

Numerička analiza elemenata postolja vjetroturbine

Halužan, Mateo

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:315798>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-26**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

NUMERIČKA ANALIZA ELEMENATA POSTOLJA

VJETROTURBINE

Mateo Halužan

Rijeka, rujan 2023.

0069078601

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET RIJEKA

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**NUMERIČKA ANALIZA ELEMENATA POSTOLJA
VJETROTURBINE**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Marino Brčić

Rijeka, rujan 2023.

Mateo Halužan

0069078601

Rijeka, 9. ožujka 2021.

Zavod: **Zavod za tehničku mehaniku**
Predmet: **Metoda konačnih elemenata čvrstih tijela**
Grana: **2.15.06 tehnička mehanika (mehanika krutih i deformabilnih tijela)**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Mateo Halužan (0069078601)**
Studij: **Diplomski sveučilišni studij strojarstva**
Modul: **Konstruiranje i mehatronika**

Zadatak: **Numerička analiza elemenata postolja vjetroturbine / Numerical analysis of wind turbine base elements**

Opis zadatka:

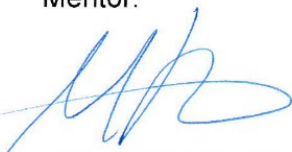
Metodom konačnih elemenata provesti analizu različitih oblika i profila postolja vjetroturbine. Provesti optimizaciju dizajna te dati prijedlog poboljšanja dizajna oblika postolja. Sve izvršene analize popratiti odgovarajućim skicama, a dati i sliku konstrukcijskog elementa u cjelini.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Mateo Halužan

Zadatak uručen pristupniku: 15. ožujka 2021.

Mentor:



Izv. prof. dr. sc. Marino Brčić

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

IZJAVA O AUTORSTVU RADA

Ja, Mateo Halužan izjavljujem da sam ovaj diplomski rad napravio pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog rada *Numerička analiza elemenata postolja vjetroturbine*, da sam ovaj diplomski rad izradio samostalno prilikom čega sam koristio navedenu literaturu i savjete od strane mentora izv. prof. dr. sc. Marino Brčić, te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Mateo Halužan

Mateo Halužan

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Marino Brčić na pomoći, savjetima, strpljenu i vodstvu pri izradi ovog diplomskog rada, koji me je vodio i pomogao sa svim svojim savjetima.

Također zahvaljujem se svim svojim prijateljima na strpljenju i potpori kroz cijeli ovaj tijek studiranja, koji su sa mnom dijelili teške i sretno trenutke.

Posebnu i najveću zahvalnost iskazujem cijeloj svojoj obitelji i djevojci koji su najviše zaslužni za ono što sam dosad postigao, te koji su me uvijek podržavali i upućivali na pravi put.

SADRŽAJ:

| | |
|---|----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. VJETAR..... | 3 |
| 2.1. Lokalni (površinski) vjetrovi..... | 5 |
| 2.2. Mjerenje brzine vjetra..... | 7 |
| 2.3. Energija i snaga vjetra..... | 15 |
| 2.4. Potencijali i resursi vjetra..... | 19 |
| 3. VJETROTURBINA..... | 25 |
| 3.1. Rotor..... | 27 |
| 3.1.1. Lopatice..... | 27 |
| 3.1.2. Glavina..... | 32 |
| 3.2. Kućište ili gondola..... | 33 |
| 3.2.1. Vratilo..... | 34 |
| 3.2.2. Ležaj..... | 34 |
| 3.2.3. Prijenosnik snage..... | 35 |
| 3.2.4. Spojka..... | 35 |
| 3.2.5. Kočnica..... | 36 |
| 3.2.6. Hidraulički sustav..... | 36 |
| 3.2.7. Generator..... | 37 |
| 3.2.8. Sustav zakretanja turbine (eng. <i>Yawing</i>)..... | 37 |
| 3.3. Postolje..... | 38 |
| 3.3.1. Cijevno čelično postolje..... | 39 |
| 3.3.2. Cijevno betonsko postolje..... | 40 |
| 3.3.3. Rešetkasto postolje..... | 40 |
| 3.3.4. Žičano učvršćeno postolje..... | 40 |
| 3.3.5. Hibridno postolje..... | 41 |
| 3.4. Temelji..... | 41 |
| 3.4.1. Kopnene (eng. <i>onshore</i>) vjetroturbine..... | 42 |
| 3.4.2. Priobalne (eng. <i>offshore</i>) vjetroturbine..... | 43 |
| 3.5. Kontrola vjetroturbine..... | 45 |
| 3.5.1. Metoda zavjetrine (eng. <i>Stall control</i>)..... | 46 |
| 3.5.2. Metoda promjene kuta lopatica rotora (eng. <i>Pitch control</i>)..... | 47 |
| 3.5.3. Aktivna metoda zavjetrine (eng. <i>Active stall control</i>)..... | 48 |
| 3.5.4. Ostale pomoćne metode..... | 49 |
| 4. OPTEREĆENJE POSTOLJA..... | 50 |
| 4.1. Vrsta opterećenja..... | 50 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 4.2. | Spajanja segmenata postolja..... | 53 |
| 4.3. | Odabir vjetroturbine, definiranje geometrije i opterećenja | 54 |
| 5. | TEORIJE ČVRSTOĆE | 73 |
| 5.1. | Teorija najvećeg normalnog naprezanja..... | 76 |
| 5.2. | Teorija najveće duljinske deformacije..... | 78 |
| 5.3. | Teorija najvećeg tangencijalnog naprezanja..... | 79 |
| 5.4. | Teorija najveće distorzijske energije | 81 |
| 5.5. | Usporedba navedenih teorija čvrstoće | 84 |
| 6. | METODA KONAČNIH ELEMENATA..... | 87 |
| 6.1. | Vrste elemenata | 89 |
| 6.2. | Matrica krutosti..... | 92 |
| 6.3. | Koordinatni sustav | 93 |
| 6.3.1. | Osnovni ili globalni koordinatni sistem | 94 |
| 6.3.2. | Lokalni koordinatni sistem..... | 94 |
| 6.4. | Vrste analize | 95 |
| 6.4.1. | Kreiranje geometrije modela..... | 95 |
| 6.4.2. | Definiranje materijala modela..... | 95 |
| 6.4.3. | Omreživanje ili diskretizacija modela..... | 96 |
| 6.4.4. | Definiranje ograničenja i oslonaca modela | 96 |
| 6.4.5. | Definiranje opterećenja koja djeluju na model | 96 |
| 6.4.6. | Dobivanje rezultata | 96 |
| 6.4.7. | Analiza dobivenih rezultata..... | 97 |
| 6.4.8. | Modificiranje konstrukcije | 97 |
| 6.5. | Ključne pretpostavke prilikom analize | 97 |
| 6.6. | Linearna statička analiza | 98 |
| 6.6.1. | Svojstva materijala | 99 |
| 6.6.2. | Geometrijska svojstva | 99 |
| 6.6.3. | Rubni uvjeti..... | 100 |
| 6.7. | Smjernice za izradu geometrije konstrukcijskog modela..... | 100 |
| 7. | NUMERIČKA ANALIZA POSTOLJA | 103 |
| 7.1. | Izrada 3D modela različitih izvedbi presjeka postolja..... | 104 |
| 7.2. | Definiranje materijala i omreživanja modela | 106 |
| 7.3. | Definiranje ograničenja, oslonaca i opterećenja modela | 109 |
| 7.4. | Simulacije, rezultati i analize modela različitih izvedbi postolja | 115 |
| 7.4.1. | Rezultati analize za opterećenje vjetra pri brzini v_{ref} | 116 |
| 7.4.2. | Rezultati analize za opterećenje vjetra pri brzini v_{isklj} | 118 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 7.4.3. | Rezultati analize za opterećenje vjetra pri brzini v_{max} | 120 |
| 7.5. | Optimizacija modela različitih izvedbi postolja | 122 |
| 7.5.1. | Rezultati optimiziranih postolja za opterećenje vjetra pri brzini v_{ref} | 124 |
| 7.5.2. | Rezultati optimiziranih postolja za opterećenje vjetra pri brzini v_{isklj} | 126 |
| 7.5.3. | Rezultati optimiziranih postolja za opterećenje vjetra pri brzini v_{max} | 128 |
| 7.6. | Izvijanje optimiziranih modela različitih izvedbi postolja | 130 |
| 7.7. | Usporedba rezultata | 133 |
| 8. | ZAKLJUČAK | 137 |
| 9. | POPIS LITERATURE | 138 |
| 10. | POPIS SLIKA, TABLICA I GRAFOVA | 142 |
| 11. | SAŽETAK | 145 |
| 12. | SUMMARY | 146 |

1. UVOD

U suvremenom svijetu, potreba i povećana svijest za obnovljivim izvorima energije sve više dolazi do izražaja. Jedan od najperspektivnijih izvora energije je energija vjetra, koja se može iskoristiti putem vjetroelektrana. Vjetroelektrane se sastoje od vjetroturbina koje pretvaraju kinetičku energiju vjetra u električnu energiju. Važan dio vjetroturbine je njeno postolje, koje osigurava stabilnost i pouzdanost cijelog sustava. Numerička analiza elemenata postolja vjetroturbine ima ključnu ulogu u razumijevanju ponašanja i optimizaciji ovog vitalnog dijela konstrukcije. Ova analiza omogućuje detaljno proučavanje napreznja, deformacija i opterećenja koja djeluju na postolje, što je od izuzetne važnosti za osiguranje sigurnosti i dugotrajnosti vjetroelektrane. Cilj ovog diplomskog rada je izvršiti numeričku analizu elemenata postolja vjetroturbine kako bi se proučilo ponašanje i performanse konstrukcije. U tu svrhu, koristit će se metoda konačnih elemenata koja je široko prihvaćena i omogućuje modeliranje složenih struktura, te analizu njihovog mehaničkog ponašanja i kompleksnih struktura.

U prvom dijelu rada, bit će prikazane osnovne informacije o vjetru, uključujući lokalne vjetrove, mjerenje brzine vjetra, energiju i snagu vjetra te potencijale i resurse vjetra. Zatim će se detaljnije opisati vjetroturbina, njene komponente kao što su rotor, kućište, postolje i temelji, kao i kontrola vjetroturbine. Nadalje, bit će proučeno opterećenje postolja vjetroturbine, uključujući vrste opterećenja i spajanja segmenata postolja. Također će se istražiti odabir vjetroturbine, definiranje geometrije i opterećenja kako bi se osigurala sigurnost i pouzdanost postolja. U sklopu rada, bit će obrađene teorije čvrstoće koje su ključne za razumijevanje ponašanja postolja vjetroturbine pod opterećenjem. Poseban naglasak bit će stavljen na teoriju najvećeg normalnog napreznja, teoriju najveće duljinske deformacije, teoriju najvećeg tangencijalnog napreznja i teoriju najveće distorzije energije. Konačno, metoda konačnih elemenata bit će primijenjena za numeričku analizu elemenata postolja vjetroturbine. Ovaj pristup omogućuje detaljno modeliranje i analizu ponašanja postolja pod različitim uvjetima opterećenja. Biti će opisane vrste elemenata, matrica krutosti i koordinatni sustav, te će biti objašnjene vrste analiza koje će biti provedene, uključujući kreiranje geometrije modela, definiranje materijala, omreživanje modela, definiranje ograničenja i oslonaca, definiranje opterećenja te dobivanje i analiza rezultata.

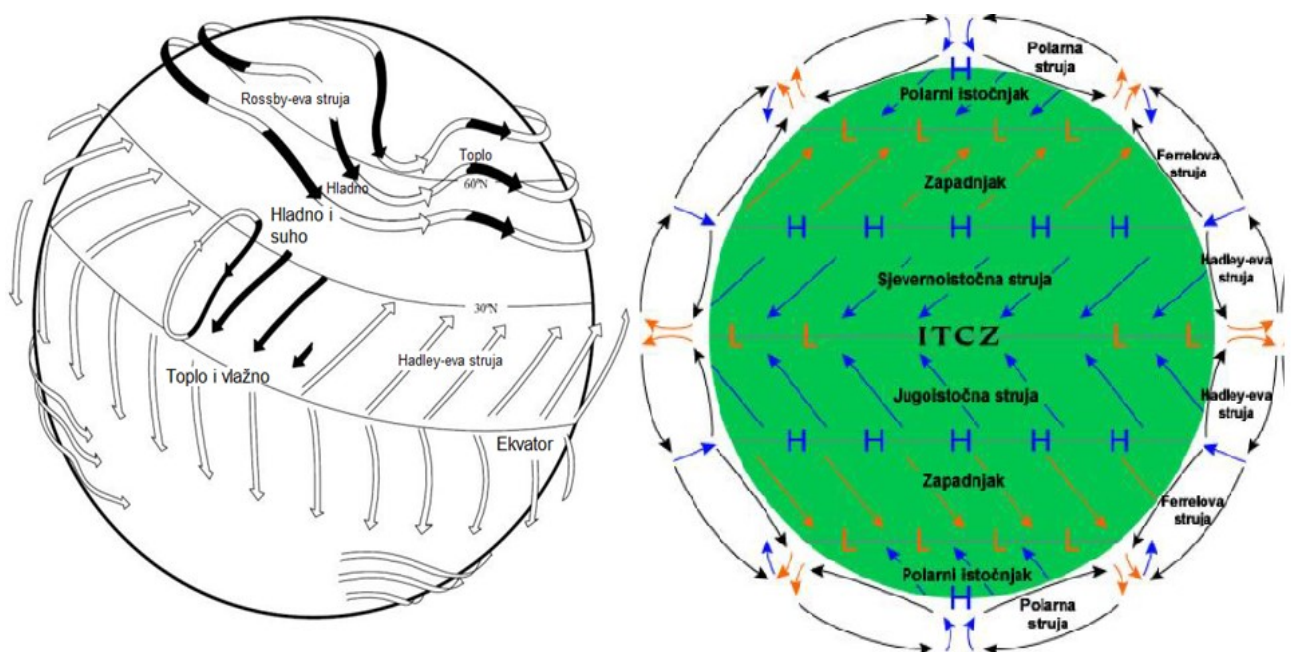
Numerička analiza elemenata postolja vjetroturbine pružit će dublje razumijevanje ponašanja konstrukcije pod različitim uvjetima opterećenja. Ova analiza ima važnu ulogu u optimizaciji postolja, poboljšanju sigurnosti i dugotrajnosti vjetroelektrane te pridonosi razvoju održivih izvora energije.

U nastavku rada, bit će prikazana izrada 3D modela različitih izvedbi presjeka postolja vjetroturbine, definiranje materijala i omreživanje modela te definiranje ograničenja, oslonaca i opterećenja. Nakon toga, bit će prezentirane simulacije, rezultati i analize modela različitih izvedbi postolja pod različitim brzinama vjetra. Dodatno, provest će se optimizacija modela postolja vjetroturbine kako bi se postigla maksimalna učinkovitost i sigurnost. Analizirat će se rezultati optimiziranih postolja za različite brzine vjetra te će se provesti analiza izvijanja optimiziranih modela.

Kroz ovaj diplomski rad, cilj je pružiti dublje razumijevanje numeričke analize elemenata postolja vjetroturbine i njen značaj za optimizaciju konstrukcije. Očekuje se da će rezultati ove analize doprinijeti unapređenju dizajna i performansi postolja vjetroturbine, te pridonijeti daljem razvoju obnovljivih izvora energije.

2. VJETAR

Prirodno strujanje zraka zovemo vjetar, odnosno vjetar je prirodno kretanje zraka ili drugih plinova u odnosu na površinu planeta. Vjetar je gibanje zračnih masa u atmosferi uzrokovano razlikom tlaka. Naime, zbog neravnomjernog zagrijavanja površine Zemlje (različite zemljopisne širine, a i razlika u zagrijavanju kopna i mora) dolazi do razlike temperature u slojevima zraka (efekt zagrijavanja zraka preko tla). Vjetar struji od područja višega tlaka prema području nižega tlaka, vjetar je jači što je ta razlika veća. Kako je Zemlja kugla, atmosfera u ekvatorijalnim zonama dobiva više sunčeve energije od one u polarnim zonama, što uzrokuje razliku u intenzitetu sunčevog zračenja u različitim zonama. Vrući zrak je lakši od hladnog zraka i dizat će se u nebo dok ne dosegne približno 10 km visine, te će se širiti na sjever i jug. Toplina se isporučuje strujanjem zraka od ekvatora do dva pola zemlje uz izmjenu zračne mase globalnih sustava vjetra kao što je prikazano na slici 2.1. Taj gradijent temperature uzrokuje i gradijent tlaka, zbog čega se zračne mase počinju gibati. Na osnovu ovoga može se zaključiti da vjetar indirektno nastaje iz sunčeve energije. [1, 2]



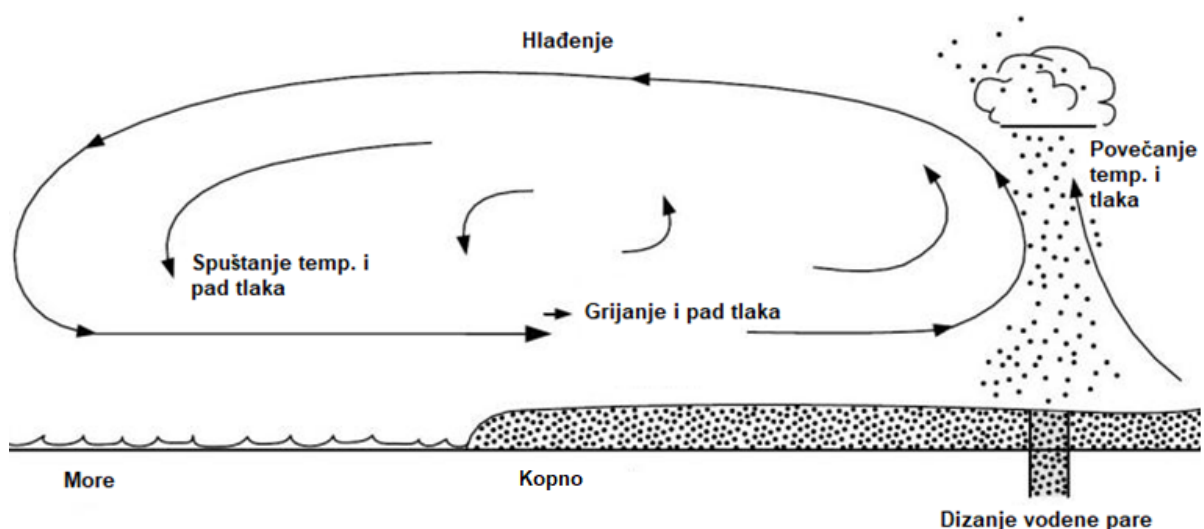
Slika 2.1: Prikaz sustava smjerova globalnih vjetrova [2]

Sva obnovljiva energija (osim energije plime i oseke, te geotermalne energije), čak i energija u fosilnim gorivima, u konačnici dolazi od Sunca. Sunce zrači Zemlji 10^{12} kWh energije. Otprilike 1% do 2% energije koja dolazi od Sunca pretvara se u energiju vjetra. To je oko 50 do 100 puta više od energije koju pretvaraju u biomasu sve biljke na Zemlji. [1]

Budući da se Zemlja rotira, svako kretanje na sjevernoj hemisferi se preusmjerava udesno, ako ga gledamo iz vlastitog položaja na tlu (na južnoj hemisferi je savijen ulijevo). Ova prividna sila savijanja poznata je kao Coriolisova sila i ta sila je vidljiva pojava. Željezničke pruge se troše brže s jedne strane nego s druge. Riječna korita su s jedne strane dublje ukopana od druge. Koja strana ovisi o tome na kojoj se hemisferi nalazimo: na sjevernoj hemisferi pokretne čestice su savijene udesno. Na sjevernoj hemisferi vjetar ima tendenciju rotacije u smjeru suprotnom od kazaljke na satu (gledano odozgo) dok se približava području niskog tlaka. Na južnoj hemisferi vjetar se okreće u smjeru kazaljke na satu oko područja niskog tlaka. [1]

Atmosfera oko Zemlje je vrlo tanak sloj. Zemljina kugla ima promjer od 12 000 km. Troposfera, koja se proteže na oko 11 km nadmorske visine, je mjesto gdje se događaju sva meteorološka događanja, vremenske neprilike, efekt staklenika i sl. Vjetrovi koji nastaju u troposferi možemo podijeliti na [1]:

- Globalni vjetrovi: pokreću ih temperaturne razlike, a time i razlike u tlaku, dok površina Zemlje na njih ne utječe mnogo. Nalaze se na visinama 1 000 metara iznad razine tla.
- Lokalni vjetrovi: ovise o smjerovima globalnih vjetrova, ali na njih najviše utječe površina tla na visinama do 100 metara. Vjetar će usporavati s hrapavošću zemljine površine i prepreke na koje nailazi prilikom strujanja.



Slika 2.2: Cirkulacije zraka - nastanak vjetra [2]

Prilikom proučavanja energije vjetra, interesantni su lokalni (površinski) vjetrovi i kako izračunati sadržaj korisne energije vjetra.

2.1. Lokalni (površinski) vjetrovi

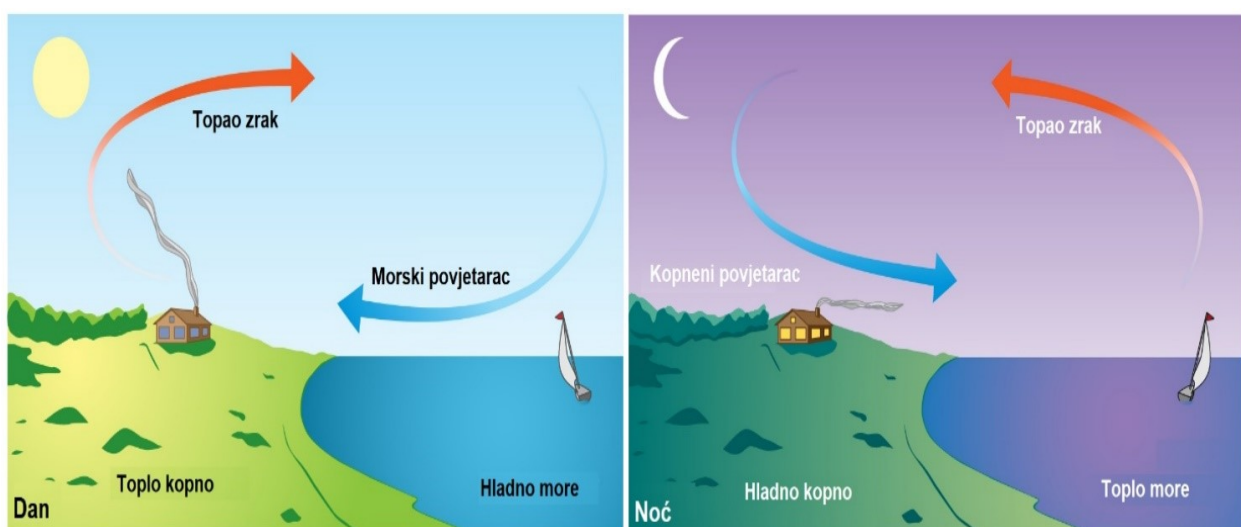
Iako su globalni vjetrovi važni u određivanju prevladavajućih vjetrova u određenom području, lokalni klimatski uvjeti mogu utjecati na najčešće smjerove vjetra. Lokalni vjetrovi su uvijek superponirani na veće sustave vjetra, tj. na smjer vjetra utječe zbroj globalnih i lokalnih učinaka. Kada su vjetrovi većeg razmjera lagani, lokalni vjetrovi mogu dominirati obrascima vjetra.

Lokalne (površinske) vjetrove možemo podijeliti na:

- Morski i kopneni povjetarac koji nastaje uz morske obale

Kopnene mase sunce zagrijava brže od mora danju. Zrak se diže, struji iznad mora i stvara nizak tlak na razini tla koji onda privlači hladan zrak iz mora. To se zove morski povjetarac. Navečer često dolazi do razdoblja zatišja kada su temperature kopna i mora jednake, dok noću vjetar puše u suprotnom smjeru. Kopneni povjetarac noću uglavnom ima manje brzine vjetra, jer je razlika u temperaturi između kopna i mora noću manja. Takav način stvaranja vjetrova je prikazan na slici 2.3.

Monsun poznat iz jugoistočne Azije u stvarnosti je veliki oblik morskog i kopnenog povjetarca, koji varira u smjeru između godišnjih doba, jer se kopnene mase zagrijavaju ili hlade brže od mora.

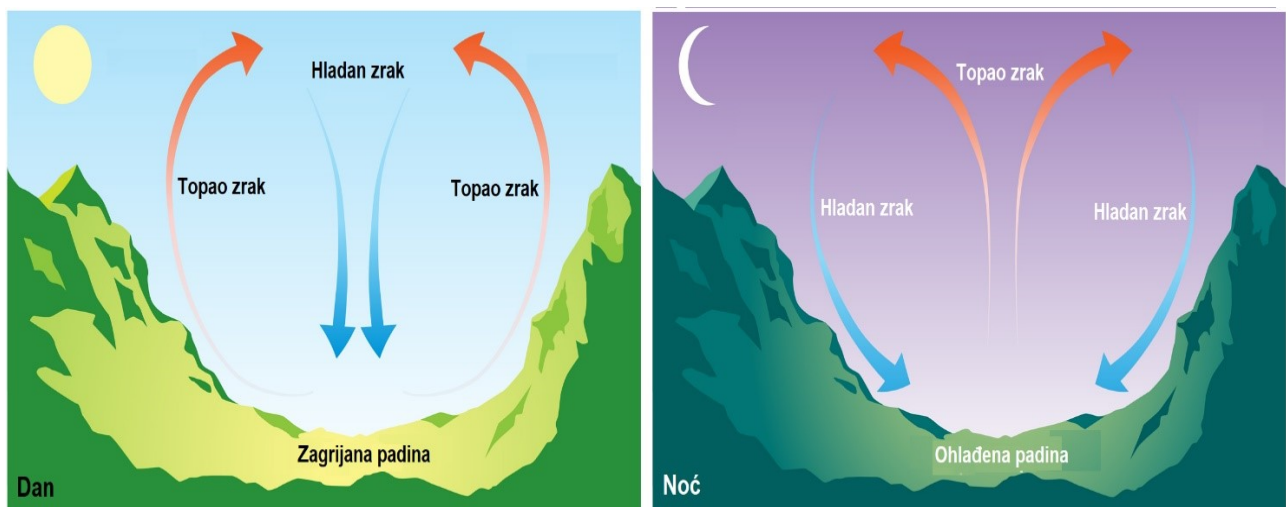


Slika 2.3: Stvaranje morskog i kopnenog povjetarca [3]

- Dolinski (kanjonski) vjetar koji nastaje u planinskim predjelima

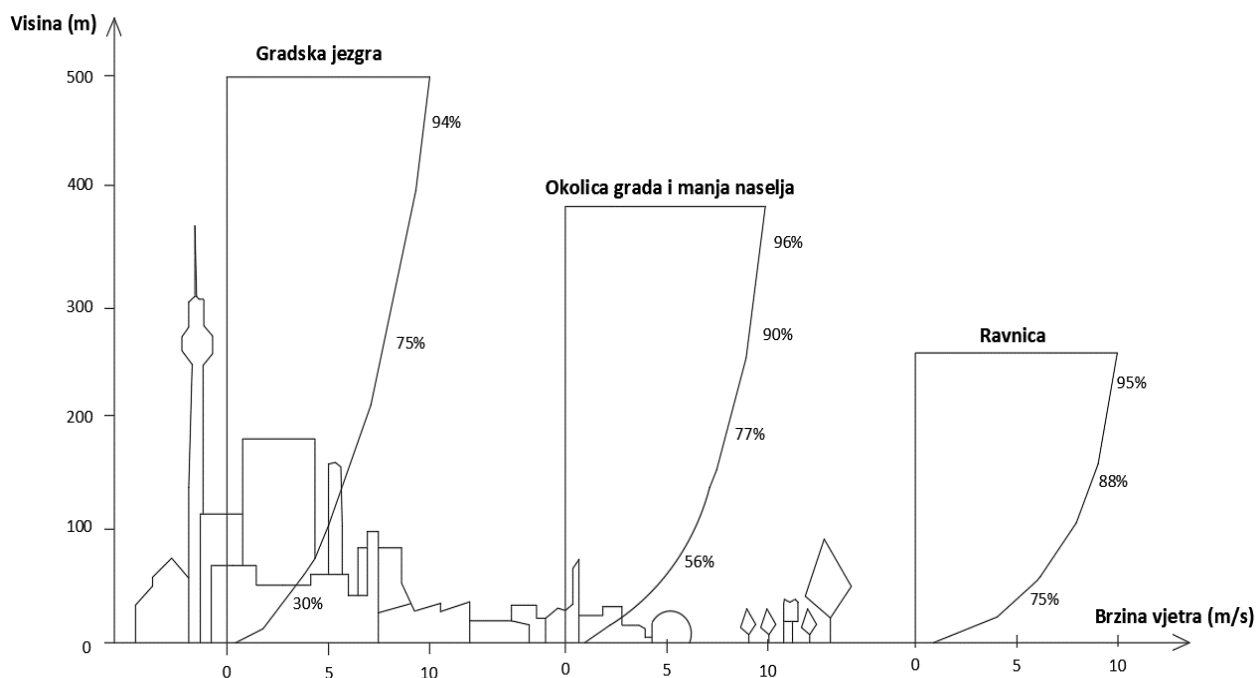
Planinske regije prikazuju mnoge zanimljive vremenske obrasce. Jedan primjer je dolinski vjetar koji potječe s obronaka okrenutih prema jugu. Kada se padine i susjedni zrak zagrijavaju, gustoća zraka se smanjuje, a zrak se penje prema vrhu prateći površinu padine. Smjer vjetra noću je obrnut i prelazi u nizbrdicu. Takav način stvaranja vjetrova je prikazan na slici 2.4.

