državnih poticaja. U državama u kojima postoje poticaji, stupanj razvoja vjetroelektrana vrlo je visok.

Stalni zahtjevi za povećanjem isplativosti i produljenjem životnog vijeka znače daljnji razvoj svih sustava i napredak i interdisciplinarnost strojarstva, elektrotehnike, materijala, teorije upravljanja i računarstva, građevinarstva i zrakoplovnog inženjerstva.

1.4 Ostali koncepti vjetroturbina

Uvriježeni koncept modernih vjetroturbina je rotor s 3 lopatice, uzgonskog tipa s horizontalnom osi rotacije (u daljnjem tekstu HAWT prema eng. *horizontal axis wind turbine*). Međutim, kroz povijest su razmatrani vrlo različiti koncepti s horizontalnom ili vertikalnom osi rotacije (u daljnjem tekstu VAWT prema eng. *vertical axis wind turbine*), bilo uzgonskog ili otporničkog tipa.

Razlog zbog kojeg je prevladao uzgonski tip vjetroturbine je taj što su vjetroturbine otporničkog tipa vrlo neučinkovite te ih je teško zaštititi od ekstremnih vjetrova. Jedini koncept koji je zaživio je Savoniusov rotor koji se koristio za pumpanje vode.

VAWT imaju prednost pred HAWT jer su operativne za bilo koji smjer vjetra bez potrebe promjene orijentacije rotora. Najpoznatija VAWT je već spomenuti Darrieusov rotor koji je uzgonskog tipa sa simetričnim profilima lopatica. Oblik lopatica je strukturalno pogodan i dobro se nosi s centrifugalnim silama, međutim manje je pogodan tehnološki i logistički. Osim Darrieusovog rotora, istraživani su različiti koncepti s ravnim lopicama poput H ili V rotora te u novije vrijeme MAGLEV turbine.

Trenutačno VAWT nisu ekonomski kompetitivne s HAWT, ali i dalje pobuđuju interes za istraživanjem s obzirom na njihovu znatnu prednost u vidu opterećenja lopatica i zamora. Kod konvencionalnih rotora (HAWT), gravitacijska sila izmjenično djeluje na lopaticu ovisno o kretanju gore ili dolje, zbog čega težina lopatica može biti ograničavajući faktor za maksimalnu veličinu turbina. No na lopatice VAWT djeluje konstantna gravitacijska sila pa njihova veličina nije ograničena takvim opterećenjima [13].

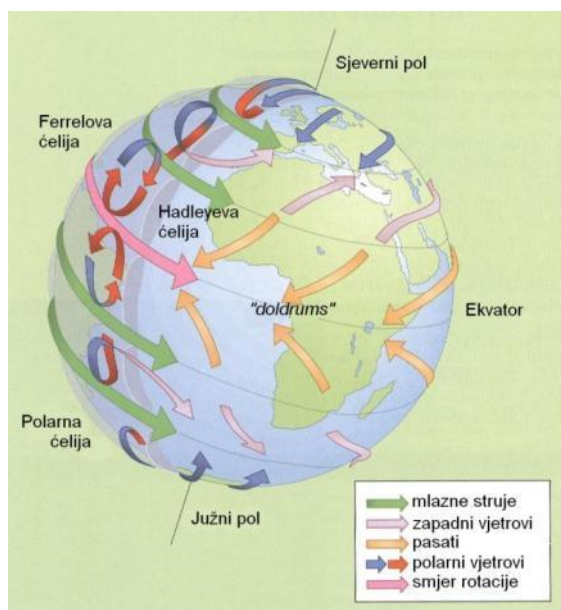
2 Vjetar

Vjetar je gibanje zraka u odnosu na Zemlju. Kako su vertikalne komponente atmosferskih gibanja relativno male, meteorolozi pod pojmom vjetar najčešće podrazumijevaju njegovu horizontalnu komponentu, odnosno komponentu koja je približno paralelna sa Zemljinom površinom. Vjetar je vektor (posjeduje i smjer i brzinu).

2.1 Globalni vjetrovi

Globalni vjetrovi nastaju uslijed razlike atmosferskih tlakova do koje dolazi zbog nejednolikog zagrijavanja Zemljine površine. Ekvatorsko područje primi više solarne radijacije od područja na većim geografskim širinama (u daljnjem tekstu g.š.) jer se zbog zakrivljenosti Zemlje kut upada sunčevih zraka smanjuje s porastom geografske širine, a radi duljeg puta dio sunčeve energije upije atmosfera prije nego sunčeva zraka dođe do površine. Ekvatorsko područje mnogo je toplije od polarnih kao rezultat ovih pojava.

Globalno strujanje može se podijeliti na tri pojasa ili ćelije. To su tzv. Hadleyeva ćelija, Ferrelova ćelija i polarna ćelija.



Slika 2.1 Cirkulacija globalnog vjetra [13]

Hadley-eva ćelija

Uz ekvator nastaje pojas niskog tlaka zraka radi toplog vlažnog zraka koji se diže do tropopauze. Taj zrak putuje prema sjeveru (ako se nalazi na Sjevernoj polutki) ili prema jugu (ako se nalazi na Južnoj polutki) i polako se hladi dok ne dođe do geografskih širina od oko 30° gdje ponire prema površini stvarajući pojas visokog tlaka na tim područjima. Za te širine karakteristično je suho i vedro vrijeme te se većina pustinja nalazi u tim područjima. Dio zraka koji dođe do površine na tim širinama je pogurnut natrag prema području niskog tlaka na ekvatoru. Ovo kretanje zraka odnosno vjetrovi poznati su pod nazivom pasati (eng. *trade winds*) te kada dosegnu ekvator, potpuna cirkulacija je poznata pod nazivom Hadleyeva ćelija prema Georgeu Hadleyu koji ju je prvi opisao 1753. god. Pojas bez vjetra uz sam ekvator naziva se eng. *doldrums*.

Ferrel-ova ćelija

Međutim, ne vraća se sav zrak na 30° g. š. prema ekvatoru, već dio nastavi putovati do širina od oko 60° g. š. gdje se nadolazećoj struji suprotstavlja strujanje hladnog zraka s polova (tzv. polarna fronta). Topliji zrak se diže i veliki dio se vraća natrag prema 30° g. š. gdje ponire prema površini pridonoseći pojasa visokog tlaka. Ova cirkulacija je poznata pod imenom Ferrel-ova ćelija prema Williamu Ferrelu koji ju je prvi identificirao 1856. god.

Polarna ćelija

Ostatak zraka putuje prema polovima, hladi se, ponire i vraća do 60° g. š. čime je zatvorena polarna ili Hadleyeva polarna ćelija.

Uslijed Coriolisovog efekta, vjetrovi koji pušu na Sjevernoj polutki prema sjeveru skreću udesno, oni koji pušu prema jugu skreću ulijevo, a na Južnoj polutki obratno.

Na mjestu gdje se sastaju dvije ćelije na visinama između 9 do 13 km dolazi do snažnog strujanja gdje brzine mogu doseći 400 km/h. To strujanje naziva se mlaznom strujom (eng. *jet streams*) Pojas struje vrlo je uzak te predstavlja oštru granicu između područja hladnog i toplog zraka.

2.2 Geostrofički vjetar

Geostrofički vjetar je teorijsko horizontalno strujanje koje je rezultat geostrofičke ravnoteže, ravnoteže između Coriolisove sile i horizontalne komponente sile gradijenta tlaka. To je koji vjetar puše u tzv. slobodnoj atmosferi, na visini većoj od 500 m gdje nema utjecaja trenja od površine Zemlje.

Geostrofički vjetar je neubrzan i nedivergentan ($\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$). Usmjeren je paralelno s izobarama odnosno s izolinijsama geopotencijala tako da mu je na sjevernoj hemisferi niži tlak, odnosno manji geopotencijal s lijeve strane. Na južnoj hemisferi ulijevo od vektora geostrofičkog vjetra tlak (geopotencijal) je viši.

Izraz za geostrofički vjetar dobivamo polazeći od jednadžbe gibanja u sustavu koji rotira [16]

$$\rho \left(\frac{d\mathbf{v}}{dt} + \mathbf{v} \times \boldsymbol{\Omega} \right) = -\nabla p - \rho \mathbf{g} + \rho \mathbf{a}_{tr} \quad (2.1)$$

gdje je \mathbf{v} brzina u relativnom sustavu (brzina koju vidi opažač sa Zemlje), $\boldsymbol{\Omega}$ je kutna brzina rotacije Zemlje, \mathbf{g} je akceleracija sile teže, \mathbf{a}_{tr} je akceleracija sile trenja, ρ je gustoća, a p je tlak. Kako je geostrofičko strujanje neakcelerirano i horizontalno te je bez trenja, jednadžba (2.1) prelazi u jednadžbu koja opisuje ravnotežu horizontalnih komponenti Coriolisove sile i sile gradijenta tlaka iz koje se može izračunati brzina geostrofičkog vjetra \mathbf{v}_g [16]

$$\mathbf{v}_g \times \boldsymbol{\Omega} = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad (2.2)$$

2.3 Granični sloj

Prilikom strujanja uz Zemljinu površinu javlja se smično naprezanje koje rezultira usporavanjem neporemećene struje zraka i stvaranjem površinskog graničnog sloja. Debljina graničnog sloja može se kretati u granicama od deset metara do nekoliko stotina metara, ovisno o hrapavosti površine i polju temperature. Utjecaj Coriolisove sile je zanemariv spram sila trenja te je struja zraka okomita na izobare.

Gradijent smičnog naprezanja, a samim time i vertikalni gradijent brzine najveći je u blizini tla. Varijacija brzine u turbulentnom graničnom sloju iznosi [17]

2.3

gdje je: U_x - brzina trenja koja je za slučaj malih temperaturnih gradijenata neovisna o promjeni visine

K - von Karmanova konstanta za granični sloj zračne struje

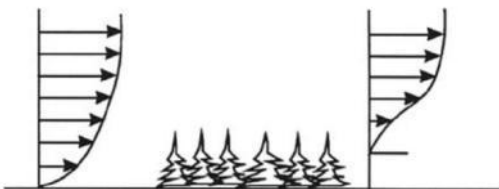
h_0 - visina hrapavosti u ovisnosti o izgledu Zemljine površine

U stvarnosti je teško odrediti vrijednosti U_x i K stoga se vertikalne varijacije brzine vjetra ne računaju direktno, već se računa varijacija brzine relativne referentnoj brzini V_{w1} mjerenoj na referentnoj visini h_1 [17]

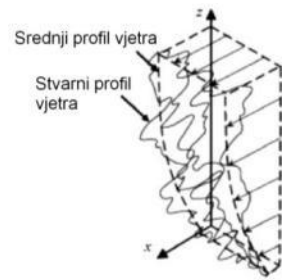
2.4

Za strujanje preko relativno glatke površine pri suhoj adijabatskoj stopi ohlađivanja, n je otprilike jednak 7 [17].

Na lokalni profil brzina utječu sve značajke površine poput zgrada, vegetacije, šuma, rijeka, jezera, brda i planina.

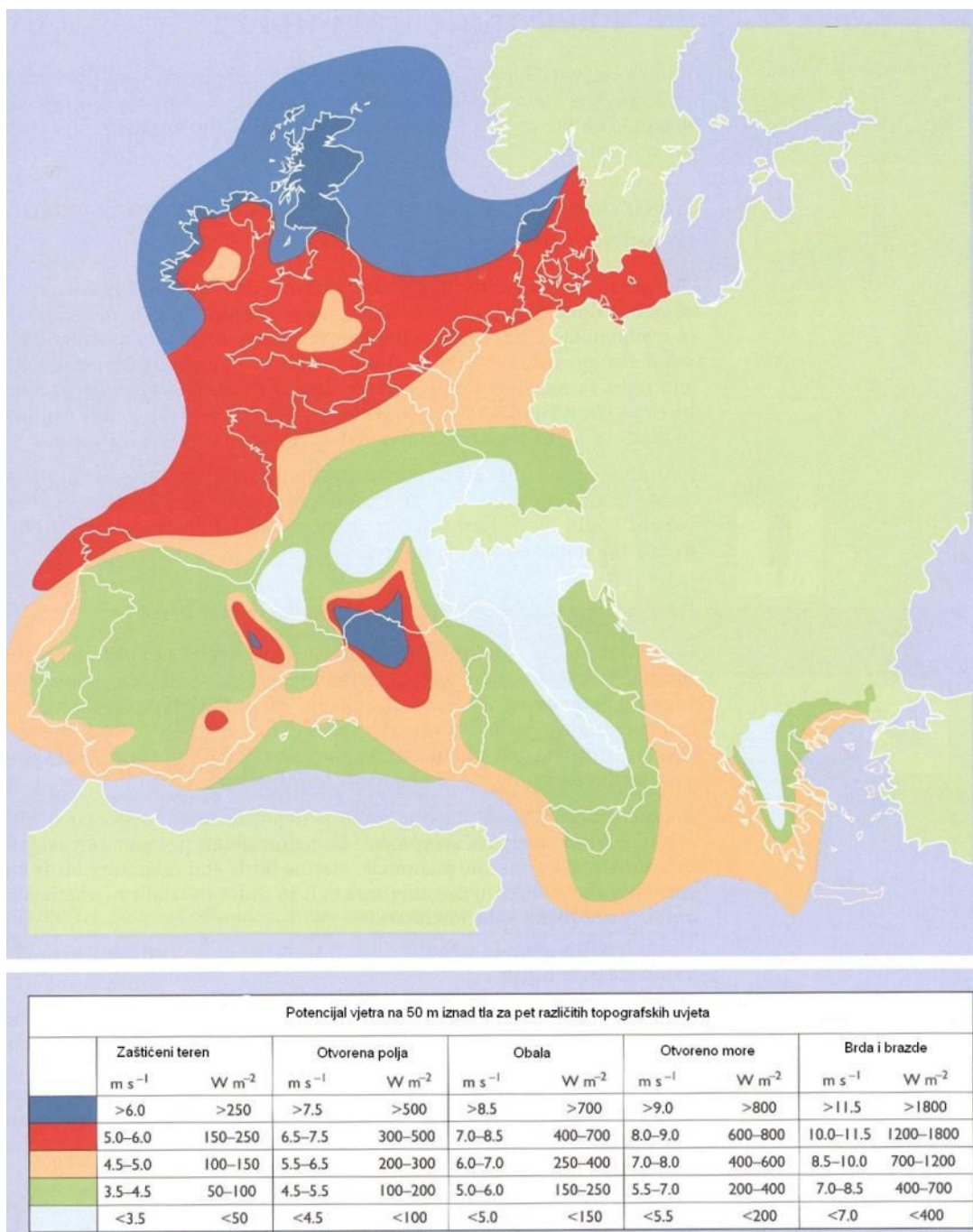


Slika 2.2 Utjecaj površinske hrapavosti na profil brzine [12]



Slika 2.3 Usporedba srednjeg i realnog profila brzine [12]

Turbulencija se može okarakterizirati kao kaotično gibanje atmosfere u vremenu i prostoru s naglaskom na snažne struje u vertikalnom smjeru odnosno zraka koji se diže ili spušta. Uzrok turbulencija su atmosferske nestabilnosti i smična naprezanja u graničnom sloju. Naleti vjetra su kratka odstupanja od 10-minutnog prosjeka i znače kratke i snažne zapuhe s brzim promjenama smjera strujanja.



Slika 2.4 Srednje godišnje brzine vjetra i potencijal vjetra za zemlje EU (1989.) [13]

2.4 Vjetrovi u hrvatskom priobalju

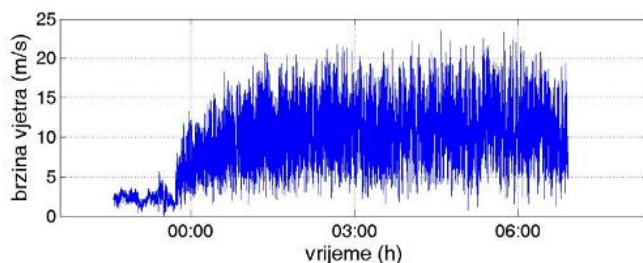
2.4.1 Bura

Bura je tipični vjetar Jadranskog primorja. Puše u zavjetrini Dinarida koji dijele općenito topliji zrak nad morem od hladnog zraka nad kopnom. Ovakvi uvjeti, kao na Jadranu, malo gdje su ispunjeni pa ime bura ulazi u svjetsku terminologiju. Većina autora buru opisuje kao jak, hladan i pretežno suh sjeveroistočni vjetar koji puše preko Dinarskog gorja. Njena su najznačajnija osobina snažni udari. Satne vrijednosti srednje brzine bure prelaze i 30 m/s, dok udari vjetra mogu preći brzine i od 60 m/s [18].

Bura puše po nekoliko sati do nekoliko dana. Javlja se kroz gotovo cijelu godinu iako je njena učestalost u pojedinim godinama različita. Na istočnoj obali Jadrana učestalost joj opada od sjeverozapadnog prema jugoistočnom dijelu. Prevladava zimi kad s prekidima može potrajati i do dva tjedna. Zimski vjetar u prosjeku jači je od ljetnog [18].

Potrebna su dva uvjeta za nastanak bure: dotok hladnog zraka sa sjevera ili sjeveroistoka i planinska prepreka okomita na tok zraka. Hladni zrak koji dođe do planine penje se uz planinsku prepreku na navjetrinskoj, a spušta na zavjetrinskoj strani. Prelaženje zraka preko prepreke kod jakih bura odvija se u hidrauličkom režimu strujanja koje završava hidrauličkim skokom. Hidraulički režim strujanja omogućuje ubrzavanja vjetra i na uzlaznoj i na silaznoj strani, čime se nadolazećem toku zraka znatno povećava brzina [19].

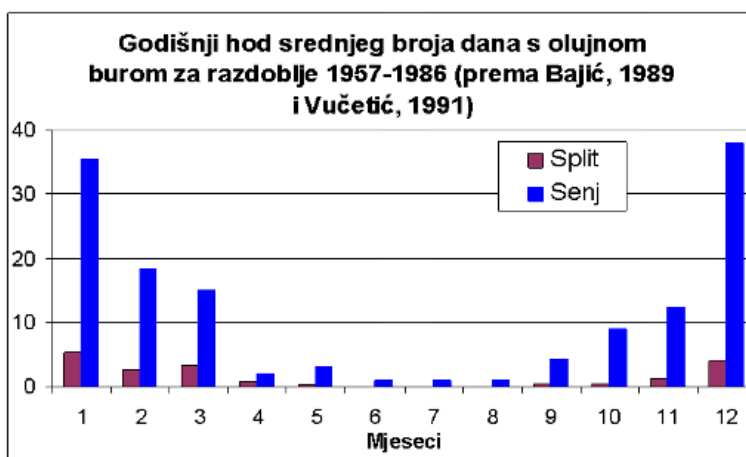
Posebnost bure je mahovitost (Slika 2.6). Iako je srednja brzina nešto viša od 10 m/s, pojedinačne vrijednosti brzine variraju od 0 do gotovo 25 m/s. Dakle, udari mogu biti dvostruko jači od srednje brzine. Iz ovoga se vidi da opasnost bure leži više u udarima nego u srednjim vrijednostima [19].



Slika 2.5 Zapis bure u Senju zabilježen ultrasoničnim anemometrom s intervalom uzorkovanja 0.25 s [19]

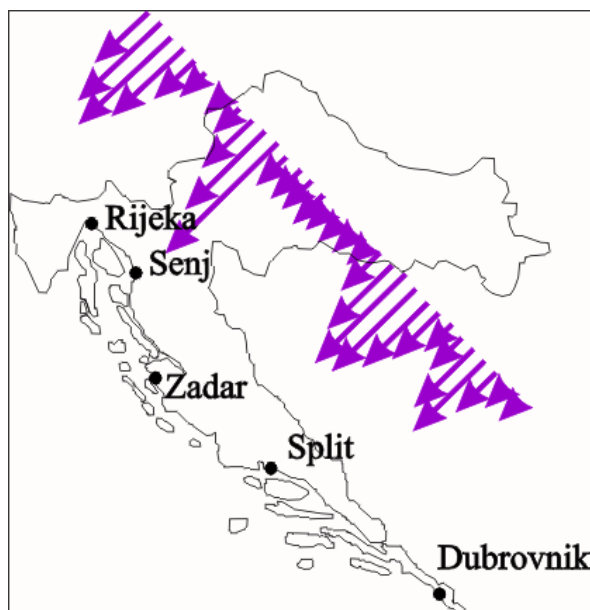
Postoje dvije vrste udara – udari malih perioda (od nekoliko sekundi) i udari većih perioda (od nekoliko minuta – pulzacije). Sekundni udari uvijek su prisutni. Oni su uglavnom uzrokovani mehaničkim trenjem zbog hrapavosti podloge. Pulzacije, s druge strane, mogu biti prisutne, ali i ne moraju. One su uzrokovane procesima koji se odvijaju više stotina metara iznad tla, a nastaju uslijed velikih promjena brzine vjetra. Pri tome vrlo je važan faktor lom planinskih valova u zavjetrini planine, što je i jedan od uzroka nastanka bure [19].