Vjetrovi koji teku niz zavjetrine planina mogu biti prilično snažni: primjeri su Foehn u Alpama u Europi, Chinook u Stjenovitom gorju i Zonda u Andama.



Slika 2.4: Stvaranje dolinskog vjetra [3]

Hrapavost površine ima veliki utjecaj na brzinu vjetra, s porastom hrapavosti površine raste i otpor vjetru koji tako gubi na brzini, odnosno gubi kinetičku energiju. Šume i veliki gradovi očito su mjesta velike hrapavosti, dok ceste i betonske površine stvaraju vrlo mali otpor gibanju vjetra. Vodene površine stvaraju najmanje otpora vjetru, dok travnate površine također imaju mali otpor vjetru, ali zbog grmlja i niskih drveća ipak usporavaju vjetar. Na slici 2.5 prikazana je promjena brzine vjetra po visini ovisno o hrapavosti za grad i ravne terene. [4]



Slika 2.5: Brzina vjetra ovisna o hrapavosti površine

2.2. Mjerenje brzine vjetra

Stanje vjetra se aproksimira tako da za desetominutni period uzima konstantna brzina vjetra. Standardnom devijacijom se prikazuje promjena brzine vjetra kroz neki duži period. U slučajevima ekstremnih uvjeta, poput tornada i ciklona, ne može se uzeti desetominutni period kao konstantan. Ukratko, tijekom desetominutnog razdoblja, pretpostavka je da će prevladavati stacionarni klimatski uvjeti vjetra. Dugoročno gledano, distribucija desetominutne srednje brzine vjetra može se uzeti kao Weibullova distribucija. Najčešća referentna visina za mjerenje brzine iznosi 10 m. [5]

Stanje vjetra se prikazuje kroz sljedeću funkciju:

$$F_{U_{10}}(u) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{u}{A}\right)^k\right) \quad (2.1)$$

pri čemu je:

k – parametar oblika,

A – parametar protoka koeficijenta ovisan o mjestu i visini.

Parametar protoka A na visini z može se izračunati na sljedeći način:

$$A = A_H \cdot \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{H}{z_0}} \quad (2.2)$$

pri čemu je:

z_0 – parametar hrapavosti terena (Zemljine površine), te se on očitava iz tablice 2.1 u ovisnosti o tipu terena na kojoj se nalazi vjetroturbina,

A_H – je parametar razmjera na referentnoj visini H .

Uobičajeni izbor za referentnu visinu je $H = 10$ m. Međutim, u kontekstu vjetroturbina, visina glavine je prirodan izbor za H . [5]

Izraz za A temelji se na logaritamskom profilu brzine vjetra iznad tla:

$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \cdot \ln \frac{z}{z_0} \quad (2.3)$$

pri čemu je:

u^* – brzina trenja,

$\kappa = 0,4$ – je von Karmanova konstanta i s time da su pretpostavljeni neutralni atmosferski uvjeti. [5].

Brzina trenja definirana je kao:

$$u^* = \left(\frac{\tau}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

pri čemu je:

τ – površinsko posmično naprezanje,

ρ – gustoća zraka.

Tablica 2.1: Parametar hrapavosti terena (Zemljine površine) [5]

| Tip terena | Parametar hrapavosti z_0 (m) | Eksponent α |
|---|--------------------------------|--------------------|
| Ravnice prekrivene ledom | 0,00001 | |
| Otvoreno more bez valova | 0,0001 | |
| Otvoreno more sa valovima | 0,0001 – 0,003 | 0,12 |
| Priobalna područja s kopnenim vjetrom | 0,001 | |
| Unutrašnjost bez značajnijih građevina i vegetacije | 0,01 | |
| Kultivirana područja s raspršenim građevinama | 0,05 | 0,16 |
| Šume i predgrađa | 0,3 | 0,3 |
| Gradski centar | 1 – 10 | 0,4 |

Vjetrovi se obično klasificiraju prema njihovoj prostornoj skali, njihovoj brzini i smjeru, silama koje ih uzrokuju, regijama u kojima se javljaju i njihovom učinku. Ukratko rečeno vjetar je određen brzinom, smjerom i jačinom. Vjetrovi imaju različite aspekte: brzinu i gustoću zraka, energetski sadržaj ili energiju vjetra.

Za obalne i morske lokacije (eng. *offshore*), gdje se teren sastoji od površine mora i obala, parametar hrapavosti nije konstantan, već ovisi o:

- brzini vjetra,
- uzvodnoj udaljenost do kopna,
- dubini vode,
- valovima.

Za inženjerske izračune ponekad se može pokazati korisnim primijeniti sljedeću empirijsku aproksimaciju za parametar A :

$$A = A_{10} \cdot \left(\frac{z}{H}\right)^\alpha \quad (2.8)$$

Eksponent α ovisi o hrapavosti terena. Ako se kombiniraju logaritamski i eksponencijalni izrazi za A u jednadžbi 2.8, tada rezultira izraz ovisan o visini za eksponent α .

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{v_{z1}}{v_{z0}}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)} \quad (2.9)$$

Kao alternativa navedenom izrazu za α , mogu se koristiti vrijednosti za α prikazane u tablici 2.1.

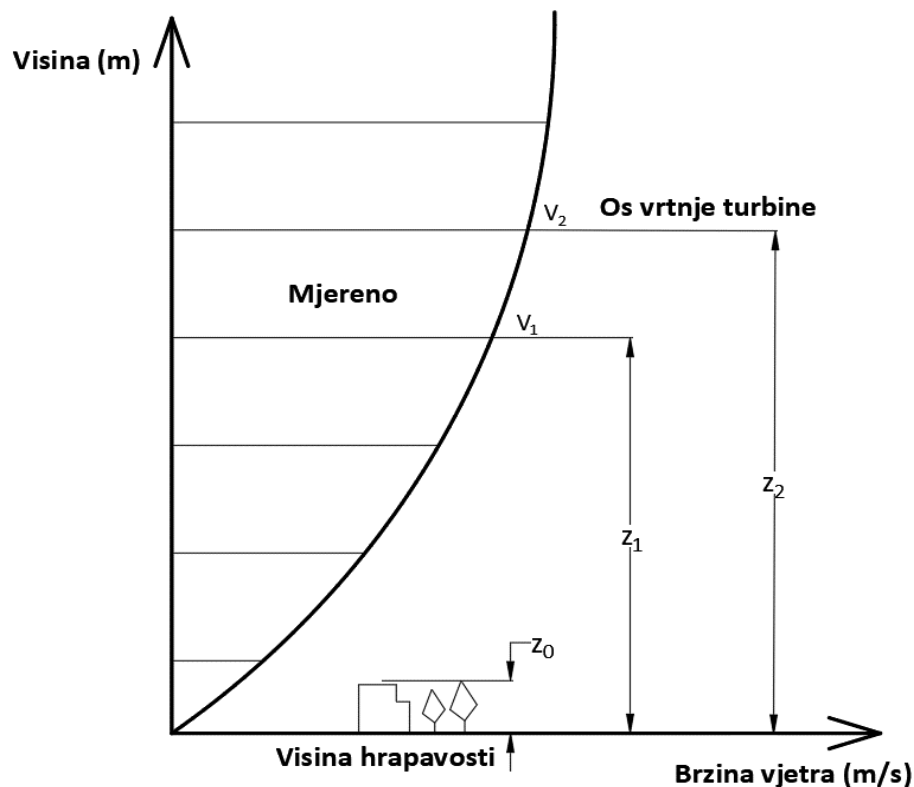
Osnovna brzina vjetra, v_B , je 50 godišnja povratna vrijednost desetominutne srednje brzine vjetra na visini od 10 m iznad kopna uz hrapavost terena $z_0 = 0,05$. [5]

Srednja brzina vjetra od deset minuta s povratnim periodom od 50 godina na drugim visinama i drugim neravninama terena može se naći kao:

$$v_{10 \text{ min}, 50 \text{ god}} = v_B \cdot k_t \cdot \ln \frac{z}{z_0} \quad (2.10)$$

gdje je:

$$k_t = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{0,05}\right)^{0.078} \quad (2.11)$$

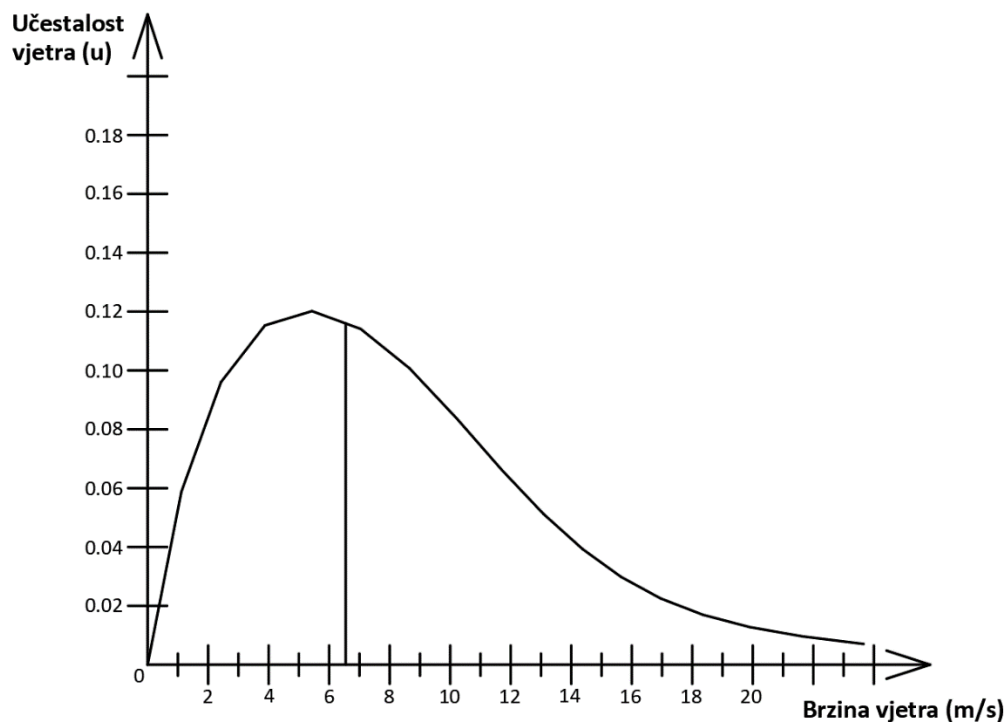


Slika 2.6: Gradijent brzine vjetra

Weibullovom razdiobom (funkcijom) moguće je aproksimirati podatke mjerene pri visini na 10 m kroz više godina i dobiti vjerojatnost pojavljivanja određene brzine vjetra. To je korisno jer idealni vjetrovi, koji pušu svaki dan s istom brzinom, su rijetki. Stoga je poželjno napraviti osrednjavanje brzine vjetra kroz određeno vremensko razdoblje kako bismo najbolje opisali njegovu pojavljivanje i odredili koliko nam je taj vjetar pogodan.

Na primjeru slike 2.7 Weibullove razdiobe za srednju brzinu vjetra od 7 m/s, okomita linija dijeli površinu na dva jednaka dijela i označuje medijan distribucije. Medijan distribucije predstavlja brzinu vjetra ispod koje će se 50% vremena brzina vjetra nalaziti, dok će se 50% vremena nalaziti iznad te brzine. Osim medijana distribucije, razlikujemo srednju brzinu (7 m/s) i najučestaliju brzinu (oko 5,5 m/s). [4]

Weibullova razdioba omogućuje nam bolje razumijevanje i karakterizaciju brzine vjetra na određenom području, što je važno prilikom planiranja i dizajniranja vjetroelektrana ili drugih sustava koji koriste vjetar kao izvor energije.



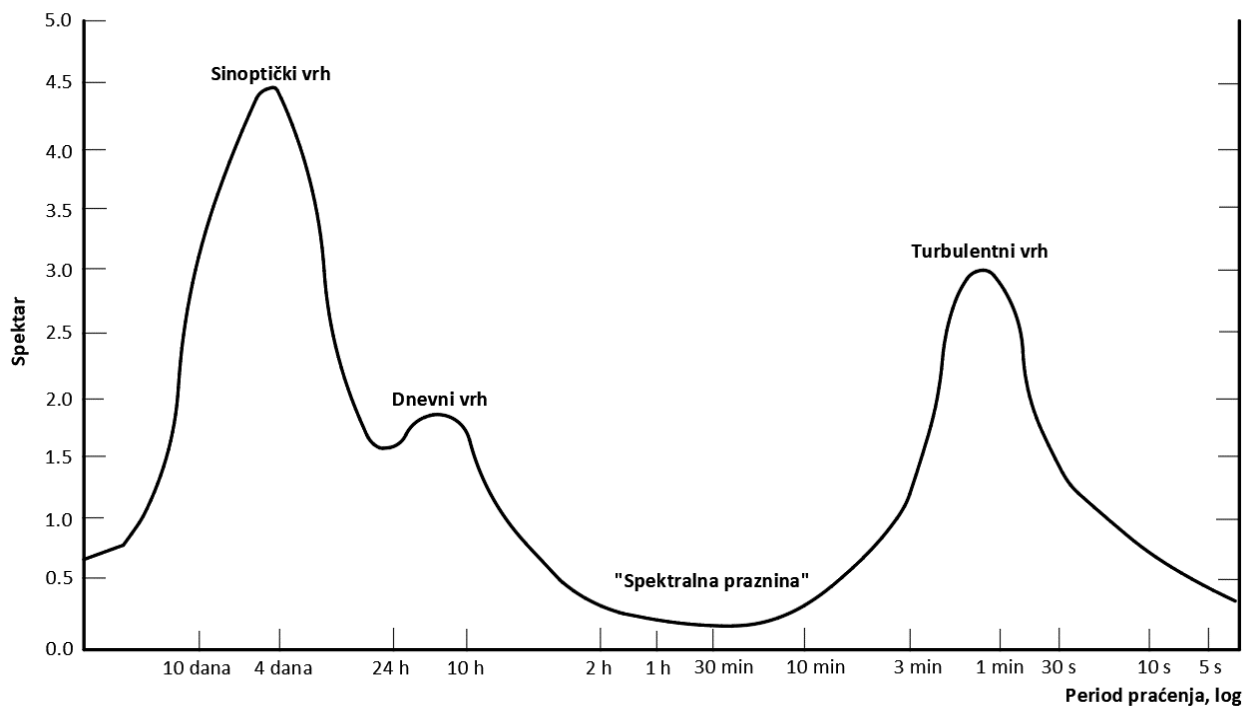
Slika 2.7: Primjer Weibullove razdiobe

Van der Hoven je 1950-ih razvio dijagram koji temelji na spektru snage za jedinicu mase brzine vjetra kod različitih perioda praćenja. Ovaj dijagram je važan za projektiranje vjetroturbina jer omogućuje analizu nagle turbulencije vjetra.

Na dijagramu (prikazanom na slici 2.8) možemo vidjeti sinoptički vrh (formiran na temelju nekoliko dana praćenja), dnevni vrh (na temelju jednog dana) i turbulentni vrh (na temelju nekoliko minuta). Međutim, važno je primijetiti područje koje nazivamo "spektralna praznina". To je područje u kojem je energija vrlo mala i nebitna. Ova "praznina" ukazuje da se sinoptičke i dnevne promjene mogu tretirati na drugačiji način od ultra kratkih turbulentnih promjena. [4]

Iako su kratke turbulencije vjetra važne za projektiranje vjetroturbina u smislu dinamičkih naprezanja, nisu jednako presudne kao brzina vjetra koja je osrednjena u dužem vremenskom periodu. Zbog toga se brzine vjetra osrednjavaju u duljem vremenskom periodu kako bi se dobila realnija slika vjetrovnog potencijala.

U konačnici, kombinacija analize spektra snage brzine vjetra i osrednjavanja brzina u dužem vremenskom periodu omogućuje bolje projektiranje vjetroturbina i uzimanje u obzir različitih aspekata turbulencije i promjena brzine vjetra.



Slika 2.8: Van der Hovenov dijagram

Općenito brzina vjetra u najsloženijom obliku ima 4 komponente:

- osnovnu komponentu brzine vjetra (eng. *base*),
- komponentu linearne promjene brzine vjetra (eng. *ramp*),
- komponentu udarne promjene brzine vjetra (eng. *gust*),
- komponentu promjene brzine vjetra koja je podložna šumu (eng. *noise*).

Taj se model koristi kod složenih modeliranja, te od 4 komponenti, jedino je osnovna komponenta brzine vjetra konstantna, ostale su promjenjive i modeliramo ih prema iskustvenim podacima i tablicama. Zbog jednostavnosti najčešće se ipak koristi i govori samo o osnovnoj komponenti brzine vjetra, jer ona ipak zauzima najveći udio u formiranju apsolutne brzine. [4]

Beaufortova ljestvica je empirijska mjera koja povezuje brzinu vjetra s promatranim uvjetima na moru ili na kopnu.

Brzina vjetra po Beaufortovoj ljestvici određena je po jednadžbi:

$$v = 0.836 \cdot B^{\frac{3}{2}} \quad (2.12)$$

pri čemu je:

v – brzina vjetra [m/s] na 10 metara iznad površine mora,

B – broj iz Beaufortove ljestvice ili Beaufortov broj iz tablice 2.2.

Tablica 2.2: Beaufortova ljestvica snage vjetra [6]

| Beaufortov broj | Opis vjetra | Brzina vjetra [m/s] |
|-----------------|---------------------|---------------------|
| 0 | Tišina | < 0,3 |
| 1 | Lahor | 0,3 – 1,5 |
| 2 | Povjetarac | 1,6 – 3,3 |
| 3 | Slab vjetar | 3,4 – 5,5 |
| 4 | Umjeren vjetar | 5,6 – 7,9 |
| 5 | Umjereno jak vjetar | 8 – 10,7 |
| 6 | Jak vjetar | 10,8 – 13,8 |
| 7 | Žestok vjetar | 13,9 – 17,1 |
| 8 | Olujni vjetar | 17,2 – 20,7 |
| 9 | Jak olujni vjetar | 20,8 – 24,4 |
| 10 | Orkanski vjetar | 24,5 – 28,4 |
| 11 | Jak orkanski vjetar | 28,5 – 32,6 |
| 12 | Orkan | ≥ 32,7 |

2.3. Energija i snaga vjetra

Kako bi se preobrazila cjelokupna kinetička energija sadržana u struji zraka (vjetru) potrebno je smanjiti brzinu vjetra na nulu pri prolasku kroz energetske pretvarač, odnosno kroz vjetroturbinu. Smanjena brzina, ujedno znači i proširenje poprečnog presjeka, jer kroz njega mora proći isti protok mase. Došlo bi do „slaganja“ zračne mase kada se ona približi vjetroturbini, što je fizički nemoguće, te mora vrijediti očuvanje ukupne mehaničke energije. Stoga mora postojati teoretski maksimum za energiju koja se može pretvoriti iz vjetra. Ekstrakcija mehaničke energije iz struje zraka koja se kreće uz pomoć rotirajućeg pretvarača energije vjetra (vjetroturbine) slijedi princip koji je iznio Albert Betz 1920-ih godina. Betzova teorija slijedi elementarne fizikalne zakone, to jest, mehanička energija koja se može izdvojiti iz struje zraka koja prolazi kroz dano područje poprečnog presjeka ograničena je na određeni fiksni udio energije ili snage sadržane u struji zraka. [7]

Kinetička energija mase zraka (maseni protok) \dot{m} [kg/s] koja se giba brzinom v [m/s] dana je na sljedeći način:

$$E = \frac{\dot{m} \cdot v^2}{2} \text{ [Nm]} \quad (2.13)$$

Uzimajući u obzir određenu površinu poprečnog presjeka A [m²], kroz koju zrak prolazi brzinom v [m/s], dobije se volumni protok zraka:

$$V = v \cdot A \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \quad (2.14)$$

Masa zraka (maseni protok) izražena preko gustoće ρ [kg/m³] dobiven je na sljedeći način:

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (2.15)$$

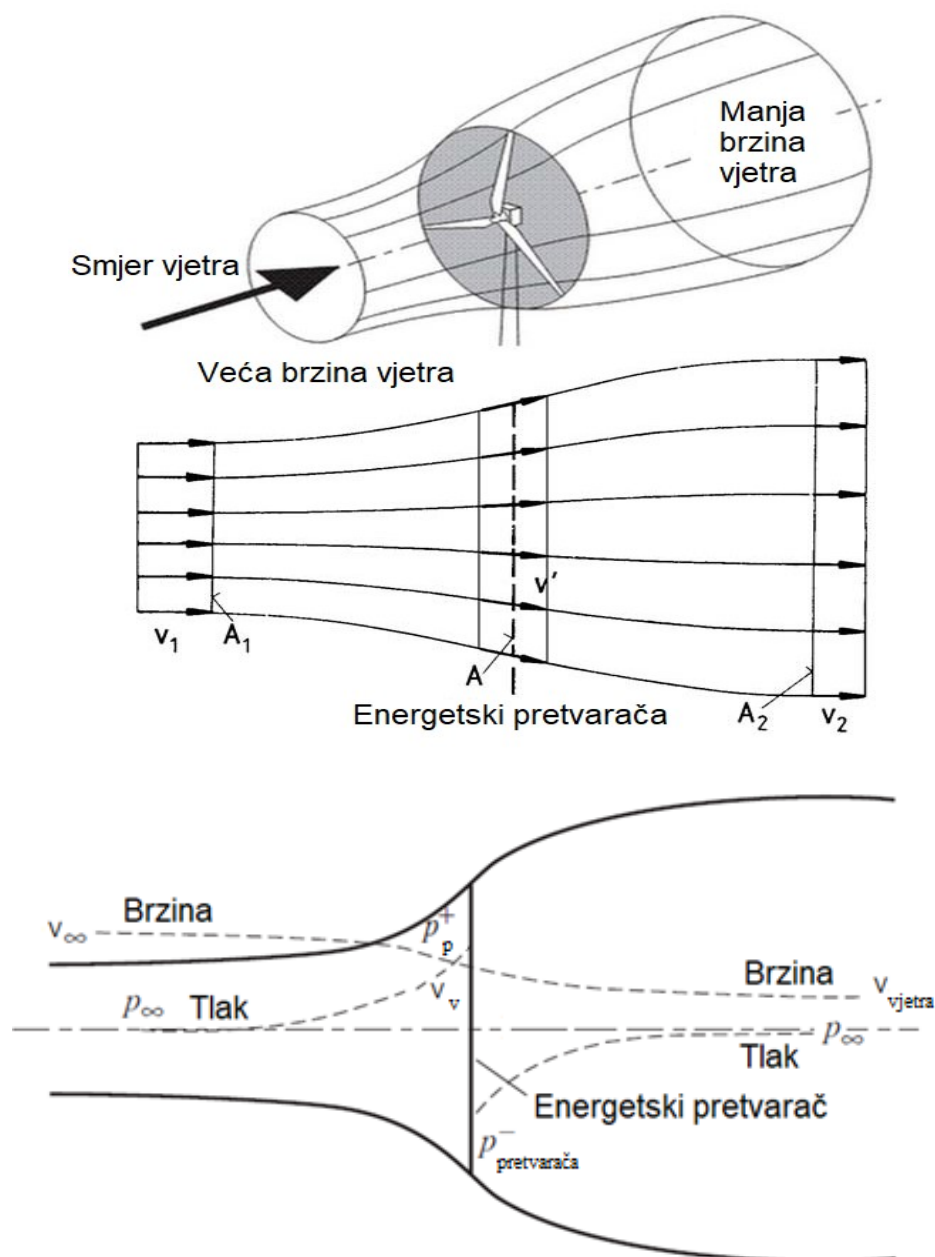
Snaga zraka koji se kreće je brzina protoka kinetičke energije u sekundi:

$$P = \frac{\rho \cdot v^3 \cdot A}{2} \text{ [W]} \quad (2.16)$$

S obzirom na to da je v_1 brzina slobodnog toka, tj. brzina vjetra prije vjetroturbine, a v_2 brzina strujanja nakon prelaska preko vjetroturbine, mehanička energija koju vjetroturbina izvlači iz strujanja zraka odgovara razlici snage strujanja zraka prije i poslije vjetroturbine. Izračun energije pretvorene iz vjetra, ekvivalentne snazi vjetroturbine, koristi dva osnovna principa: očuvanje mase i očuvanje količine gibanja.

Jednadžba kontinuiteta koja odgovara održavanju protoka mase (vidi sliku 2.9) je:

$$\rho \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho \cdot v_2 \cdot A_2 \quad (2.17)$$



Slika 2.9: Prikaz protoka zraka [7, 8]

Snaga je dana razlikom energije prije i poslije vjetroturbine:

$$P = \frac{\rho \cdot v_1^3 \cdot A_1}{2} - \frac{\rho \cdot v_2^3 \cdot A_2}{2} \quad (2.18)$$

$$P = \frac{\dot{m}}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.19)$$

Budući da vjetar usporava prilikom prolaska kroz vjetroturbinu, ali ne postaje komprimiran (došlo bi do „slaganja“ zračne mase kada se ona približi vjetroturbini, što je fizički nemoguće). Površina poprečnog presjeka mlazne cijevi mora se proširiti kako bi se smjestio zrak koji se sporije kreće, te njen statički tlak raste kako bi apsorbirao smanjenje kinetičke energije. Iako se kinetička energija izvlači iz strujanja zraka, nagla promjena brzine nije moguća niti poželjna zbog ogromnih ubrzanja i sila koje bi to zahtijevale. Kako zrak prolazi kroz vjetroturbinu, prema konstrukciji dolazi do pada statičkog tlaka tako da je zrak pri izlasku ispod razine atmosferskog tlaka. Statički tlak se mora vratiti na atmosfersku razinu kako bi se postigla ravnoteža. Porast statičkog tlaka ide na račun kinetičke energije i tako uzrokuje daljnje usporavanje vjetra. Dakle, ne postoji promjena u statičkom tlaku, ali postoji smanjenje kinetičke energije, te sve vjetroturbine, bez obzira na dizajn, rade na taj način.

Mehanička snaga vjetroturbine pokorava se zakonu očuvanje količine gibanja, to jest, sila koja djeluje odgovara usporavanju vjetra pri prelasku preko vjetroturbine. Ovaj potisak „gura“ zračnu masu prisutnu u ravnini strujanja vjetroturbine pri brzini v_{sr} . Potrebna snaga izražena je:

$$P = F \cdot v_{sr} = \dot{m} \cdot (v_1 - v_2) \cdot \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (2.20)$$

$$P = \frac{\rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2)}{4} \quad (2.21)$$

Koeficijent iskoristivosti snage vjetroturbine ili aerodinamički stupanj pretvorbe se definira kao omjer mehaničke snage vjetroturbine i snage vjetra na ulazu u vjetroturbinu:

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{\rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2)}{4}}{\frac{\rho \cdot A \cdot v_1^3}{2}} \quad (2.22)$$

$$C_p = \frac{1}{2} \cdot \left| 1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right| \cdot \left| 1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \right| \quad (2.23)$$

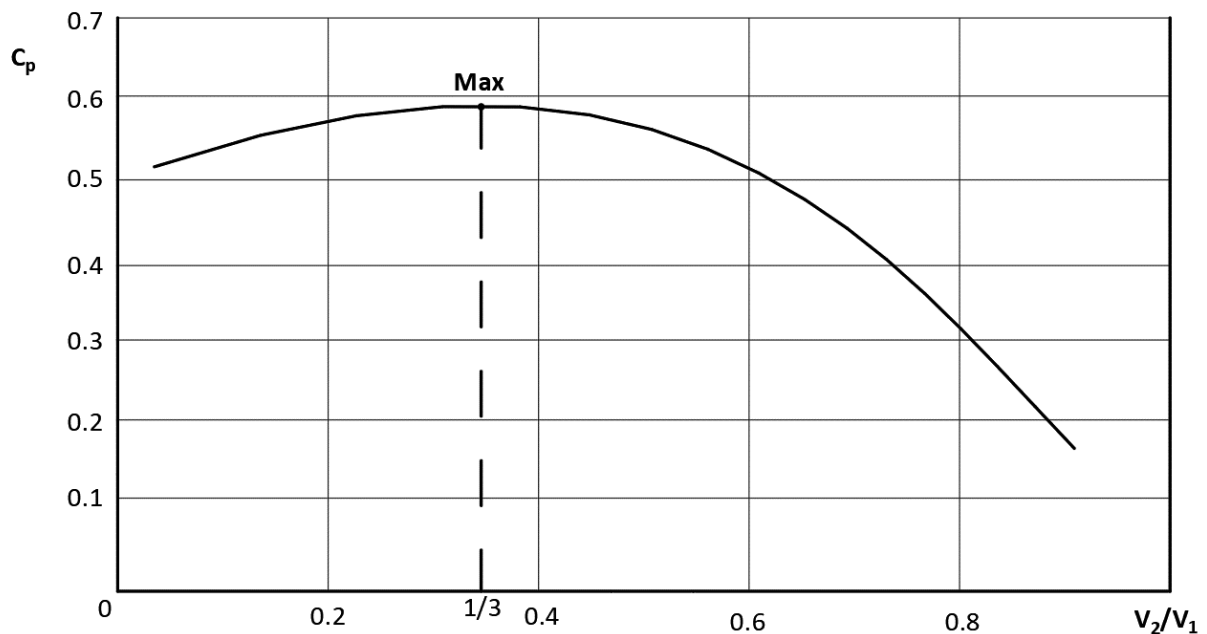
Maksimalni idealni aerodinamički stupanj pretvorbe ili koeficijent iskoristivosti snage dobije se ako je omjer brzina:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3} \quad (2.24)$$

Iz čega slijedi da maksimalni idealni aerodinamički stupanj pretvorbe ili koeficijent iskoristivosti snage iznosi:

$$C_p = \frac{16}{27} = 0,593 = 59,3\% \quad (2.25)$$

Betzova granica predstavlja maksimalni udio raspoložive snage vjetra koji se može pretvoriti u korisnu energiju. Vrijednost iz jednadžbe 2.25 predstavlja idealan slučaj, ali u stvarnosti će aerodinamički stupanj pretvorbe biti manji, što znači da će realna situacija biti lošija. Najmodernije vjetroturbine danas mogu doseći aerodinamički stupanj pretvorbe od oko 0,5 ili 50%. Ovo znači da će polovica raspoložive snage vjetra biti pretvorena u korisnu energiju, dok će druga polovica biti izgubljena zbog različitih gubitaka u pretvorbi. Na slici 2.10 je prikazana ovisnost aerodinamičkog stupnja pretvorbe o omjeru smanjenja brzine vjetra nakon prolaska kroz vjetroturbinu. Ova ovisnost nam pokazuje koliko učinkovito vjetroturbina pretvara kinetičku energiju vjetra u mehaničku energiju rotacije. Što je veći aerodinamički stupanj pretvorbe, to će vjetroturbina biti učinkovitija u iskorištavanju energije vjetra. [7]



Slika 2.10: Aerodinamički stupanj pretvorbe i omjer brzine

Najbitnije se može sažeti na sljedeći način:

- Mehanička snaga koja se može izvući iz slobodnog strujanja zraka pomoću vjetroturbine tri puta se povećava sa snagom brzine vjetra.
- Snaga raste linearno s površinom poprečnog presjeka vjetroturbine; povećava se kvadratom promjera.
- Čak i uz idealan protok zraka i pretvorbu bez gubitaka, omjer mehaničkog rada koji se može izvući i snage sadržane u vjetru ograničen je na vrijednost od 0,593. Dakle, samo oko 60% energije vjetra može se pretvoriti u mehaničku snagu.
- Kada idealni koeficijent iskoristivosti snage postigne svoju maksimalnu vrijednost od 0,593, brzina vjetra u ravnini strujanja vjetroturbine iznosi dvije trećine brzine neometanog vjetra i smanjuje se na jednu trećinu iza vjetroturbine.