Tijekom godine, bura se najčešće javlja zimi. Zimske bure traju dulje od ljetnih, a i brzine su im veće .



Slika 2.6 Srednji broj dana s burom za pojedini mjesec za Split i Senj [19]

Općenito može se reći da se olujne bure (bure sa srednjom brzinom vjetra većom od 17 m/s) javljaju duž cijele jadranske obale, ali se trajanje i učestalost olujne bure smanjuju od sjevera prema jugu (Slika 2.7). Kako na pojavu bure utječu karakteristike lokalne orografije ona se češće javlja na lokacijama koje se nalaze ispod planinskih prijevoja [19].



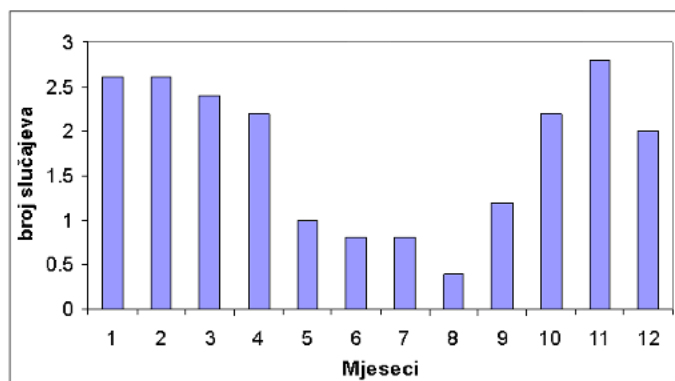
Slika 2.7 Srednji smjerovi i jačine bure duž Jadranske obale [19]

Bura se najčeće javlja u Senju. Statističke analize pokazale su da se olujna bura u Senju godišnje prosječno javlja u više od 20 dana, s prosječnim trajanjem od preko 9 sati po epizodi. Sljedeću najveću vjerojatnost pojave bure ima Split. Tamo se olujna bura godišnje prosječno javlja u manje od 5 dana, s trajanjem manjim od 5 sati po epizodi. To ipak ne znači da su u Splitu bure slabije: Primjerice, preko 28 % olujnih bura u Splitu ima maksimalne satne udare veće od 35 m/s, dok ih je u Senju samo 10 %. Također, najveće su brzine vjetra u buri izmjerene na drugim postajama, koje nemaju nužno najčešću buru (npr. Krk-most, Maslenica). Rekord u brzini za sada drži Maslenički most gdje je 21. prosinca 1998. izmjeren udar od 248 km/h [19].

2.4.2 Jugo

Jugo je vjetar jugoistočnog smjera duž Jadrana. Uzroci tome su specifična orografija, tj. položaj Jadrana i planinskog lanca uz istočnu obalu te sinoptičke situacije koje pogoduju strujanju takvog vjetra.

To je topli i vlažni vjetar, koji se javlja uz oblačno i kišovito vrijeme. Puše po nekoliko dana ujednačenom brzinom od oko 10 m/s. Rijetko ostaje kao slab vjetar, često postiže olujni karakter dosežući i do 30 m/s. Izraženiji je na otvorenom moru, dok prema kopnu slabi. Najčešći je na južnom Jadranu gdje postiže i najveće brzine. Prevladava u hladnom dijelu godine kad je i jači nego ljeti. Na južnom Jadranu najčešći je od jeseni do kraja zime, dok je na sjevernom Jadranu najčešći od kraja zime do početka ljeta. Zimi obično traje po tjedan dana, no ponekad s kraćim prekidima može potrajati do tri tjedna (Slika 2.8). Ljeti obično traje do tri dana. Olujnu jačinu postiže obično tijekom trećeg dana puhanja [18].



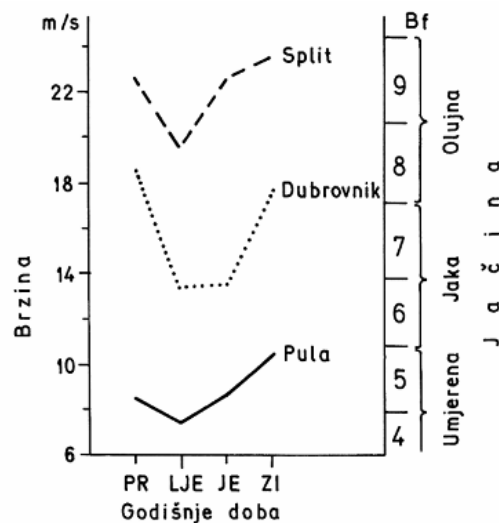
Slika 2.8 Srednji broj slučajeva s jugom koje je trajalo više od 24 sata za Dubrovnik, 1976 – 1980. [20]

Jugo je tipični vjetar Jadranskog mora, uvjetovan općim južnim strujanjem nastalim zbog Genovske ciklone ili ciklone na Jadranu, a samo ponekad kao dio strujanja vjetra *sirocco* koji puše na širem prostranstvu Sredozemlja, dolazeći iz Afrike [18].

Jugo se može podijeliti prema vrsti sinoptičkih situacija koje ga uzrokuju na ciklonalno (kišno) i anticiklonalno (suho). Većina je situacija s jugom povezana s ciklonom dok je manji broj situacija kada je jugo uzrokovan anticiklonom. Kišna je južina najčešće vezana uz približavanje područja niskoga atmosferskog tlaka, bilo da je to duboka ciklona ili dolina nad europskim kopnom ili manji ciklonalni vrtlog na Jadranu.

Zbog toga se jugo često širi Jadranom od Istre prema Dalmaciji. Također, za ciklonalnog se juga središte niskog tlaka najčešće nalazi u Genovskom zaljevu. Anticiklonalno jugo nastaje pod utjecajem visokog atmosferskog tlaka nad istočnim dijelom Sredozemlja i djelovanjem duboke i dugo stacionirane ciklone na sjevernom dijelu Europe. Javlja se naročito u proljeće i jesen [20].

Čestina pojavljivanja juga povećava se od sjevernog prema južnom dijelu Jadrana. Uz obalu od Splita do Neretve vjerojatnost je pojavljivanja maksimalna zbog kanalizirajućeg efekta kojeg stvaraju prolazi između brda i otoka u tom području. To se odražava i na brzine vjetra, tako da se na slici (Slika 2.9) vidi da brzina raste prema jugu, ali i na mjestima gdje je vjetar kanaliziran (npr. Split).



Slika 2.9 Najveća srednja satna brzina juga po godišnjim dobima u Dubrovniku, Splitu i Puli, 1976 – 1980. [20]

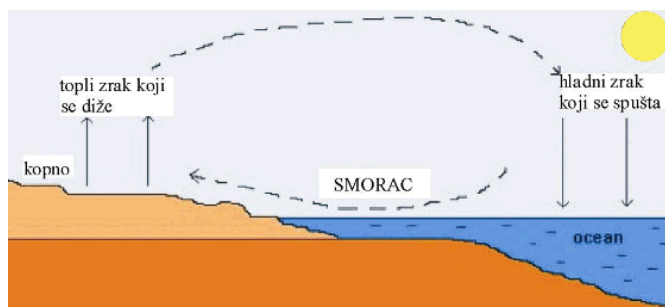
2.4.3 Maestral

Maestral je tipičan ljetni jadranski sjeverozapadni vjetar koji puše za stabilna anticiklonalna vremena. Izostaje prije nastupa juga, a ponovo počinje puhati dan nakon kiše.

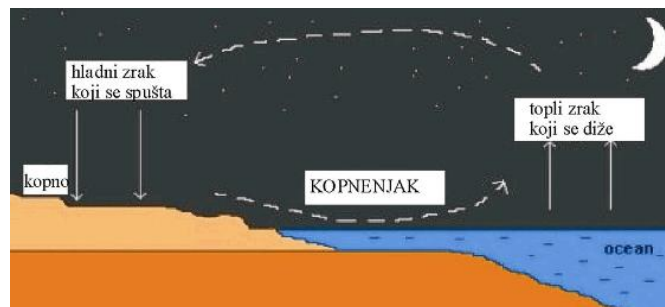
Naziv maestral odnosi se na vjetar koji nastaje uslijed zajedničkog strujanja jednog dijela obalne cirkulacije (smorca) i stalnog visinskog sjeverozapadnog vjetra koji predstavlja jednu granu etezije [21]. Etezijski vjetrovi nastaju zbog polja niskog tlaka nad Azijom - tzv. Karachi depresije, koja se proteže duboko na zapad (katkad čak i do Cipra) i istovremenog djelovanja azorske anticiklone koja se ljeti pomiče na sjever te se tada proteže nad jugoistočnom Europom. Na Jadranu etezije započinju u drugoj polovici lipnja te traju do rujna i prilično su slabe pa se jasno uočavaju samo na udaljenijim otocima, dok na obali prevladava obalna cirkulacija [22].

Maestral ima svoj dnevni ritam koji započinje ujutro laganim puhanjem s mora prema kopnu. Tijekom poslijepodneva se pojačava da bi se navečer ponovo stišao. Prestanak maestrala znači započinjane noćnog strujanja s kopna prema moru (*burin*). Time se zatvara jedan cjelodnevni krug strujanja na obali [21].

Proces stvaranja lokalne obalne cirkulacije započinje zagrijavanjem kopna u jutarnjim satima. Kako se tlo zagrijava jače nego more, nad kopnom dolazi do dizanja toplog zraka blizu obale i do gibanja hladnog zraka koji ga zamjenjuje; smorac (Slika 2.10). Nad kopnom se zrak dizanjem hladi sve do nivoa na kojem su izoterme paralelne ravnoj horizontalnoj podlozi. Na visini se javlja sporija struja u suprotnom smjeru koja puše s kopna prema moru. Tijekom noći situacija je suprotna. Kopno se hladi jače nego more i stvara se suprotno strujanje. Sada hladan zrak putuje s kopna na more; kopnenjak (Slika 2.11), nad morem se zagrijava i uzdiže, i na određenoj se visini vraća natrag prema kopnu, gdje se spuštanjem zatvara cirkulacija. Noćni vjetrovi su slabiji od dnevnih, a i dubina noćne cirkulacije manja je u odnosu na dubinu njenog dnevnog dijela [21].



Slika 2.10 Skica nastajanja obalne cirkulacije; dnevno strujanje [21]



Slika 2.11 Skica nastajanja obalne cirkulacije; noćno strujanje [21]

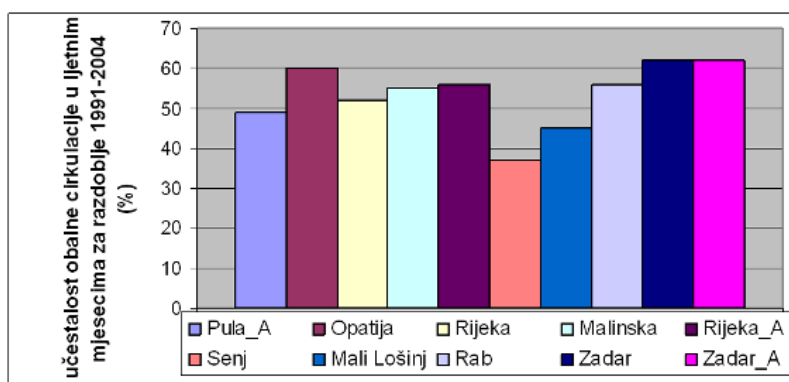
2.5 Vjetrovi cirkulacije obronka

Maestral nije jedini vjetar lijepog vremena na našoj obali. U povoljnim vremenskim uvjetima uz brdovitu obalu učinak maestrala pojačavaju lokalni vjetrovi, tzv. vjetrovi cirkulacije obronka. To su termički generirani vjetrovi koji se razvijaju uzduž obronaka planina tijekom dana. Nakon izlaska sunca, obronci planina zagrijavaju se jače od nižih slojeva te se stvara razlika u površinskoj temperaturi, a time i strujanje.

Tako se tijekom dana javljaju uzlazni (anabatički) vjetrovi koji pušu uz obronak, a tijekom noći nakon jačeg hlađenja planinskih vrhova silazni (katabatički) vjetrovi koji pušu niz obronak. Na primjer postaje Opatija, Rijeka, Senj i Split imaju planinsko zaleđe i za vrijeme nastanka obalne cirkulacije nastaju i vjetrovi cirkulacije obronka. Smjerovi dnevnih dijelova cirkulacija se podudaraju pa strujanje prema obali tijekom dana čine smorac i uzlazni vjetar, a tijekom noći strujanje od obale prema moru čine kopnenjak i silazni vjetar burin [23].

2.5.1.1 Učestalost obalne cirkulacije

Klimatološki gledano obalna cirkulacija pojavljuje se u prosjeku u 50% dana tijekom ljetnih mjeseci na sjevernom Jadranu i učestalija je na postajama koje su smještene na obali s planinskim zaleđem. Na tim postajama dolazi do podudaranja smjerova između vjetrova obalne cirkulacije i vjetrova cirkulacije obronka. Postaja u Senju je izuzetak jer tijekom godine ima velik udio dana s burom koja ne dopušta razvoj lokalnih cirkulacija. Na rjeđu pojavu obalne cirkulacije na otočnim postajama svakako utječu i manje površine tih otoka. U morskim kanalima između otoka ili otoka i kopna, smorac pokazuje tendenciju da slijedi smjer tih kanala [21].



Slika 2.12 Učestalost obalne cirkulacije u ljetnim mjesecima (%) za deset postaja u Istri, Kvarneru i sjevernoj Dalmaciji [21]

Učestalost maestrala na južnom dijelu Jadrana veća je od one na sjevernom dijelu. Tako je obalna cirkulacija česta na postajama srednjeg i južnog Jadrana; npr. u Šibeniku, Splitu, Hvaru, Dubrovniku i na Lastovo. Kao i u sjevernom Jadranu otoci s malom aktivnom kopnenom površinom kao što je Palagruža ne mogu pokrenuti razvoj obalne cirkulacije [21].

3 Osnovni elementi vjetroturbine

Osnovni elementi tipične vjetroturbine s horizontalnom osi rotacije su :

- rotor kojeg čine lopatice i glavina
- pogon koji uključuje sve rotirajuće dijelove izuzev rotora – vratilo, prijenos, krutu spojku, mehaničku kočnicu i generator
- kućište i glavni okvir – kućište, podvozje i sustav skretanja
- toranj i temelj
- sustav upravljanja turbinom – kontroleri i senzori
- električni sustav – kablovi, prekidači, transformator i pretvarači snage



Slika 3.1 Shematski prikaz dijelova vjetroturbina

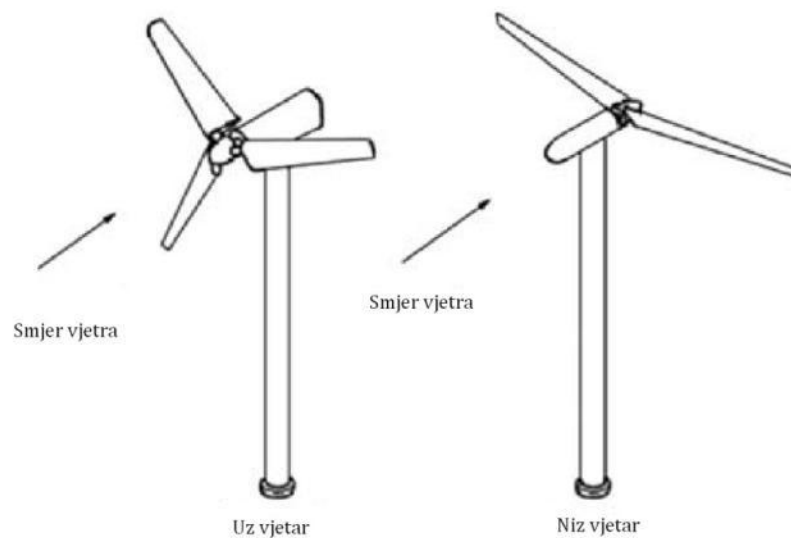
Za ovaj tip turbine može se napraviti podjela s obzirom na :

- položaj rotora u odnosu na toranj – uz vjetar (eng. *upwind*) i niz vjetar (eng. *downwind*)
- konstrukciju glavine – kruti rotor (eng. *rigid*), klackajući rotor (eng. *teetering*), rotor sa zglobovima (eng. *hinged*)
- upravljanje snagom rotora – kontrola sloma uzgona (eng. *stall control*) ili promjenjivi postavni kutovi lopatice (eng. *pitch control*)
- broj lopatica – dvije ili tri
- način kako se rotor poravnava s vjetrom – slobodno skretanje (eng. *free yaw*) ili aktivno skretanje (eng. *active yaw*)
- brzinu rotacije rotora koja može biti konstantna ili promjenjiva
- vrstu generatora – sinkroni ili indukcijski
- vrstu prijenosa – prijenosnik (koji može biti planetarni ili s paralelnim vratilima) ili direktni pogon (eng. *direct drive generator*)

3.1 Rotor

Funkcija rotora je pretvaranje kinetičke energije vjetra u rotacijsko gibanje. Rotori vjetroturbina trpe stacionarne i dinamički promjenjiva opterećenja, a potonja su stohastička uslijed nestacionarnosti polja vjetra i periodička uslijed rotacije samog rotora. Ova dinamička opterećenja se pojavljuju pri vrlo visokom broju ciklusa, tako da je zamor materijala jedan od ključnih parametara pri konstruiranju.

Danas su uobičajeni rotor koji su postavljeni ispred tornja odnosno uz vjetar. Kod rotora postavljenih iza tornja javlja se dodatno periodičko opterećenje jer lopatice prolaze kroz vrtloženje od tornja (tzv. sjena tornja, eng. *tower shadow*) što uzrokuje i dodatnu buku. Međutim, prednost takvog položaja rotora je mogućnost pasivnog sustava skretanja i sigurniji rad u slučaju jakih naleta vjetra jer se kod vjetroturbina s rotorom ispred tornja elastične lopatice pod jakim vjetrom mogu savinuti toliko da udare u toranj.



Slika 3.2 Orijentacija rotora u odnosu na položaj tornja [12]

Jedan od bitnih konstrukcijskih parametara je koeficijent vršne brzine λ .

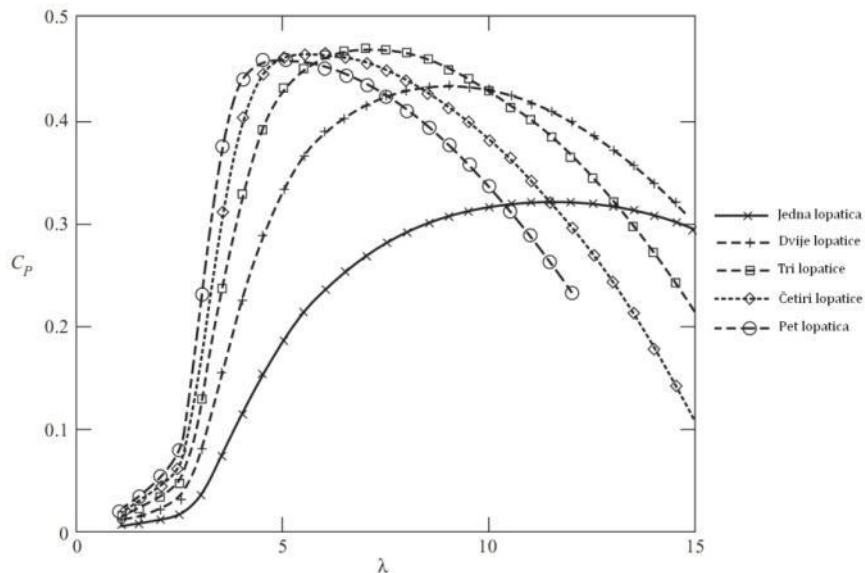
—

pri čemu je Ω kutna brzina rotacije rotora, R radijus rotora, a U je brzina slobodne struje koja nastrujava na rotor. Sporohodne vjetroturbine imaju mali koeficijent vršne brzine, dok se kod većine modernih vjetroturbina spojenih na električnu mrežu taj omjer kreće između 5 i 8. Kutna brzina rotacije može biti konstantna ili promjenjiva. Turbine s konstantnom brzinom rotacije imaju promjenjiv koeficijent vršne brzine ovisno o brzini nastrujavanja, tako da za samo određenu brzinu imaju optimalan rad. Turbine s promjenjivom brzinom rotacije rade stalno s optimalnim koeficijentom vršne brzine bez obzira na brzinu nastrujavanja. Takav sustav znači bolju iskoristivost rotora, međutim spajanje na električnu mrežu postaje kompleksnije jer je potrebno osigurati konstantnu frekvenciju od 50 Hz (ili 60 Hz za SAD).

3.1.1 Lopatice

Broj lopatica rotora indirektno je povezan s λ . Da bi se ostvarila veća snaga, za manje vrijednosti λ potreban je veći broj lopatica i obrnuto, čime se direktno utječe na faktor ispunjenosti rotora. Na slici (Slika 3.3) prikazan je utjecaj promjene faktora ispunjenosti rotora na koeficijent snage.

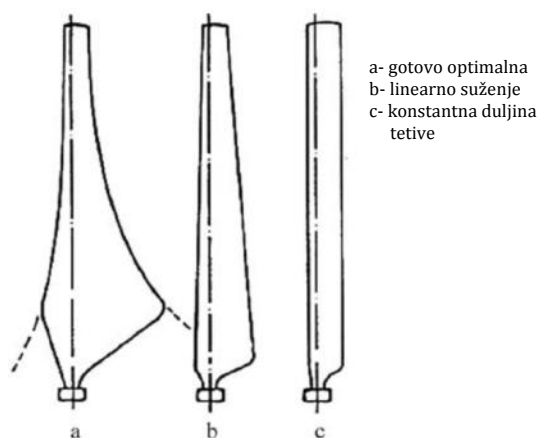
Faktor ispunjenosti rotora definiran je kao omjer ukupne površine lopatica i ukupne površine rotora. Uočljivo jest da za isti koeficijent vršne brzine (npr. $\lambda=6$), rotori s dvije ili tri lopatice imaju mnogo veći C_P u odnosu na rotor s jednom lopicom. Također se iz dijagrama vidi da daljnje povećanje broja lopatica ne pridonosi povećanju koeficijenta snage, dok znatno pridonosi ukupnoj težini rotora. Nadalje, lopatice nose i oko 20% ukupnih troškova izrade te ih je zbog toga poželjno imati što manji broj.



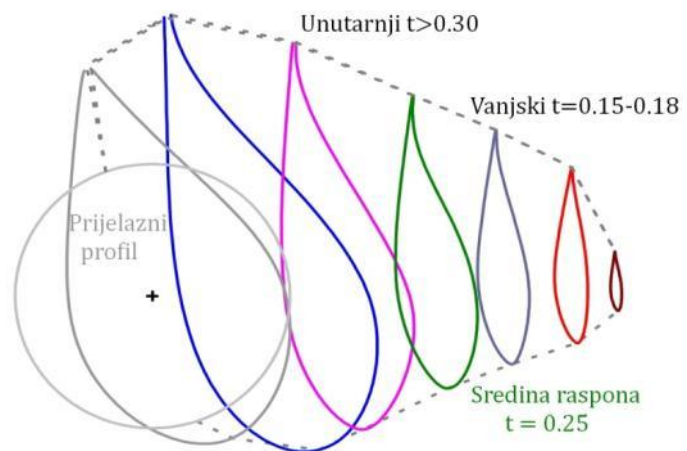
Slika 3.3 Učinak promjene faktora ispunjenosti na koeficijent snage [14]

Lopatice modernih vjetroturbina vrlo su vitke i lagane. U suštini konstrukcija lopatice nalikuje konstrukciji krila zrakoplova s ramenačom koja nosi opterećenja i oplatom koja daje aerodinamični oblik. U većini slučajeva aeroprofil nije konstantan duž lopatice već se pri korijenu koriste deblji profili, a pri vrhu lopatice tanji profili boljih performansi (Slika 3.5).

Korijenski profili nisu toliko bitni za aerodinamiku radi malih brzina nastrujavanja i vrlo velikog vrtloženja toka, već je njihova uloga osiguranje čvrstoće i krutosti lopatice. Na srednjem rasponu i prema vrhu lopatice, koriste se aeroprofil velikog odnosa koeficijenta uzgona i otpora za male napadne kutove. Bitan parametar pri odabiru profila je i njihova neosjetljivost na povećanu hrapavost površine (npr. gomilanje insekata na oplati). Odabir profila ovisi i o načinu kontrole snage jer profili namijenjeni za upravljanje zakretom lopatice možda nisu prikladni za kontrolu sloma uzgona.



Slika 3.4 Raspodjela tetiva po rasponu [12]

Slika 3.5 Raspodjela debljine profila t po rasponu [26]

Lopatice su također uvijene kako bi se osigurao optimalan napadni kut duž cijelog raspona. Optimalna raspodjela duljina tetiva za maksimalni koeficijent uzgona rezultira vrlo kompleksnom geometrijom i velikim korijenskim tetivama. Zbog toga je uobičajena praksa pojednostaviti geometriju čime se dobiva tehnološki manje zahtjevana konstrukcija i mnogo lakša lopatica jer je odstranjen velik dio mase blizu korijena (Slika 3.4). Materijali koji se koriste za izradu lopatica su većinom kompozitni materijali te je stoga moguće proizvesti lopatice kompleksne geometrije.

3.1.2 Glavina rotora

Preko glavine rotora lopatice su spojene na glavno vratilo i dalje na ostatak pogona. Konstrukcija ovisi o općenitom dizajnu vjetroturbine. Glavina rotora prenosi snagu i mora biti napravljena tako da može izdržati sva nametnuta opterećenja. Sukladno tome načinjena je od čelika, postupkom lijevanja ili zavarivanja..

Postoje tri osnovna tipa glavine koji se koriste u modernim HAWT vjetroturbinama. To su kruti tip, glavina klackajućeg rotora i glavina sa zglobom mahanja. Kruta glavina je najčešća kod koje su svi dijelovi učvršćeni su na glavno vratilo. Turbine s promjenjivim postavnim kutom lopatica također imaju krutu glavinu uz dodatak ležajeva na korijenu lopatice koji osiguravaju zakretanje lopatice samo oko vlastite osi i mehanizam za zakretanje.



Slika 3.6 Pogled u unutrašnjost glavine rotora na vjetroturbini Enercon E126 [G]

Glavina klackajućeg rotora koristi se kod rotora s jednom ili dvije lopatice. Lopatice se mogu relativno pomicati u odnosu na vratilo i tijekom rotiranja se „klackaju“ odnosno dok jedna lopatica putuje prema gore u odnosu na ravninu rotora, druga se spušta. Rotori s lopicama koje imaju mogućnost mahanja vrlo su rijetki, ali se sve više istražuju radi povoljne dinamike rotora poput onih na helikopterskim rotorima [23]. Dodatni zglob zabacivanja lopatica teoretski je moguć, ali nikada se ne koristi. Umjesto toga, za kompenzaciju alternirajućeg momenta na pogon se ugrađuju suspenzija i posebne spojke.

3.2 Pogonski sustav

Pogonski sustav uključuje vratilo, prijenos, krutu spojku, kočioni sustav i generator.

Prema vrsti struje koju daju, generatori mogu biti istosmjerni i izmjenični, dok se prema broju okretaja dijele na one s promjenjivim i one s nepromjenjivim brojem okretaja.

Prijenos snage odvija se najčešće preko multiplikatora u raznim izvedbama (planetarni ili paralelni), ali sve je češći prijenos direktnim pogonom (eng. *direct drive generator*). Kućište prijenosnika u većini slučajeva hladi se zrakom, dok se za njegovo podmazivanje najčešće koriste sintetička ulja.

Kočioni sustav služi za rasterećenje prijenosnika snage od izrazitog dinamičkog opterećenja uslijed naleta vjetra te zaustavljanja rotora u slučaju kada brzina vjetra prijeđe brzinu isključivanja, odnosno prilikom ispada generatora iz mreže (tzv. pobjeg). Primarni kočioni sustav čini mehanička kočnica, a sekundarni aerodinamička kočnica. Najčešća izvedba kočionog sustava je disk kočnica. Vrlo važna uloga kočionog sustava je i održavanje konstantne projektne brzine vrtnje.

3.3 Kućište, glavni okvir i toranj

Kućište vjetroturbine ima dvojaku ulogu. Osim što štiti komponente vjetroturbine od vanjskih vremenskih utjecaja kao što su kiša, direktna izloženost suncu, povećana koncentracija soli u zraku itd., njegova uloga je i smanjiti buku koju vjetroturbina emitira tijekom rada tj. zaštititi okoliš od buke.

Uloga sustava skretanja ili zakretnika je skretanje rotora na način da ga se dovede u položaj da njegova os bude paralelna sa strujom zraka, dok isto tako pri jakim naletima vjetra i olujama zakretnik okreće rotor van struje zraka i rotor dovodi u položaj najmanjih opterećenja, tzv. preživljavanje.

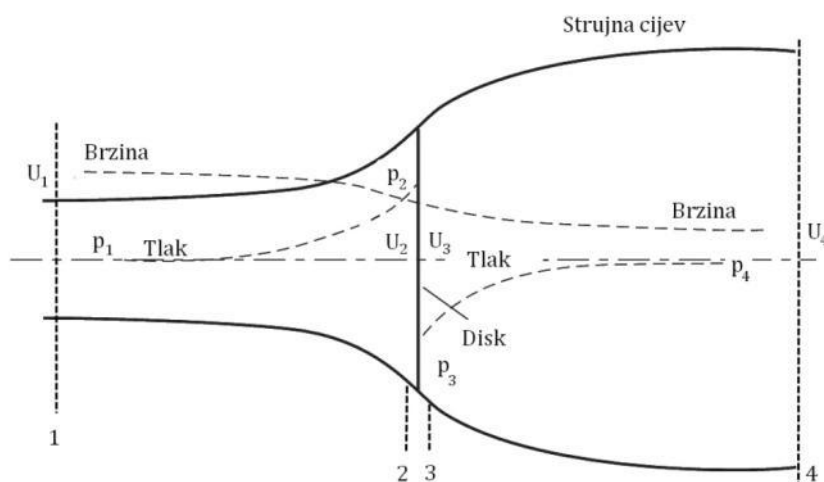
Toranj nosi cjelokupni turbinsko-generatorski dio vjetroturbine. Toranj može biti rešetkaste izvedbe (eng. *lattice tower*) ili cjevaste (eng. *tubular tower*). Tornjevi od lijevanog betona (eng. *gravity based*) koriste se za velike agregate na moru („off-shore“).

4 Određivanje geometrije rotora

4.1 Teorijska osnova

4.1.1 Osnove teorije diska

Vjetroturbina je stroj kojim se kinetička energija vjetra pretvara u mehaničku energiju. Oduzimanjem dijela te kinetičke energije, zrak se usporava, ali samo onaj dio struje koji prolazi kroz rotor. Jednostavnim modelom može se odrediti snaga idealnog rotora vjetroturbine, potisak i utjecaj rotora na okolno polje vjetra. Taj model temelji se na poznatim jednadžbama o očuvanju mase, količine gibanja i energije. Takav pristup poznat je pod nazivom teorija diska (eng. *momentum theory*) čije temelje je postavio Rankine, a detaljnije razvili Froude i Glauert [23].



Slika 4.1 Idealni rotor – akuator disk i strujna cijev za vjetroturbinu [14]

Analiza podrazumijeva kontrolni volumen omeđen površinom strujne cijevi i dvama poprečnim presjecima (1 i 4) kroz koje se odvija protok (Slika 4.1). S obzirom da se zrak unutar strujne cijevi usporava, ali ne stlačuje, strujna cijev se širi. Iako se oduzima kinetička energija iz zraka, skokovita promjena brzine preko diska nije moguća. Međutim, moguća je skokovita promjena tlaka i to je princip rada svih vjetroturbina bez obzira na njihovu konstrukciju. Nadolazeća struja zraka radi prisutnosti rotora usporava i kad dođe do samog rotora brzina struje je manja od neporemećene brzine.

Usljed tog usporavanja brzine, statički tlak raste i strujna cijev se širi. Pri prolasku kroz rotor (presjeci 2 i 3, neposredno ispred i iza rotora), statički tlak naglo pada ispod vrijednosti okolišnog tlaka. Ovaj dio strujne cijevi naziva se vrtložni trag. Dovoljno daleko iza rotora, statički tlak se mora izjednačiti s okolišnim tlakom što rezultira daljnjim usporenjem struje. Dakle, dovoljno daleko ispred i iza rotora nema promjene statičkog tlaka, ali postoji razlika u kinetičkoj energiji [14].

Rotor turbine u teoriji diska opisuje se beskonačno tankim diskom (aktuator disk) preko kojeg se statički tlak skokovito mijenja. Pretpostavke teorije diska su sljedeće [23] i [12]:

- brzina na disku je konstantna
- tlak na disku je konstantan
- rotacija struje zraka koji prolazi kroz rotor je zanemarena
- struja zraka koja prolazi kroz rotor odvaja se od okolnog zraka zamišljenom strujnom cijevi
- strujanje je nestlačivo i stacionarno
- nema otpora trenja
- broj lopatica je beskonačan

Primjenom jednadžbe očuvanja masenog protoka može se zapisati

4.1

Budući da je pretpostavljeno nestlačivo strujanje, a za površinu diska vrijedi $A_2=A_3$ slijedi da se brzina pri prolasku kroz sami disk ne mijenja

4.2

Prema jednadžbi očuvanja količine gibanja, za stacionarno strujanje, potisak na rotoru jednak je brzini promjene količine gibanja

4.3

Bernoullijeva jednadžba može se primijeniti na oba kontrolna volumena s obje strane diska

$$- \quad - \quad 4.4$$

$$- \quad - \quad 4.5$$

Uz pretpostavku jednakosti tlakova p_1 i p_4 te brzina U_2 i U_3 , manipulacijom prethodno navedenih jednadžbi može se izvesti izraz za brzinu na disku

$$\text{—————} \quad 4.6$$

Brzina struje na disku je prosječna vrijednost ulazne i izlazne brzine u kontrolni volumen.

Aksijalni induksijski faktor a je definiran kao omjer smanjenja brzine na rotoru i neporemećene brzine

$$\text{—————} \quad 4.7$$

4.8

Kako induksijski faktor raste, struja iza rotora se sve više usporava. Ako je $a=0.5$, brzina struje zraka iza rotora je nula i teorija diska više ne vrijedi.

Iz jednadžbe očuvanja energije slijedi da je snaga dobivena na rotoru jednaka smanjenju kinetičke energije masenog protoka zraka kroz rotor odnosno da je snaga jednaka umnošku potiska i brzine na rotoru

$$- \quad 4.9$$

Kada se uvrste izrazi za U_2 i U_4 te se površina A_2 zamijeni s A , a brzina neporemećene struje U_1 s U , snaga se može izračunati kao

—

4.10

Koeficijent snage izražava se kao omjer dobivene i raspoložive snage vjetra

—

4.11

—

Maksimalni koeficijent snage dobije se kad je

—

—

4.12

—

4.13

Ovaj maksimalni koeficijent snage poznat je kao Betzov limit, prema njemačkom znanstveniku Albertu Betzu.

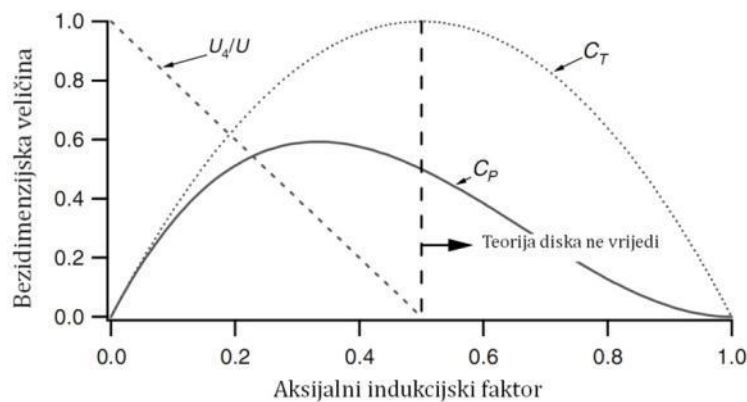
Koeficijent potiska može se izračunati kao

—

—

4.14

Maksimalna vrijednost $C_T = 1$ je kad je $a=0.5$, a struja nizvodno od rotora potpuno zaustavljena. Pri najvećem koeficijentu snage, —.

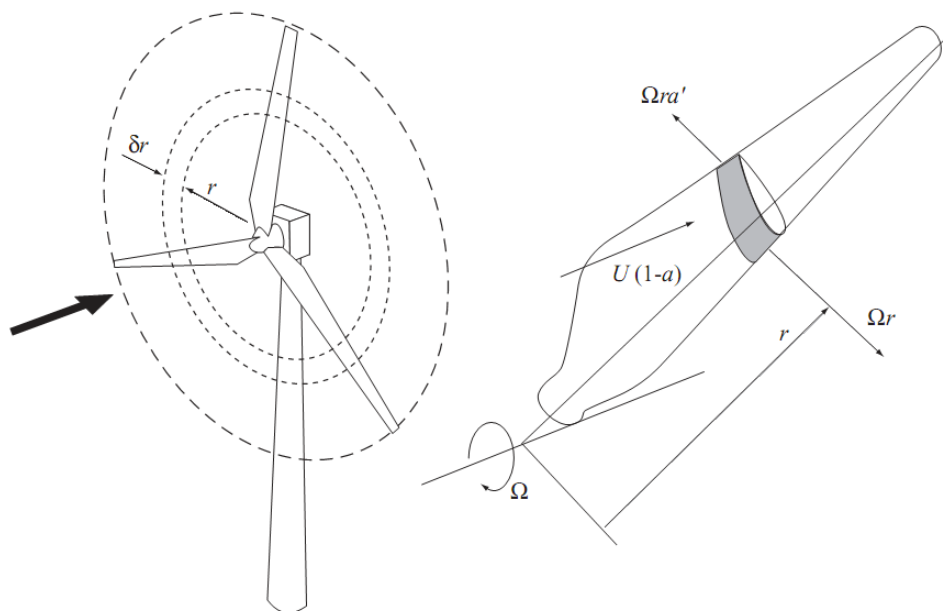


Slika 4.2 Koeficijenti snage i potiska za idealni rotor [12]

4.1.2 Osnove teorije elementarnog kraka

Teorijom diska može se analizirati samo idealni rotor kod kojeg nema gubitaka uslijed rotacije zraka u njegovom tragu, otpora profila kraka ili interferencije između krakova turbine. Jedini gubitak obuhvaćen ovom teorijom je gubitak kinetičke energije jer nisu poznate informacije o samom kraku rotora. Teorijom elementarnog kraka razmatra se geometrija kraka pri čemu se lopatica uzima kao kruto tijelo [23].

Lopatica rotora može se podijeliti na radijalne odsječke koji opisuju kružni vijenac na rotoru. Teorija elementarnog kraka razmatra sile na infinitezimalnom radijalnom dijelu kraka rotora δr na udaljenosti r od osi rotacije [23].

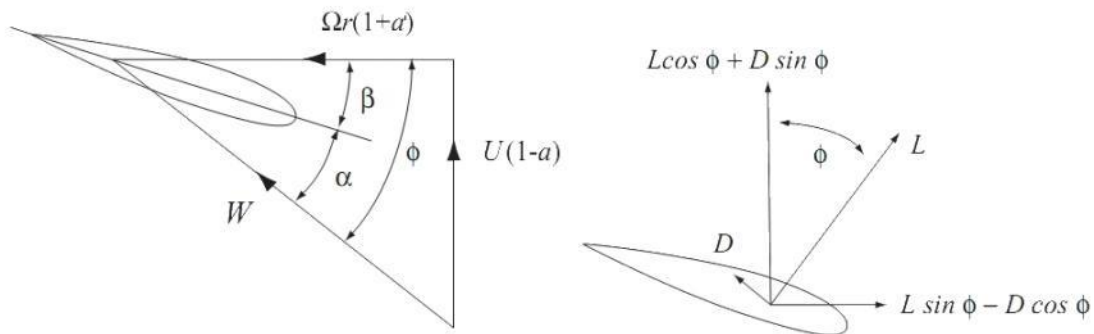


Slika 4.3 Odsječak kraka opisuje kružni vijenac infinitezimalne širine [14]

Sile na elementu kraka mogu se izračunati iz karakteristika aeroprofila (koeficijenti uzgona i otpora c_l i c_d) i napadnog kuta određenog iz vektorskog zbroja brzina pri čemu se komponenta brzine u radijalnom smjeru zanemaruje kao i trodimenzionalni efekti.