2.4. Potencijali i resursi vjetra

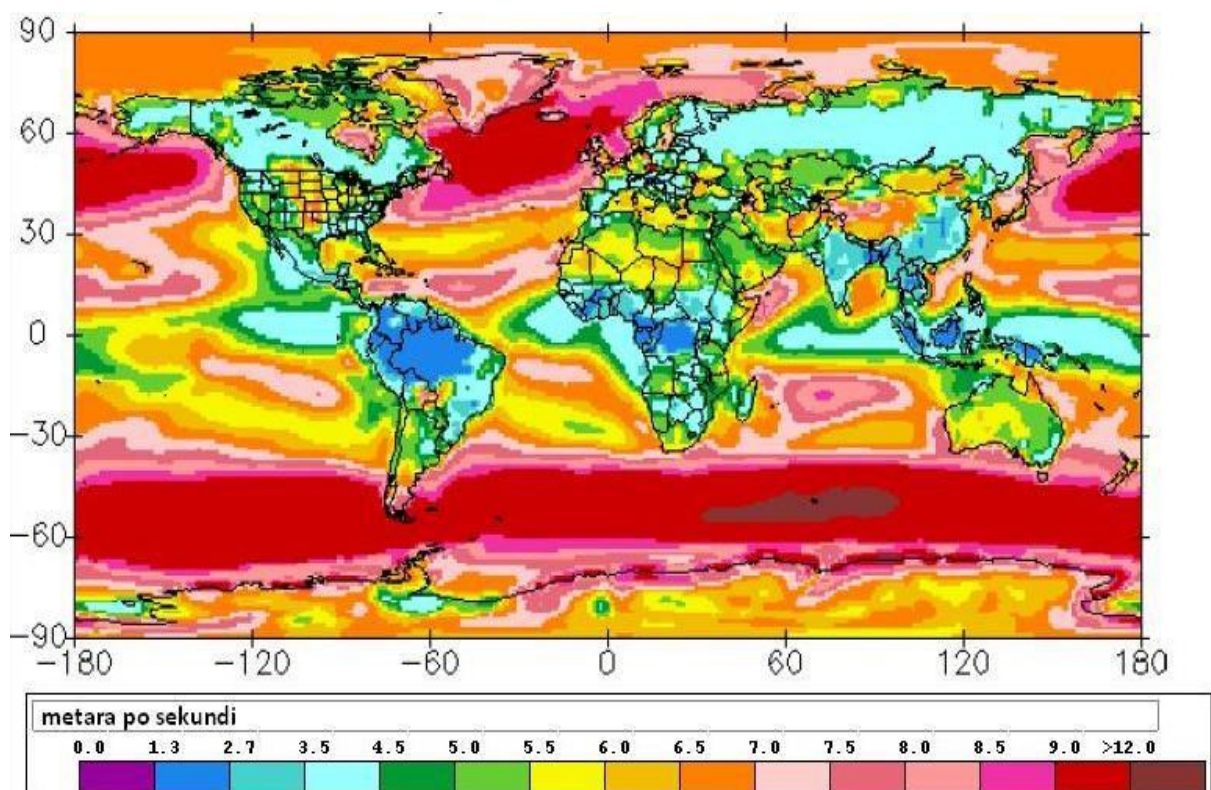
Atlasi (karte) resursa vjetra formiraju se najčešće na temelju brzine i snage vjetra budući da su to njegovi najvažniji parametri. Pri tome se naravno uzimaju u obzir srednje godišnje brzine i snage vjetra.

Na slici 2.11 može se primijetiti da najjači vjetrovi na Zemlji pušu u područjima koja su nepristupačna čovjeku, poput velikih oceana. Priobalna područja također imaju dobre iskoristive vjetrove. S druge strane, područja koja su udaljena od mora imaju najslabije vjetrove.

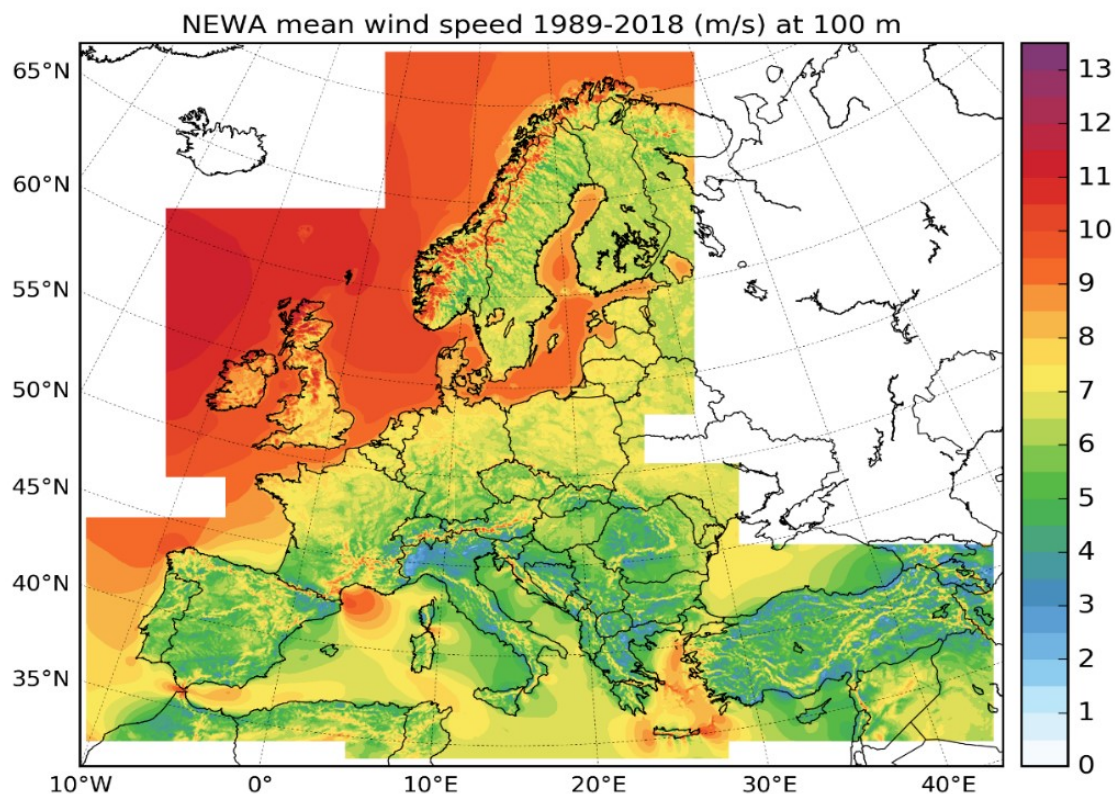
Iz slike 2.12 vidljivo je da sjeverna i sjeverozapadna Europa imaju izuzetno dobre resurse vjetra, s hladnim i jakim vjetrovima koji dolaze s Atlantika i Sjevernog mora.

S obzirom na iskorištavanje vjetra, situacija u Hrvatskoj je relativno loša u usporedbi sa sjeverom Europe. Karta vjetropotencijala (slika 2.13 i slika 2.14) pokazuje da kopneno područje ima vrlo slab vjetropotencijal. Čak i duž obale situacija nije puno bolja, iako je vjetar tamo jednoličniji. Bolji vjetropotencijal nalazi se iznad mora (označeno crvenim područjem), ali i to je relativno slabo u usporedbi s drugim europskim i svjetskim regijama. Kvarnerski zaljev je poznat po jakom vjetru bure, ali nažalost, ona nije kontinuirana i puše samo na mahove. [9]

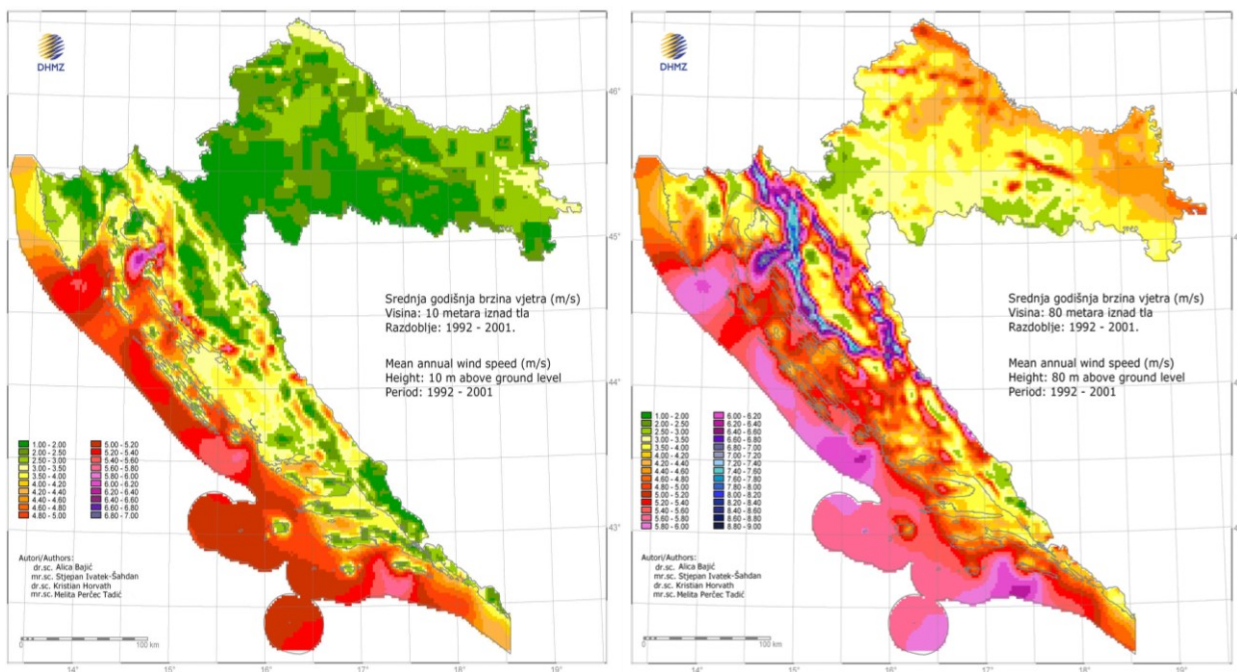
Iako Hrvatska ima određene potencijale za iskorištavanje vjetra, situacija je ograničena i ne tako povoljna kao u nekim drugim dijelovima Europe i svijeta.



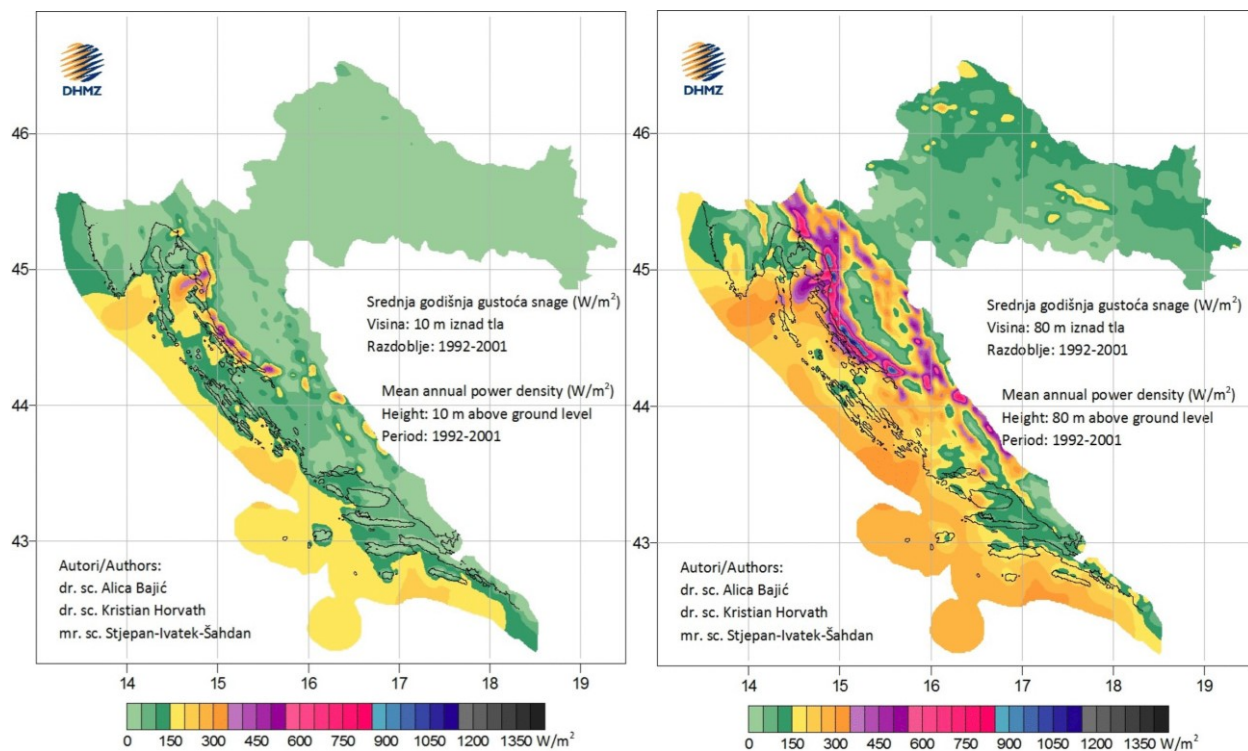
Slika 2.11: Prikaz srednje godišnje brzine vjetra za Zemlju na visini 100 metara iznad tla [10]



Slika 2.12: Prikaz srednje godišnje brzine vjetra za Europu na visini 100 metara iznad tla [10]



Slika 2.13: Prikaz srednje godišnje brzine vjetra za Hrvatsku na visinama 10 metara i 80 metara iznad tla [9]



Slika 2.14: Prikaz srednje godišnje gustoće snage vjetra za Hrvatsku na visinama 10 metara i 80 metara iznad tla [9]

Ruža vjetrova je grafički prikaz brzina vjetra iz 12 različitih smjerova, sličan kompasu. Svaki od 12 smjerova obuhvaća 30° horizonta, što je standard za europski atlas vjetrova. Ruža vjetrova može se također prikazati s 8 ili 16 sektora, ali 12 sektora je uobičajeni standard u Europskom atlasu vjetrova. Ovaj način prikaza se naziva ruža vjetrova jer u polarnom sustavu prikazuje vjerojatnost da vjetar puše iz određenog smjera. [9]

Mjerenje brzine vjetra se obavlja pomoću anemometra, koji obično ima tri poluloptaste čašice postavljene na vrhu osovine. Čašice se okreću u smjeru vjetra, a uz anemometar se nalazi mehanizam koji bilježi smjer vjetra. Brzina i smjer vjetra se zatim registriraju elektronički. Na temelju tih podataka izrađuje se ruža vjetrova za određeno područje. [9]

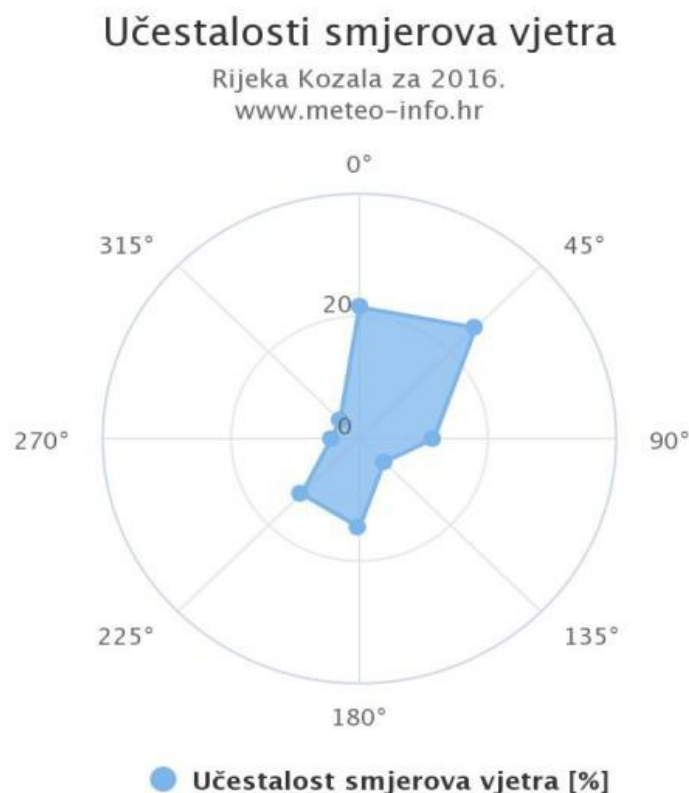
Ruža vjetrova pruža informacije o relativnim brzinama vjetra u različitim smjerovima. Svaki set podataka (učestalost, srednja brzina vjetra i srednja brzina vjetra na treću) se množi s odgovarajućim faktorom kako bi se osiguralo da najduža linija u setu točno odgovara polumjeru najudaljenije kružnice na dijagramu. Ruže vjetrova variraju od jednog mjesta do drugog mjesta, oni su zapravo oblik meteorološkog otiska prsta. [1]

Ruže vjetrova iz susjednih područja često su prilično slične, tako da u praksi ponekad može biti sigurno interpolirati (uzimati prosjek) ruža vjetrova iz okolnih promatranja. Ako je složen teren, tj. planine i doline koje se kreću u različitim smjerovima, ili obale okrenute u različitim smjerovima, općenito nije sigurno donositi jednostavne pretpostavke poput ovih. [1]

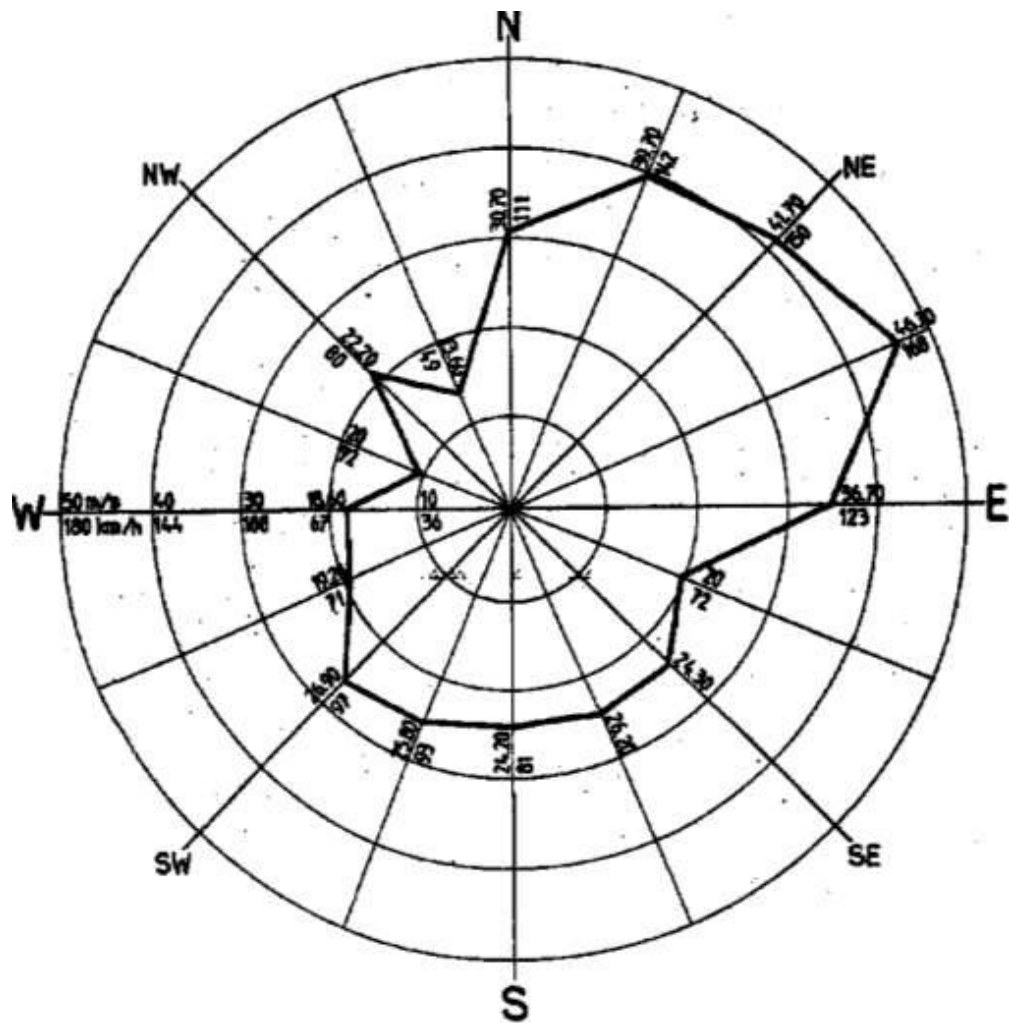
Ruža vjetrova, još jednom, govori samo o relativnoj distribuciji smjerova vjetra, a ne o stvarnoj razini srednje brzine vjetra. Pogled na ružu vjetrova izuzetno je koristan za postavljanje vjetroturbina. Ako veliki udio energije u vjetru dolazi iz određenog smjera, tada je korisno imati što manje prepreka i što glatkiji teren u tom smjeru. [1]

Karakteristike vjetrova na nekoj lokaciji mogu se razlikovati iz godine u godinu i do 10%, stoga je najbolje imati promatranja kroz nekoliko godina kako bi se dobio vjerodostojan prosjek. Planeri velikih vjetrovarkova obično će se oslanjati na jednogodišnja lokalna mjerenja, a zatim koristiti dugoročna meteorološka promatranja s obližnjih meteoroloških postaja kako bi prilagodili svoja mjerenja i tako bi dobili pouzdani dugoročni prosjek. [1]

Na slici 2.15 prikazana je vjerojatnost učestalosti vjetra za područje Rijeke (Kozala) iz 2016. godine, te na slici 2.16. prikazana je vjerojatnost učestalosti vjetra na mjestu Martinsćica – Grčevo iz 2017. godine.



Slika 2.15: Ruža vjetrova za Riječko područje Kozale [9]



Slika 2.16: Ruža vjetrova za Riječko područje Martinsćica – Grčevo [9]

3. VJETROTURBINA

Vjetroturbina je rotacijski stroj koji uz pomoć strujanja vjetra vrši pretvorbu energije vjetra u rotacijsko gibanje na rotoru gdje se dobiva okretni moment na vratilu, za pretvaranje kinetičke energije vjetra u mehaničku energiju. Ako mehaničku energiju koriste izravno strojevi, kao što su pumpa ili kamenje za mljevenje, stroj se naziva vjetrenjača. Dok se mehanička energija pretvara u električnu, stroj se naziva vjetrogenerator. [5, 11]

Vjetroturbina je „hladni stroj“, to znači da se u njemu pretvara energija prirodnog fluida koji ima temperaturu okoline. Glavna karakteristika vjetra je da kao pogonski fluid je uvijek obnovljiv. Nakon što zrak napusti sustav kojem je predao energiju vraća se u okolinu ne promijenjenih fizičkih i kemijskih svojstava. [8]

Manje vjetroturbine koriste se za primjene kao što je punjenje baterija za pomoćnu energiju na čamcima ili kamp prikolicama, te za napajanje prometnih znakova upozorenja. Veće vjetroturbine mogu pridonijeti opskrbi električnom energijom u kućanstvu, dok prodaju neiskorištenu energiju natrag dobavljaču komunalnih usluga putem električne mreže. [8]

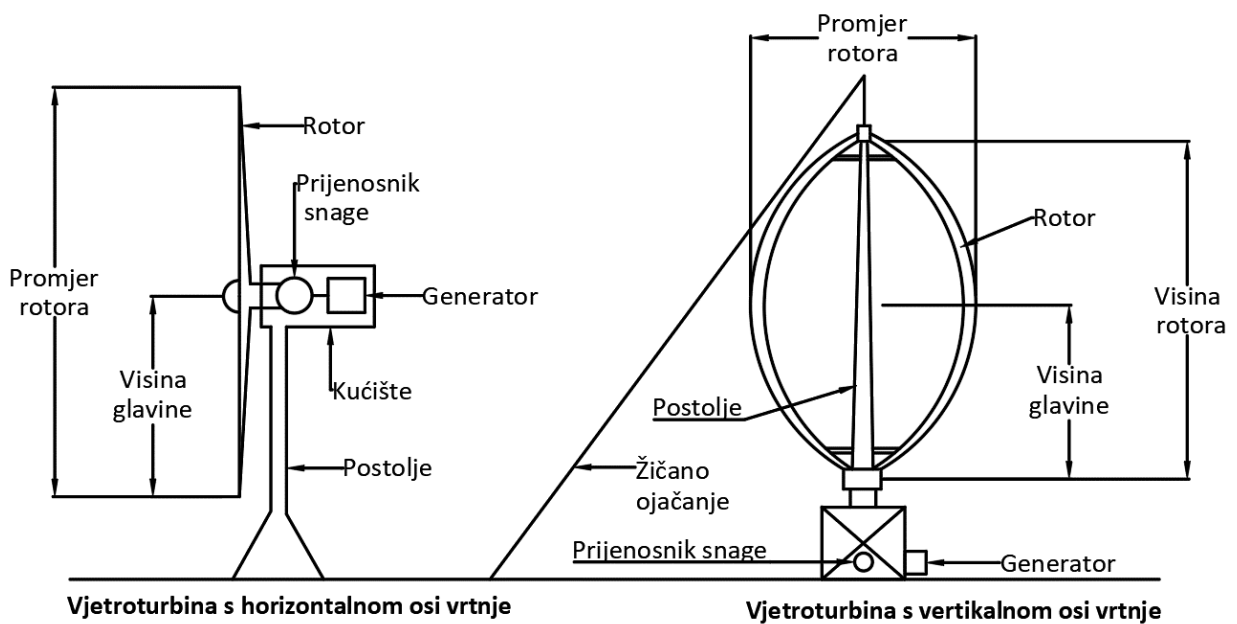
Dizajn vjetroturbine je pažljiva ravnoteža troškova, izlazne energije i vijeka trajanja.

Općenito, vjetroturbine se mogu podijeliti prema položaju osi vrtnje:

- Vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje ili VSHO (eng. *HAWT*), ima osovinu glavnog rotora na vrhu postolja i okreće se paralelno s vjetrom.
- Vjetroturbina s vertikalnom osi vrtnje VSVO (eng. *VAWT*), ima osovinu glavnog rotora paralelno uz stup i okreće se okomito s vjetrom.

Vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje nudi isplativu konstrukciju, instalaciju i upravljanje promjenom nagiba lopatica, a nedostatak je skuplja izvedba zbog sustava zakretanja turbine. Dok vjetroturbina s vertikalnom osi vrtnje ima prednost da radi neovisno o smjeru vjetra (nije potreban mehanizam za promjenom nagiba lopatica), a teški prijenosnici snage i generatori mogu se instalirati na razini tla (čineći strukturu znatno jednostavnijom). Zbog toga ima nedostatke kao što su: ne radi sama (potrebno je „gurnuti“ prije nego što se pokrene), nema postolja pa nije u moguće učinkovito koristiti veće brzine vjetra na većim visinama, obično su potrebna žičana ojačanja pričvršćene na vrh za potporu, moment oscilira sa svakim okretajem kako se lopatice pomiču prema vjetru i udaljavaju se od vjetra, a regulacija brzine pri jakom vjetru može biti teška. [12]

Razlika između vjetroturbina prema položaju osi vrtnje prikaza na je na slici 3.1.