Za element kraka koji rotira kutnom brzinom Ω , duljine tetive c i postavnog kuta β na slici (Slika 3.1) prikazani su vektori brzina i komponente sila. Postavni kut i duljina tetive mogu varirati po radijusu.

Osim obodne brzine uslijed rotacije Ωr na elementu kraka postoji i tangencijalna brzina vrtložnog traga $a'\Omega r$ te je ukupna tangencijalna brzina na kraku $(1+a')\Omega r$. Koeficijent a' je tangencijalni indukcijski faktor kojim se izražava promjena tangencijalne brzine kroz rotor. Nadolazeća struja zraka ne rotira, a prolaskom kroz rotor struja zraka dobiva rotacijsku komponentu.



Slika 4.4 Brzine i sile na odsječku kraka [14]

Ukupna relativna brzina jest

$$\underline{\hspace{10em}} \quad 4.15$$

a kut mjereno od ravnine rotacije

$$\underline{\hspace{10em}} \quad 4.16$$

Napadni kut dan je kao

$$\underline{\hspace{10em}} \quad 4.17$$

Sila uzgona orijentirana normalno na brzinu W iznosi

$$\underline{\hspace{10em}} \quad 4.18$$

Sila otpora paralelna je brzini W i iznosi

$$\underline{\hspace{10em}} \quad 4.19$$

4.2 Kombinirana teorija elementarnog kraka i teorije diska

Za zadane sile na rotoru, teorijom diska izračunavaju se brzine na rotoru. Teorijom elementarnog kraka za dane brzine, mogu se izračunati opterećenja na rotoru. Kombinirana teorija elementarnog kraka i teorije diska (u daljnjem tekstu BEM metoda, eng. *Blade Element-Momentum theory*) je brza i jednostavna metoda za proračun neuniformne raspodjele indukcijskih faktora po rasponu rotora i performansi samog rotora.

Izjednačavanjem izraza za izračun aksijalne sile i momenta za svaki kružni vijenac, dobivaju se sljedeće jednadžbe

$$\text{—} \quad 4.20$$

$$\text{—} \quad 4.21$$

Lijeva strana jednadžbe dolazi iz teorije diska za koju je pretpostavljen beskonačan broj lopatica i uniformna raspodjela aksijalne sile i momenta po azimutu. Desna strana jednadžbe dolazi iz teorije elementarnog kraka s diskretnim opterećenjima po azimutu radi konačnog broja lopatica B . Nepoznanice su indukcijski faktori te se problem rješava iterativno.

Za BEM metodu vrijede sljedeća pojednostavljenja [26]:

- indukcijski faktori a i a' konstantni su po azimutu
- kružni vijenci i lopatice su međusobno neovisni
- utjecaj konačnog broja lopatica u teoriji diska je zanemaren
- indukcijski faktor $a < 0.5$
- nadolazeća struje je stacionarna i okomita na ravninu rotora
- strujanje na aeroprofilima je stacionarno
- utjecaj rotacije lopatica na granični sloj je zanemaren

4.3 Odabir profila

Lopatica je po rasponu podijeljena na 4 dijela s promjenom profila na svakom dijelu. Na unutarnjem dijelu lopatice profili su deblji dok se prema vrhu stanjuju. U tablici (Tablica 4.1) prikazane su vrijednosti debljina profila po sekcijama lopatice.

Tablica 4.1 Odabrane debljine profila po rasponu lopatice

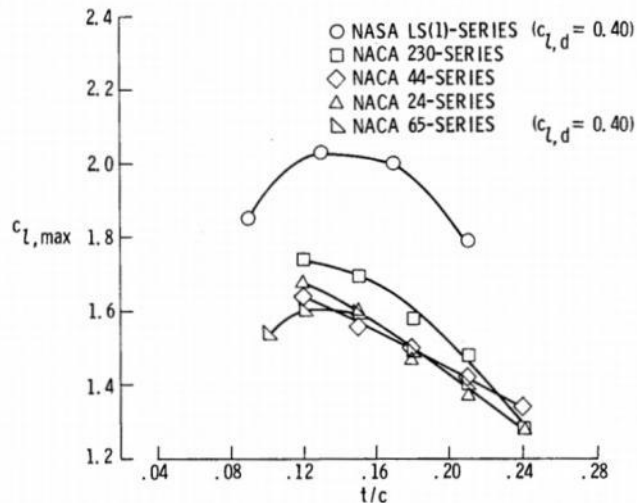
| Odsječak na lopatici (relativan radijus r/R) | Debljina profila |
|--|------------------|
| 0.15R - 0.3R | 34% |
| 0.3R - 0.75R | 25% |
| 0.75R - 0.85R | 21% |
| 0.85R - R | 17% |
| R | 13% |

Profili su odabrani iz dvije serije. Za korijenske profile i profile na srednjem dijelu odabrani su profili Wortmann FX 77-W-258 i Wortmann FX 77-W-343. Za vanjski dio lopatice odabrani su profili LS(1)-0417 MOD i LS(1)-0421 MOD iz serije NASA LS.

Profili serije Wortmann FX dizajnirani su prvenstveno za vjetroturbine i karakterizira ih velika zakrivljenost i izražena konkavnost donjake.

Profili serije NASA LS (eng. *low speed*) razvijeni su za opće zrakoplovstvo za primjenu pri malim brzinama s uglavnom turbulentnim graničnim slojem. Karakteristike profila su mali otpor pri brzinama krstarenja, veliki omjer koeficijenta uzgona i otpora, veliki maksimalni koeficijent uzgona i predvidljivo ponašanje pri slomu uzgona [25].

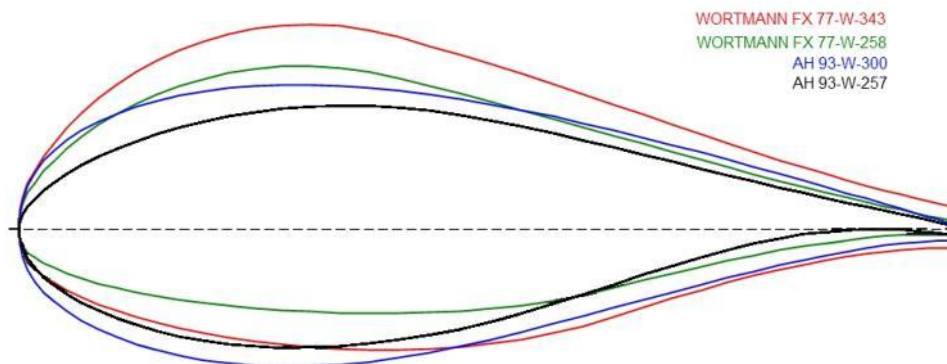
Kad je počeo razvoj modernih vjetroturbina, malo pažnje pridavalo se samim aeroprofilima već su pri konstrukciji lopatice bili važniji kut uvijanja i suženje lopatice. Profili koji su se koristili bili su iz serije NACA 44xx i NACA 230xx, tada tipični odabir za helikopterske aeroprofile. Međutim, iako ti profili imaju velik koeficijent uzgona i mali koeficijent otpora, vrlo su osjetljivi na površinsku hrapavost napadnog ruba.



Slika 4.5 Usporedba maksimalnog koeficijenta uzgona za profile serije NACA i NASA LS. $M=0.15$, $Re=6 \cdot 10^6$, glatke površine [25]

Na slici (Slika 4.5) prikazana je usporedba maksimalnog koeficijenta uzgona različitih NACA serija i NASA LS(1) serije. Iz dijagrama je očito da je koeficijent uzgona LS serije mnogo veći nego kod NACA serija pri istom koeficijentu otpora. Radi svih navedenih karakteristika, posebice neosjetljivosti na površinsku hrapavost, profili serije LS primjenjuju se i na vjetroturbine.

Izuzev navedenih, za korijenski dio lopatice razmatrani su profili iz još nekoliko serija. Profili iz serije Althaus (AH-93-W-xxx) koja je također razvijena za primjenu na vjetroturbinama imaju vrlo dobre aerodinamičke karakteristike, ali konstrukcijski se nisu uklapali. Na primjer, kod profila AH 93-W-257 debljine 25 % konkavnost donjake je tolika da nije moguće ostvariti kontinuirani prijelaz s tog profila na profil AH-93-W-300 koji je veće debljine (30%), ali manje konkavnosti donjake (Slika 4.6).



Slika 4.6 Usporedba profila serija AH-93-W-xxx i FX 77-W-xxx

Profili serije FX 77-W-xxx pokazuju mnogo bolje poklapanje zakrivljenosti površina te je njihova integracija tehnološki moguća.

Karakteristike odabranih profila navedene su u tablici dolje (Tablica 4.2).

Tablica 4.2 Karakteristike odabranih profila

| Profil | Debljine [%] | Zakrivljenost [%] | C_{lmax} | $\alpha(C_{lmax}) [^\circ]$ | $C_l/C_{d max}$ | $\alpha(C_l/C_{d max}) [^\circ]$ | $C_l(C_l/C_{d max})$ |
|----------------|--------------|-------------------|------------|-----------------------------|-----------------|----------------------------------|----------------------|
| LS(1)-0413MOD | 13 | 2.00 | 1.45 | 10 | 46.972 | 6 | 1.28 |
| LS(1)-0417 MOD | 17 | 2.3 | 1.611 | 15 | 41.321 | 5.5 | 1.225 |
| LS(1)-0421 MOD | 21 | 2.1 | 1.76 | 15 | 31.463 | 5.5 | 1.17 |
| FX-77-W-258 | 26.1 | 4.3 | 1.715 | 15 | 25.651 | 9 | 1.229 |
| FX-77-W-343 | 34.4 | 4.7 | 1.502 | 15 | 11.71 | 14.5 | 1.468 |

U prilogu 1 dane su karakteristike profila i polare.

4.4 Preliminarno određivanje promjera rotora

Prema teoriji diska [14] snaga vjetroturbine izračunava se sljedećom relacijom

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p U^3 \quad 4.22$$

pri čemu je C_p koeficijent snage, ρ je gustoća zraka, A površina rotora, a U brzina neporemećene struje koja okomito nastrojava na rotor.

Izračunati polumjer rotora iznosi

$$R = 48,5067 \text{ m}$$

a postupak proračuna naveden je u ovom poglavlju.

Kao nazivna brzina neporemećene struje uzeta je vrijednost 12 — na temelju nazivnih brzina sličnih vjetroturbina u klasi 3MW. S obzirom da se radi o vjetroturbini koja treba biti instalirana na Pometenom brdu, uzeta je odgovarajuća gustoća zraka koja za visinu od 500 m (procjena srednjeg visinskog položaja [27]) iznosi — .

Koeficijent vršne brzine λ_D određen je iz ograničenja na aerodinamičku razinu buke. Aerodinamička razina buke ovisi o vršnoj brzini V_{tip} je čija maksimalno dopuštena vrijednost oko 65 — za turbine smještene na udaljenosti 400 m od naselja [14].

$$\lambda_D = \frac{V_{tip}}{U} \quad 4.23$$

$$V_{tip} = \lambda_D U \quad 4.24$$

Prema [27] lokacija Pometeno brdo je od najbližeg naselja udaljena 5,5 km, stoga je buka koja bi se mogla osjetiti u naselju zanemariva.

Izračunata brzina vrtnje je

4.4.1 Koeficijent snage

Maksimalni koeficijent snage (poznat kao Betzov limit) iznosi

i moguće ga je postići samo idealnim rotorom. Jedini gubitak pri tome je aksijalno usporenje struje. Međutim, osim toga, postoje još mnogi izvori gubitaka. Glavni su gubici profila uslijed otpora, gubici uslijed prestrujavanja struje s donjake na gornjaku profila (vršni gubici) i gubici uslijed vrtloženja struje.

S obzirom da je poznat broj lopatica i odabrani su aeroprofil, moguće je preliminarno odrediti iskoristivost rotora.

4.4.1.1 Gubici uslijed otpora profila

Prema [15], gubitke uslijed otpora profila može izračunati iz omjera koeficijenta uzgona i otpora i kuta nagiba struje.

Za sekciju lopatice duljine dr na polumjeru r može se odrediti silu uzgona i otpora

$$F_L = \frac{1}{2} \rho w^2 c_l dr \quad (4.25)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho w^2 c_d dr \quad (4.26)$$

pri čemu su w brzina nastrujavanja, a c_l i c_d koeficijenti uzgona i otpora profila.

S obzirom da su sile uzgona i otpora orijentirane normalno i paralelno s tetivom profila lopatice, tangencijalnu komponentu sile na rotoru možemo izračunati preko kuta α - kuta između neporemećene brzine i stvarne brzine nastrujavanja

$$F_{L_t} = F_L \sin \alpha \quad (4.27)$$

--

4.28

Iako nije poznata duljina lopatice odnosno polumjer rotora, određeni su relativni polumjeri na kojima se nalaze sekcije lopatice za koje su i poznati aerodinamički koeficijenti.

Dobivena snaga iznosi

4.29

B je broj lopatica, v lokalna obodna brzina.

Ako promatramo idealni slučaj bez otpora, snaga iznosi

—

4.30

Iz odnosa stvarne i idealne snage možemo izračunati iskoristivost profila

—

4.31

Za odabrane profile na određenim relativnim radijusima, iskoristivosti profila su sljedeće:

Tablica 4.3 Iskoristivosti profila

| Profil | |
|----------------|--------|
| LS(1)-0417 MOD | 0,8034 |
| LS(1)-0421 MOD | 0,7805 |
| FX-77-W-258 | 0,7624 |
| FX-77-W-343 | 0,7710 |

4.4.1.2 Vršni gubitci

Vršni gubitci se javljaju uslijed prestrujavanja zraka s donjake na gornjaku. Da bi uzeo u obzir te gubitke, Betz [15] je uveo pojam efektivnog promjera D'

$$\frac{D'}{D} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{C_p}{C_t}}}$$

4.32

S obzirom da je snaga proporcionalna kvadratu promjera, vršne gubitke može se izračunati iz sljedeće jednadžbe

$$P_{\text{vršni}} = P_{\text{rotor}} \left(1 - \left(\frac{D'}{D} \right)^2 \right)$$

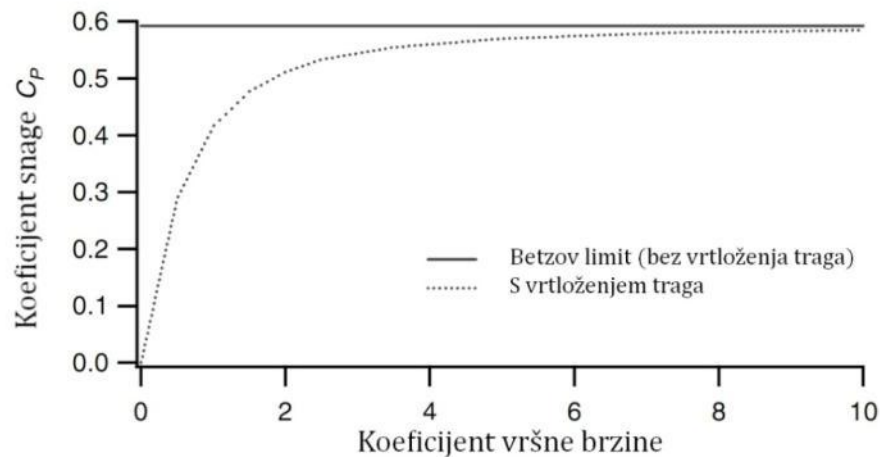
4.33

Za rotor u ovom radu, vršni gubitci iznose

4.4.1.3 Gubitci uslijed vrtloženja traga

Iza rotora nastaje vrtložni trag kao reakcija na okretni moment. Kinetička energija koja se troši na vrtložni trag rezultira manjom ukupnom energijom koja se može izvući iz struje zraka i pretvoriti u mehaničku energiju. Općenito, energija vrtložnog traga bit će veća što je veći okretni moment.

Za sporohodne vjetroturbine, okretni moment vrlo je velik, a time i gubitci uslijed velikog vrtložnog traga. Kod turbina s većom brzinom rotacije i manjim okretnim momentom gubitci su vrlo mali te se koeficijent snage približava idealnom Betzovom limitu (Slika 4.7). Za slučaj vjetroturbine u ovom radu, koeficijent vršne brzine je dovoljno velik te su gubitci uslijed vrtloženja traga zanemareni .



Slika 4.7 Teoretski maksimalni koeficijent snage kao funkcija koeficijent vršne brzine sa i bez vrtloženja traga [12]

4.34

—

4.35

Snaga koju je potrebno dobiti odabranim rotorom iznosi 3 MW te sa svim prethodno navedenim gubiticima potrebni radijus rotora iznosi

$$R=48,5067 \text{ m}$$

4.5 Raspodjela duljine tetive

Vjetroturbina promjenjive brzine rotacije može održavati optimalni koeficijent vršne brzine potreban za maksimalni koeficijent snage bez obzira na brzinu nastrujavanja.

Pomoću BEM teorije izračunata je raspodjela duljina tetive za optimalan rad preko koeficijenta vršne brzine, relativnog radijusa r , induksijskog faktora a i tangencijalnog induksijskog faktora a' [14].

a' za optimalan rad može se izraziti kao

$$\text{-----} \tag{4.36}$$

S obzirom da se radi o idealnoj tetivi, koeficijent otpora je zanemaren.

Raspodjela duljina tetive (idealna c_{id}) po rasponu dobiva se sljedećim izrazom

$$\text{-----} \tag{4.37}$$

Kada se uvrste vrijednosti za optimalne induksijske faktore (a -) dobije se sljedeći izraz

$$\text{-----} \tag{4.38}$$

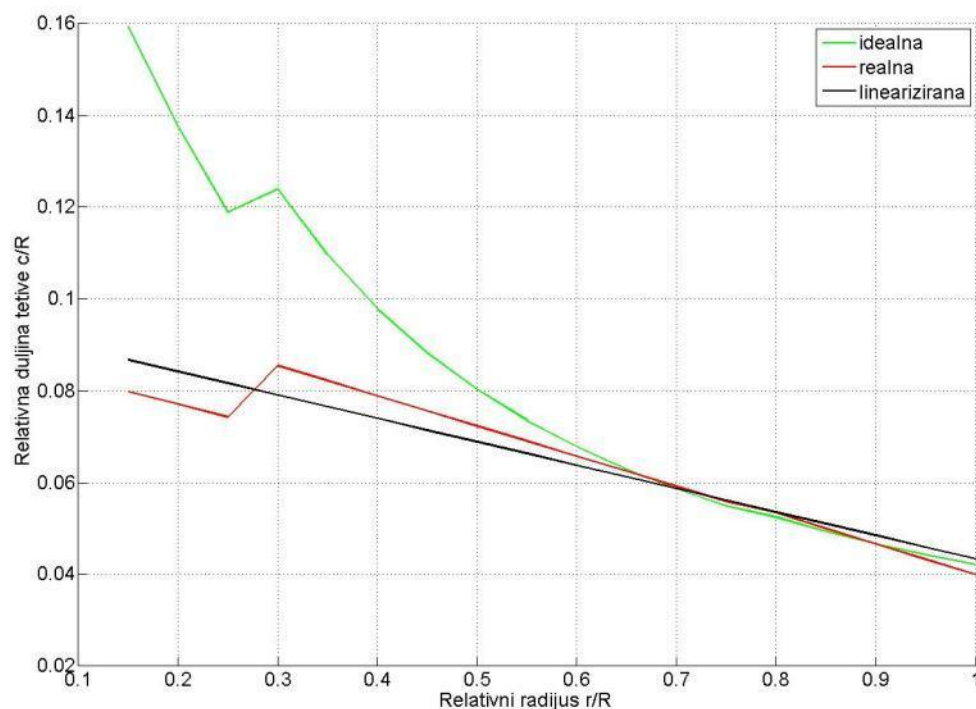
Na slici (Slika 4.8) prikazana je izračunata raspodjela duljina tetive po rasponu lopatice. S obzirom da je ovakva raspodjela učinkovita, ali vrlo kompleksna i skupa za izradu geometrija se može pojednostaviti. Ako se pretpostavi linearno suženje lopatice, raspodjela duljina tetiva može se linearizirati pravcem [14] prema jednadžbi

$$\text{-----} \tag{4.39}$$

Ovakvom raspodjelom duljina tetive (realna c_r), geometrija je pojednostavljena, a masa lopatice je smanjena jer je odstranjen veliki dio materijala uz korijen.

S obzirom da je lopatica građena od nekoliko različitih aeroprofila, kako bi se izbjegle skokovite promjene duljina tetiva, lopaticu je potrebno dodatno linearizirati. Linearizacija je provedena metodom najmanjih kvadrata kroz sve točke i dobivena je konačna raspodjela duljina tetiva c_{rlin} .

Na dijagramu (Slika 4.8) prikazane su idealna, realna i linearizirana raspodjela tetiva.



Slika 4.8 Raspodjela relativnih duljina tetiva po rasponu

4.6 Raspodjela kuta uvijanja

Nagib struje (kut nagiba struje eng. *inflow angle*) također se mijenja po rasponu. Prema slici (Slika 4.4) može se izračunati kao

$$\frac{\dots}{\dots}$$

4.40

Uvrste li se indukcijski faktori za optimalni rad izraz postaje

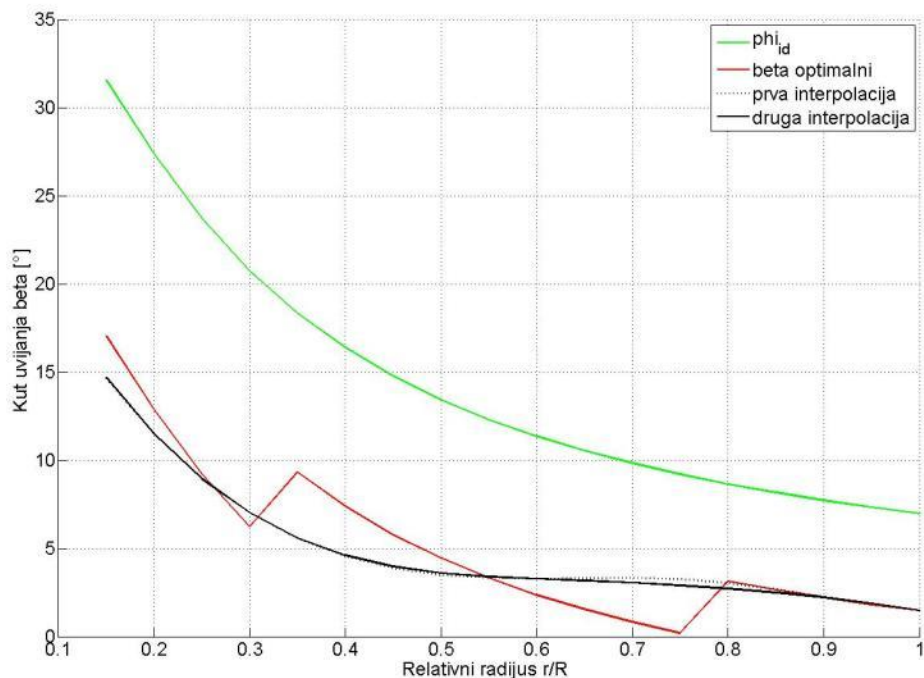
$$\frac{\dots}{\dots}$$

4.41

Blizu korijena nagib struje vrlo je velik što može uzrokovati slom uzgona. Da bi koeficijent otpora bio minimalan, potrebno je konstruirati lopaticu s kutom uvijanja β koji će osigurati optimalni napadni kut za odabrane profile.

4.42

Dijagram na slici (Slika 4.9) prikazuje izračunatu raspodjelu kuta nagiba struje po radijusu i optimalni kut uvijanja. Napadni kutovi pri kojima su omjeri koeficijenta uzgona i otpora maksimalni, variraju od profila do profila te dobivena raspodjela kuta uvijanja nije kontinuirana. Lopatica bi u tom slučaju imala diskontinuiranu površinu i tehnološki bila bi vrlo zahtjevna. Da bi se dobila glatka krivulja, izvršena je dvostruka interpolacija kutova uvijanja. Obje interpolacije prikazane su također na slici (Slika 4.9).



Slika 4.9 Raspodjela kuta uvijanja po rasponu

U tablici (Tablica 4.4) dane su vrijednosti izračunatih relativnih duljina tetiva u odnosu na radijus i kutova uvijanja.

Tablica 4.4 Izračunate relativne duljine tetiva i kutovi uvijanja

| Profil | Relativni radijus r/R | Relativna duljina tetive c_{rlin}/R | Kut uvijanja [°] |
|----------------|-------------------------|---------------------------------------|------------------|
| FX-77-W-343 | 0.15 | 0.08682 | 14.7014 |
| | 0.2 | 0.084298 | 11.4724 |
| | 0.25 | 0.081778 | 8.9362 |
| FX-77-W-258 | 0.3 | 0.079257 | 7.0058 |
| | 0.35 | 0.076737 | 5.5943 |
| | 0.4 | 0.074216 | 4.6147 |
| | 0.45 | 0.071696 | 3.9801 |
| | 0.5 | 0.069175 | 3.6036 |
| | 0.55 | 0.066655 | 3.3982 |
| | 0.6 | 0.064133 | 3.2769 |
| | 0.65 | 0.061614 | 3.1656 |
| | 0.7 | 0.059092 | 3.0416 |
| | LS(1)-0421 MOD | 0.75 | 0.056573 |
| 0.8 | | 0.054051 | 2.7147 |
| LS(1)-0417 MOD | 0.85 | 0.051531 | 2.4918 |
| | 0.9 | 0.049012 | 2.2158 |
| | 0.95 | 0.04649 | 1.8766 |
| LS(1)-0413 MOD | 1 | 0.043971 | 1.4643 |

5 Proračun snage

Proračun snage izvršen je BEM metodom.

Izračunati koeficijent snage iznosi $C_p = 0,366$.

S tim koeficijentom snage i rotorom promjera 48,5067 m dobivena snaga iznosi

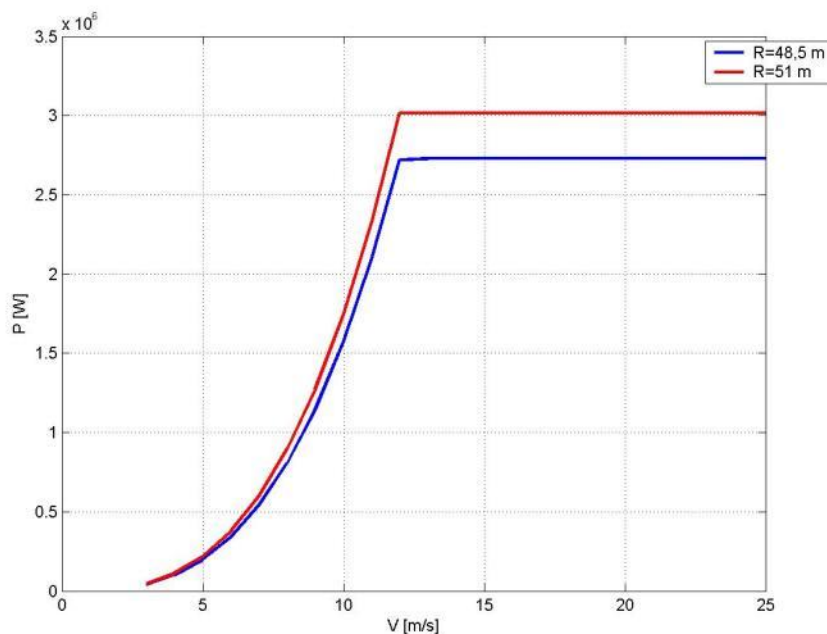
$$P=2,7288 \text{ MW}$$

Za ostvarivanje željene snage potrebno je povećati polumjer rotora na $R=51$ m. S tim polumjerom rotora dobivena snaga iznosi

$$P=3,0165 \text{ MW}$$

S novom duljinom lopatice određena je i konačna geometrija lopatice odnosno duljine tetiva.

Na slici (Slika 5.1) dana je usporedba snaga dobivenih s dvije različite duljine lopatica. Pretpostavljene brzine rada su početna od $V_{\text{cut-in}} = 3$ m/s, nazivna brzina $V_{\text{rated}} = 12$ m/s i krajnja operativna brzina $V_{\text{cut-out}} = 25$ m/s.



Slika 5.1 Krivulja snage u ovisnosti o brzini

6 Kontrola opterećenja i strujanja

U zadnjih nekoliko desetljeća globalni trendovi pokazuju da od svih obnovljivih izvora energije, energija vjetra bilježi najbrži rast kako ukupne instalirane snage tako i snage pojedinih vjetroagregata. Trenutačno najveća instalirana vjetroturbina ima rotor promjera 127 m (Enercon E-126, 7,5 MW). Može se reći da masa lopatice raste s kubom duljine lopatice, dok dobivena snaga raste s kvadratom duljine lopatice.

Da bi se smanjila cijena cijelog vjetroagregata po kWh, razvoj je usmjeren na poboljšavanje performansi, smanjenje ukupne mase, produljenje životnog ciklusa, razvoj materijala, poboljšanje geometrije lopatice i smanjenje opterećenja vjetroturbine. Smanjenje troška izrade lopatice utječe na cijenu električne energije, ali u malom postotku s obzirom na cijeli sustav. Međutim, ako je lopatica konstruirana tako da se smanjuju opterećenja, ukupni troškovi će se smanjiti jer manje opterećenje rotora znači i manje opterećenje ostalih komponenti poput pogonskog sustava i tornja čime se produljuje njihov životni ciklus.

Postoje dvije vrste metodologije kontrole opterećenja lopatice. To su aktivna i pasivna kontrola i principi obaju koncepata primijenjeni su na moderne vjetroturbine.

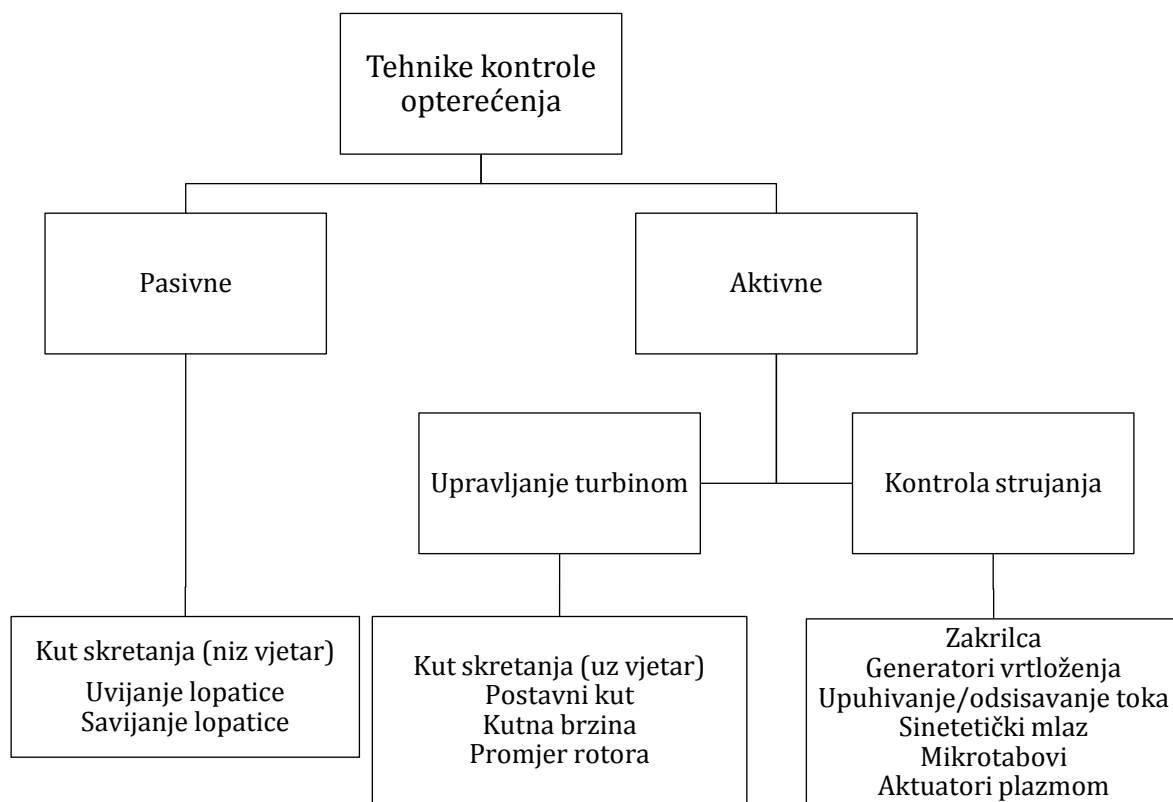
Pasivne metode kontrole koriste se za poboljšanje ukupnih performansi turbine, smanjenje opterećenja i naprezanja konstrukcije s ciljem povećanja dobivene snage bez dodatnog utroška energije.

Tehnike koje se koriste su sustav slobodnog skretanja rotora, aeroelastična sprega te različite metode za kontrolu strujanja poput generatora vrtloženja, žljebastih ljuski (eng. *riblets*), traka za slom uzgona (eng. *stall strips*), Gurney zakrilca, nazubljenih izlaznih ivica i posebno dizajniranih aeroprofila. Metode kontrole aeroelastičnom spregom još se istražuju.

Metode aktivne kontrole koriste se kako bi se rotor prilagodio naletima vjetra, promjenama smjera vjetra i velikim turbulencijama. U sustav moraju biti integrirani senzori kako bi se na temelju izmjerenog stvarnog stanja mogle prilagoditi geometrija i aerodinamičke karakteristike lopatice i time promijeniti opterećenja na rotoru.

Povećanje izlazne snage vjetroturbine mora biti toliko da može nadoknaditi dodatni utrošak energije potreban za pokretanje sustava aktivne kontrole kao i povećane troškove izrade i održavanja.

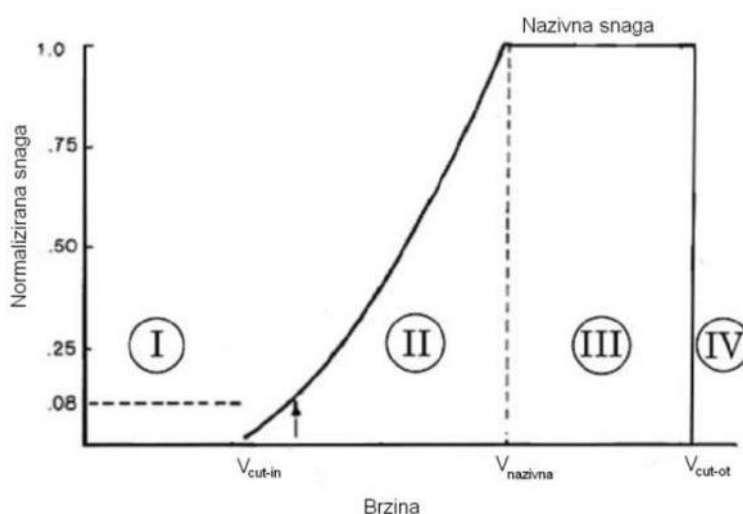
Aktivnom kontrolom mogu se mijenjati napadni kut, brzina opstrujavanja, veličina lopatice, a aerodinamičke karakteristike podešavaju se izmjenom oblika, upuhivanjem u ili odsisavanjem graničnog sloja i drugim tehnikama kontrole optjecanja. Aktivno upravljanje kutom skretanja, promjenjiva brzina rotacije, upravljanje zakretom lopatice i upotreba zakrilaca na lopaticama sastavni su dio modernih vjetroturbina.



Slika 6.1 Podjela tehnika kontrole opterećenja

6.1 Upravljanje turbinom

Do '90-tih na većini vjetroturbina primjenjivao se danski model kontrole opterećenja koji se temelji na kontroli slomom uzgona na rotorima s konstantnom brzinom vrtnje - povećanjem brzine vjetra povećava se sila otpora na lopatici i time ograničava dobivena snaga. Jednostavnost metode pridonijela je uspjehu danskog koncepta, ali kako su rasli promjeri rotora, ta metoda pokazala se ekonomski neisplativom. Današnje se moderne vjetroturbine vrte promjenjivom kutnom brzinom i gotovo sve za upravljanje i kontrolu koriste sustav kolektivnog zakreta lopatice. Na slici (Slika 6.2) prikazani su režimirada takve turbine.



Slika 6.2 Područja rada vjetroturbine s promjenjivom brzinom vrtnje

U režimu rada II lopatice imaju stalni postavni kut, a vjetroturbina se vrtila promjenjivom kutnom brzinom održavajući optimalni koeficijent vršne brzine. U režimu III rotor se okreće gotovo konstantnom brzinom, a lopatice se zakreću održavajući okretni moment unutar prihvatljivih granica. Uvođenjem ovog sustava ne samo da je omogućena regulacija snage, već je olakšana konstrukcija lopatice radi manjih sila i smanjen je reduktor radi manjih momenata.

Međutim, problemi se javljaju kod nepravilnog nastrujavanja zraka poput nagnutog rotora ili pod kutom skretanja, velikih turbulencija i naleta vjetra jer uslijed ekstremnih sila dolazi do pojačanog trošenja komponenti turbine i odziv sustava vrlo je spor. Za takva opterećenja potrebne su sofisticiranije metode poput cikličke i individualne promjene postavnog kuta lopatice, pasivnog i aktivnog uvijanja lopatice, promjenjivog promjera rotora i bilo kojeg sustava kontrole optjecanja.

6.2 Kontrola strujanja

Kontrola strujanja je kontrola optjecanja oko krila ili lopatice s ciljem poboljšanja aerodinamičkih karakteristika aeroprofila ili uzgonske površine i istražuje se za primjenu na zrakoplovima, helikopterima, plinskim i vjetroturbinama.

Općenito, kontrola strujanja vrši se kroz odgodu/poticanje tranzicije iz laminarnog u turbulentno strujanje, smanjenje/povećanje turbulencije ili za sprječavanje/razvijanje separacije toka. Posljedice mogu biti smanjenje otpora, povećanje uzgona, poboljšanje prijenosa topline i smanjenje aerodinamičke buke. Metode kontrole strujanja mogu biti pasivne i aktivne. U daljnjem tekstu dan je osvrt na aktivne metode s težištem na uređaje i aktuatore i njihov utjecaj na fenomene strujanja.

6.2.1 Aktivna kontrola strujanja

Uređaji za aktivnu kontrolu strujanja (u daljnjem tekstu AKS) ili „pametni“ uređaji moraju uključivati aktuatore i senzore raspoređene duž cijelog raspona lopatice i kontrolere sa ili bez povratne veze. Za primjenu na vjetroturbine najbolji su sustavi s povratnom vezom kako bi se mogle prepoznati promjene u lokalnim uvjetima strujanja i brzo reagirati da ne bi došlo do negativnog utjecaja na lopaticu. Kod vjetroturbina glavni zadatak je smanjiti vršna opterećenja i ublažiti zamor materijala. Zatvorena petlja također znači manju potrošnje energije i veću sigurnost.

Uređaji za AKS mogu se podijeliti u nekoliko kategorija prema „načinu rada“² (geometrijski ili strujni, plazma), prema lokaciji na profilu (napadna ivica, sredina tetive, izlazna ivica) i utjecaju na koeficijent uzgona (povećanje, smanjenje ili odgoda sloma uzgona). U tablici (Tablica 6.1) dana je kategorizacija različitih uređaja za AKS. Bitno je napomenuti da su svi uređaji još u fazi istraživanja te da niti jedan od navedenih uređaja nije testiran na realnom modelu. Neki od uređaja još nisu niti istraživani za primjenu na vjetroturbinama, već je njihova namjena za ugrađivanje na helikoptere ili bespilotne letjelice.