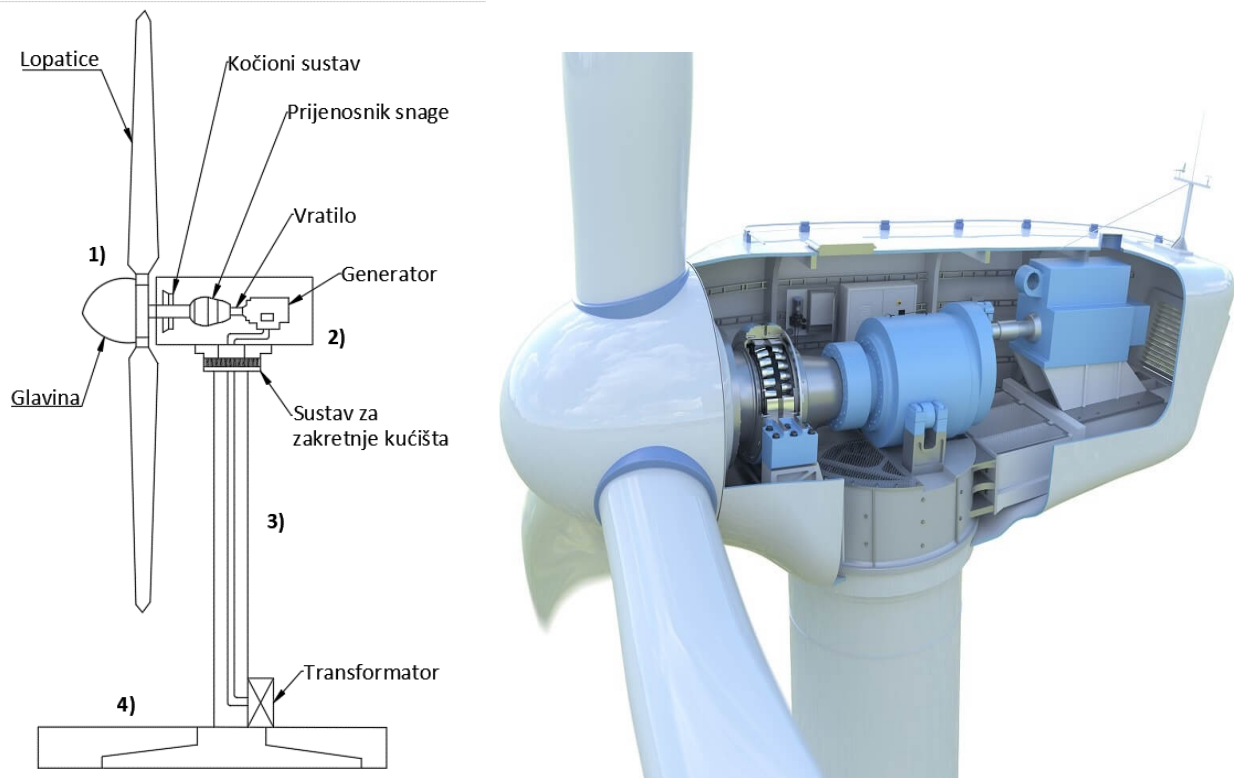
Slika 3.1: Prikaz vjetroturbina prema položaju osi vrtnje

S obzirom na veliki postotak tržišta, u ovom radu će se proučavati vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje ili VSHO (eng. *HAWT*).

U osnovi, vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje ili VSHO (eng. *HAWT*) sastoji se od 4 glavnih dijelova:

- 1) Rotor – sastoji se od lopatica i glavine.
- 2) Kućište vjetroturbine (gondola) – sastoji se od vratila, ležajeva, kočnica, prijenosnika snage, generatora i sustava zakretanja turbine.
- 3) Postolje – može biti izvedeno kao cjevasti, teleskopski, rešetkasti, učvršćeni i hibridni, a služi kao nosač za gondolu i rotor.
- 4) Temelj – prenosi opterećenja ostalih dijelova konstrukcije na tlo.

Na slici 3.2 prikazani su glavni dijelovi vjetroturbine i dijelovi koji se nalaze u kućištu vjetroturbine.



Slika 3.2: Prikaz glavnih dijelova vjetroturbine [13]

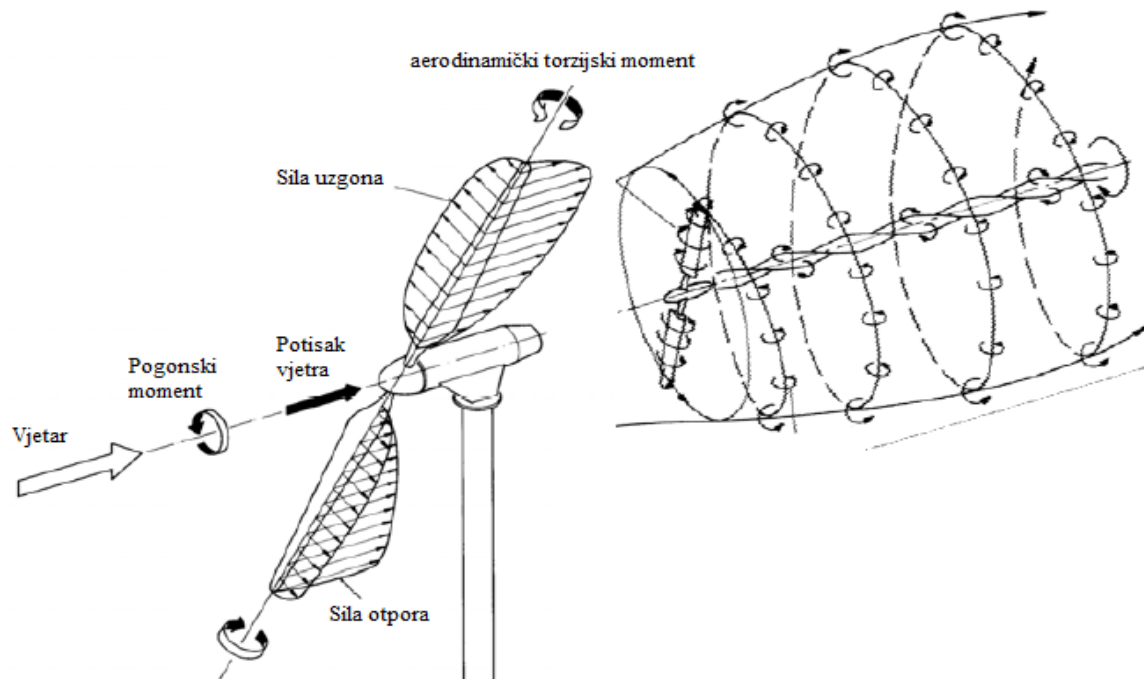
3.1. Rotor

Rotor se sastoji od lopatica i glavine. Postavljeni su uz vjetar od postolja i vanjskog kućišta vjetroturbine. To je prvenstveno zbog toga što strujanje zraka iza postolja je vrlo nepravilno, odnosno turbulentno. Lopatice rotora hvataju vjetar i prenose njegovu snagu na glavinu koja dalje šalje snagu preko vratila do prijenosnika snage i generatora.

3.1.1. Lopatice

Lopatice vjetroturbine su u obliku zračnog profila koje iskorištavaju energiju vjetra i pokreću rotor vjetroturbine. Dizajn u obliku aeroprofila (koji osigurava podizanje u zrakoplovu s fiksnim krilom) koristi se kako bi se lopicama omogućilo podizanje okomito na smjer vjetra. Ovaj vektor sile djeluje na rotor i pokretačka je sila vjetroturbine, odnosno rotora. Lopatice su pomno izrađeni profili koji koriste aerodinamičke principe kako bi uhvatili što je više moguće snage. Dizajn aeroprofila koristi dužu gornju površinu, dok je donja površina donekle ujednačena. Po Bernoullijevom principu, „dizanje“ (uzgon) se stvara na aerofilu zbog razlike tlaka vjetra koji struji preko gornje i donje površine lopatice. [7]

Osim sile podizanja (uzgona) na lopaticama, stvara se sila otpora koja djeluje na lopatice, ometajući učinak podizanja i usporavajući rotor. Sili otpora mora se oduprijeti noseća konstrukcija, postolje i temelj. Cilj dizajna je dobiti najveći omjer uzgona i što manji otpora koji se može mijenjati duž duljine lopatice kako bi se optimizirala izlazna snaga turbine pri različitim brzinama.



Slika 3.3: Prikaz strujanja vjetra na lopatice vjetroturbine [7]

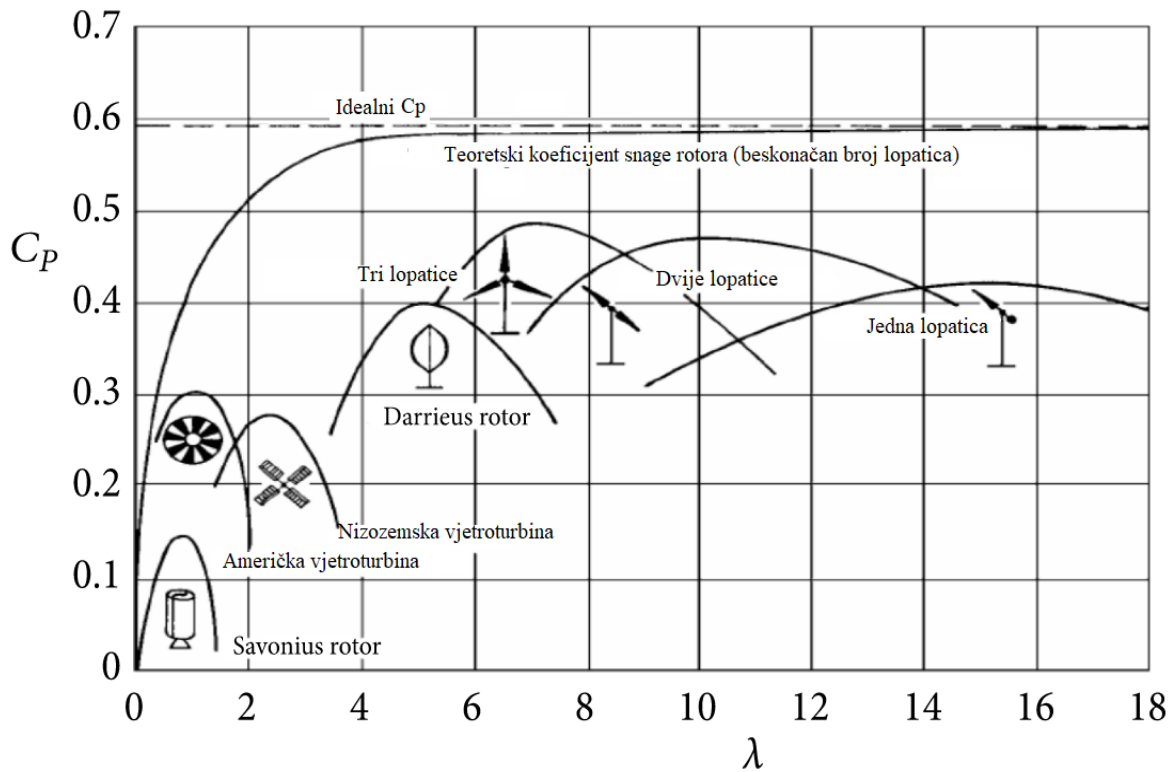
Moderne lopatice vjetroturbine imaju zaokret duž duljine lopatice. Na optimalni napadni kut aeroprofila utječe prividni smjer vjetra. Prividni smjer vjetra mijenja se kako se brzina lopatice povećava, čak i kada postoji ujednačena brzina vjetra u području rada rotora. Kako vrh lopatice putuje mnogo brže od segmenata lopatice koji je bliže glavini, lopatice zbog toga imaju zaokret duž lopatice kako bi se postigao optimalni napadni kut duž cijele duljine lopatice turbine. Ravne lopatice su one koje nemaju zaokret i jeftinije su za izradu. [11]

Koeficijent brzohodnosti vjetroturbine (eng. *Tip speed ratio* – TSR) ili λ definiran je kao omjer između brzine vrhova lopatica vjetroturbine i brzine neometanog aksijalnog strujanja zraka (vjetra):

$$\lambda = \frac{v_{\text{vrh lopatice}}}{v_{\text{vjetra}}} = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad (3.1)$$

gdje je: ω – kutna brzina lopatica (rad/s), R – polumjer rotora (m) i v – brzina vjetra (m/s).

Uobičajeno je koristiti grafikon koeficijenta snage rotora različitih tipova turbina (koeficijent iskorištenja snage vjetroturbine ili aerodinamički stupanj pretvorbe) C_p u odnosu na omjer koeficijent brzohodnosti vjetroturbine λ , a ne u odnosu na brzinu vjetra v jer to stvara bezdimenzijski graf. Ovaj omjer se često koristi C_p u odnosu na λ i prikazana je graf na slici 3.4.

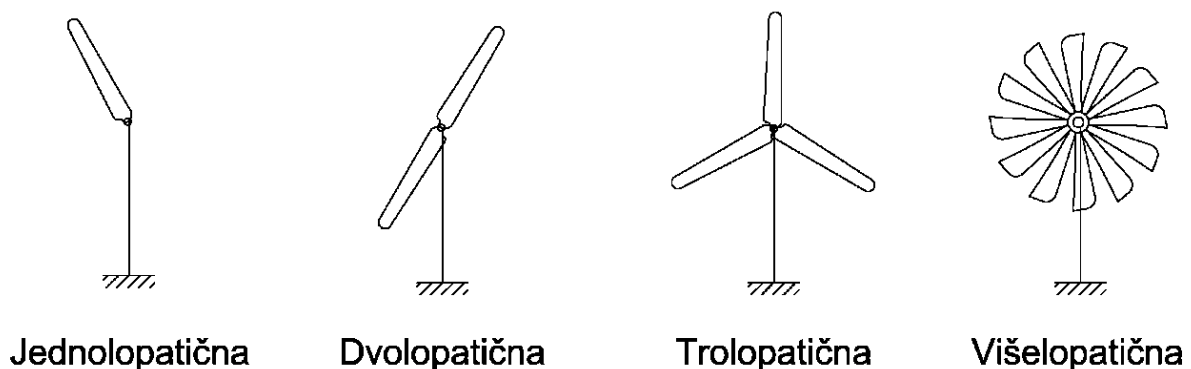


Slika 3.4: Dijagram koeficijenta brzohodnosti vjetroturbine λ i koeficijenta snage rotora različitih tipova turbina [7]

Rotor koji se polako rotira omogućit će da vjetar neometano prolazi kroz praznine između lopatica, dok rotor koji se brzo rotira pojavit će se kao čvrsti zid za vjetar. S druge strane, kada lopatica rotora prolazi kroz struju zraka, ostavlja turbulentni trag na svom putu. Ako sljedeća lopatica u rotirajućem rotoru stigne u zrak kada je još turbulentan, neće moći učinkovito izvući energiju iz vjetra i bit će podvrgnuta sve većim vibracijama. Stoga vjetroturbine moraju biti projektirane tako da rade na svom optimalnom koeficijentu brzohodnosti kako bi izvukle što je više moguće energije iz vjetra, prilagođavajući brzinu lopatica promjenama brzine vjetra. Općenito, visok koeficijent brzohodnosti je poželjna karakteristika jer rezultira velikom brzinom rotacije rotora koja je potrebna za učinkovit rad električnog generatora. Međutim vrhovi lopatica rotora koji rotiraju brzinom većom od 80 m/s bit će podložni eroziji rubova uslijed njihovog udara s prašinom ili česticama pijeska u zraku, također će biti skloni stvaranju buke i vibracija, te će imati smanjenu učinkovitost rotora zbog gubitka. [7]

Lopaticice su važna komponenta vjetroturbine s ekonomskog stajališta. Stoga broj lopatica igra važnu ulogu u tržišnoj konkurentnosti turbine. Inženjeri izbjegavaju izgradnju velikih vjetroturbina s parnim brojem lopatica rotora, a najvažniji razlog je stabilnost turbine. Rotor s parnim brojem lopatica stvara probleme stabilnosti stroja s krutom strukturom. Razlog je u tome što u trenutku kada se najgornja lopatica savija unatrag, jer dobiva maksimalnu snagu od vjetra, najdonja lopatica prolazi kroz područje gdje se nalazi stup postolja pa dobiva najmanju snagu od vjetra. Analizirajući sliku 3.4 očito je da vjetroturbina s manjim brojem lopatica (što je ekonomska prednost) pokazuju niže performanse (što je nedostatak). [14, 15]

Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje obično koriste različiti broj lopatica, ovisno o namjeni vjetroturbine. Za proizvodnju električne energije obično se koriste turbine s dvije ili tri lopaticice. Vjetroturbine s velikim brojem lopatica imaju nizak koeficijent brzohodnosti λ , ali veliki početni moment. Više lopatica ne daje veću snagu, ali daju veći zakretni moment i zahtijevaju kompliciraniju konstrukciju. Vjetroturbine sa samo dvije ili tri lopaticice imaju visoki koeficijent brzohodnosti λ , ali mali početni moment. Vjetroturbina s jednom lopaticom, iako je tehnički izvediva, daje vrlo veliki koeficijent brzohodnosti λ s posljedicom stvaranje buke, te povećanja abrazije i dinamičkih problema, s pulsirajućim momentom koji uzrokuje prekomjerne vibracije. Također zahtijevaju postavljanje protu utega s druge strane glavine od lopaticice rotora kako bi se uravnotežio rotor, što očito negira uštedu na težini u usporedbi s dizajnom s dvije ili tri lopaticice.

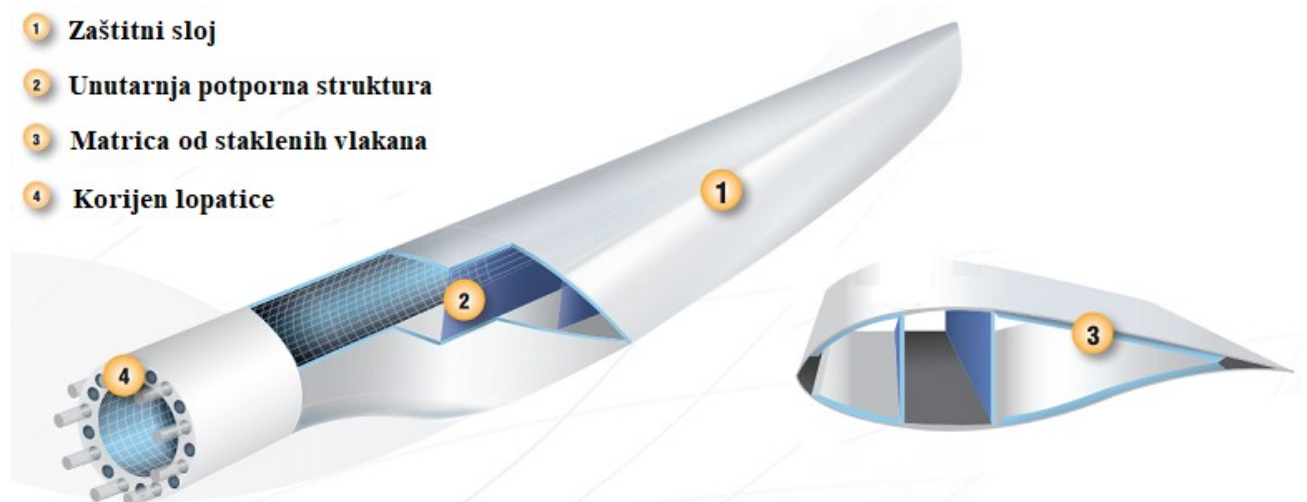


Slika 3.5: Prikaz vjetroturbina sa različitim brojem lopatica

Trenutno na tržištu dominiraju vjetroturbine s tri lopaticice i prednosti su im što moment inercije rotora je lakše razumjeti, te imaju lakšu gornju konstrukciju stoga cijela noseća konstrukcija ima nižu cijenu. Nadalje, ovim turbinama se često pripisuje bolja vizualna estetika s nižom razinom buke od vjetroturbina s dvije lopaticice. Oba su aspekta važna za korištenje vjetroturbina u naseljenim područjima. [14, 15]

Lopaticе rotora se obično izrađuju od širokog raspona materijala: aluminij, čelik, epoksid za drvo i plastika ojačana staklenim vlaknima. Većina lopatica na velikim vjetroturbinama izrađena je od plastike ojačane staklenim vlaknima (eng. *Glassfiber Reinforced Plastic – GRP*), odnosno od poliestera ili epoksida ojačanog staklenim vlaknima jer imaju najbolju kombinaciju čvrstoće, težine i cijene. Lopaticе koje su izrađene od mekih, fleksibilnih materijala, omogućit će promjenu oblika lopatica kao odgovor na uvjete vjetra, kako bi se povećalo hvatanje energije i smanjila opterećenja. Također je važno svesti težinu na minimum, jer težina ima snažan utjecaj na iskoristivost i ekonomičnost vjetroturbine. [1, 14]

Lopaticе se obično izrađuju pomoću kompozitnih matrica od staklenih vlakana koje su impregnirane materijalom kao što je poliester (GRP = poliester ojačan staklenim vlaknima). Poliester se stvrdne nakon što se impregnira staklena vlakna. Umjesto poliestera može se koristiti i epoksid. Isto tako osnovna matrica može biti izrađena u cijelosti ili djelomično od karbonskih vlakana, što se dobiva lakši, ali skuplji materijal visoke čvrstoće. Čelik i aluminijske legure imaju problema s težinom i zamorom metala, te se trenutno koriste samo za vrlo male vjetroturbine.

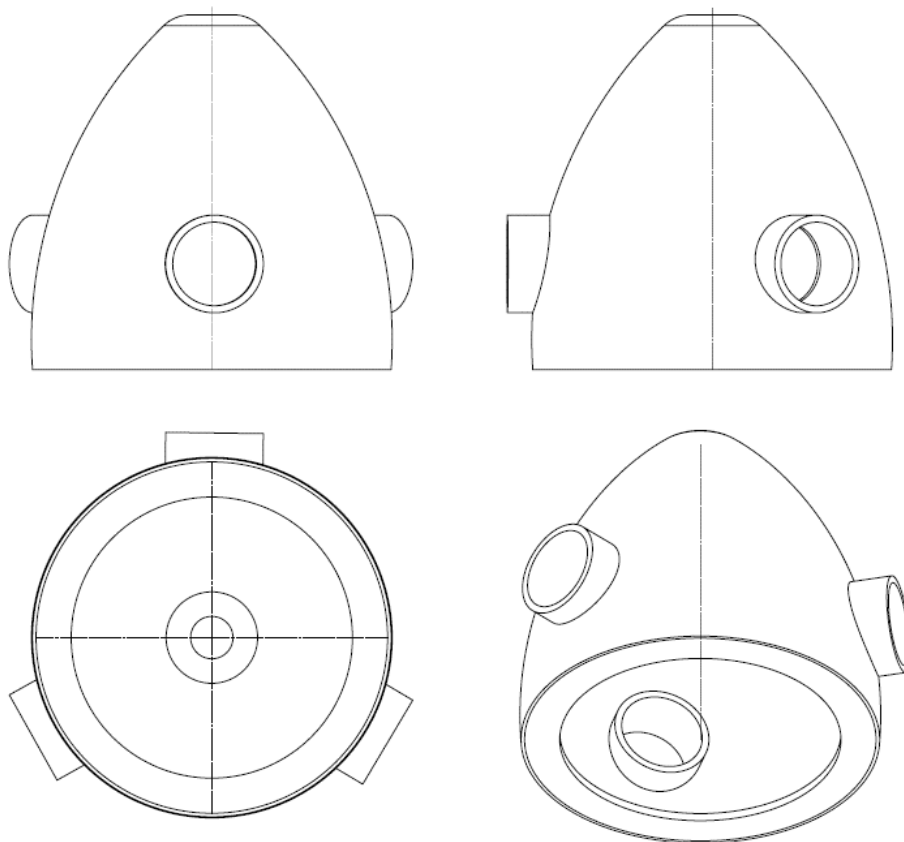


Slika 3.6: Prikaz dijelova lopatice [16]

Lopaticе rotora su najvidljiviji dio vjetroturbine i predstavljaju prednju stranu vjetroturbine. Postojano mehaničko naprezanje zbog centrifugalnih sila i zamora pod stalnim vibracijama čine dizajn lopatice najslabijom mehaničkom karikom u sustavu. Potreban je opsežan projektni napor kako bi se izbjegao prerani lom (kvar) lopatice od zamora u korijenu, gdje je opterećenje maksimalno zbog efekta konzole. Podložni su ogromnim naprezanjima i proizvedeni su uz uske tolerancije. Moraju biti uravnoteženi i pridržavati se tih uskih tolerancija kako bi se smanjila svaka količina vibracija koja bi inače uništile vjetroturbinu. [14]

3.1.2. Glavina

Glavinom se povezuju lopatice s vratilom rotora. Najčešće se izrađuje iz nodularnog lijeva zbog same kompleksnosti glavine, što je vidljivo na slici 3.7. Iako bi bila moguća izrada i zavarivanjem, ne izrađuje se na takav način zato što glavina mora imati veliku otpornost na zamor metala. Lijevane komponente trebaju biti projektirane s glatkim prijelazima kako bi se ograničile koncentracije geometrijskog naprezanja. [5]



Slika 3.7: Glavina rotora

Momenti i sile, koji se prenose na glavinu i postolje, zavise o tipu glavine. Razlikuju se tri tipa:

- Kruta glavina bez šarki: sadrži konzolne lopatice i prenosi sve momente na postolje (najviše se koristi ovaj tip).
- Kalebajući rotor: sastavljen od dvije kruto povezane lopatice poduprte sa spojnicom kojom može prenositi isključivo momente u ravnini glavine.
- Zglobna glavina: ima šarke koji omogućuju slobodno gibanje lopatica, pa zato one ne mogu prenositi nikakav moment.

Lopaticice su obično pričvršćene vijcima na glavinu. Postoje dvije tehnike za ugradnju vijaka u lopaticice:

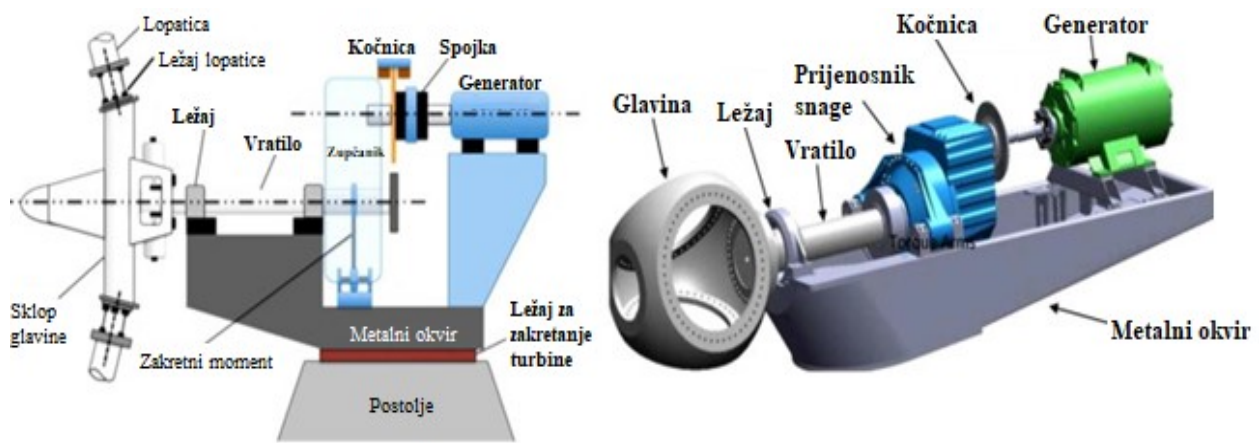
- Prirubnica ojačana sa staklenim vlaknima u obliku prstena koja se postavlja na korijenu lopaticice u koju su ugrađene čelične čahure za vijke.
- Čelične čahure s navojem montiraju se izravno u korijen lopaticice i fiksiraju se s ljepilom.

Sferoidno grafitno lijevano željezo, također poznato kao nodularno lijevano željezo, preferirani je materijal za glavinu. Važno je razmotriti ima li odabrani konstrukcijski materijal potrebnu duktilnost. Niske temperature mogu biti kritične za lijevane glavine u tom pogledu, te stoga pri izboru materijala za glavinu treba uzeti u obzir temperature okoline. Glavina treba biti konstruirana tako da je moguće podesiti kut vrha oštrice i zategnuti vijčane spojeve. U slučajevima kada je kućište glavine veliko, preporučuje se uzeti u obzir opterećenje vjetrom kojem će biti izloženo. Isto tako popravak lijevanih glavina zavarivanjem nije dopušten. [5]

3.2. Kućište ili gondola

Kućište vjetroturbine ili gondola sadrži ključne komponente za proizvodnju električne energije u vjetroturbini, uključujući od vratila, ležajeva, kočnica, prijenosnika snage, generatora i sustava zakretanja turbine. Kućište ili gondola se nalazi na vrhu postolja, te s jedne strane štiti električne i mehaničke komponente od vanjskih uvjeta, a s druge strane štiti okoliš od buke sustava. Mora biti konstruirano na način da je omogućen ulazak zamjenskih strojnih dijelova u slučaju reparacije vjetroturbine. Servisno osoblje može ući u gondolu kroz postolje vjetroturbine. Neke su gondole dovoljno velike da tehničari mogu stajati. [1]

Gondola sadrži većinu komponenti vjetroturbine i to od otprilike 8000 komponenti. Sama gondola je često izrađena od laganog materijala stakloplastike (eng. *fiberglass*). Poklopac gondole pričvršćen je na glavni okvir, koji podupire sve ostale komponente unutar gondole. Glavni okviri su velike metalne konstrukcije koje moraju biti sposobne izdržati velika opterećenja od zamora. Na slici 3.8 mogu se vidjeti glavne komponente koje se nalaze unutar gondole. [12]



Slika 3.8: Prikaz glavnih komponenti gondole [17]

3.2.1. Vratilo

Vratilo prenosi mehaničku energiju s glavine rotora na zupčasti prijenosnik ili direktno na generator. Njegova svrha je prenošenje opterećenja na fiksni dio kućišta, te ono prenosi aerodinamička, gravitacijska i dinamička opterećenja s glavine na gondolu, zbog stabilnosti i sigurnosti rotora na vjetroturbini. Vratilo je potrebno izraditi od materijala dobre duktilnosti zbog svih naprezanja i vibracija, a cijelo kućište mora dobro biti zaštićeno od korozije budući da ona uvelike smanjuje otpornost prema zamoru materijala. [5,18]

Za izradu vratila koristi se niskolegirani čelik pri čemu su tipični legirajući elementi Mn, Cr, Mo, Ni i V. Da bi izdržao zadana opterećenja materijal mora posjedovati visoku lomnu žilavost i malu krhkost bez obzira na promjenu temperature. Samo vratilo jedno je od najkritičnijih komponenata vjetroturbine stoga njezina kvaliteta izrade treba biti višestruko kontrolirana. [5]

3.2.2. Ležaj

Glavni ležaj vjetroturbine je oslonac za vratilo i prenosi opterećenja s rotora na kućište. Zbog velikih deformacija u vratilu najčešći tip ležaja koji se koristi jest bačvasto valjkasti ležaj. Taj tip ležaja podnosi velike radijalne i umjerene aksijalne sile u oba smjera, a dopušta zakretanje unutarnjeg prstena u odnosu na vanjski, što znači da je ležaj samopodešavajući i neosjetljiv na pogreške poravnjanja vratila u odnosu na kućište kod vjetroturbine. Količina ležajeva koji se ugrađuju zavisi o tipu vjetroturbine. Također pravilan odabir brtve i maziva osigurava da se smanjuje trenje i s time nepotrebno trošenje materijala, pozitivno djeluju na smanjenje buke, štiti od korozije i produljuje životni vijek ležaja. [5]

3.2.3. Prijenosnik snage

Mala brzina s rotora se prenosi na vratilo koje je spojeno na prijenosnik snage (zupčasti prijenos) koji je dalje spojen na drugo vratilo od generatora, koje ima veću brzinu pogodnu za generator da stvara električnu energiju. Glavna svrha zupčastog prijenosa je da djeluje kao multiplikator brzine rotacije i da prenosi energiju između rotora i generatora. Zupčasti prijenos povećava brzinu vrtnje prijenosnim omjerom od 30 do 60 puta. [5]

Zupčanici koji se koriste mogu se podijeliti u dvije skupine:

- čelnici s ravnim, kosim ili strelastim zubima,
- planetarni zupčanici.

Također je potrebno osigurati učinkovito podmazivanje i hlađenje zupčanika.

Vjetroturbine bez prijenosnika (također se nazivaju izravnim pogonom) eliminiraju zupčasti prijenos i umjesto toga, vratilo rotora spojeno je izravno na generator, koji se vrti istom brzinom kao i lopatice. [5, 18]

3.2.4. Spojka

Spojka je uređaj koji se koristi za spajanje vratila zajedno na njihovim krajevima u svrhu prijenosa snage. Primarna svrha spojke je spajanje dvaju dijelova rotirajuće opreme uz dopuštanje određenog stupnja neusklađenosti ili pomicanja kraja ili oboje. Spojke obično ne dopuštaju odspajanje vratila tijekom rada, ali postoje spojke za ograničavanje zakretnog momenta koje mogu proklizati ili se odvojiti kada se prekorači neka granica zakretnog momenta. Odabir, instalacija i održavanje spojke može dovesti do smanjenja vremena i troškova održavanja. [19]

Kod vjetroturbine koriste se u pogonskom sklopu između zupčastog prijenosnika i generatora za prijenos zakretnog momenta i kompenzaciju neusklađenosti. Kompaktan dizajn omogućuje radijalnu montažu i demontažu bez pomaka reduktora ili generatora. Spojke koje su posebno razvijene za primjenu u vjetroturbinama, osiguravaju prijenos visokog zakretnog momenta u kombinaciji s velikim vrijednostima neusklađenosti s ekstremno niskim silama vraćanja kao i maksimalnim vijekom trajanja. Tipično, spojke vjetroturbina su krute u osi rotacije. [20]

Neki od tipova spojki koji se ugrađuju u vjetroturbine su sljedeće:

- prirubnička spojka – prenosi se moment pomoću trenja među prirubnicama, a ponekad može biti i slučaj da se prenosi pomoću trenja i pomoću smicanja vijaka,
- spojka izvedena prisnim dosjedom – prenosi minimalno 1,5 puta veći moment od maksimalnog bez proklizavanja spojke,
- torzijska elastična spojka – sadrži gumu među elementima koja ublažava nagle pomake, udarce i vibracije,
- zupčasta spojka – prenosi moment pomoću zuba koji naliježu jedni na druge.

3.2.5. Kočnica

Aktivni dio zaštitnog sustava je kočioni sustav koji se sastoji od dva neovisna sustava: aerodinamičkog kočionog sustava i mehaničkog kočionog sustava. Aerodinamički kočioni sustav kontrolira vrhove lopatica koji se mogu podesiti ili se cijela lopatica rotora može nagnuti. Prijenosnik snage opremljen je mehaničkom disk kočnicom i koristi se kao pomoćni sustav za aerodinamički kočni sustav u vjetroturbini. Mehanička kočnica se koristi kao sigurnosni sustav za kočenje glavnog vratila u slučaju da on dostiže prevelike brzine, u slučaju kvara aerodinamičke kočnice ili kada je turbina na servisu. Sastoji se od kočionih čeljusti, diskova i pločica. Za aktiviranje i deaktiviranje kočnica najčešće se koristi hidraulički sustav. [18]

3.2.6. Hidraulički sustav

U hidrauličkom sustavu se nalazi fluid koji pod pritiskom kruži u zatvorenom krugu, te prenosi i kontrolira snagu u samom sustavu. Hidraulički sustav se koristi za okretanje lopatica i kao što je spomenuto u prethodnom poglavlju (3.2.5 Kočnica), u sustavu kočnica. Sam sustav mora biti zaštićen od prekoračivanja maksimalnog dopuštenog tlaka, te mora biti konstruiran na način da bude jednostavno njegovo sastavljanje, rastavljanje i održavanje. Sustav se kontrolira pomoću ventila koji reguliraju hidrauličke efekte između pumpe i motora, cilindra ili aktuatora. Svrha ventila je regulacija veličina volumnog protoka, blokiranje volumnog protoka ili za kontroliranje tlaka fluida. [5]

3.2.7. Generator

Generator vjetroturbine pretvara mehaničku energiju rotora u električnu energiju. Dok lopatice prenose kinetičku energiju vjetra u energiju rotacije u prijenosnom sustavu, generator osigurava opskrbu električnom energijom iz vjetroturbine u električnu mrežu. Generator se sastoji od rotora i statora. Rotor se može sastojati od magneta ili namotaja vodiča, smješten je u središtu statora. Stator preuzima energiju s rotora i pretvara ju u električnu energiju (inducira se izmjenična struja). [5, 18]

Brzina rotacije rotora mora biti prilagođena kako bi se dobivala izmjenična struja frekvencije 50 Hz. Struju frekvencije 50 Hz dobiva se kada rotor s dva pola okreće brzinom od 50 okretaja u sekundi, odnosno 3000 okretaja u minuti. U slučaju da povećavamo broj polova rotora, broj potrebnih rotacija će se smanjiti, pa će rotor sa šest polova trebati postizati brzinu rotacije od samo 1000 okretaja u minuti. Točan broj okretaja se postiže pomoću reduktora (zupčastog prijenosa). [5]

Generatore možemo podijeliti na broj polova i na:

- sinkrone generatore – rotor se vrte na konstantnoj brzini,
- asinkrone generatore – dopuštaju promjenu brzine vrtnje na rotoru i stoga se češće koriste kod vjetroturbina.

3.2.8. Sustav zakretanja turbine (eng. *Yawing*)

Sustav zakretanja turbine je rotacija kućišta (gondole) i rotora oko vertikalne osi postolja. Zakretanjem turbine rotor se može postaviti tako da vjetar udara u ravninu rotora pod pravim kutom i održavanje osi rotora u ravnini sa smjerom vjetra, odnosno kako bi se ostvario pravilan upadni kut vjetra na lopatice rotora. [5]

Sustav zakretanja dijeli se na pasivno i aktivno zakretanje.

Pasivni sustav zakretanja podrazumijeva da se ravnina rotora drži okomito na smjer vjetra korištenjem površinskog tlaka koji stvara vjetar, odnosno samostalno poravnava sa smjerom vjetra pomoću korištenja površinskog pritiska na kućište. Pasivni sustav zakretanja se koristi za male vjetroturbine i turbine na niz vjetar, također može predstavljati problem u smislu uvrtnja kabela ako turbina se nastavi okretati u istom smjeru dulje vrijeme. [5]

Aktivni sustav zakretanja koristi elektromehanički pogon i upravljački sustav za kontrolu koji zakreće rotor točno okomito na smjer vjetra i također služi kao zaštita prilikom prejakog vjetra. Senzori otkrivaju brzinu i smjer vjetra, a motori okreću rotor u vjetar kako bi maksimizirali učinak. Takvo pozicioniranje turbine u odnosu na vjetar naziva se i prisilno zakretanje. Većina vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje koristi aktivni sustav zakretanja za poravnavanje osi rotora s vjetrom. [5]

Mehanizam koji se koristi za aktivni sustav zakretanja obično sastoji se od niza elektromotora s električnim pogonom u sprezi sa zupčanikom koji pokreće veliki nazubljeni prsten za kretanje po obodu postolja. [5]

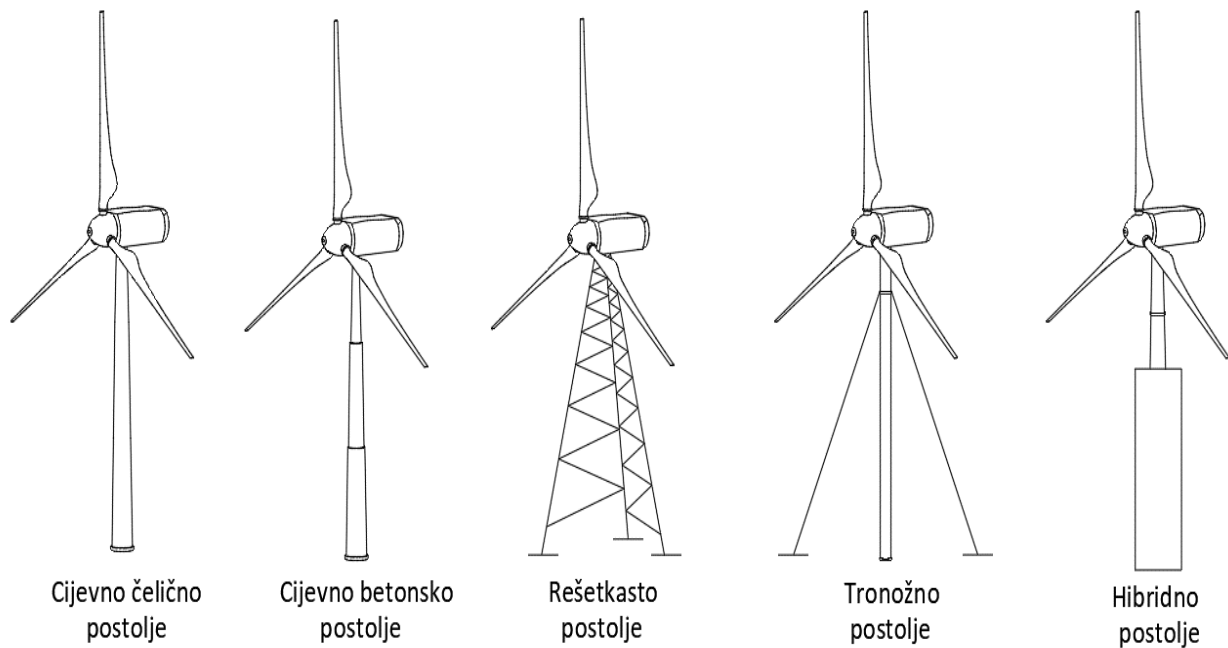
3.3. Postolje

Postolje vjetroturbine nosi masu kućišta (gondole), rotora i svih elemenata koji se nalaze na vrhu postolja, te prenosi opterećenja s rotora i kućišta na temelj, isto tako osigurava siguran i pouzdan rad vjetroturbine u različitim uvjetima vjetra. Općenito, prednost je imati visoko postolje, jer se brzina vjetra povećava dalje od tla. Kako bi se uhvatilo više energije iz vjetra i generiralo više energije. Proizvođači radije proizvode viša postolja zbog veće sigurnosti, optimalne izvedbe i bolje fleksibilnosti dizajna. S druge strane, transport, montaža i servis komponenti postaju sve teži i skuplji s povećanjem visine.

Postolja vjetroturbina izrađuju se u različitim oblicima i materijalima. Kao materijal, postolja su izrađena od betona ili konstrukcijskog čelika. Postolja se mogu podijeliti na različite tipove (prikazano na slici 3.9), kao što su:

- cijevno čelično postolje,
- cijevno betonsko postolje,
- rešetkasto postolje,
- žičano učvršćeno postolje,
- hibridno postolje (kombinacija cijevnog ili betonskog ili rešetkastog postolja).

U nastavku su ukratko obrađene glavne značajke različitih tipova postolja.



Slika 3.9: Tipovi postolja kod vjetroturbina

3.3.1. Cijevno čelično postolje

Većina velikih vjetroturbine se izrađuje s cijevnim čeličnim postoljima, koji se proizvode u dijelovima od 20-30 metara s prirubicama na oba kraja i spojenim vijcima na mjestu gdje se montiraju. Postolja su konusna (tj. s povećanjem promjera prema bazi) kako bi se povećala njihova čvrstoća gdje je to najpotrebnije, te i istovremeno uštedio materijal. Zapravo, glavni razlog za odabir ove vrste postolja je čvrstoća strukture. Cijevno čelično postolje ima prednost što je poznato i vrlo dobro optimizirano, proizvođači diljem svijeta uložili su u opremu za proizvodnju cijevi (specifično za vjetroturbine). Mogućnost pred ugradnje cjelokupne unutarnje opreme postolja, dovele su do toga da su cijevno čelična postolja postala standardno rješenje na tržištu. Kao nedostatak se ističe transport, kako se takav tip postolja sastoji od više većih dijelova, stoga dolazi do poteškoća prilikom samoga transporta. Jedno od rješenja je podijeliti dijelove na više manjih dijelova. Ipak, dijeljenje na male komade čini više troškova za proizvođača i transport. [5, 12, 18]

3.3.2. Cijevno betonsko postolje

U usporedbi s cijevnim čeličnim postoljem, cijevna betonska postolja nisu toliko popularna kao čelične konstrukcije. S druge strane, prema energetske zahtjevima, visina postolja i promjer rotora će se znatno povećati u budućnosti. Rezultat ovog povećanja, kako bi se došlo do više sigurnosnih konstrukcija, investitori se okreću betonskim konstrukcijama. Posebno su impresivni rezultati dinamičkih analiza betonskih konstrukcija. Uglavnom se betonska postolja montiraju na terenu, osim toga beton se dosta koristi u građevinskom sektoru, tako da nema problema s dobavljačima. Često se koristi metoda prednaprežanja betona, kao rezultat ove metode smanjuje se broj pukotina u betonu. Manje pukotina znači duži vijek trajanja u smislu zamora. Još jedan dobar aspekt betona je lokalna torzija ili savijanje. Tijekom montaže, čelične konstrukcije moraju se vrlo pažljivo provjeriti na lokalne torzije ili savijanja. Također cijevna betonska postolja kao i cijevna čelična postolja su sigurnija i udobnija za servisno osoblje i druge koji moraju ulaziti i penjati se na vjetroturbine. Osim toga, cilindrična postolja zahtijevaju manje održavanja od ostalih vrsta. Vizualni izgled je također jedna pozitivna stvar za ovu vrstu postolja. [5, 12, 18]

3.3.3. Rešetkasto postolje

Proizvodi se pomoću zavarenih ili vijčano povezanih čeličnih profila. Osnovna prednost je jednostavan dizajn i cijena, budući da je za rešetkasto postolje potrebno upola manje materijala nego za cijevno postolje slične krutosti, te sadrži dobro dinamičko ponašanje. Isto tako ima bolju ekonomičnost transporta (čelični profili su lakši za transport u usporedbi s cijevnim konstrukcijama). Osim što je lakše, pruža i manji otpor zraka nego masivno cijevno postolje. Međutim, ova vrsta konstrukcije ne može nositi vrlo teške gondole, a glavni trošak nekada je veći nego kod ostalih tipova postolja. Osnovni nedostatak rešetkastih postolja je njihov vizualni izgled i šira baza postolja koje zauzima veći prostor kod temelja. [5, 12, 18]

3.3.4. Žičano učvršćeno postolje

Mnoge male vjetroturbine izgrađene su s uskim stupovima koji su poduprti žicama. Prednost je ušteda na težini, a time i troškova. Nedostaci su otežan pristup oko postolja što ih čini manje prikladnim na poljoprivrednim površinama. Konačno, ova vrsta postolja sklonija je kvarovima, čime se ugrožava ukupna sigurnost. [5, 12, 18]

3.3.5. Hibridno postolje

Izrađena u različitim kombinacijama gore navedenih tipova postolja, najčešća je kombinacija čelika i betona. Ovakva postolja se sastoje od dva glavna dijela. Prvi dio je betonski temelj i polovica postolja od betona, a drugi dio je čelična cijev iznad betona. Cilj hibridnog postolja je izvlačenje pozitivnih aspekata različitih tipa postolja. Na primjer, betonsko postolje nema problema s transportom, a čelične konstrukcije su lakše od betona. Korištenje hibridnog tornja može pružiti fleksibilnost prilikom transporta i montaže. Kako je temelj i donji dio postolja od betona, tako nije potrebna dodatna dizalica veće snage za montiranje velikog cijevnog čeličnog postolja. To znači jednostavan proces montaže i manji trošak. Nadalje vrh hibridnog postolja je od čelika, stoga je manje težine od cijelog betonskog postolja, što donosi pozitivnu stvar prilikom vibracija i seizmičkog djelovanja (potresa). [5, 12, 18]

3.4. Temelji

Dostupne su mnoge opcije za temelje vjetroturbine, a optimalna konfiguracija temelja ovisi o veličini vjetroturbine, geotehničkim uvjetima i uvjetima opterećenja specifičnim za lokaciju. Temelji konstrukcije vjetroturbine podvrgnute su snažnim momentima prevrtanja i stoga moraju pokazati dovoljnu otpornost na tlačne sile i sile podizanja. U većini slučajeva, velike varijacije između tlačnih sila i sila podizanja (zatezanja) ovise o silama vjetra, a povremeno i o seizmičkim djelovanjima. Potreban je niz strukturalnih i geotehničkih provjera projekta kako bi se osiguralo da su tip, veličina i položaj temelja sposobni odoljeti najnepovoljnijoj kombinaciji opterećenja. Zbog toga je potrebno dobro projektiranje temelja jer su oni osnova za ostatak izgradnje, te normalnog pogona i sigurnosti.

Postolje je obično povezano sa svojim nosećim temeljom pomoću prirubničkog spoja vijcima ili zavarom. Vjetroturbine se učvršćuju na površinu preko temeljne ploče ili preko temelja koje je učvršćeno sa šipkama. Temeljna ploča se postavlja kada je podloga dovoljno čvrsta da podnese opterećenja s vjetroturbine. Ukoliko podloga nije dovoljno čvrsta, postavljaju se šipke koje se učvršćuju na većim dubinama gdje je prisutna čvršća podloga i na taj način temelj može prenijeti opterećenja s vjetroturbine na podlogu. Temelj se uglavnom nalazi ispod površine, te najčešće se ne primijeti. [5]

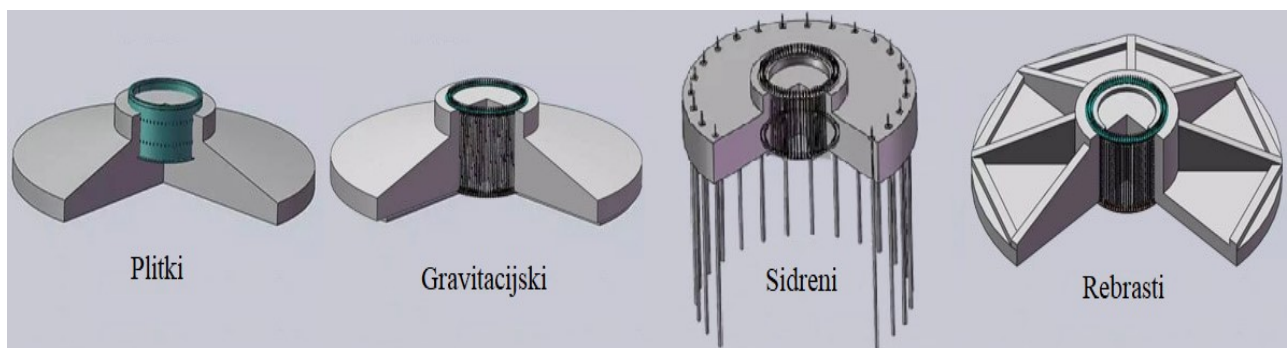
Prema mjestu gdje se ugrađuju vjetroturbine mogu se podijeliti na: kopnene (eng. *onshore*) i priobalne (eng. *offshore*) vjetroturbine.

3.4.1. Kopnene (eng. *onshore*) vjetroturbine

Na kopnu gdje se vjetroturbine grade u unutrašnjosti, obično u brdovitim ili planinskim predjelima kako bi pogodovali vjetrovitim uvjetima. Kopnene vjetroturbine često se postavljaju što više kako bi se postigle veće brzine vjetra. Međutim, vjetroturbine na kopnu ne rastu tako brzo kao vjetroturbine na moru zbog nekih ograničenja, kao što su buka samih vjetroturbina i ograničena dostupnost zemljišta. S druge strane, vjetroturbine na kopnu imaju i neke druge prednosti zbog kojih su također značajni kao što su jeftinija konstrukcija, jeftinija instalacija i pristup tijekom izgradnje, jeftinija integracija u električnu mrežu, te jeftiniji i lakši pristup za rad i održavanje. [5]

Na slici 3.10 prikazani su različiti tipovi temelja kopnenih vjetroturbina koji se mogu podijeliti na:

- plitki temelj,
- gravitacijski temelj,
- sidreni (prednapregnute šipke) temelj,
- rebrasti temelj.



Slika 3.10: Prikaz različitih tipova temelja kopnenih vjetroturbina [21]

Svi tipovi sastoje se od kružnih, pravokutnih ili poligonalnih temelja, koji dodaju vertikalnu težinu postolju i tako smanjuju ekscentricitet vertikalnog opterećenja. Masa i dimenzije ploče određuju se tako da težina turbine, postolja i samog temelja budu u stanju odoljeti momentu prevrtanja od horizontalnog opterećenja na konstrukciju vjetroturbine. [21]

Naglasak je stavljen na plitke temelje, koji su najčešće korišteni tip temelja za kopnene vjetroturbine. Kružne ploče smatraju se najučinkovitijim konstrukcijskim rješenjem za plitke temelje, jer je vjerojatno da će se maksimalni momenti prevrtanja dogoditi u bilo kojem smjeru.

Prednosti su da je jednostavan za izgradnju, razdoblje izgradnje je kratko, može se široko koristiti za veliki raspon kapaciteta postolja vjetroturbina. Pogodno za ravničarsko i brežuljkasto zemljište. Nedostatak je što je potrebno više iskopa i kopanja, više je potrebno betonskog i čeličnog materijala, te nije ekološki prihvatljivo. [21]

Kod gravitacijskih temelja, gdje se velika masa betona raspoređuje na velikom području koristi za otpor opterećenjima. Prednost je jednostavnost gradnje, posebice oplata, često se preferira poligonalni oblik za temelj ploče. Vrijedi napomenuti da je osmerokutna baza, s istom površinom kružnog temelja, najadekvatnije rješenje. Veličina i tip vjetroturbine, uvjeti vjetra i tla na gradilištu odlučujući su čimbenici u dizajnu temelja.

Prednapregnute šipke ili sidreni temelji su alternativni dizajni temelja koji koriste mnogo manje betona i čelika. Ovaj tip se oslanja na silu interakcije između šipki i zemlje kako bi se savladale sile prevrtanja. Prednosti su velika nosivost i mala površina. Pogodni za priobalno blatno i ravno područje, močvarno područje i područje meke zemlje. A nedostaci su da prednapregnute šipke utječu na okolne zgrade i objekte, kompliciraju tehnološki proces, te mogu biti skupe.

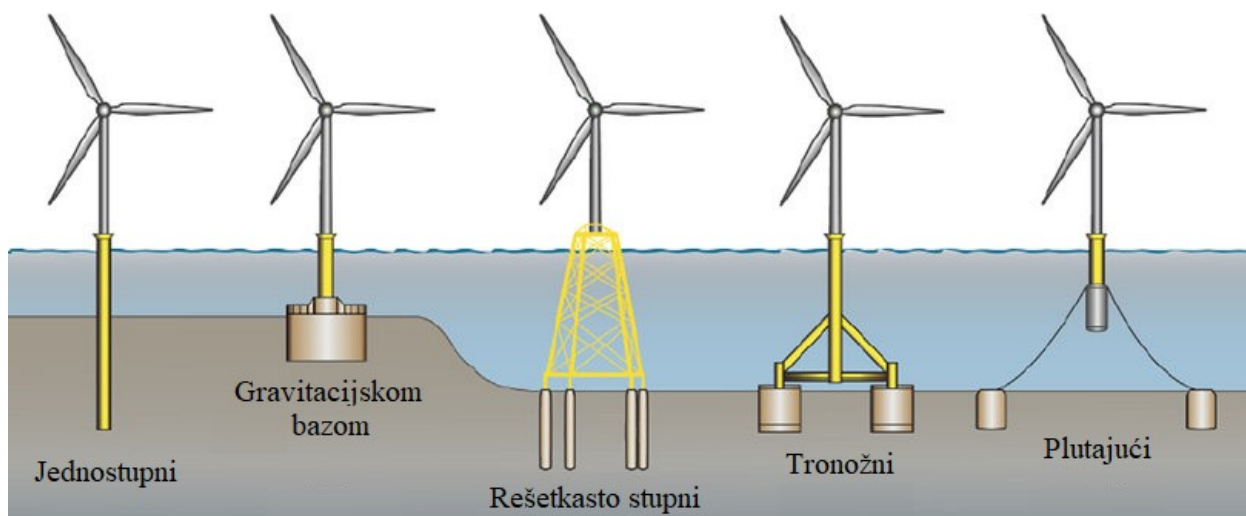
Rebrasti temelj uključuje dodatne grede i središnji stup. Grede su dizajnirane da se suprotstave momentima prevrtanja. Prednosti su da je potrebno manje betona ili čelika i pogodno je za ravničarski prostor. A nedostaci su da je potrebno više iskopa i kopanja, te složen modul. [21]

3.4.2. Priobalne (eng. *offshore*) vjetroturbine

Priobalno područje gdje su vjetroturbine postavljene u moru, najmanje 10 kilometara udaljene od kopna, a dubina vode je obično manja od 60 metara. To je atraktivno zbog veće brzine vjetra nad morem, ali uglavnom zbog smanjenog utjecaja na okoliš. Glavni nedostatak razvoja ovog tipa vjetroturbina je veći trošak izgradnje temelja, integracije u električnu mrežu, instalacije i održavanja. Moraju prenositi opterećenja od dna postolja kroz vodu do potpornog tla. Morski temelji stoga osim opterećenja od vjetra će trpjeti i opterećenja koja uzrokuju morske struje i valovi. Vjetroturbine na moru daju nam veću izlaznu snagu i rade više sati svake godine u usporedbi s istim turbinama instaliranim na kopnu, zbog veće i konstantnije brzine vjetra na otvorenim područjima iznad mora. Još jedna prednost korištenja vjetroturbina na moru je manja turbulencija vjetra uz veće prosječne brzine vjetra. [5]

Na slici 3.11 prikazani su različiti tipovi temelja priobalnih vjetroturbina koji se mogu podijeliti na:

- jednostupni temelj,
- temelj s gravitacijskom bazom,
- rešetkasto stupni temelj,
- tronožni temelj,
- plutajući temelj.