² utječe li se na strujanje promjenom geometrije ili unošenjem dodatnog mlaza u strujanje

Tablica 6.1 Kategorizacija uređaja za aktivnu kontrolu strujanja

| | Način rada | Lokacija na profilu | Utjecaj na C_L |
|---|---|---|---|
| | Geometrijski (G) Strujni (S) Plazma (P) | Napadna ivica (LE) Izlazna ivica (TE) Sredina tetive (MC) | Povećanje (I) Smanjenje (D) Odgoda sloma uzgona (SU) |
| Tradicionalna zakrilca | G | TE | I/D |
| Netradicionalna zakrilca | G | TE | I/D |
| Mikrozakrilca | G | TE | I/D |
| Minijaturni TE efektori | G | TE | I/D |
| Mikrotabovi | G | TE | I/D |
| Trake za slom uzgona | G | LE | D |
| Generatori vrtloženja | G | LE | SU |
| Upuhivanje/odsisavanje toka | F | LE/TE | SU |
| Kontrola cirkulacije | F | TE | I/D |
| Aktuatori plazme | P | LE | SU |
| Mlazovi za generiranje vrtloženja | F | LE | SU |
| Visokofrekventni generatori mikro vrtloga | G | LE | SU |
| Sintetički mlaz | G/F | LE | SU |
| Aktivna fleksibilna stijenka | G | LE | SU |
| Aeroprofil promjenjivog oblika | G | MC | I |

Režim rada vjetroturbina uglavnom je u linearnom području krivulje uzgona stoga su najzanimljivije metode za primjenu one kojima se povećava ili smanjuje koeficijent uzgona, a s obzirom na jednostavnost tehnologije prednost imaju „geometrijski“ uređaji.

6.2.1.1 Zakrilca

Tradicionalna zakrilca poput onih na zrakoplovima koriste se kod vjetroturbina za kontrolu opterećenja i aerodinamičko kočenje. Kao i kod zrakoplova, rad zakrilca ovisi o krutosti lopatice. Kod torzijski krutih lopatica, pozitivnim otklonom zakrilca (prema donjaci) povećava se koeficijent uzgona, a negativnim koeficijent uzgona se smanjuje. Kod elastičnih lopatica, pozitivan otklon zakrilca rezultirat će dodatnim momentom propinjanja koji će uvinuti nos lopatica prema dolje (odnosno prema donjaci) pri čemu će se smanjiti napadni kut, a time i ukupne sile. Negativan otklon zakrilca ima obrnuto djelovanje odnosno povećava napadni kut.

Kod upotrebe tradicionalnih zakrilaca na vjetroturbinama javlja se nekoliko problema. Sustav za njihovo pokretanje je kompleksan, iziskuje puno snage i ima spori odziv. Da bi zakrilca imala potreban učinak, trebaju biti vrlo velika. Osim dodatne mase, povećanjem dimenzija zakrilaca raste i razina buke koju uzrokuju.

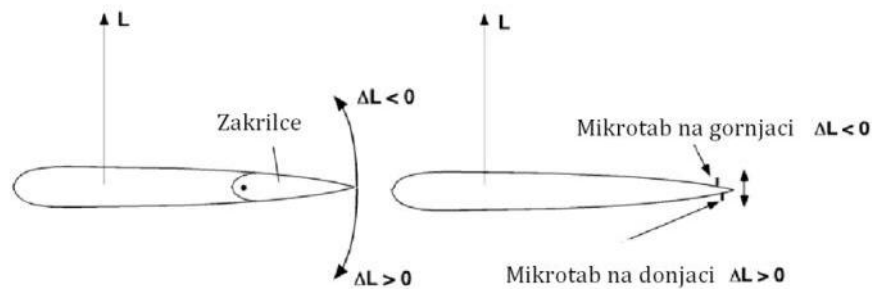
Radi toga razvijaju se nove vrste zakrilaca koje koriste moderne tehnologije poput piezoelektričnih i „pametnih“ materijala. Ta netradicionalna zakrilca su lagana, brzog odziva i zauzimaju puno manju površinu u odnosu na ukupnu površinu lopatice. Kompaktna zakrilca (eng. *compact trailing edge flaps*) istražuju se za primjenu na helikopterima za smanjenje vibracija, prilagodljiva krila (eng. *adaptive compliant wing* ili *morphing wing*) za zrakoplove visokih performansi, a prilagodljiva zakrilca (eng. *adaptive trailing edge geometry*, u daljnjem tekstu ATEG) istražuju se za primjenu na vjetroturbinama.

ATEG zakrilca koriste piezoelektrične aktuatora i smještena su duž raspona lopatice s mogućnosti kutova rotacije -3° $+1,8^{\circ}$. Odziv sustava je vrlo brz, a zakrilca se mogu zakretati neovisno jedna o drugima s efektom istim kao kod tradicionalnih elastičnih zakrilaca.

6.2.1.2 Mikrotabovi

Mikrotabovi su mali uređaji reda veličine graničnog sloja koji se postavljaju normalno ili približno normalno na površinu lopatice. Njihovom aktivacijom (izvlačenjem iz tijela lopatice) mijenjaju se zakrivljenost tog dijela lopatice i rubni uvjeti na izlaznoj ivici što rezultira promjenom aerodinamičkih karakteristika. Mikrotabovi se mogu koristiti za poboljšavanje performansi vjetroturbine ili smanjenje vršnih opterećenja, ovisno o površini (donjaka ili gornjaka) na koju se postavljaju. Za aktuatora istraživani su različiti mehanički sustavi povezivanja, ali elektro-mehanički sustav akcije pomoću „pametnih“ legura (eng. *shape memory alloys*) pokazao se najprikladnijim.

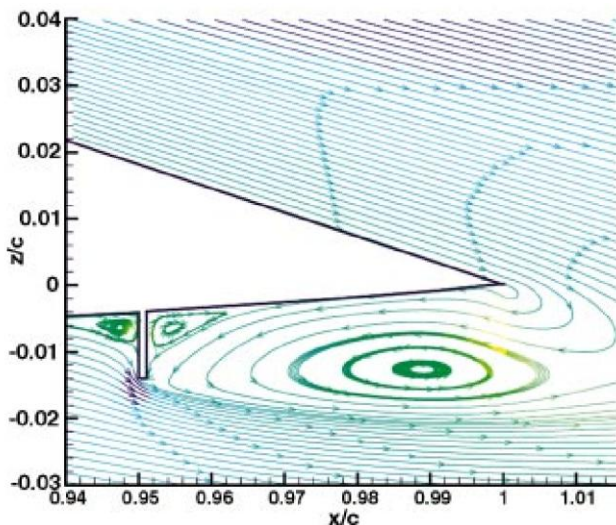
Glavne prednosti mikrotabova su mala energija potrebna za akutatore, brz odziv, jednostavnost i laka integracija u postojeću tehnologiju.



Slika 6.3 Usporedba otklona zakrilca s duljinom izvačenja miktrotaba

6.2.1.2.1 Mikrotabovi na pretlačnoj strani

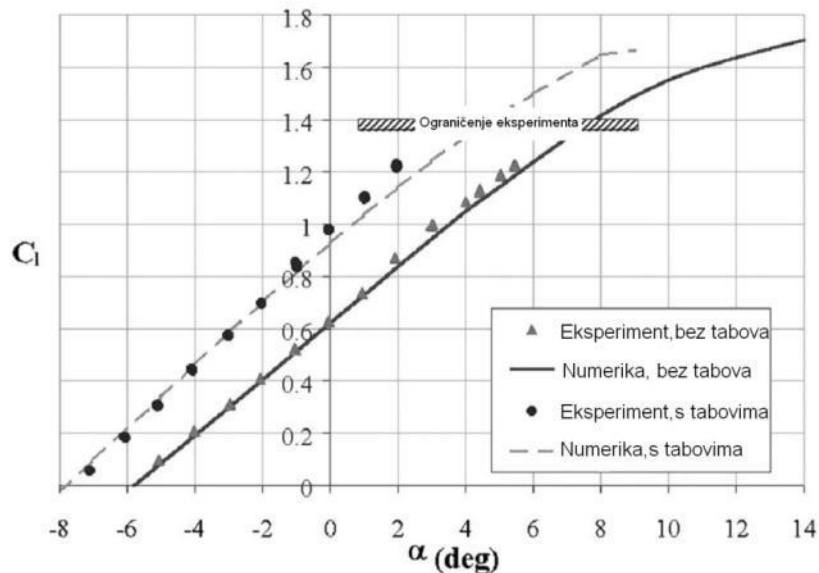
Kada se koriste na donjaci lopatice, mikrotabovi utječu na povećanje koeficijenta uzgona.



Slika 6.4 Strujnice oko izlazne ivice za profil s mikrotabom, $h/c=0.01$, $Re=1 \times 10^6$, $\alpha=0^\circ$

Na slici (Slika 6.4) prikazane su strujnice oko izlazne ivice profila s mikrotabovima visine 1% tetive ($h/c=0.01$) postavljenih na 95% tetive ($x/c=0.95$). Na slici se jasno vidi da se točka odvajanja strujanja pomaknula s izlaznog ruba na rub mikrotaba. Tim pomakom mijenja se zakrivljenost profila i značajno mijenja ukupno strujanje oko profila bez velikih promjena same geometrije. Numeričkom analizom predviđeno je povećanje koeficijenta uzgona od 30-50%, a rezultati su potvrđeni eksperimentom (Slika 6.5).

S obzirom na povećani koeficijent uzgona, režim rada vjetroturbine može se pomaknuti prema manjim brzinama vjetra koje se inače smatra energetski nezanimljivim i time povećati proizvodnju električne energije.



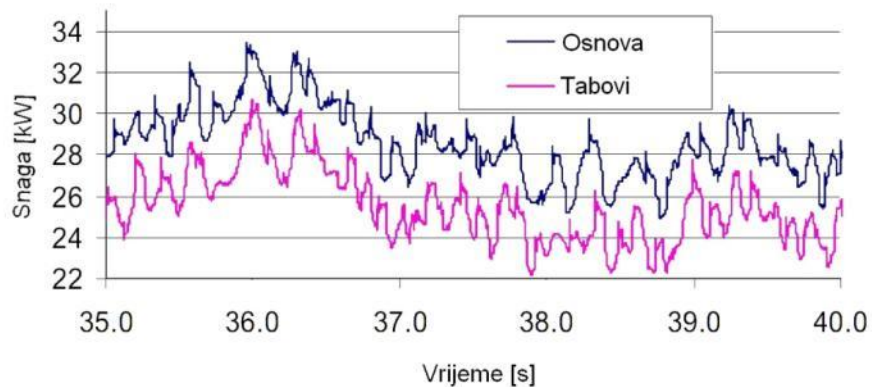
Slika 6.5 Usporedba eksperimentalne i numeričke učinkovitosti tabova, $Re=1 \times 10^6$, $x/c=0.95$, $h/c=0.01$ [29]

Ispitivanja su još pokazala da se optimalni rezultati mogu dobiti mikrotabovima duljine 1% tetive smještenih na 5% tetive od izlaznog ruba s razmakom između pojedinih tabova duljine 0.5 h [29].

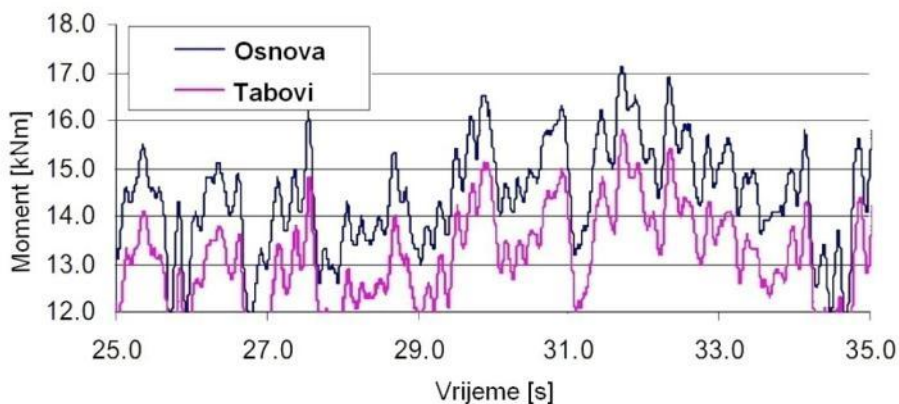
6.2.1.2.2 Mikrotabovi na potlačnoj strani

Postavljanje mikrotabova na gornjaku lopatice ima povoljan utjecaj na smanjenje opterećenja lopatice.

Na slikama (Slika 6.6 i Slika 6.7) prikazani su rezultati ispitivanja utjecaja mikrotabova na vjetroturbinu sa sustavom upravljanja slomom uzgona [31].



Slika 6.6 Usporedba dobivene snage sa i bez tabova, brzina vjetra 8 m/s [31]

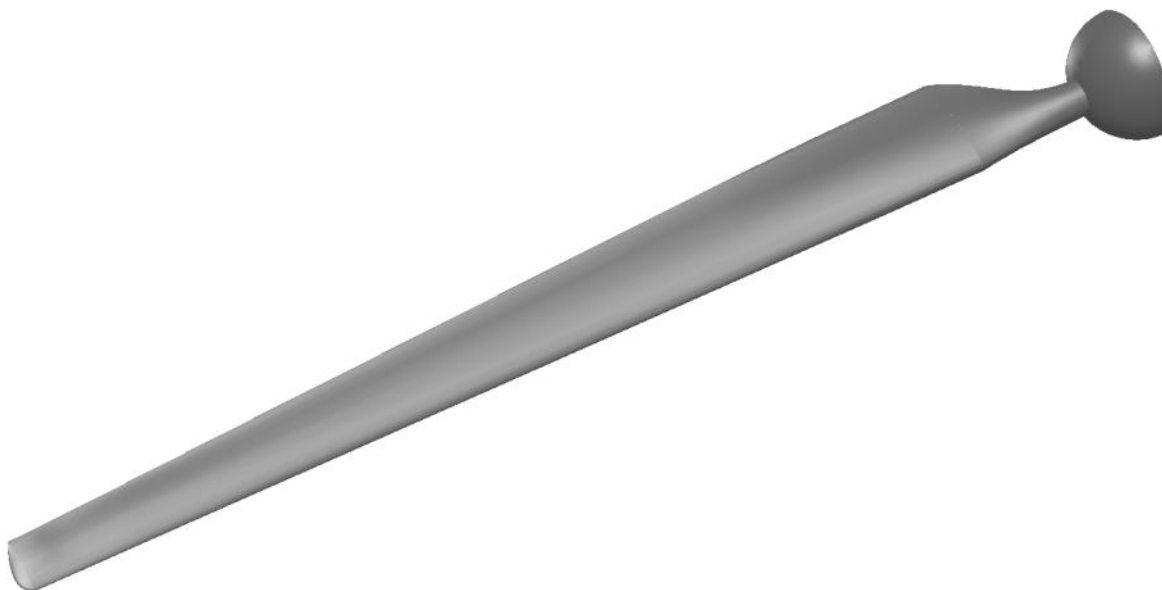


Slika 6.7 Usporedba momenta savijanja sa i bez tabova, brzina vjetra 8 m/s [31]

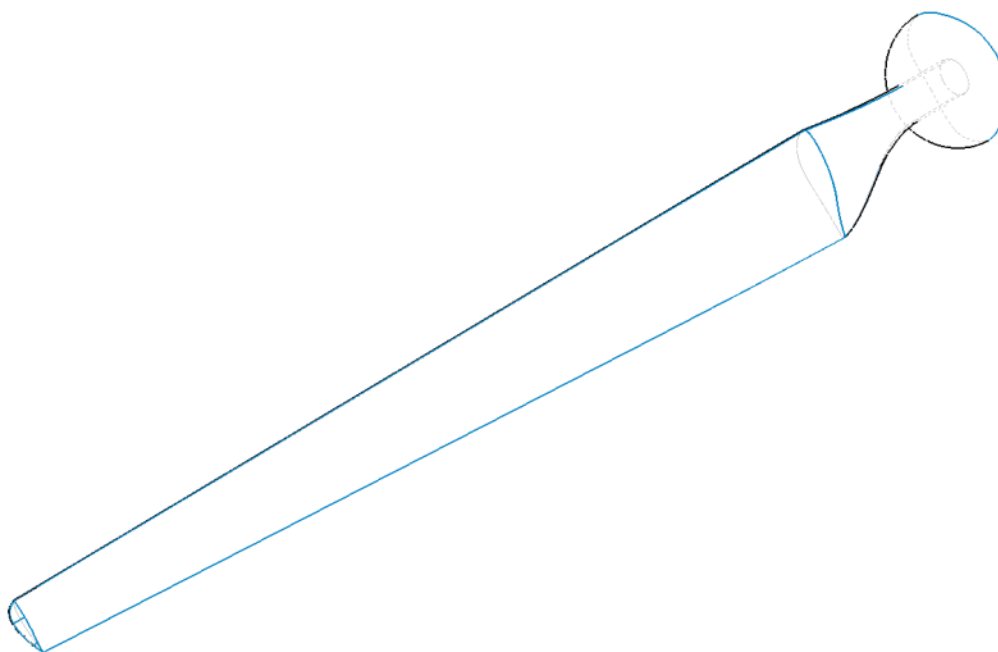
Mikrotabovi se mogu koristiti zajedno s upravljanjem postavnim kutom lopatice. Pri tome se sustav zakretanja lopatice može koristiti za upravljanje proizvodnjom energije dok se mikrotabovi mogu koristiti za smanjenje visokofrekventnih opterećenja uzrokovanih velikim turbulencijama i naletima vjetra.

7 3D model lopatice

Na temelju izračunate geometrije lopatice napravljen je 3D model u programu Gambit. U prilogu je dan crtež lopatice s izmjerama.



Slika 7.1 Izometrija, vidljiva donjaka



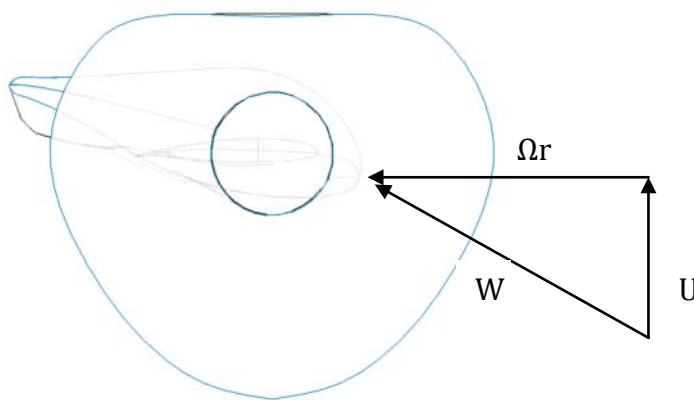
Slika 7.2 Izometrija, „žičani“ prikaz



Slika 7.3 Pogled na napadnu ivicu



Slika 7.4 Pogled na izlaznu ivicu



Slika 7.5 Pogled iz korijena s vektorom brzina

8 Numerička provjera strujanja

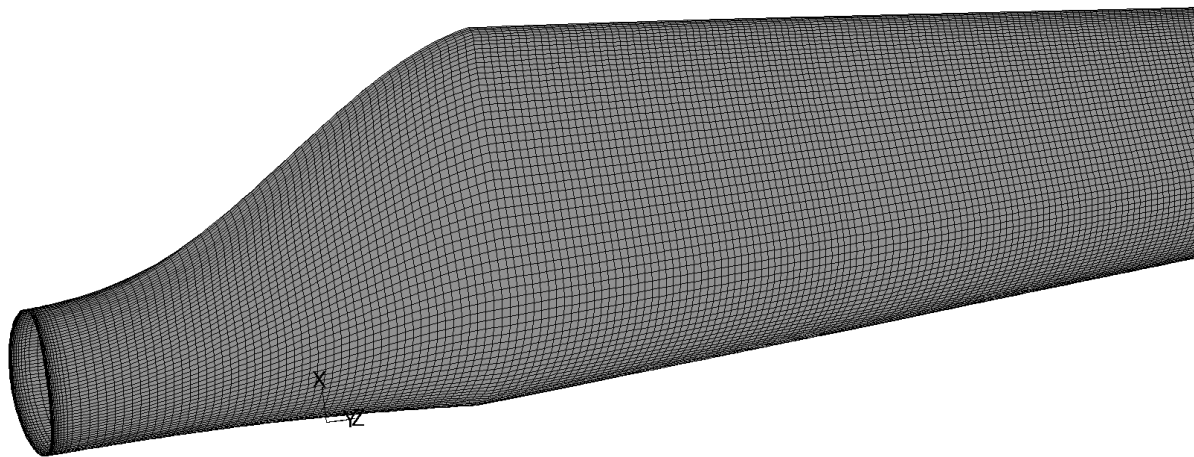
Za numeričku simulaciju strujanja oko lopatice korišten je program Fluent.

Za simulaciju je korišten RANS model turbulencije zbog fizikalnih karakteristika strujanja. Model turbulencije je SST – k- ω , 6,2 milijuna kontrolnih volumena. Ulazna brzina je 12 m/s s intezitetom turbulencije I=1%.