Slika 3.11: Prikaz različitih tipova temelja priobalnih vjetroturbina [22]

Jedan od najčešćih temelja za vjetroturbine na moru je jednostupni, jedna cijevna čelična šipka velikog promjera (4 do 6 metara) koja se zabija na dubinu od 5 do 6 puta veće od promjera šipke u morsko dno. Kohezija tla i trenje između cijevi i tla osiguravaju potrebnu strukturnu potporu za vjetroturbinu. Prednosti su da dobro funkcionira na pješčanom i šljunčanom tlu, ima jednostavan dizajn koji se lako montira, te je prilagodljiv za plitke i dublje instalacije raznih veličina. A nedostaci su da povećavaju se troškovi kod većih dubina postavljanja, te da vjetar, valovi i seizmičko opterećenje mogu negativno utjecati na jednostupni temelj. Što može uzrokovati rano oštećenje konstrukcije od zamora ako se ne uzme u obzir tijekom instalacije. [22]

Temelj s gravitacijskom bazom projektiran je od montažnog betona i pogodan je za dubine do 30 m, te koristi šljunak, pijesak ili kamenje kao dodatni teret radi poboljšanja stabilnosti. To je provjerena tehnologija posuđena iz naftne i plinske industrije. Prednosti su što koristi jeftinije materijale poput betona i čelika. Dok nedostaci su potrebna dodatna priprema morskog dna, te veći otisak temelja može povećati utjecaj turbine na okoliš. [22]

Rešetkasto stupni temelji se mogu postaviti do dubine od 60 m. Ove rešetkaste konstrukcije podsjećaju na naftne platforme na moru s četiri cjevaste noge povezane dijagonalnim podupiračima. Prednosti su da se može ugraditi pomoću šipki, pogotovo na mekom tlu gdje se ugrađuju šipke s većim duljinama koje značajno povećavaju sigurnost. Ima laganu rešetkastu strukturu, koja je isplativa. A nedostaci su da treba dobro kontrolirati spojeve između rešetkaste strukture. [22]

Tronožni temelj je dizajniran za korištenje dubina do 50 m, temelji imaju tronožne cjevaste baze spojene na cilindrični središnji stup ispod površine mora. Iznad površine mora izgleda kao jednostupni temelj. Ima karakteristike slične kao i jednostupni temelj, međutim prednost je ta da pruža dodatnu stabilnost vjetroturbini. Dobro je prikladan za mjesta gdje su prisutne krute gline ili srednji do gusti pijesak, a može se koristiti i na mekšem tlu. Mjesto morskog dna ne zahtijeva naprednu pripremu prije instalacije. Nedostaci su da troškovi izgradnje i održavanja mogu biti veći od ostalih vrsta temelja. [22]

Plutajući temelji značajno povećavaju doseg vjetroturbina, dopuštajući instalacije do preko 200 m dubine. Iskorištava 58% morskih izvora vjetra u dubokim vodama koje se nalaze tamo gdje tradicionalni temelji ne mogu doseći. Vjetroturbina i temelj mogu se sastaviti u luci, a zatim s lakoćom transportirati na mjesto ugradnje. Veći remontirani se mogu obaviti u luci tako da se vjetroturbina transportira natrag u luku. Nedostaci su često kabliranje za pričvršćivanje platformi na mjesto, koje zahtijeva stalnu inspekciju i održavanje. Sidra i kablovi mogu poremetiti život u moru. [22]

3.5. Kontrola vjetroturbine

Vjetroturbine postižu najveću učinkovitost pri brzini vjetra između 10 i 15 m/s. Iznad ove brzine vjetra, izlazna snaga rotora mora se kontrolirati kako bi se smanjile sile na lopaticama rotora, kao i opterećenje cijele strukture vjetroturbine. Jaki vjetrovi javljaju se samo u kratkim razdobljima i stoga imaju mali utjecaj u smislu proizvodnje energije, ali ako se ne kontroliraju, dominirali bi dizajnom i troškovima pogonskog sklopa i generatora. Sukladno tome, sve vjetroturbine su dizajnirane s vrstom kontrole snage. Postoje različiti načini za kontrolu aerodinamičkih sila na rotor turbine i ograničavanje snage pri jakom vjetru kako bi se izbjegla oštećenja vjetroturbine. [11, 14]

Brzina rotora mora se kontrolirati iz tri razloga:

- Za hvatanje što više energije vjetra, pretvarajući ju u kinetičku i električnu energiju.
- Za zaštitu rotora, generatora i ostale opreme od preopterećenja tijekom jakog vjetra.
- Kada je generator isključen iz električnog opterećenja, slučajno ili zbog planiranog događaja.

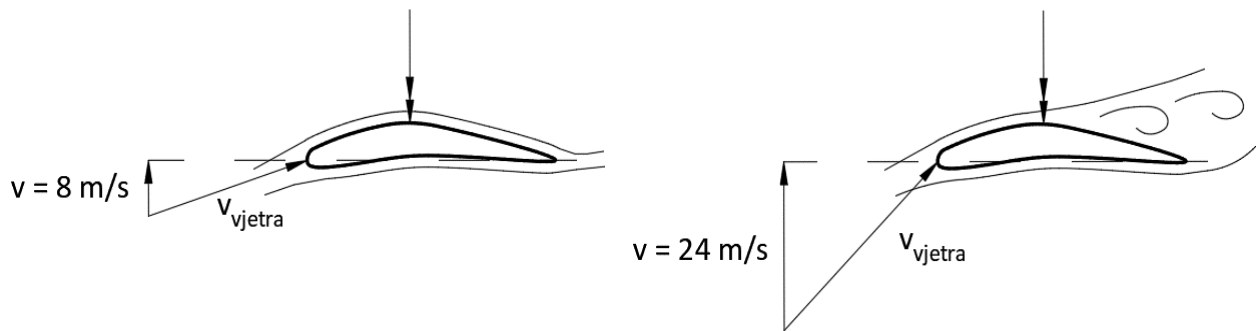
Upravljački sustav kontrole snage uključuje tri osnovna elementa: senzore za mjerenje procesnih varijabli, aktuatore za upravljanje hvatanjem energije i opterećenjem komponenti, te kontrolne algoritme koji primjenjuju informacije prikupljene od senzora za koordinaciju aktuatora. [23]

Sastoji se od tri metoda za kontrolu izlazne snage i ostale pomoćne metoda koje pripomažu:

- Metoda zavjetrine (eng. *Stall control*)
- Metoda promjene kuta lopatica rotora (eng. *Pitch control*)
- Aktivna metoda zavjetrine (eng. *Active stall control*)

3.5.1. Metoda zavjetrine (eng. *Stall control*)

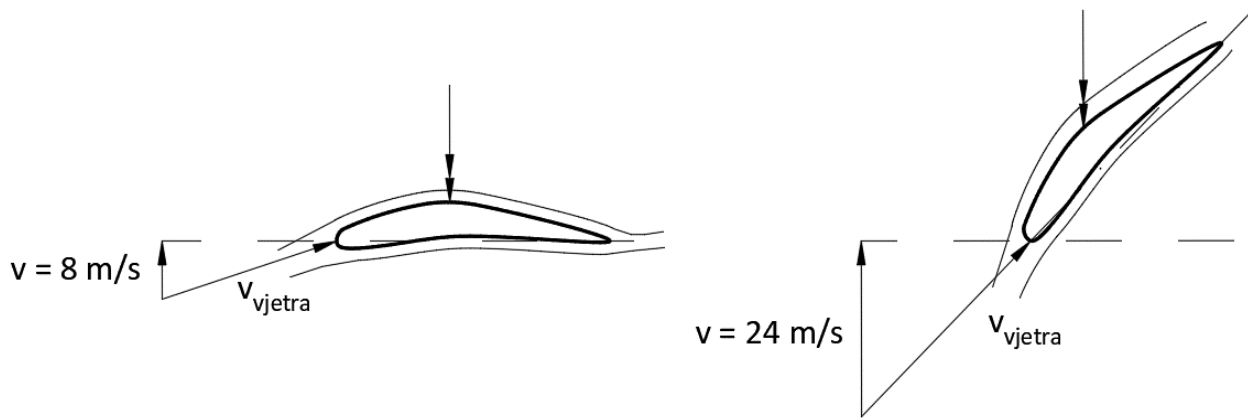
Metoda zavjetrine je najjednostavniji, najjeftiniji i najrobusniji način kontrole. Kod ovoga načina kontrole lopatice rotora se ne pomiču, te kut pod kojim su postavljene uvijek ostaje konstantan. To je dugo bila poželjna metoda upravljanja za male i srednje veličine komercijalnih vjetroturbina, a poznata je i kao pasivna kontrola, budući da nema pokretnih dijelova za podešavanje: inherentna aerodinamička svojstva lopatice određuju izlaznu snagu. Zavoj i debljina lopatice rotora variraju duž njezine duljine na način da se iza lopatice pojavljuju turbulencije (efekt stvaranja vrtložnih struja) kad god brzina vjetra postane previsoka. Ova turbulencija znači da se prenosi manje energije u vjetru, minimizirajući izlaznu snagu pri većim brzinama. Drugim riječima, aerodinamički dizajn lopatica uzrokuje zaustavljanje rotora (gubitak snage) kada brzina vjetra prijeđe određenu razinu. Prirodna strategija je dakle, dopustiti lopaticama rotora da se zaustave kada se brzina vjetra poveća. Međutim, stupanj nagiba lopatice ima tendenciju povećanja razine buke. Stoga je aerodinamička snaga lopatica ograničena. Nedostaci ove metode upravljanja su niska učinkovitost pri niskim brzinama vjetra i nedostatak potpomognutog pokretanja, te ne omogućava nikakvo naknadno upravljanje zbog toga što je ovaj način kontrole isključivo pasivan. Osim toga, ova vrsta upravljanja zahtijeva korištenje turbine s konstantnom brzinom koja, kako je već objašnjeno, ima nižu energetska učinkovitost od turbine s promjenjivom brzinom. [11, 23]



Slika 3.12: Prikaz zavjetrine, pojava turbulencije (Stall control)

3.5.2. Metoda promjene kuta lopatica rotora (eng. *Pitch control*)

Lopatice vjetroturbina s kontroliranim nagibom lopatica rotora mogu se okrenuti od vjetra ili prema vjetru kada izlazna snaga postane previsoka ili preniska. Kut lopatica rotora može se aktivno podešavati pomoću upravljačkog sustava kako bi se smanjila ili povećala snaga vjetra. Kontrola nagiba je relativno brza i može se koristiti za ograničavanje brzine rotora reguliranjem ulaznog aerodinamičkog toka snage vjetra. Glavne prednosti ove vrste upravljanja su dobra kontrola snage (snaga se održava blizu nazivne snage pri jakom vjetru), potpomognuto pokretanje i zaustavljanje u nuždi. Osim toga, turbine s metodom zavjetrine moraju se isključiti preko određene brzine, dok turbine s kontroliranim nagibom mogu podesiti kut lopatica i smanjiti aerodinamičke sile, uzrokovane zbog prevelike brzine vjetra. Nedostatak koji se može uzeti u obzir je složenost koja proizlazi iz mehanizma nagiba lopatica. Zato što lopatice rotora moraju biti pomično učvršćene na vrh osovine i mora postojati još dodatni motor koji bi upravljao nagibom lopatica. Mehanizmom nagiba obično se upravlja pomoću hidraulike. Kod malih i srednjih brzina vjetra, kut nagiba je reguliran kako bi se vjetroturbini omogućilo da radi u svom optimalnom stanju. Kod velikih brzina vjetra, kut nagiba se povećava kako bi se uklonio dio aerodinamičke snage i održala brzina rotora unutar kontrolirane granice. Kako se kut nagiba povećava, vjetroturbina radi s manjom učinkovitošću. Danas se velike vjetroturbine sve više koriste sa sustavima kontrole nagiba lopatica rotora. [11, 23]



Slika 3.13: Prikaz promjene kuta lopatica rotora (Pitch control)

3.5.3. Aktivna metoda zavjetrine (eng. *Active stall control*)

Kao što naziv govori, aktivna metoda je kombinacija dvije prethodno objašnjenih metoda/tehnika. Koristi aerodinamička svojstva lopatice (zavoj i debljina lopatice rotora varira duž njezine duljine na način da se iza lopatice pojavljuju turbulencije) u kombinaciji s kontroliranim nagibom lopatica rotora. Pri malim i srednjim brzinama vjetra, lopatice su nagnute prema vjetru kako bi se dobio veliki zakretni moment (sila okretanja), kada vjetroturbina dosegne nazivni kapacitet, lopatice će se nagnuti u suprotnom smjeru kako bi lopatice ušle u dublji zastoje. Drugim riječima, povećat će napadni kut lopatica rotora kako bi lopatice zašle u dublji zastoje, čime se gubi višak energije na vjetar. Jedna od prednosti aktivne metode zavjetrine je ta, što se izlazna snaga može kontrolirati točnije nego kod pasivne metode zavjetrine, kako bi se izbjeglo prekoračenje nazivne snage vjetroturbine na početku naleta vjetra. Još jedna prednost je što vjetroturbina može raditi gotovo točno na nazivnoj snazi pri svim velikim brzinama vjetra. Vjetroturbina s pasivnom kontrolom obično će imati pad izlazne električne snage za veće brzine vjetra, jer lopatice rotora ulaze u dublji zastoje. Mehanizmom se obično upravlja pomoću hidrauličkih motora ili električnih koračnih motora. [1,11]

3.5.4. Ostale pomoćne metode

- Sustav za praćenje vjetra (eng. *Yawing*)

Sustav za praćenje vjetra ili sustav zakretanja turbine objašnjen je u prethodnom poglavlju 3.2.8 Sustav zakretanja turbine. Te i on služi kao jedna od metoda za kontrolu izlazne snage rotora odnosno za kontrolu snage vjetra.

- Moment generatora

Moderne velike vjetroturbine rade s promjenjivom brzinom na generatoru. Kada brzina vjetra padne ispod nazivne brzine, moment generatora se koristi za kontrolu brzine rotora kako bi se uhvatilo što je više moguće snage. Najviše snage dobiva se kada se omjer brzine vrha lopatica drži konstantnim na svojoj optimalnoj vrijednosti. To znači da se brzina rotora povećava proporcionalno brzini vjetra. Razlika između aerodinamičkog zakretnog momenta kojeg hvataju lopatice i primijenjenog momenta, generatora kontrolira brzinu rotora. Ako je moment generatora manji, rotor se ubrzava, a ako je okretni moment generatora veći, rotor usporava. Ispod nazivne brzine vjetra, kontrola zakretnog momenta generatora je aktivna, dok se nagib lopatice obično drži pod konstantnim kutom koji hvata najveću snagu. Iznad nazivne brzine vjetra, moment generatora se obično održava konstantnim dok se nagib lopatice u skladu s tim podešava. [23]

- Električno kočenje

Kočenje male turbine može se obaviti bacanjem energije iz generatora u bazu otpornika, pretvarajući kinetičku energiju u električnu, te zatim u toplinu. Ova metoda je korisna ako se kinetičko opterećenje generatora naglo smanji ili je premalo da zadrži brzinu turbine unutar dopuštene granice. Ciklično kočenje usporava lopatice, što povećava učinak zastoja i smanjuje učinkovitost. Rotacija se može održavati na sigurnoj brzini na bržem vjetru uz održavanje (nominalne) izlazne snage. Ova metoda se obično ne primjenjuje na velikim vjetroturbinama. [23]

- Mehaničko kočenje

Mehanička bubanj kočnica ili disk kočnica zaustavlja rotaciju u hitnim situacijama kao što su ekstremni udari vjetra. Kočnica je sekundarno sredstvo za držanje turbine u mirovanju radi održavanja, sa sustavom kontrole rotora kao primarnim sredstvom. Takve se kočnice obično primjenjuju tek nakon što su metoda zavjetrine, metoda promjene kuta lopatica rotora i elektromagnetsko kočenje (moment generatora) smanjile brzinu rotora jer mehaničke kočnice mogu zapaliti vatru unutar gondole ako se koriste pri punoj brzini. Opterećenje turbine se povećava ako se kočnica aktivira pri nazivnom broju okretaja u minuti. [23]

4. OPTEREĆENJE POSTOLJA

Postolje jedan je od najvažnijih elemenata u konstrukciji vjetroturbine. Ima ulogu potpore cijele vjetroturbine, a također omogućuje pristup za pregled i provođenje planiranog održavanja i popravaka vjetroturbine. Štoviše, postolje osigurava potporu konstrukciji i cijelome sklopu. Ima posebno važnu ulogu jer se mora suočiti s vrlo teškim vremenskim uvjetima i opterećenjima.

Većina velikih vjetroturbine se izrađuje s cijevnim čeličnim postoljima, stoga će se analiza temeljiti na cijevnim čeličnim postoljima i sličnim profilima postolja. Cijevno čelično postolje ima prednost zbog toga što je poznato i vrlo dobro optimizirano, isto tako kao što je mogućnost pred ugradnje cjelokupne unutarnje opreme postolja, dovele su do toga da su cijevno čelična postolja postala standardno rješenje na tržištu. [24]

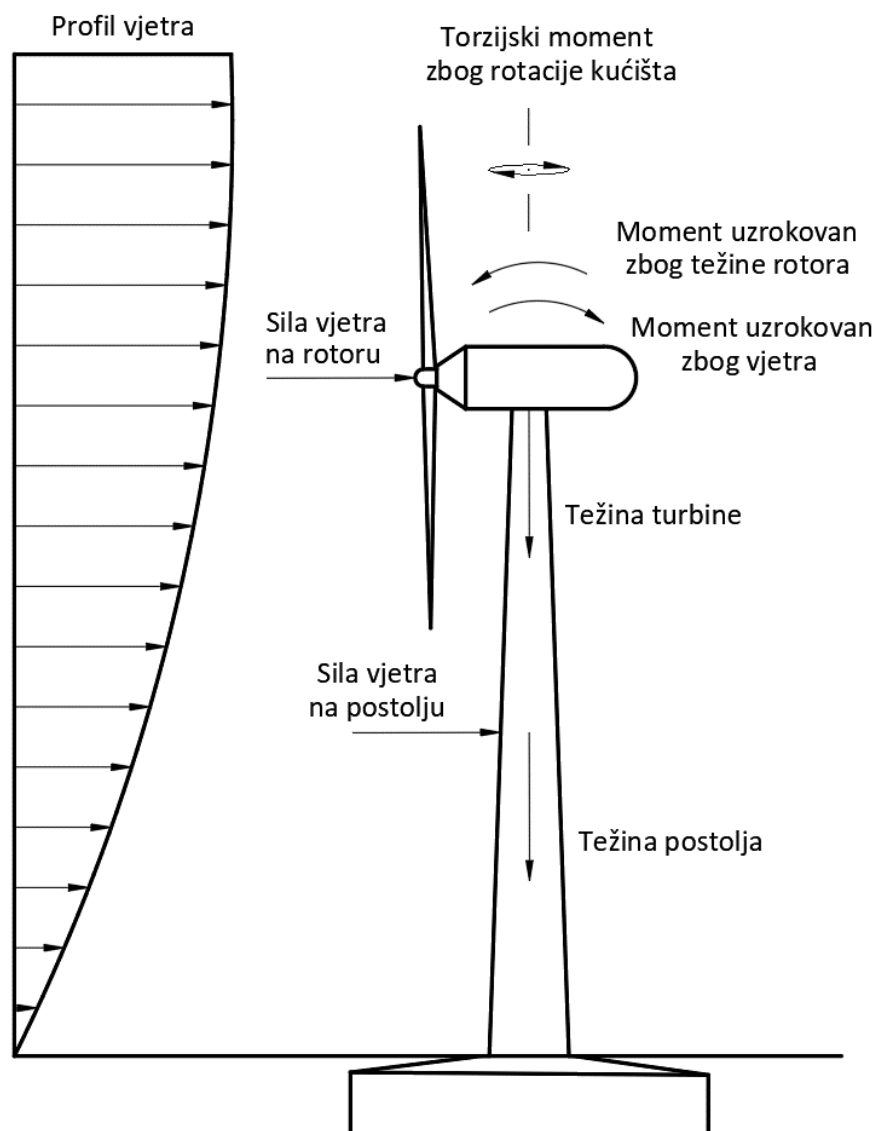
Posljednjih godina raste potreba za vjetroturbinama sve većih dimenzija, a s time konstrukcijska opterećenja vjetroturbina postaju sve značajnija i ne mogu se zanemariti. Cilj ovog dijela rada je analizirati sile i momente koji nastaju djelovanjem vjetra na postolje vjetroturbine, na koji način se spajaju segmenti postolja vjetroturbine, te odrediti osnovne elemente (geometriju i opterećenje) koji će definirati postolje vjetroturbine za daljnju obradu ovog rada.

4.1. Vrsta opterećenja

Kod konstruiranja postolja treba uzeti u obzir statičko opterećenje (težina vjetroturbine i postolja), dinamičko opterećenje (djelovanje vjetra na rotor i postolja vjetroturbine), utjecaj zamora materijala i opterećenja uzrokovana vibracijama. Zbog prirode vjetra opterećenja su vrlo promjenjiva u vremenu, dinamičke sile mnogo je teže predvidjeti nego statičke sile. Zrak je male gustoće, stoga površina potrebna za hvatanje energije mora biti velika, a dimenzije rotora i visina postolja se mora povećati. Time dolazi do povećanja statičkog opterećenja postolja. Problem nosivosti postolja je savijanje na dnu samog postolja, a glavni uzrok opterećenja konstrukcije vjetroturbine je vjetar. Od ukupne energije vjetra samo se dio pretvara u komponentu sile uzgona na lopaticama koja uzrokuje vrtnju rotora, dok se drugi dio energije vjetra pretvara u silu otpora na lopaticu. Osim sile potiska na lopatice, koja djeluje u smjeru vjetra, imamo sile i momente u ostale dvije osi. Većina momenta nastaje zbog naleta vjetra i djelovanja potisne sile na lopatice vjetroturbine, dok ostatak momenta se pojavljuje zbog nejednoliko raspoređene težine u turbini (od lopatica, rotora i gondole). [24]

Vjetroturbine s kontrolom nagiba lopatica, sila uzgona je općenito najviša kada rotor radi pri nazivnoj brzini. Međutim, pri ekstremnim brzinama vjetra dolazi do još većih opterećenja vjetroturbine stoga se uključuje sigurnosni sustav za mirovanje rotora. Maksimalna raspodjela momenta savijanja na postolju postiže se s lopaticama bez kontrole nagiba lopatica (turbine s kontroliranim zastojem) ili kada se zahtijeva najgori položaj lopatice rotora za određeni slučaj opterećenja. Sile i momenti na pojedinim lopaticama se zbrajaju i opterećuju ostatak konstrukcije. Glavčina i lopatice se gibaju, a ostatak konstrukcije miruje.

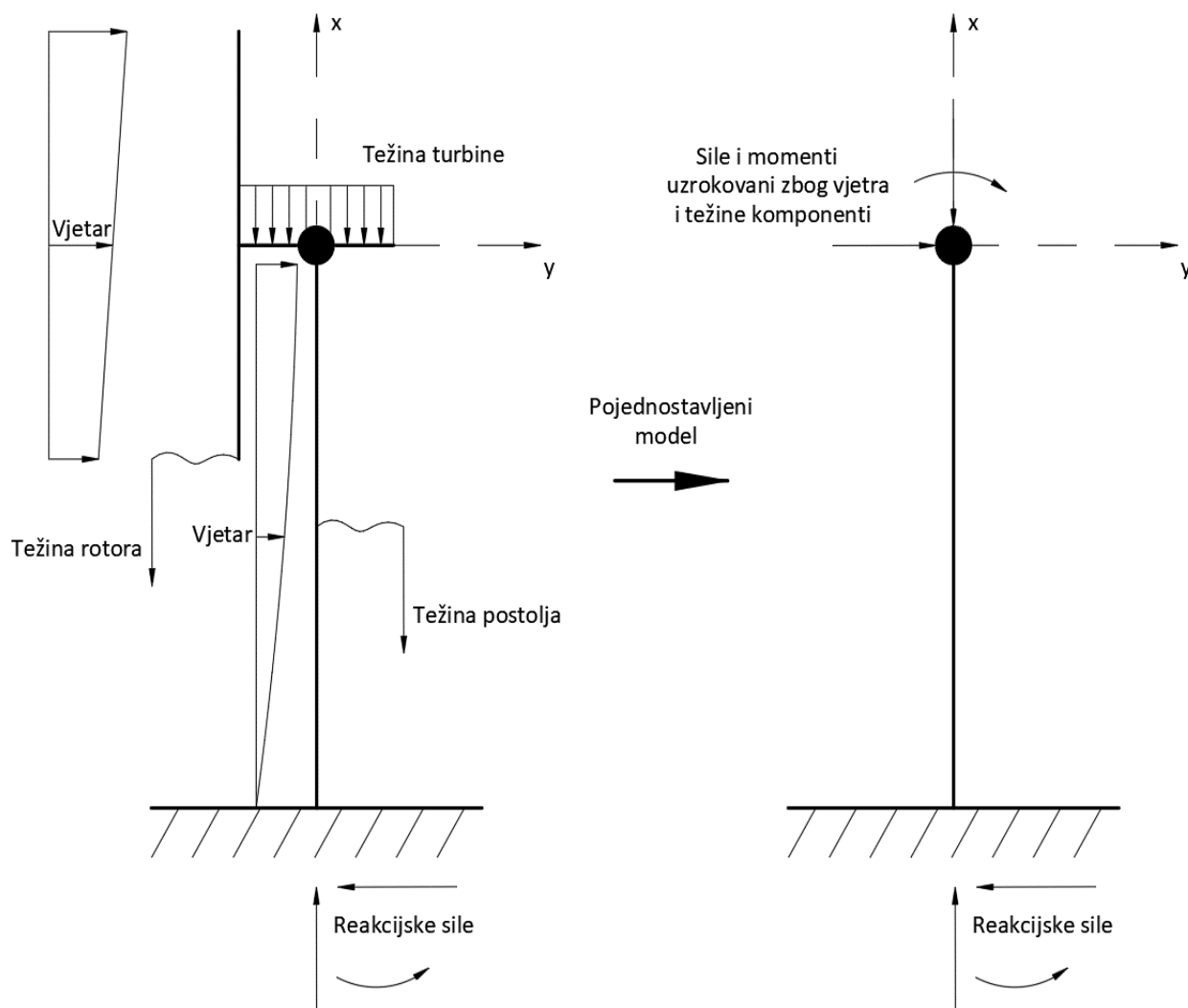
Ostala opterećenja su vlastita težina vjetroturbine (gondola, lopatice i rotor) i vlastita težina postolja. Dakle, opterećenja većine komponenta vjetroturbine posljedica su zbrajanja opterećenja lopatica rotora, te vlastite težine vjetroturbine i postolja. Na slici 4.1 prikazana su opterećenja koja djeluju na postolje.



Slika 4.1: Prikaz opterećenja vjetroturbine

Osnovne pretpostavke korištene u konstrukciji postolja su sljedeće:

- Konstruktivni model postolja se smatra konzolnom gredom koja je pričvršćena na temelj konstrukcije, a na svom slobodnom kraju nosi koncentriranu masu s raspoređenim opterećenjem vjetra i masom koja je jednaka masi gondole, lopatica i rotora.
- Materijal postolja je linearno elastičan, izotropan i homogen. Postolje je kružnog ili sličnog presjeka, s određenom debljinom stijenke.
- Distribuirana aerodinamička opterećenja uzrokovana su samo silama otpora i vjetrom.
- Postolje je konusnog oblika s promjerom koji se smanjuje od baze prema vrhu.



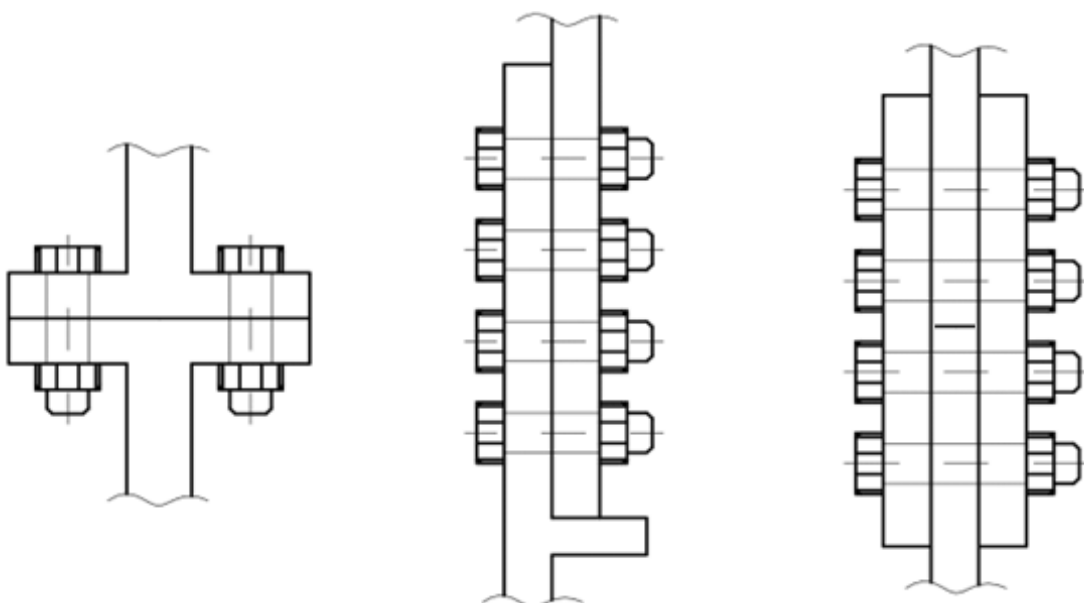
Slika 4.2: Prikaz vjetroturbine – konzola

U kontekstu vjetroturbine, postolje je nisko tehnološka komponenta, čiji je dizajn lako optimizirati i koji se stoga tijekom procesa projektiranja lako postavlja kao objekt za moguće smanjenje troškova uz vrlo malo truda. To može biti korisno jer trošak postolja obično čini značajan dio ukupnih troškova vjetroturbine.

Trošak postolja vjetroturbine je oko 30-33% ukupne investicije. Kako bi se izbjegla velika cijena postolja, minimiziranje mase postolja vrlo je kritičan posao u posljednja dva desetljeća. Kako bi se izbjeglo izvijanje, udvostručenje visine postolja općenito zahtijeva udvostručenje promjera postolja, povećavajući količinu materijala za faktor od najmanje četiri. Stoga je za konačnu cijenu energije vrlo važno izgraditi postolje što je moguće optimalnije.