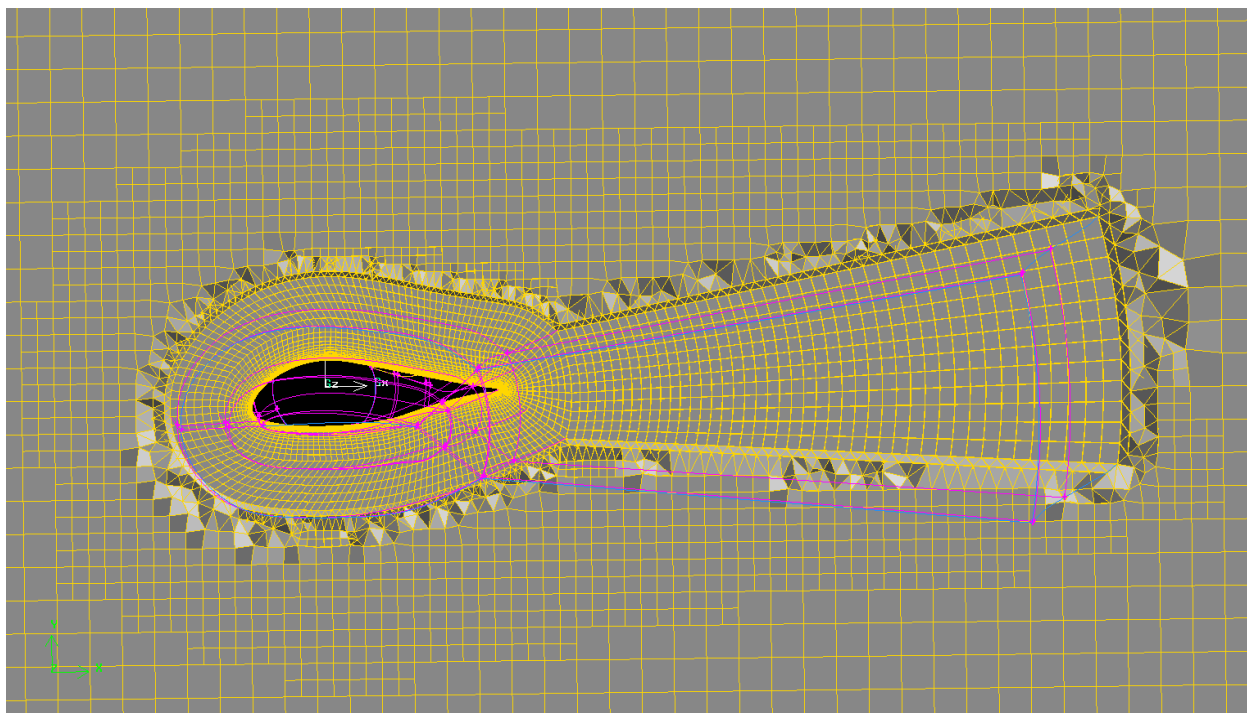
Svojstva zraka su $\rho = 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, $\mu = 1,7984 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s}$

Reynoldsov broj iznosi

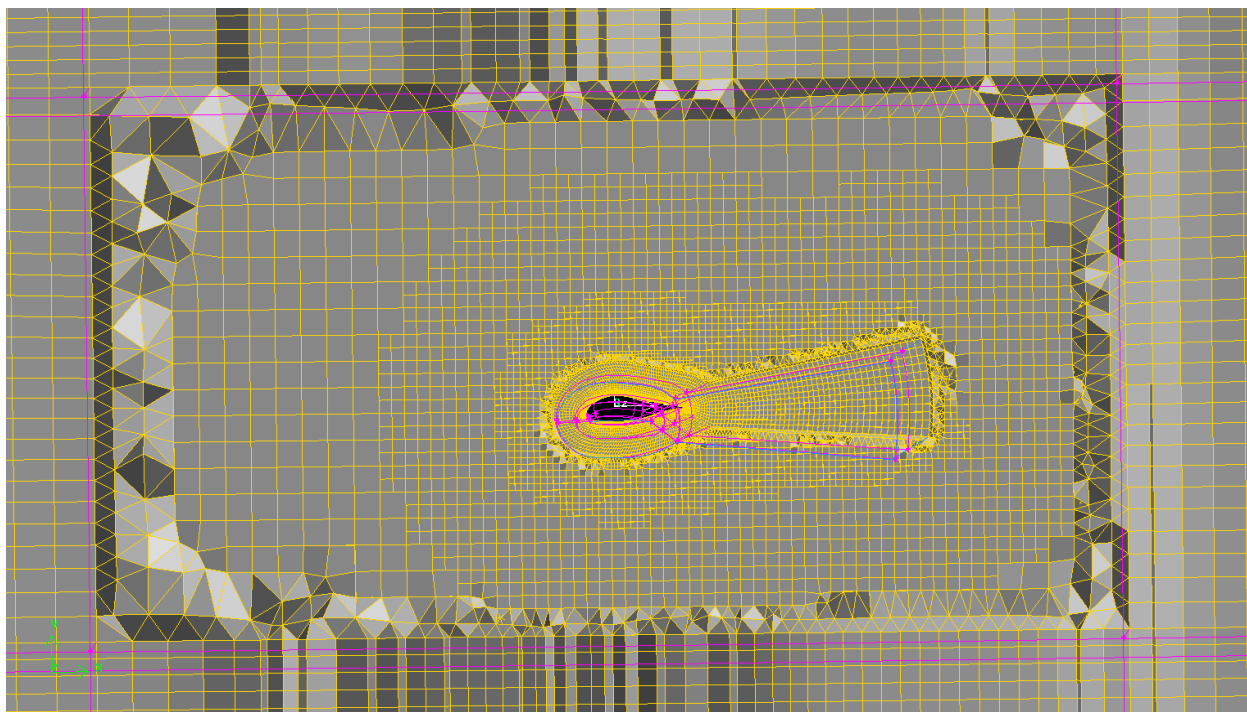
Mreža je izgrađena od poliedarskih elemenata, heksaedara i tetraedara. Na modelu je dominantna heksagonalna nestrukturirana mreža. Oko profila uz samu površinu je strukturirana mreža, veličine elemenata 0.1m x 0.1 m, debljine 1 mm.



Slika 8.1 Strukturirana mreža lopatice



Slika 8.2 Miješana poliedarska nestrukturirana 'hex-core' mreža

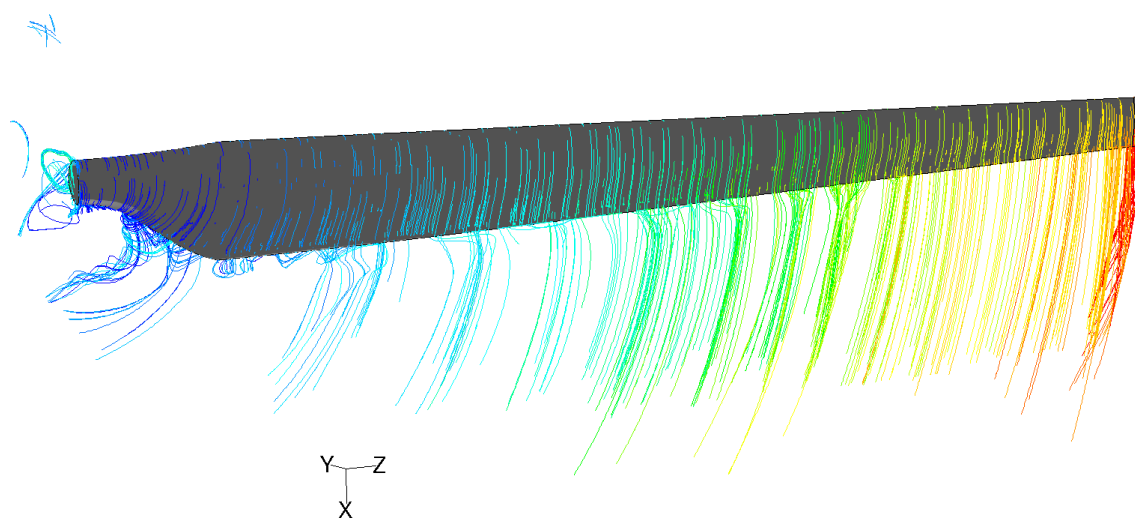


Slika 8.3 Heksaedarska nestrukturirana mreža na periferiji

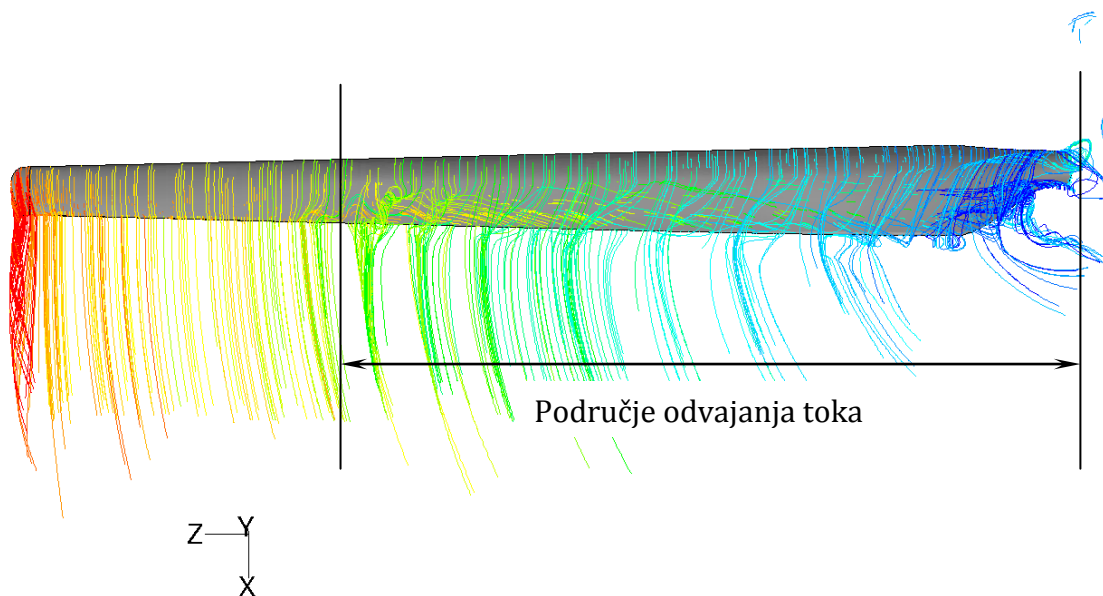
8.1 Rezultati analize

Numerička analiza strujanja pokazala je da se na potlačnoj strani lopatice (gornjaci) javlja odvajanje strujanja. Na vrhu lopatice dolazi do vrtloženja, a i korijen lopatice je problematičan.

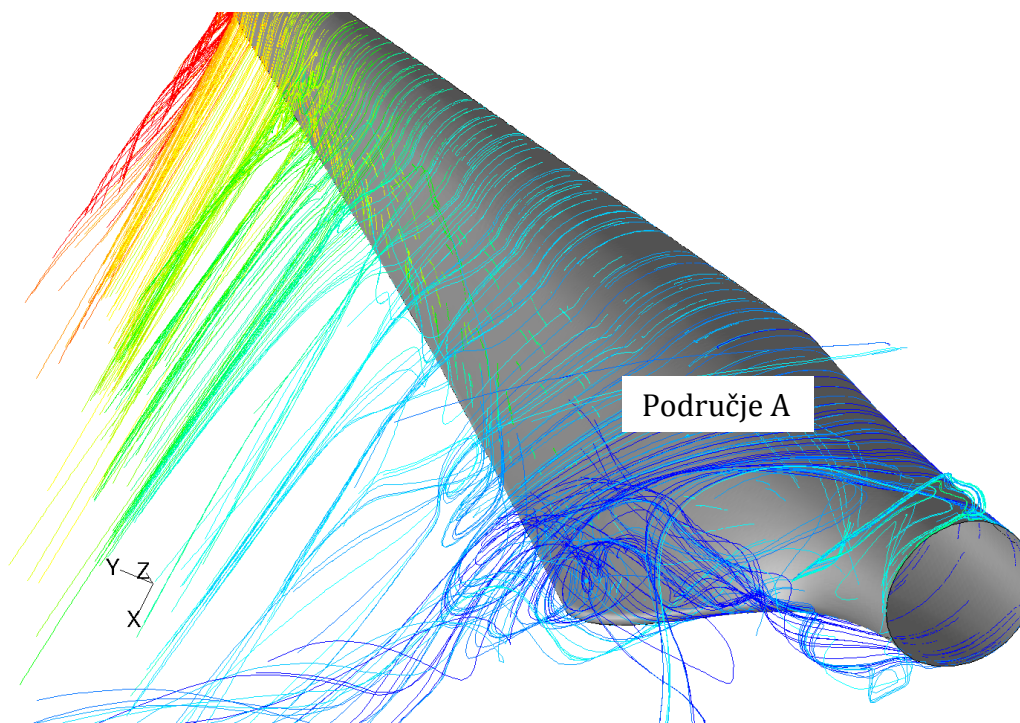
Na slikama (Slika 8.4 i Slika 8.5) prikazane su strujnice oko lopatice. Na donjaci je strujanje prema očekivanju, ali na gornjaci vidi se da se strujanje odvaja od korijena pa sve do 2/3 duljine. Na slici 8.6 označeno je područje velikog vrtloženja (Područje A).



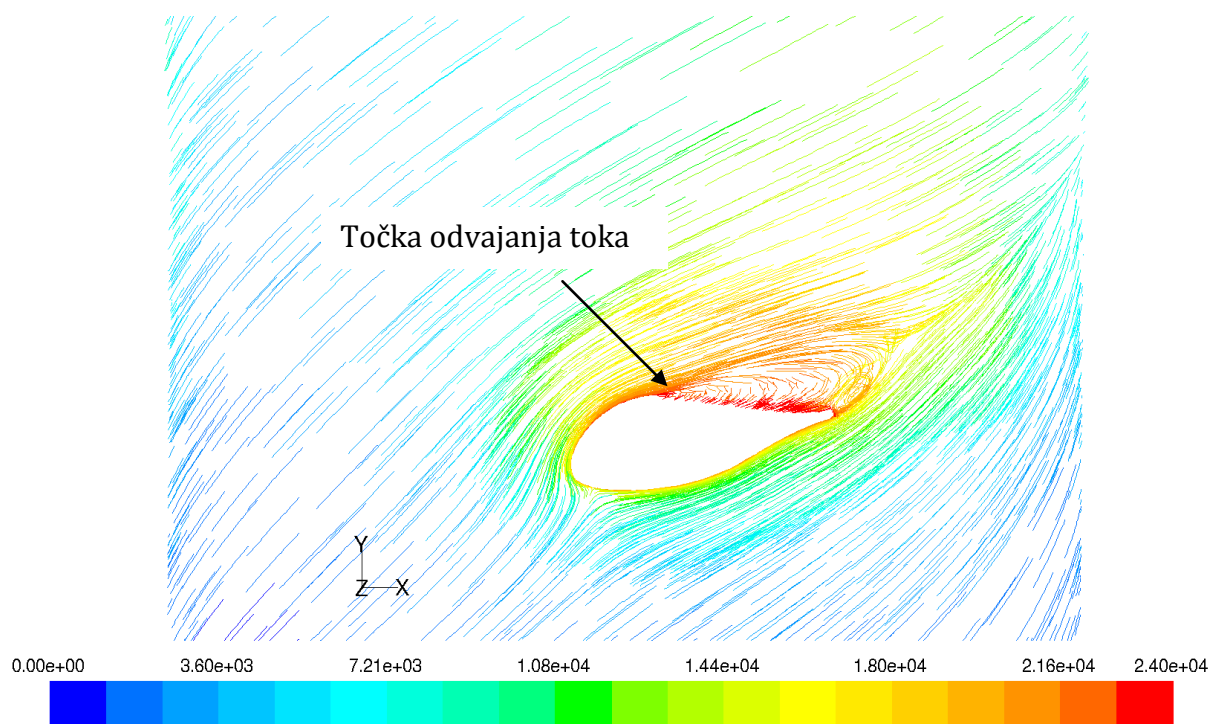
Slika 8.4 Prikaz strujanja oko donjake lopatice



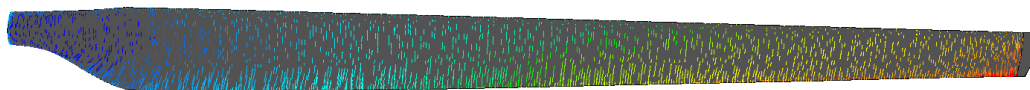
Slika 8.5 Prikaz strujanja oko gornjake lopatice



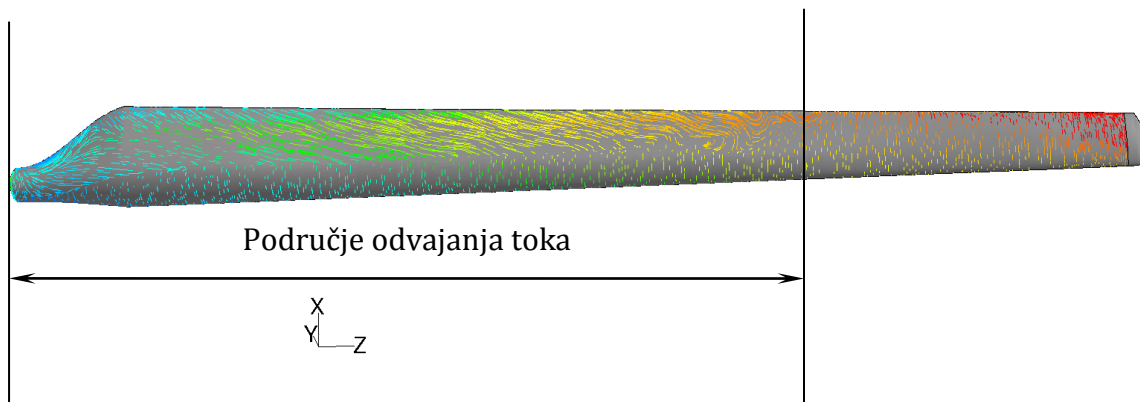
Slika 8.6 Detalj oko korijenskog dijela lopatice



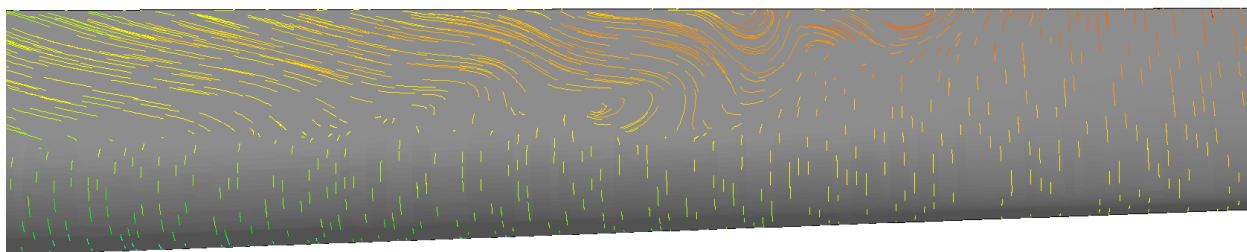
Slika 8.7 Prikaz odvajanja struje na gornjaci lopatice, R=10 m



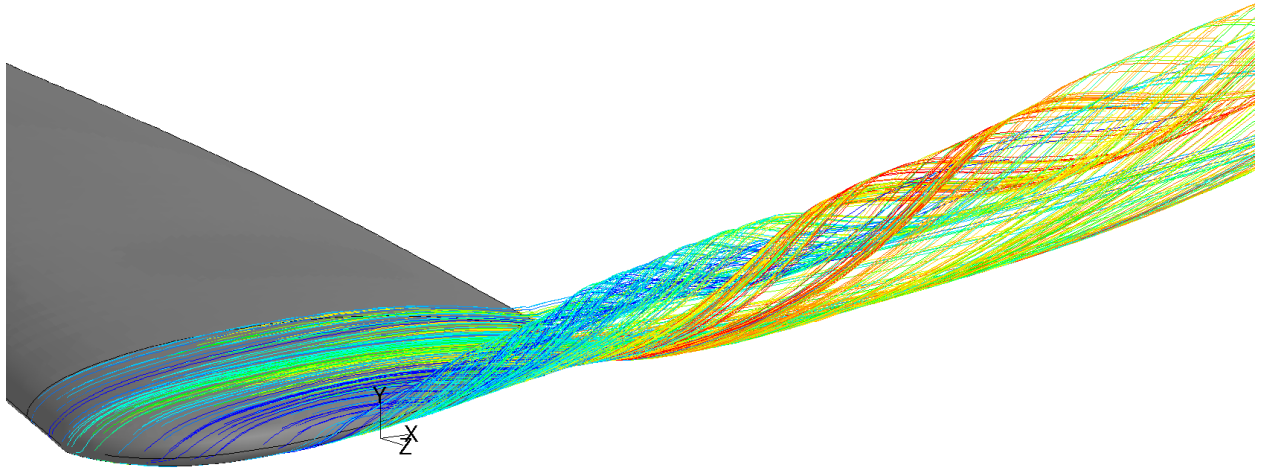
Slika 8.8 Prikaz strujnica na donjaci lopatice