4.2. Spajanja segmenata postolja

Kod većine velikih vjetroturbina postolje je konusnog oblika s promjerom koji se smanjuje od baze prema vrhu. Prednost u odnosu na ravne cilindrične oblike je da se ovime ostvaruje bolja krutost uz smanjenje težine. Postolje se sastoje od niza gotovih segmenata različitih dužina, pa i do 30 m, te debljine stijenki od 10 do 50 mm. Postolje je spojen s temeljem tzv. „temeljnim segmentom“ koji se proizvodi posebno i ugrađuje u temelj dok je beton još svjež. Segmenti su spojeni vijcima pomoću toplo valjanih čeličnih prirubnica, koje su zavarene na kraj svakog dijela tornja. Postoje tri načina spajanja postolja segmenata s vijcima i prirubnicama, kao što je prikazano na slici 4.3. [25]



Slika 4.3: Tri načina spajanja segmenata vijcima

Rešetkasta postolja se također spajaju vijcima i sastoji se od mnogo komada metalnih šipki. Jedan od pozitivnih aspekata ove strukture je laka dostupnost. Ovakvi sitni dijelovi mogu se naći kod svih proizvođača metala. Prema obliku postolja, učinak opterećenja vjetrom je manji od ostalih tipova konstrukcija. Međutim, ova vrsta konstrukcije ne može nositi vrlo teške turbine, a glavni trošak je veći od ostalih tipova postolja.

Kao što je gore spomenuto, čelična cilindrična postolja su ekonomičniji od drugih. Zbog svog konstruktivnog oblika, postolja ima manje vijčanih spojeva u usporedbi s rešetkastim, što znači manji broj vremena prednaprezanja i naprezanja. Osim toga, cilindrična postolja zahtijevaju manje održavanja od ostalih vrsta. Te u sigurnosnim aspektima, pružaju više sigurnog prostora za servis i tehničare. Estetski pogled je također jedan pozitivan način za ovu vrstu postolja.

4.3. Odabir vjetroturbine, definiranje geometrije i opterećenja

Potrebno je odrediti koja vrsta vjetroturbine će se promatrati i analizirati, prema kriterijima kao što su lokacija, snaga vjetroturbine, brzina vjetra, visina postolja i slično. Stoga je odabrana vjetroturbina „Vestas model V136-4.2“ na lokaciji Ličko-senjske županije, sjeveroistočno od grada Senja. [26]

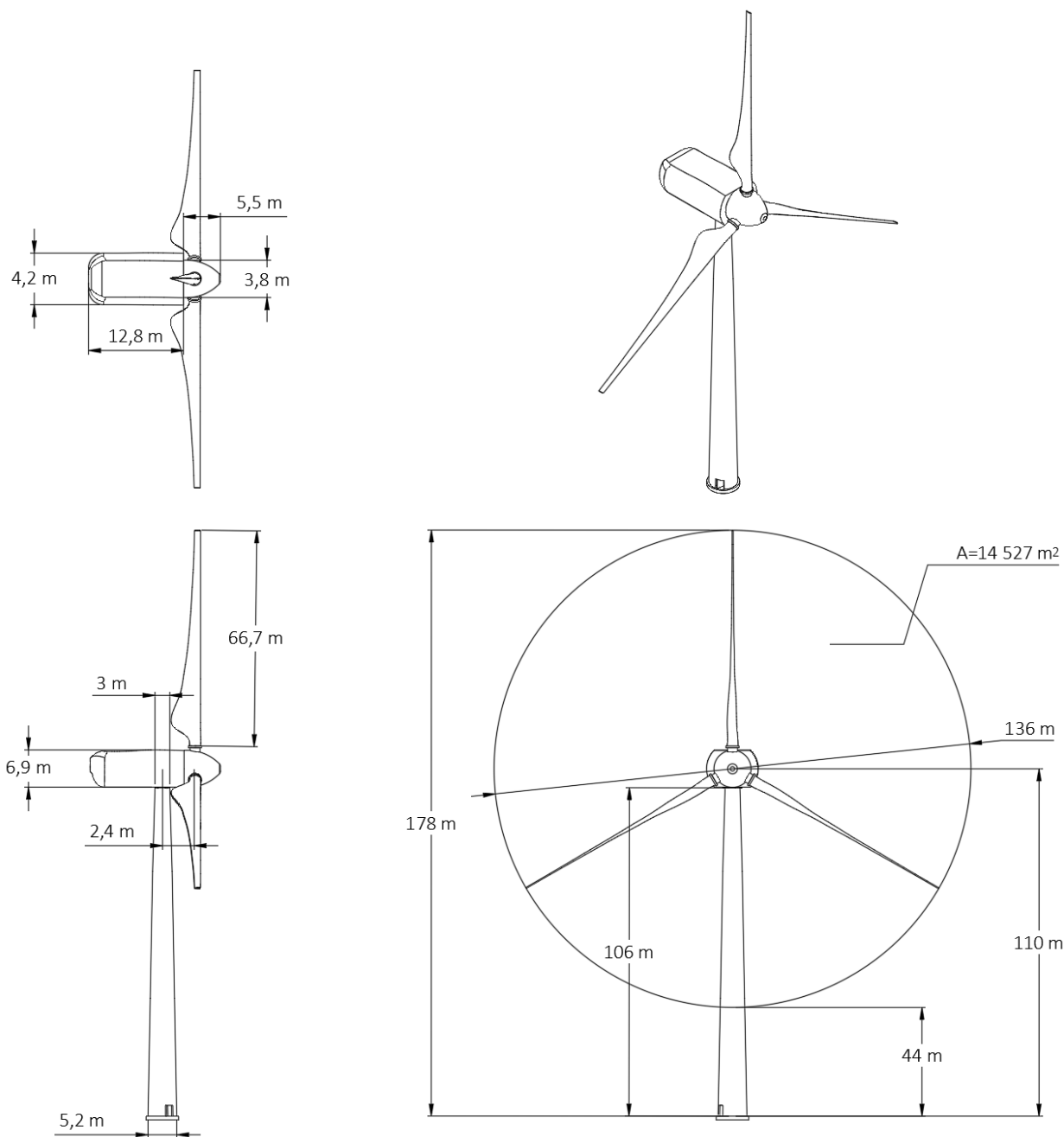
Odabir vjetroturbine je specifičan jer se nalazi u Hrvatskoj i to u zaleđu Senja, na Vratniku gdje se dostižu najveći naleti vjetra (to jest poznata „Senjska bura“), isto tako to je vjetroturbina s najvećom snagom i visinom u Hrvatskoj. Vjetroelektranu Senj gradi tvrtka Norinco International (tj. Norinco – podružnica Zagreb, koja je većinski vlasnik tvrtke Energija projekt iz Senja) i riječ je o prvom velikom kineskom ulaganju u Hrvatskoj. Projekt snage 156 MW uključuje gradnju 39 vjetroturbina, od čega se čak 29 nalazi na području Senja, a ostalih 10 u općini Brinje. Prema procjenama, vjetroelektrana bi godišnje proizvodila 530 milijuna kW h električne energije. Takav tip vjetroturbina na tom području je vrlo nedavno pušten u pogon, stoga je relativno nova na tržištu, što ju čini izuzetno atraktivnom za što boljom optimizacijom. [27]

Turbina Vestas V136 odabrana je zbog analize resursa vjetra, lokacije, nedostataka i dostupnosti turbina. Modeli od 3,45 MW i 4,2 MW iste su turbine, osim što 4,2 MW ima veći kapacitet zbog poboljšanja u prijenosniku snage.

Tablica 4.1: Specifikacije vjetroturbine "Vestas model V136-4.2" [28]

| | | |
|--|---------------------------------|-----------------------|
| Nazivna snaga | P_n | 4 MW |
| Maksimalna snaga | P_{max} | 4,2 MW |
| Visina postolja | H | 106 m |
| Visina rotora (glavine) | H_r | 110 m |
| Promjer rotora | R | 136 m |
| Dužina lopatica | r | 66,7 m |
| Ukupna visina | L | 173 m |
| Vjetrom zahvaćeno područje | A | 14 527 m ² |
| Brzina vrtnje rotora | ω | 14 okr/min |
| Visina između tla i lopatica | l | 44 m |
| Broj lopatica | B | 3 |
| Udaljenost između glavine i centra postolja | a | 2,4 m |
| Dimenzije promjera na dnu i vrhu postolja | D_d / D_v | 5,2 m / 3 m |
| Dimenzije kućišta/gondole (visina x dužina x širina) | V_k | 6,9 x 12,8 x 4,2 m |
| Dimenzije glavine (visina x dužina x širina) | V_g | 3,8 x 3,8 x 5,5 m |
| Masa jedne lopatice/ ukupna masa lopatica | $m_l / m_{l_uk} = m_l \cdot 3$ | 18,5 t / 55,5 t |
| Masa kućišta/gondole (sa svim komponentama) | m_k | 110 t |
| Masa glavine | m_g | 35 t |
| Maksimalna razina zvučne snage | I | 106,8 dB(A) |
| Broj vjetroturbina | n | 39 |

Vjetroturbina je tipski proizvod koji se zbog svojih velikih dimenzija sastavlja na lokaciji (gradilištu) na koju se dovozi u segmentima. Jedini dio koji se izrađuje na lokaciji je armirano-betonski temelj u kojeg se ugrađuju temeljni vijci kao osnovna spona za montažu postolja. Postolje vjetroturbine je izrađeno iz čelika. Stupovi su tvornički obojani i opremljeni zaštitom od vremenskih uvjeta i korozije. To znači da u tom smislu nije potreban nikakav rad nakon montaže, osim popravaka oštećenja pri transportu. Čelični stupovi napravljeni su od čeličnih cijevi (pune stijenke) koje se linearno sužavaju prema vrhu. Proizvedeni su u tvornici i sastoje se od 5 segmenata. Segmenti se međusobno spajaju prirubnički pri čemu u prirubnice tvornički zavarene na krajeve segmenata, a na sebi imaju provrte za spajanje vijčanim spojem. [26]



Slika 4.4: Dimenzije vjetroturbine „Vestas V136-4.2“

Nadmorska visina na kojoj se nalaze vjetroturbine je između 500 m i 860 m. Proizvodnja električne energije uključuje se pri brzinama vjetra većim od 2,5 m/s, a isključuje kad brzina vjetra dosegne 32 m/s. Maksimalna brzina vjetra koju vjetroturbina može izdržati iznosi 50 m/s (vrijednost se odnosi na 10 minutni prosjek). [26]

Tablica 4.2: Brzine vjetra na visini $H=110$ m i područje rada vjetroturbine

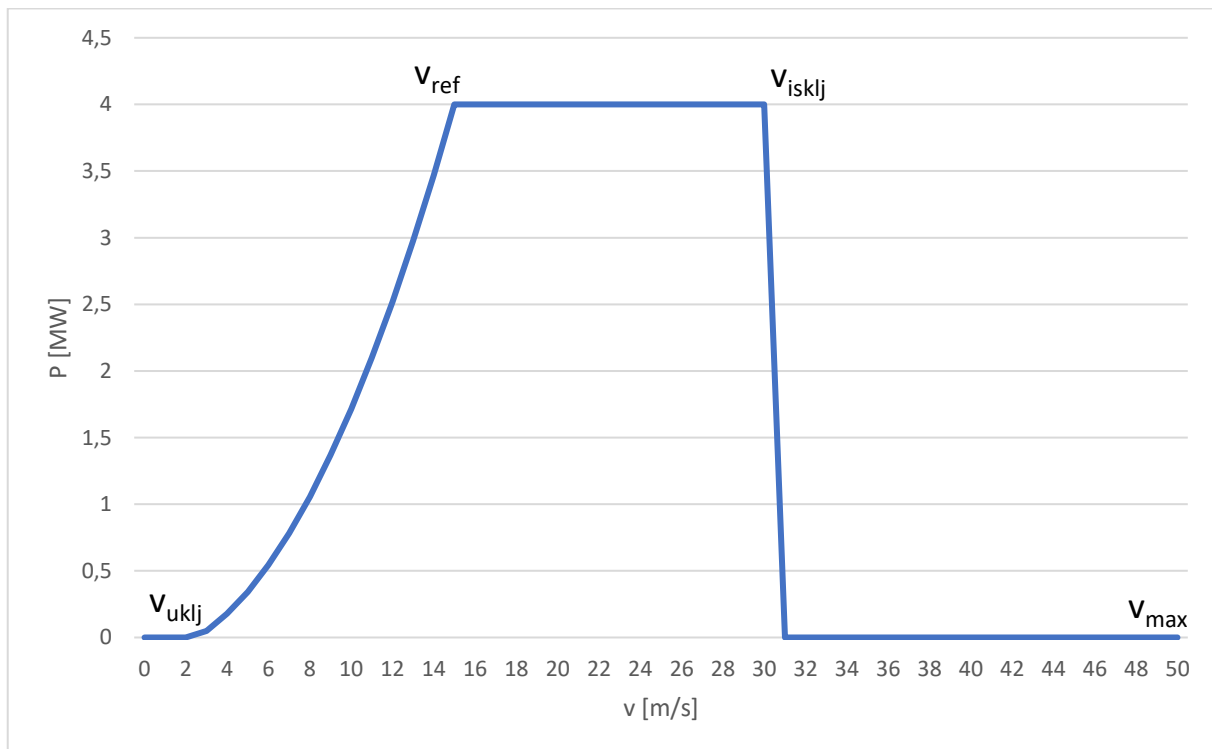
| | | |
|--|------------------|-------------|
| Brzina vjetra | v | 0 do 50 m/s |
| Brzina uključivanja vjetroturbine | $v_{uklj} \geq$ | 2,5 m/s |
| Brzina isključivanja vjetroturbine | $v_{isklj} \geq$ | 30 m/s |
| Brzina pri punom opterećenju vjetroturbine | $v_{ref} \geq$ | 15 m/s |
| Maksimalna brzina vjetra | v_{max} | 50 m/s |

Za prikaz grafa 4.1 korištena je sljedeća jednadžba za prikaz ovisnosti snage vjetroturbine i brzine vjetra:

$$P = \left\{ \begin{array}{ll} 0; & 0 \leq v \leq v_{uklj} \\ P = P_n \cdot \frac{v^2 - v_{uklj}^2}{v_{ref}^2 - v_{uklj}^2}; & v_{uklj} \leq v \leq v_{isklj} \\ P = P_n; & v_{ref} \leq v \leq v_{isklj} \\ 0; & v_{isklj} \leq v \leq v_{max} \end{array} \right. \quad (4.1)$$

Rad pri punom opterećenju je kada brzina vjetra iznosi $v \geq 15$ m/s, te s brzinama vjetra pri i iznad navedene vjetroturbina koristi upravljanje zakretanja lopatice rotora kako bi održao brzinu rotora u radnoj točki (oko 14 okr/min) i tako ograničava snagu na svoju nominalnu vrijednost od 4 MW. Upravljanje pri olujnom vjetru omogućava rad vjetroturbine čak i pri vrlo visokim brzinama vjetra, iako su brzina rotora i izlazna snaga smanjeni. Ako brzina vjetra pređe 29 m/s (12 sekundni prosjek) i nastavi rasti, brzina rotacije će se zakretanjem kuta lopatice izvan struje vjetra linearno smanjivati od 14 okr/min do stanja mirovanja pri brzini vjetra od 32 m/s. Pri brzinama vjetra iznad 30 m/s (10-minutni prosjek) lopatice rotora se nalaze u neutralnom položaju. Kada brzina vjetra padne ispod 32 m/s vjetroturbina ponovno počne predavati energiju u mrežu. [26]

Upravljanje pri olujnom vjetru je tvornički uključeno i može se isključiti putem daljinskog upravljanja ili na lokaciji ručno. Ako je iz bilo kojeg razloga upravljanje pri olujnom vjetru isključeno vjetroturbina će se zbog sigurnosnih razloga isključiti kada brzina vjetra pređe 25 m/s (3-minutni prosjek) ili 30 m/s (15-sekundni prosjek). Ako se niti jedan od ova dva događaja ne ponovi u 10 minuta nakon zaustavljanja vjetroturbina će se automatski ponovno pokrenuti. [26, 29]



Graf 4.1: Snaga vjetroturbine ovisna o brzini vjetra

Prilikom određivanja opterećenja na postolju u obzir se uzimaju tri brzine (v_{ref} , v_{isklj} i v_{max}), za svaku od brzina definirat će se sile i opterećenja koja se pojavljuju, te isto tako njihove iznose. Potrebno je odrediti za koje brzine se nalaze najveća opterećenja na postolju.

Brzina vjetra raste s porastom visine, te su u ovom slučaju brzine vjetra (v_{ref} , v_{isklj} i v_{max}) definirane za visinu jednaku $H = 110$ m (visina na kojoj se nalazi glavina i rotor vjetroturbine). Kako bi dobili brzine vjetra na određenim visinama vjetroturbine, koristi se sljedeći izrazi:

$$v(z) = v_H \cdot \left(\frac{z}{z_H}\right)^\alpha \quad (4.2)$$

pri čemu je:

$v(z)$ – brzina vjetra za određenu visinu z [m/s],

v_H – brzina vjetra na visini H (za tri različita slučaja: v_{ref} , v_{isklj} i v_{max}) [m/s],

z – određena visina ($1 \text{ m} \leq z \leq 178 \text{ m}$, s korakom visine od 1 m),

z_H – visina H [m],

α – ovisi o hrapavosti terena (poglavlje 2.2).

EkspONENT α ovisi o hrapavosti terena, tada se dobije da izraz ovisan o visini iznosi:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{v_{z1}}{v_{z0}}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{15}{1}\right)}{\ln\left(\frac{110}{0,001}\right)} = 0,23 \quad (4.3)$$

pri čemu je:

z_0 – parametar hrapavosti terena, on se očitava iz tablice 2.1 u ovisnosti o tipu terena na kojoj se nalazi vjetroturbina (Priobalna područja s kopnenim vjetrom, $z_0 = 0,001$),

z_1 – referentna visina ($H = 110 \text{ m}$),

v_{z0} – brzina vjetra pri z_0 [m/s],

v_{z1} – brzina vjetra pri v_{ref} [m/s].

Isto tako bitan podatak je gustoća zraka, ona se također mijenja s porastom visine, prema izrazu:

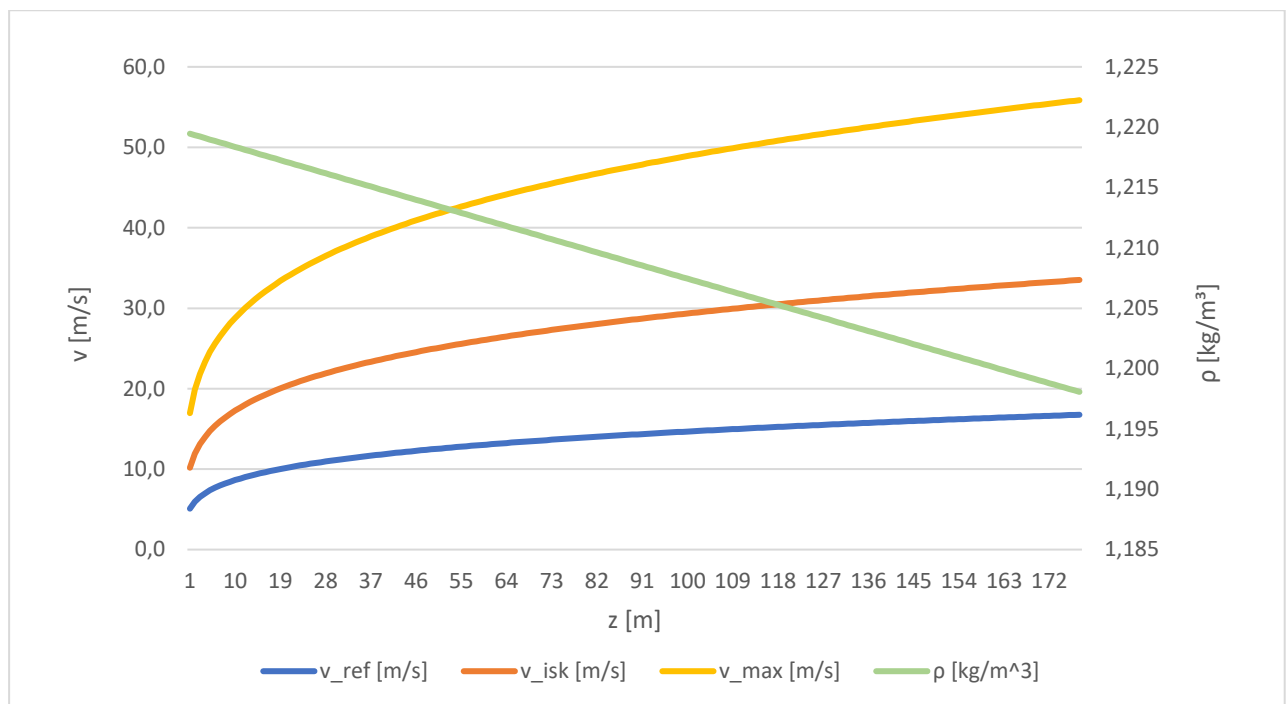
$$\rho(z) = \rho_0 \cdot e^{-0,0001 \cdot z} \quad (4.4)$$

pri čemu je:

ρ_0 – gustoća zraka na nadmorskoj visini od 600 m ($\rho_{600} = 1,220 \text{ kg/m}^3$),

z – određena visina ($1 \text{ m} \leq z \leq 178 \text{ m}$, sa korakom visine od 1 m).

U konačnici dobije se graf 4.2, koji prikazuje porast brzine vjetra i pad gustoće zraka s porastom visine.



Graf 4.2: Raspodjela brzine vjetra i gustoće zraka po visini vjetroturbine

Nakon što su poznati podaci kao što su brzine vjetra i gustoća zraka, dalje je potrebno odrediti opterećenja koja se nalaze na vjetroturbini. Opterećenja koja se javljaju na vjetroturbini mogu se podijeliti na dva slučaja: aerodinamička opterećenja (uzrokuje ih vjetar, odnosno, tlak ili pritisak koji se stvara utjecajem strujanja zraka) i opterećenja zbog vlastite težine vjetroturbine. Na slici 4.5 prikazan su opterećenja koja se pojavljuju na vjetroturbini, gdje je vidljivo da aerodinamička opterećenja se javljaju u obliku kontinuiranog opterećenja (q_r i q_p) s krivuljama. Razlog zašto kontinuirana opterećenja imaju ovakav definiran oblik je taj da se s promjenom visine mijenjaju brzina vjetra i gustoća zraka, a one su glavni razlog nastanka tlaka (sile) na površinu. Dok ostatak sila i opterećenja proizlazi iz težina određenih komponenti, kao što su: lopatice, glavine, kućište ili gondole (sa svim komponentama unutra: ležajevi, vratila, osovine, prijenosnik snage, generator, itd.) i postolja.

$$q_p = \frac{\rho(z) \cdot v(z)^2 \cdot C_d}{2} \quad (4.5)$$

$$F_{vp} = q_p \cdot A_H(z) \quad (4.6)$$

$$q_r = \frac{\rho(z) \cdot v(z)^2 \cdot C_p}{2} \quad (4.7)$$

$$F_{vr} = q_r \cdot A \quad (4.8)$$

$$F_r = m_r \cdot g \quad (4.9)$$

$$F_k = m_k \cdot g \quad (4.10)$$

$$F_p = m_p \cdot g \quad (4.11)$$

gdje je:

q_r i q_p – kontinuirano opterećenje na rotoru i postolju [N/m^2],

F_{vr} i F_{vp} – koncentrirane sile kontinuiranog opterećenja q_r i q_p [N],

F_r , F_k i F_p – sile teže rotora, kućišta/gondole i postolja [N],

$\rho(z)$ – gustoća zraka za određenu visinu [kg/m^3],

$v(z)$ – brzina vjetra za određenu visinu [m/s],

C_d – koeficijent aerodinamičkog otpora za određeni presjek postolja,

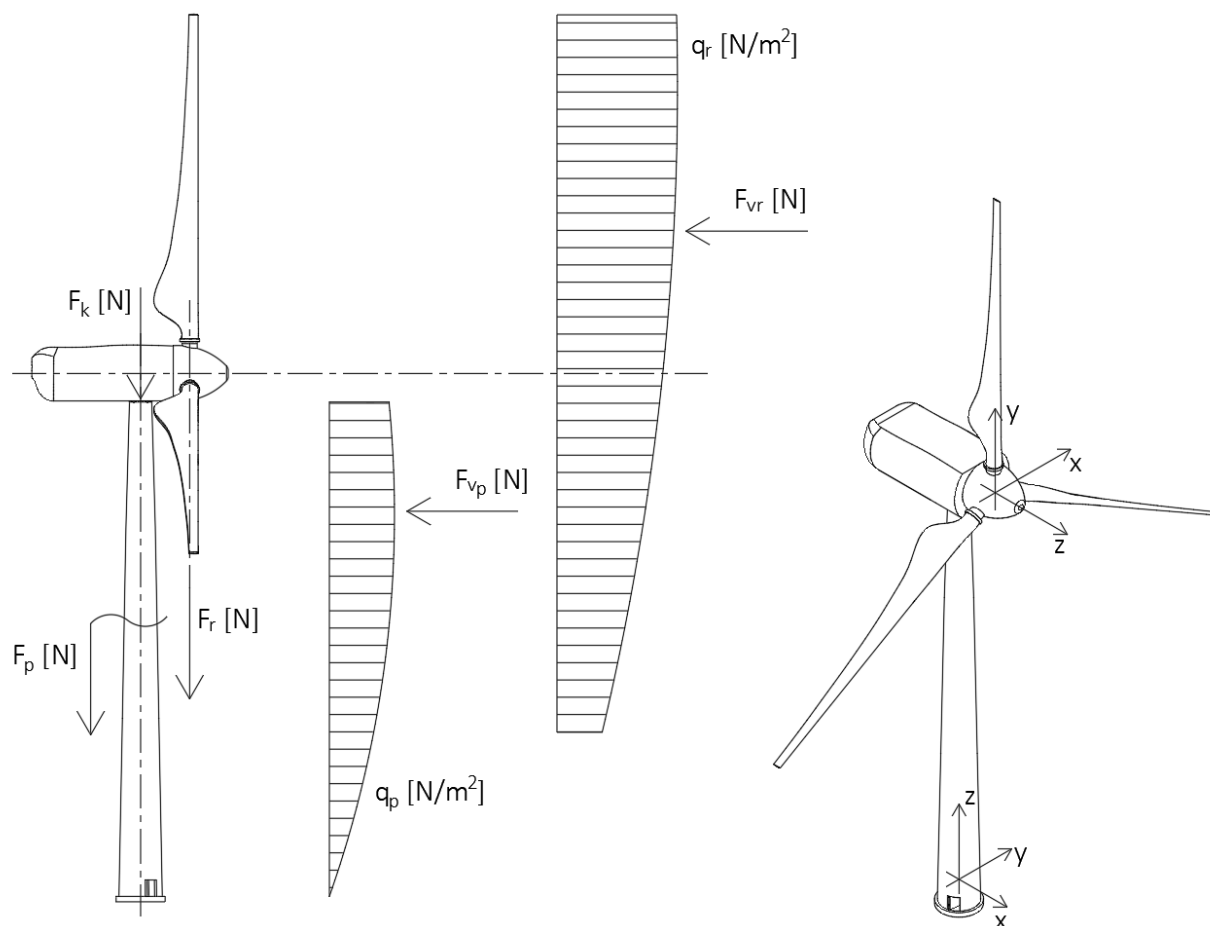
C_p – koeficijent iskoristivosti snage vjetroturbine ili aerodinamički stupanj pretvorbe,

$A_H(z)$ – površina postolja koju obuhvaća vjetar za određenu visinu [m^2],

A – vjetrom zahvaćeno područje ili površina koju pokriva rotor/lopatice [m^2],

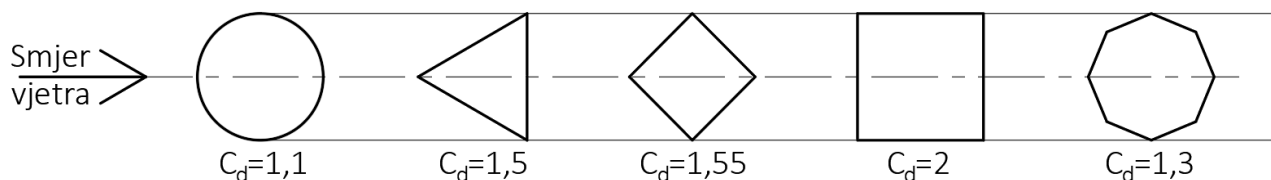
m_r , m_k i m_p – masa rotora, kućišta/gondole i postolja [t],

g – gravitacijsko ubrzanje [m/s^2].