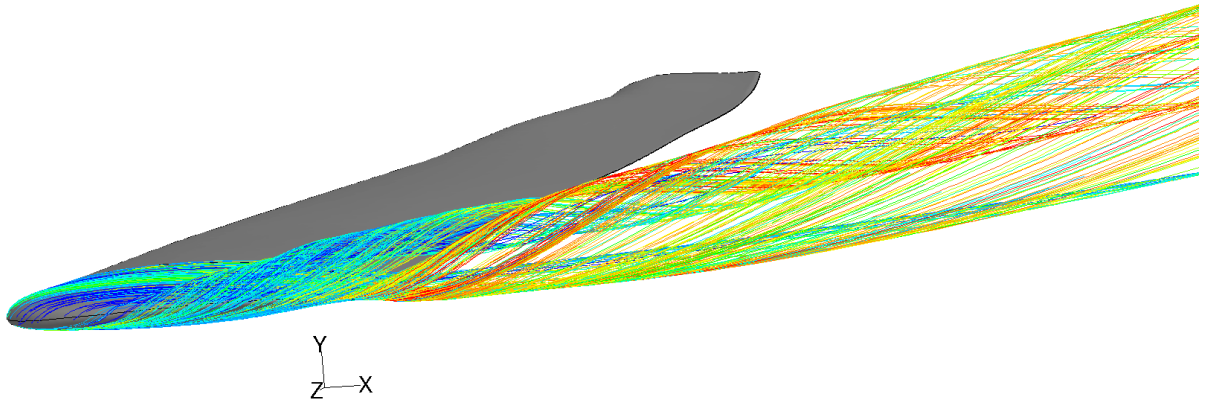
Slika 8.9 Prikaz strujnica na gornjaci lopatice



Slika 8.10 Prikaz strujnica na donjaci lopatice, detalj



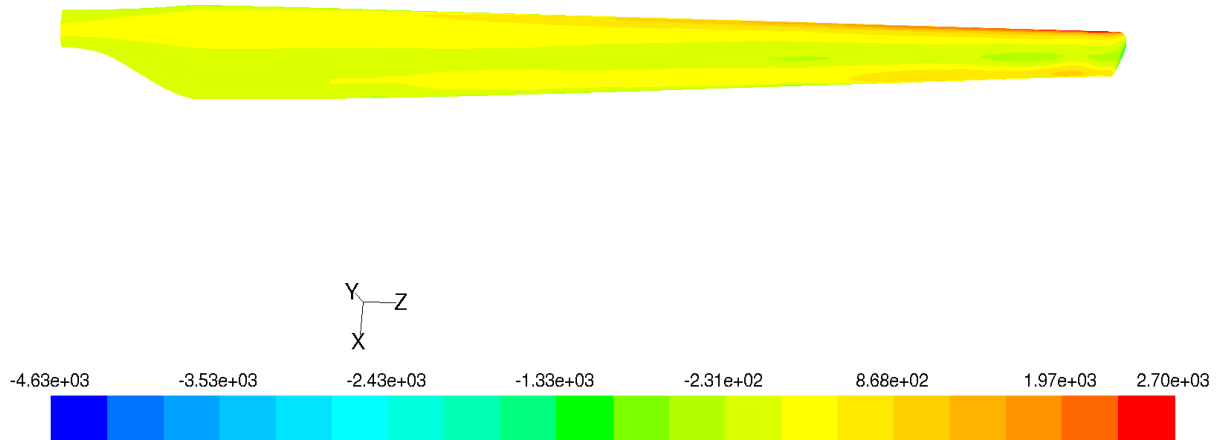
Slika 8.11 Prikaz vrtloženja na vrhu lopatice



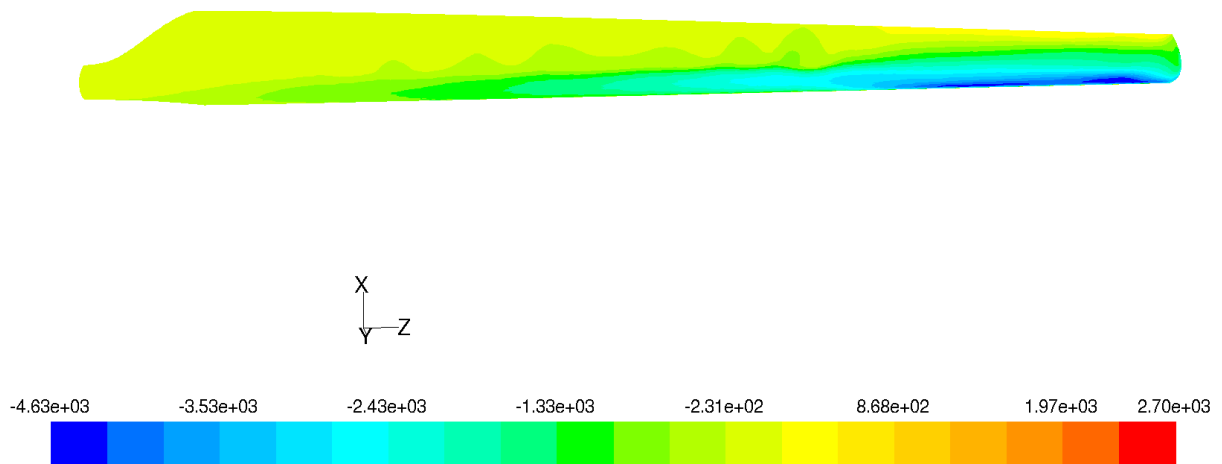
Slika 8.12 Prikaz vrtloženja na vrhu lopatice, pogled iz drugog kuta

Na slikama (Slika 8.11 i Slika 8.12) prikazano je vrtloženje na vrhu lopatice. Do vrtloženja dolazi uslijed prestrujavanja zraka s donjake na gornjaku lopatice. Da bi se spriječila ova pojava, kao rješenje nudi se upotreba „wingleta“.

Slike (Slika 8.13 i Slika 8.14) prikazuju raspodjelu tlaka na površinama lopatice. Na gornjaci lopatice lako je uočljivo kolebanje tlaka duž raspona. Također se može vidjeti da je podtlak na većem dijelu gornjake premali što ukazuje na odvajanje strujanja.

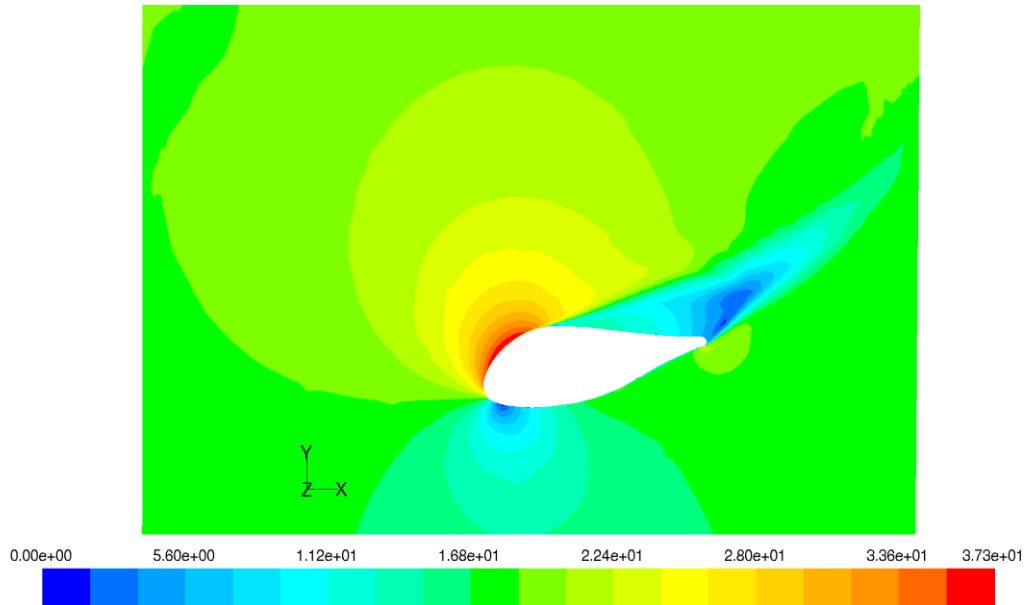
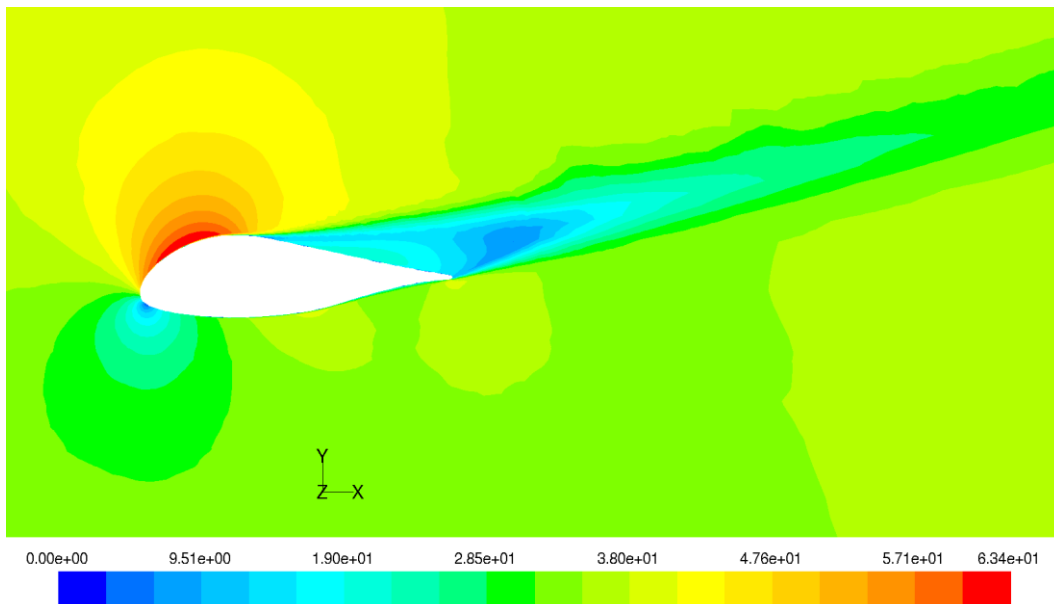


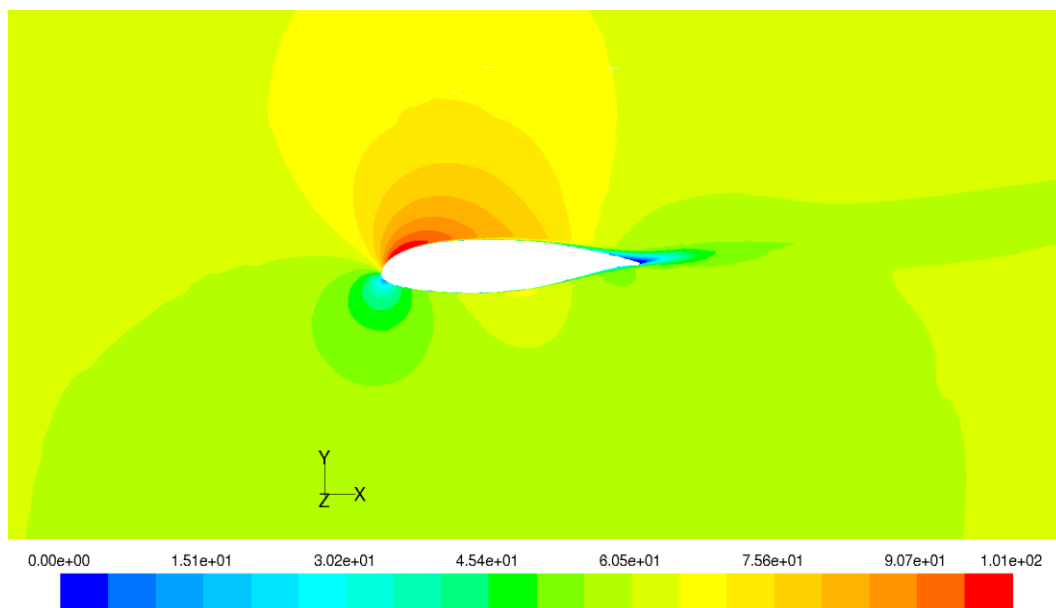
Slika 8.13 Raspodjela tlaka na donjaci lopatice



Slika 8.14 Raspodjela tlaka na gornjaci lopatice

Slike (Slika 8.15, Slika 8.16, Slika 8.17) prikazuju relativne brzine na rasponu od 10 m, 25 m i 45 m. U korijenskom dijelu lopatice ($R=10$ m) jasno je uočljiv naglo usporenje struje što je uzrokovano odvajanjem strujanja. Na sredini lopatice ta pojava još je prisutna dok je na vršnom dijelu lopatice strujanje priljubljeno uz površinu i do odvajanje dolazi tek kod same izlazne ivice.

Slika 8.15 Prikaz relativnih brzina, $R=10$ mSlika 8.16 Prikaz relativnih brzina, $R=25$ m

Slika 8.17 Prikaz relativnih brzina, $R=45$ m

Simulacija strujanja je pokazala da na velikom dijelu lopatice dolazi do odvajanja strujanja. Uzrok tome mogu biti premali kutovi uvijanja odnosno preveliki napadni kutovi. Analiza je napravljena za lopaticu s postavnim kutom od 0° .

Na gotovo $2/3$ duljine lopatice vrlo je izražen radijalni tok što je direktni gubitak jer taj tok ne pridonosi uzgonu.

Sljedeći korak trebala bi biti revizija geometrije i kutova uvijanja te ponovna simulacija strujanja.

9 Zaključak

U okviru diplomskog rada napravljen je predprojekt vjetroturbine s naglaskom na aerodinamiku rotora. Odabran je klasični tip vjetroturbine uzgonskog tipa s horizontalnom osi rotacije i 3 lopatice. Na temelju analitičkog proračuna određena je geometrija lopatice. Aeroprofilu su odabrani kako bi svojim karakteristikama najbolje odgovarali primjeni na vjetroturbinama.

Na lopatici je provedena numerička simulacija strujanja u svrhu provjere karakterističnih aerodinamskih parametara, tlaka i brzina. Simulacija je pokazala da na velikom dijelu lopatice dolazi do odvajanja strujanja te da je vrlo izražen radijalni tok što ukazuje na velike gubitke snage.

Uzrok tome mogu biti premali kutovi uvijanja odnosno preveliki napadni kutovi. Povećanjem postavnog kuta (analiza je napravljena za lopaticu s postavnim kutom od 0°) mogla bi se poboljšati slika strujanja.

Usporedba rezultata analitičkog proračuna i numeričke simulacije ukazuje na nekorektnost analitičke metode ponajviše što je zanemarena radijalna komponenta.

Potrebno je izvršiti reviziju analitičkog proračuna, uključiti radijalnu komponentu i vrtloženje toka i na temelju nove geometrije provesti numeričke simulacije.

Na tako dobivenu lopaticu s korektnim opstrujavanjem, mogu se uključiti sustavi kontrole optjecanja poput zakrilaca ili mikrotabova te usporediti dobivene koeficijente tlaka, uzgona i otpora.

10 Popis literature

- [1] HEP – OPS d.o.o. , <http://www.hep.hr/ops/hees/default.aspx>,
- [2] VE Ravna 1, <http://adriawindpower.hr/>
- [3] VE Trtar Krtolin, <http://energetika-net.com/oie/vijesti/637>
- [4] VE Velika Popina, <http://www.dalekovod.hr/>
- [5] Lista kandidata za dobivanje PEES za priključak vjetroelektrana na prijenosnu mrežu, HEP OPS d.o.o, 2007.
- [6] Vlada RH, Uredba o minimalnom udjelu električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije čija se proizvodnja potiče, NN br. 33., Zagreb, 2007.
- [7] Vlada RH, Uredba o dopunama i izmjenama Uredbe o minimalnom udjelu električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije čija se proizvodnja potiče, NN br. 8., Zagreb, 2011.
- [8] Sabor RH, Strategija energetskog razvoja Republike Hrvatske, NN br.130, Zagreb 2009.
- [9] Domazet, N., VE Vrataruša još bez svih suglasnosti, EGE 5/2010, str. 66.-68.
- [10] <http://www.windmillersgazette.com/history.html>
- [11] The European offshore wind industry key trends and statistics 2010, European Wind Energy Agency, siječanj 2011.
- [12] Manwell, J.F., McGowan J.G., Rogers A.L., Wind Energy Explained – Theory, Design and Application, John Wiley and Sons, Ltd, Chichester, 2002.
- [13] Boyle, G., Renewable Energy, Oxford University Press, Oxford, 2004.
- [14] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E., Wind Energy Handbook, John Wiley and Sons, Ltd, Chichester, 2001.
- [15] Gasch, R., Twele, J., Wind Power Plants - Fundamentals, Design, Construction and Operation, Solarpraxis AG, Berlin, 2002.
- [16] Geostrofički vjetar, http://jadran.gfz.hr/pojmovnik_g.html#geostroficki_v
- [17] Ruijgrok, G.J.J., van Paassen, D.M., Elements of aircraft pollution, VSSD, Delft, 2007
- [18] Večenaj, Ž., Procesi makrorazmjera kod olujnog vjetra u Dalmaciji, Diplomski rad, 2005.
- [19] Bura, http://jadran.gfz.hr/bura_objasnjenje.html
- [20] Jugo, http://jadran.gfz.hr/jugo_objasnjenje.html
- [21] Maestral, http://jadran.gfz.hr/maestral_objasnjenje.html
- [22] Etezijske, http://jadran.gfz.hr/pojmovnik_e.html#etezijske
- [23] Vrdoljak, M., Osnove aerodinamike i mehanike leta helikoptera, Interna skripta FSB, Zagreb, 2007.
- [24] Airfoil investigation database, <http://www.worldofkrauss.com/>
- [25] McGhee, R.J., Beasley, W.D., Whitcomb, R.T., NASA Low- and Medium-Speed Airfoil Development, Langley Research Center, Hampton, Virginia, 1979.

- [26] Timmer, N., Blade design – Aerodynamic Considerations, Windturbine design lecture notes, TU Delft, 2009.
- [27] Studija utjecaja na okoliš za vjetroelektranu „Pometeno brdo“, APO d.o.o, Zagreb, 2009.
- [28] Barlas, T.K. i van Kuik, G.A.M., State of the art and prospectives of smart rotor control or wind turbines, The Science of Making Torque from Wind, Journal of physics: Conference series 75, 2007.
- [29] Yen Nakafuji, D.T., van Dam, C.P., Smith, R.L. i Collins, S.D., Active Load Control for Airfoils using Microtabs, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 123, No. 4 , Studeni 2001, str. 282-289
- [30] Wilson, D.G. et al, Active Aerodynamics Blade Control Design for Load Reduction on Large Wind Turbines, Proc. European Wind Energy Conference & Exhibition, Marseille, ožujak 2009.
- [31] Zayas, J.R. et al, Active Aerodynamic Load Control for Wind Turbine Blades, Sandia National Laboratories, Albuquerque

11 Izvor fotografija

- [A] <http://texaswindmillgallery.com/>
- [B] <http://guidedtour.windpower.org/res/lacour1a.jpg>
- [C] <http://www.wind-works.org/photos/Smith-PutnamPhotos.html>
- [D] <http://guidedtour.windpower.org/res/gedser2.jpg>
- [E] http://de.academic.ru/pictures/dewiki/101/eoliennes_gaspesie.jpg
- [F] <http://www.power-technology.com/projects/princess-amalia/>
- [G] <http://www.hansebubeforum.de/showtopic.php?threadid=13090&pagenum=lastpage>

12 Prilog 1

Podaci o profilima preuzeti su iz baze podataka Sveučilišta Illinois, Department of Aerospace Engineering, UIUC Applied Aerodynamics Group

Reynoldsov broj za sve profile je $Re = 1 \cdot 10^5$