Slika 4.5: Prikaz sila i kontinuiranog opterećenja, te koordinatne osi za postolje i rotor vjetroturbine

S poznatim brzinama vjetra i gustoće zraka na određenim visinama, moguće je odrediti sile koje se javljaju na postolju. Iz jednadžbi 4.5 i 4.6 potrebno je odrediti C_d i $A_H(z)$. Za koeficijent aerodinamičkog otpora za određeni presjek postolja, potrebno je odabrati oblike profila koji će se uzimati u obzir, te odrediti iznos koeficijenta aerodinamičkog otpora za svaki taj profil. Na slici 4.6 prikazani su poprečni presjeci profila koji će se razmatrati za postolje vjetroturbine, sa smjerom vjetra i iznosom aerodinamičkog otpora. [30]



Slika 4.6: Poprečni presjeci profila postolja i iznosi koeficijenta aerodinamičkog otpora

Kako se promjer postolja mijenja s visinom (postolje je konusnog oblika, te se linearno sužava od dna prema vrhu). Potrebno je definirati površinu postolja koju obuhvaća vjetar za određenu visinu $A_H(z)$ iz jednadžbe 4.6.

$$A_H(z) = D(z) \cdot z_k = D(z) \cdot 1 \quad (4.12)$$

pri čemu je:

$$D(z) = D_d - \frac{D_d - D_v}{H} \cdot z = 5,2 - \frac{5,2 - 3}{106} \cdot z \quad (4.13)$$

gdje su:

$D(z)$ – presjek profila postolja koji se linearno sužava s porastom visine postolja [m],

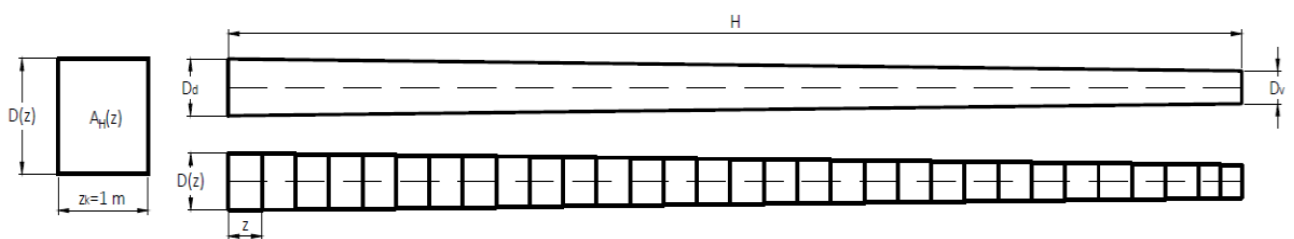
z_k – korak visine z (iznosi $z = 1$ m),

D_d – vanjski promjer profila postolja pri dnu [m],

D_v – vanjski promjer profila postolja pri vrhu [m],

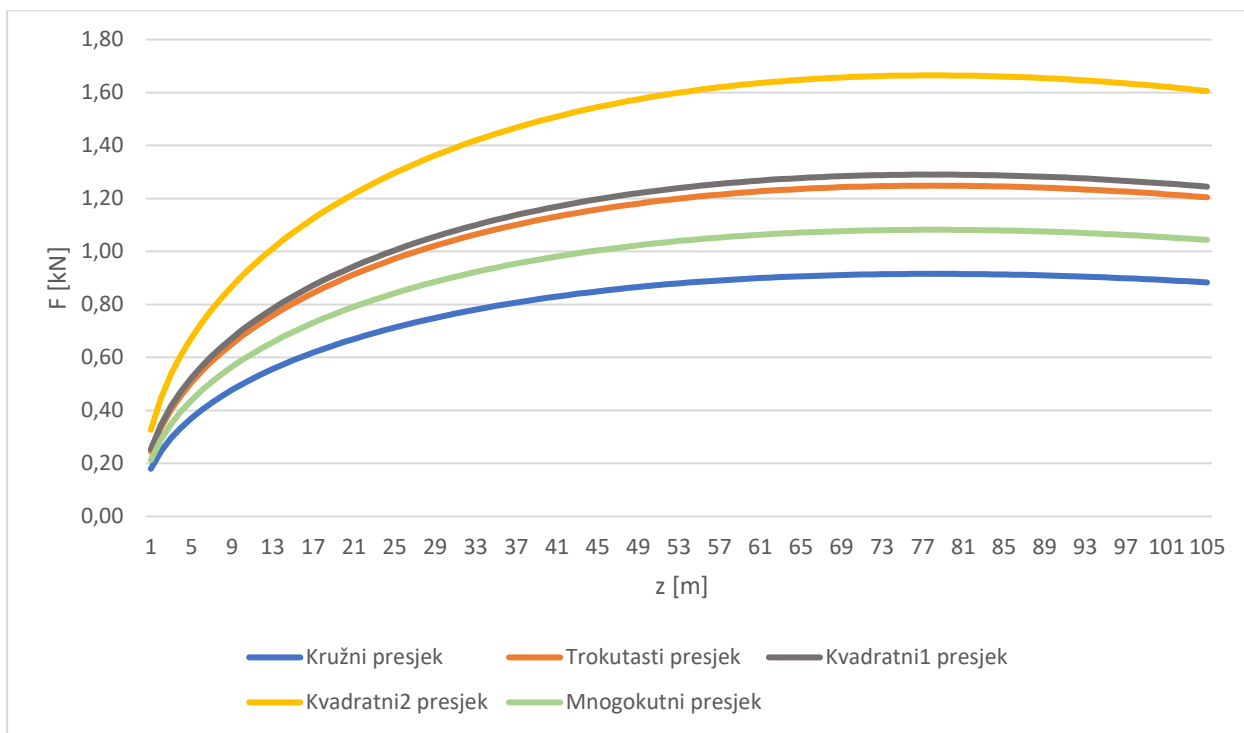
H – visina postolja [m],

z – određena visina ($1 \text{ m} \leq z \leq 106 \text{ m}$, s korakom visine od 1 m).

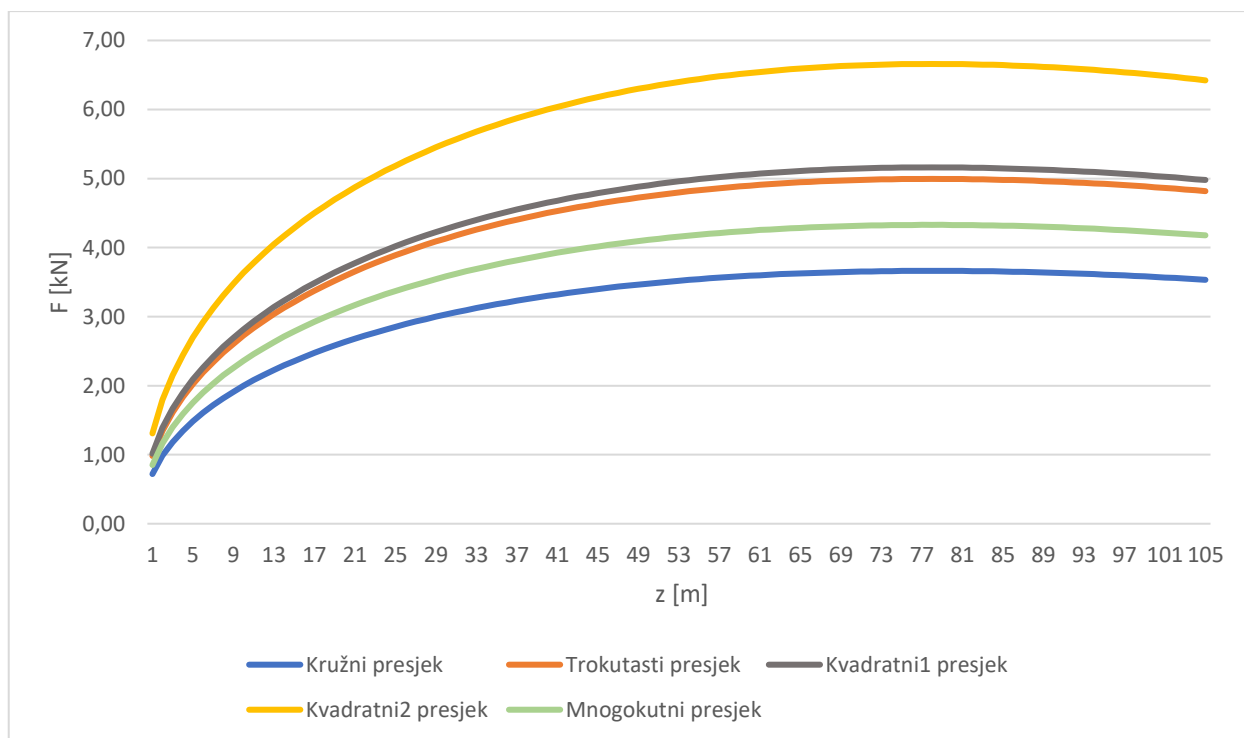


Slika 4.7: Prikaz aproksimacije površine postolja na koju djeluje vjetar

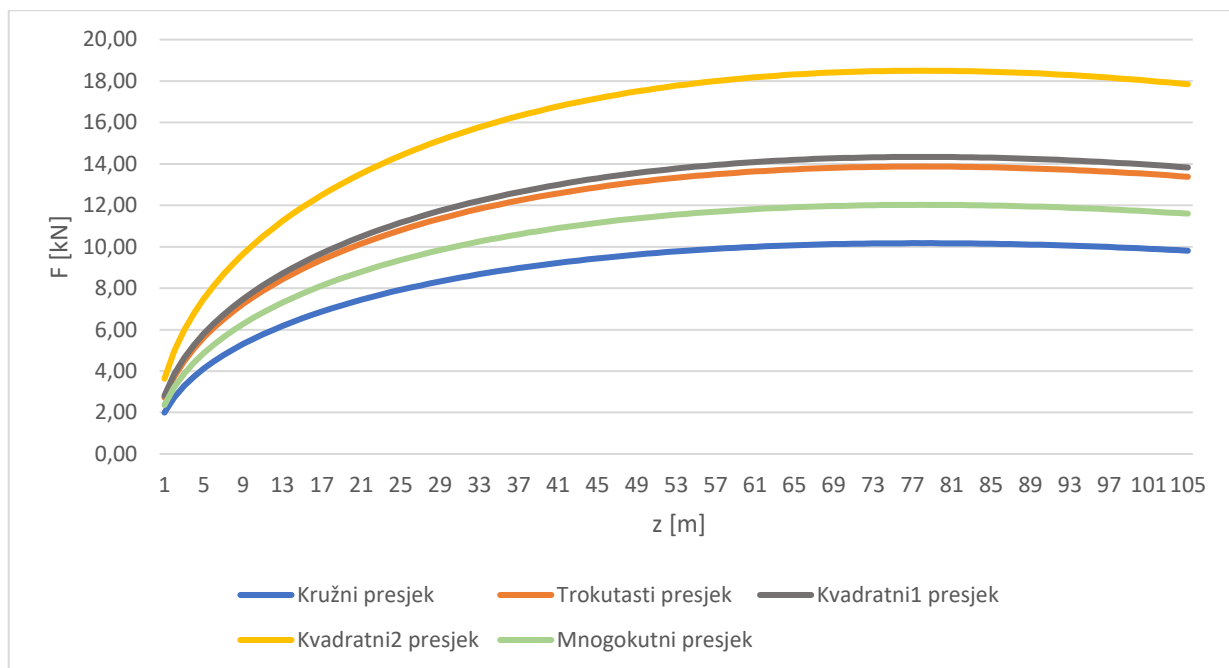
Na taj način aproksimira se površina duž postolja, te uvrštavanjem vrijednosti za svaki korak z_k dobije se sile vjetra koje djeluju na postolje na određenoj visini. Na grafovima 4.3, 4.4 i 4.5 prikazane su sile koje djeluju na postolje za brzine v_{ref} , v_{isklj} i v_{max} za određene presjeke profila.



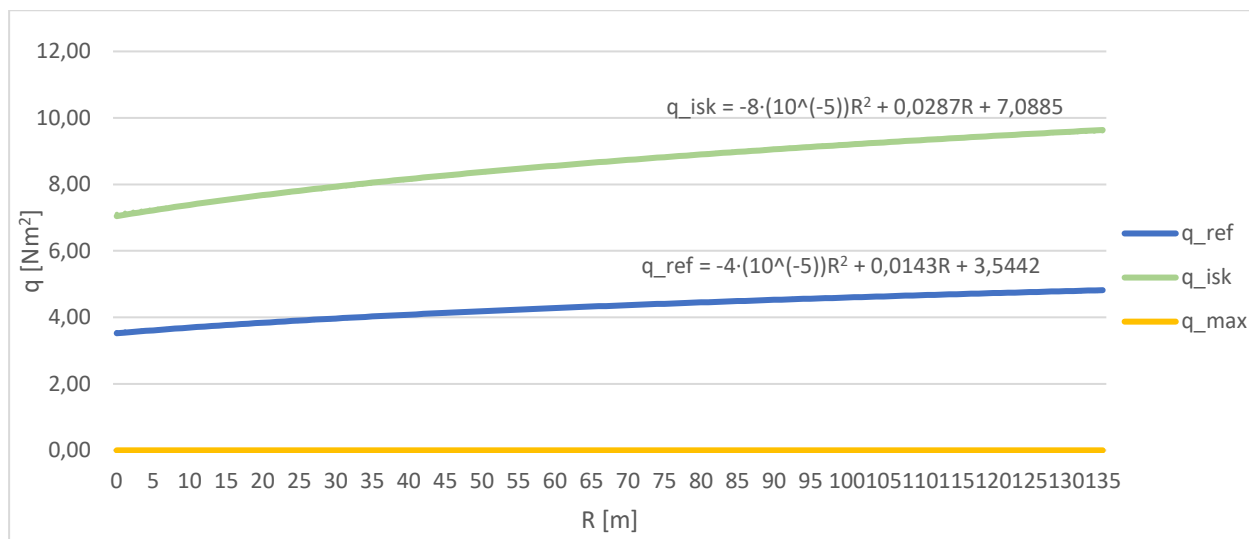
Graf 4.3: Raspodjela opterećenja na postolju za brzine v_{ref}



Graf 4.4: Raspodjela opterećenja na postolju za brzine v_{isklj}

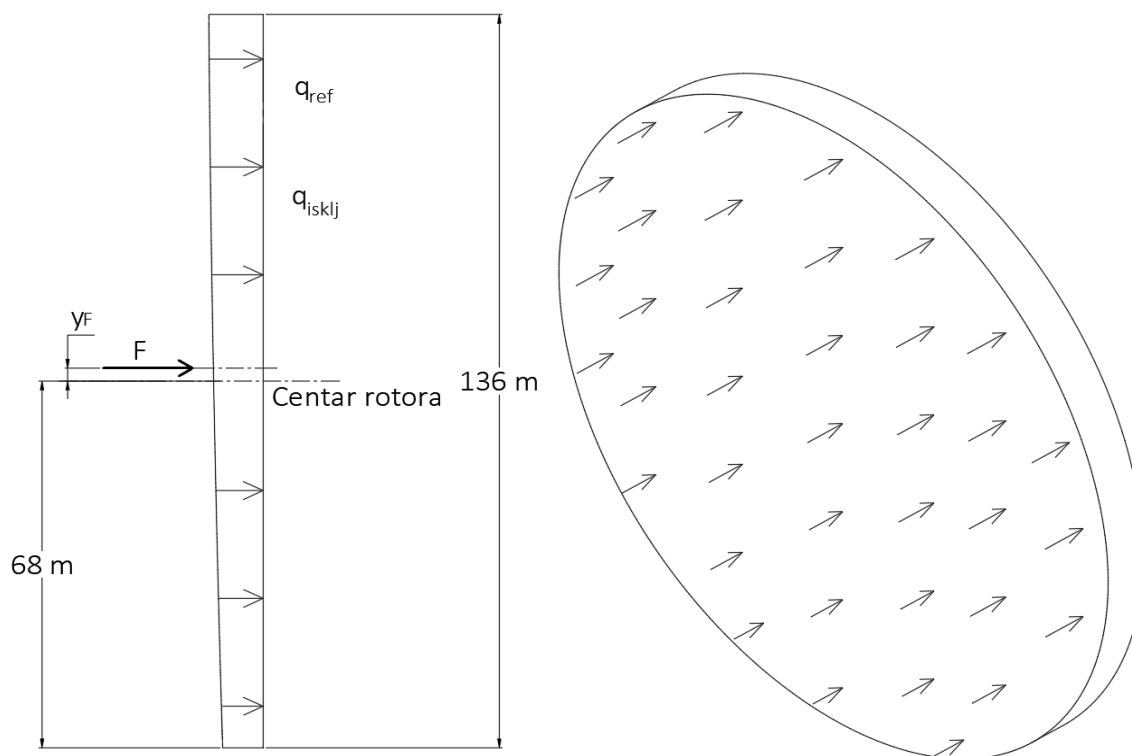
Graf 4.5: Raspodjela opterećenja na postolju za brzine v_{max}

Potrebno je također odrediti opterećenje vjetra na rotoru, uz pomoć jednadžbi 4.7 i 4.8. Potrebno je odrediti C_p (koeficijent iskoristivosti snage vjetroturbine ili aerodinamički stupanj pretvorbe) i A (vjetrom zahvaćeno područje), te za ovaj tip turbine oni iznose: $C_p = 0,48$ i $A = 14\,527\text{ m}^2$. Da je u jednadžbu 4.7 uvrštena brzina vjetra i gustoća zraka kao srednja vrijednost, dobila bi se sila koja djeluje na cijelu površinu rotora jednoliko. Međutim, s obzirom na to da porastom visine brzina vjetra raste i gustoća zraka pada, dobiva se opterećenje koje je prikazano na grafu 4.6 za sve tri brzine vjetra (v_{ref} , v_{isklj} i v_{max}). Za brzinu vjetra v_{max} iznos opterećenja je jednak nuli, zbog toga što se lopatice zaokreću u neutralan položaj i sam rotor se zakoči, pa nema prijenosa snage vjetra na vjetroturbinu.



Graf 4.6: Kontinuirano opterećenje rotora vjetroturbine

Izračunom volumena tijela koje ograničeno s površinom kružnice i krivulje iz grafa 4.6, dobije se točan iznos koncentrirane sile iz kontinuiranog opterećenja, s točkom (težištem) u kojem djeluje. To je moguće izračunati na dva načina, uz pomoć integrala ili u ovom slučaju uz pomoć SolidWorks programskog paketa. Uz pomoć 3D modeliranja, izrađuje se 3D model opterećenja i iz programskog paketa se točno očita volumen i težište tog tijela.



Slika 4.8: Prikaz volumena opterećenja na rotoru

Podaci koji su dobiveni iz programskog paketa SolidWorks, iznose za brzine vjetra:

- $v_{ref} : F_{ref} = 62,253 \text{ kN}, y_{ref} = 70,39 \text{ m},$
- $v_{isklj} : F_{isklj} = 124,606 \text{ kN}, y_{isklj} = 70,4 \text{ m}.$

Opterećenja koja je još potrebno definirati su sile teže komponenti pojedinih dijelova vjetroturbine, uz poznate mase svih komponenti i gravitacijskog ubrzanja. Iz jednadžbi 4.9 , 4.10 i 4.11, dobije se da sile iznose:

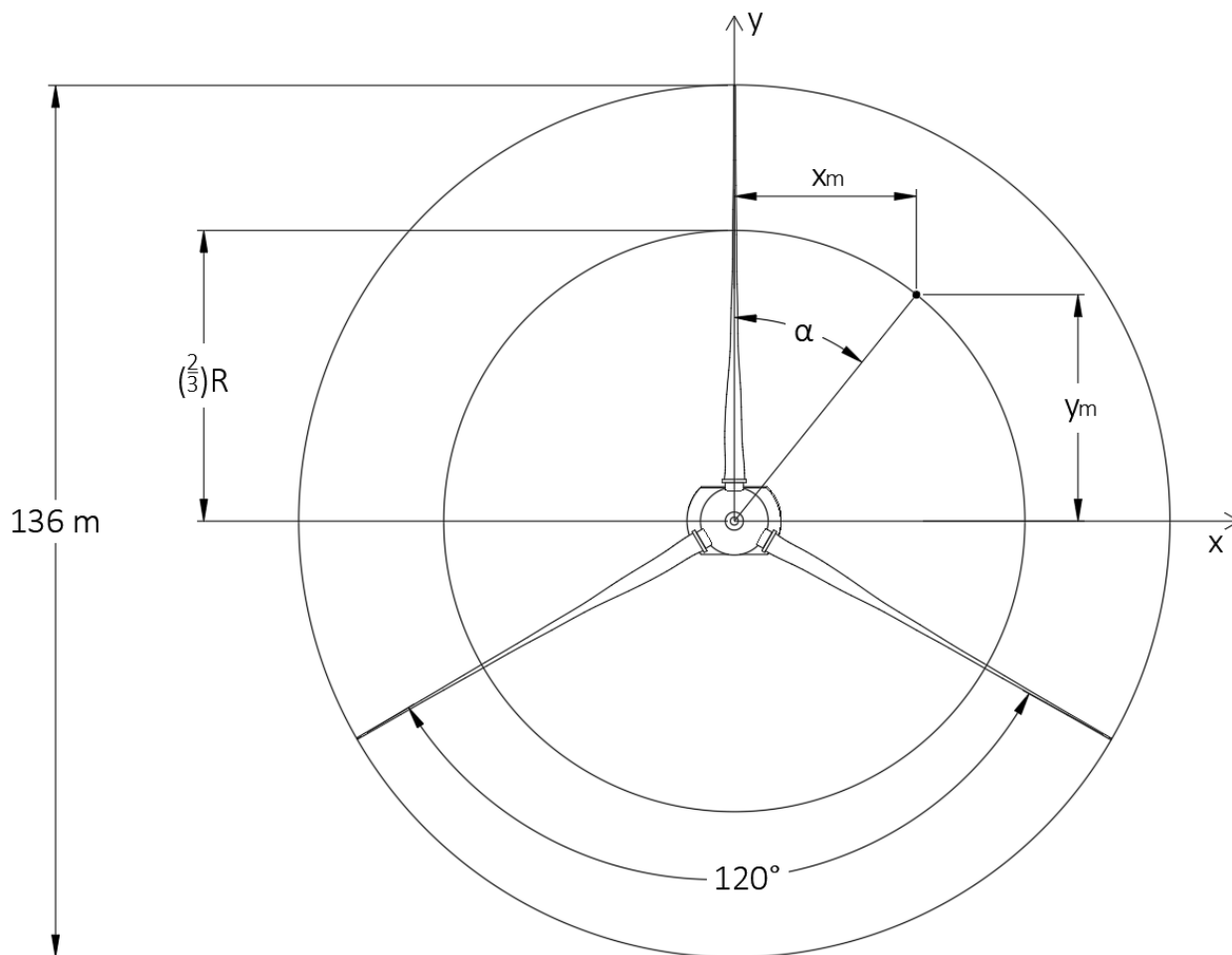
$$F_r = m_r \cdot g = 90,5 \cdot 9,81 = 887,805 \text{ kN} \quad (4.9)$$

$$F_k = m_k \cdot g = 110 \cdot 9,81 = 1079,1 \text{ kN} \quad (4.10)$$

$$F_p = m_p \cdot g \quad (4.11)$$

Međutim, vlastita sila teža postolja nije izračunata zbog toga što ona ovisi o vrsti materijala i njegovoj gustoći, te o geometrijskim karakteristikama (dimenzijama) postolja. S obzirom na to da među nađenim podacima nije pronađeno koliko iznosi debljina stijenke postolja, a kako će se raditi analiza za različite vrste poprečnih presjeka, masa postolja odredit će se uz pomoć programskog paketa Femap. Uz pomoć optimizacije, pokušat će se optimizirati debljine stijenke postolja, s ciljem što manje potrošnje materijala (uštede) s dovoljnom izdržljivošću postolja na vanjska opterećenja.

S definiranim silama koje se javljaju na postolju, potrebno je dalje odrediti momente koji se pojavljuju na vjetroturbini zbog tih sila. Najprije će se definirati moment koji se pojavljuje na rotoru zbog sile vjetra i okretanja lopatica. Naime, jedan od razloga zašto se konstruiraju vjetroturbine s tri lopatice, je taj, da tri lopatice pružaju sigurniji i stabilniji rad vjetroturbine. Uz pomoć tri lopatice, poništavaju se centrifugalne sile, koje se pojavljuju zbog vrtnje rotora i lopatica. Stoga u ovom slučaju nema dodatnih opterećenja u smislu centrifugalnih sila. Te isto tako moment na rotoru zbog sile vjetra i okretanja lopatica, je donekle izbalansiran. „Izbalansiran“ znači kada su jednaki uvjeti (jednaka brzina i gustoću zraka po cijelom dijelu koji obuhvaća rotor i lopatice), tada bi moment u središtu rotora bio jednak nuli. Odnosno, rotor kao u primjeru klackalice bio bi u ravnoteži. Međutim, zbog nejednolike raspodjele opterećenja (brzina vjetra raste s visinom, a gustoća zraka pada s visinom) dolazi do pojave momenta u središtu rotora.



Slika 4.9: Prikaz rotora vjetroturbine

S obzirom na to da je poznata potisna sila (sila vjetra) na rotoru, te je definirano kako je opterećenje raspodijeljeno po površini rotora, može se izračunati moment koja djeluje na pojedinu lopaticu na svakoj poziciji (brzina vjetra i gustoća zraka na različitim visinama). Kao referentnu visinu na kojoj djeluje sila na lopatica, uzima se $(2/3)R$. U nastavku su prikazane jednadžbe uz pomoć kojih se proračunaju vrijednosti, te iz njih se dobiju grafovi 4.7, 4.8, 4.9 i 4.10, na kojima su prikazani momenti na pojedinim lopaticama za određene brzine, njihove vrijednosti s obzirom na položaj rotacije lopatice, te suma momenata oko pojenih osi.

$$F_{vr} = \frac{\rho(z) \cdot v^2(z) \cdot C_p}{2} \cdot A \quad (4.14)$$

$$F_l = \frac{F_{vr}}{B} \quad (4.15)$$

$$M_l = F_l \cdot \frac{2}{3} R \quad (4.16)$$

$$M_{lx} = F_l \cdot y_m \quad (4.17)$$

$$y_m = \cos\alpha \cdot \frac{2}{3} R \quad (4.18)$$

$$M_{ly} = F_l \cdot x_m \quad (4.19)$$

$$x_m = \sin\alpha \cdot \frac{2}{3} R \quad (4.20)$$

pri čemu je:

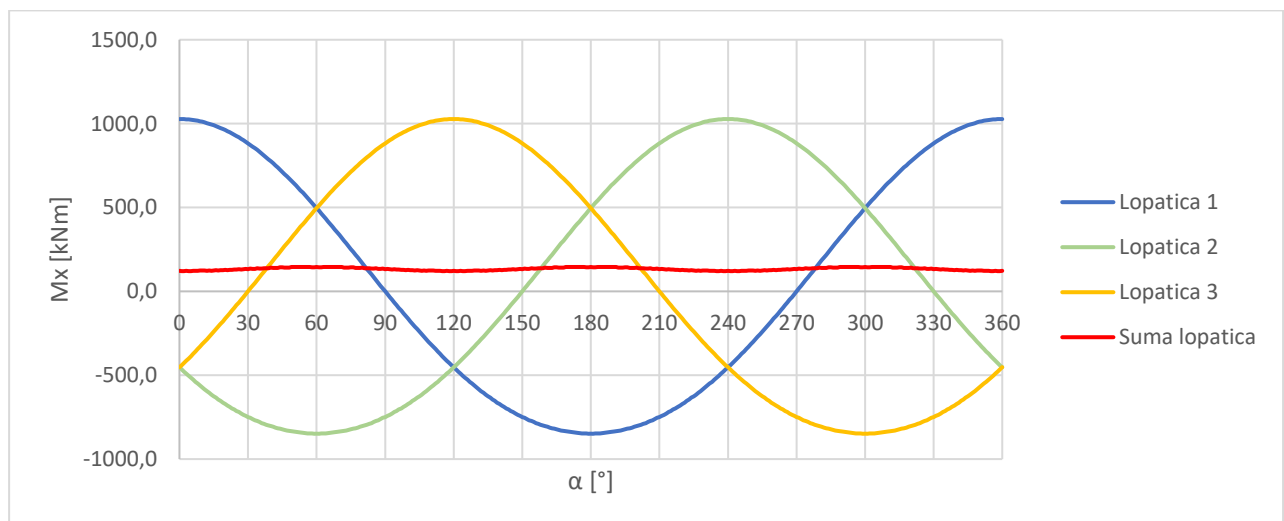
F_l – sila na pojedinoj lopatici,

B – broj lopatica na vjetroturbini,

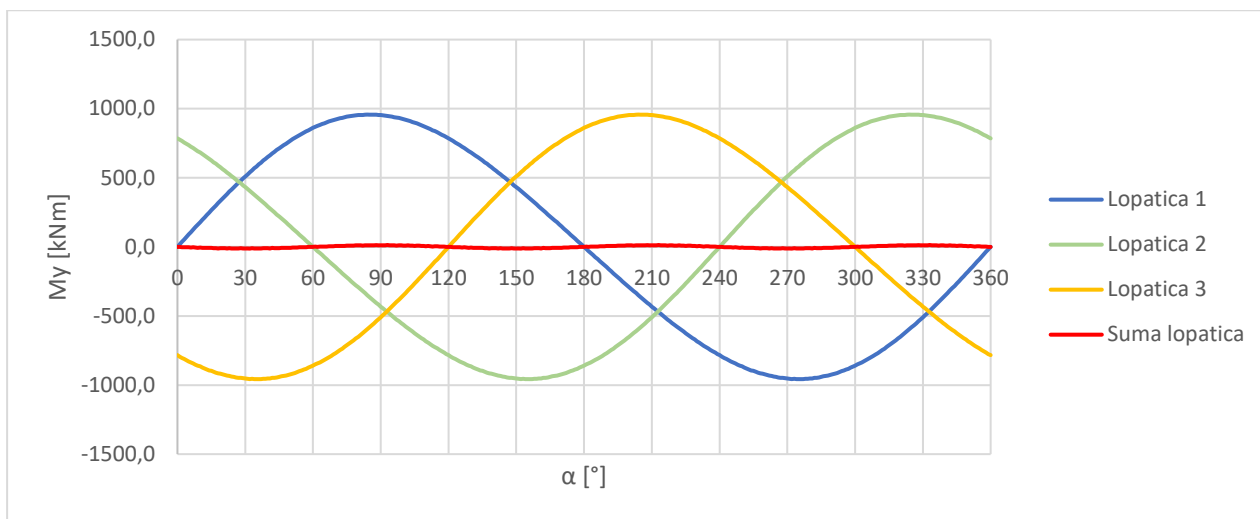
M_l – moment na pojedinoj lopatici,

M_{lx} i M_{ly} – moment oko pojedinih osi x i y,

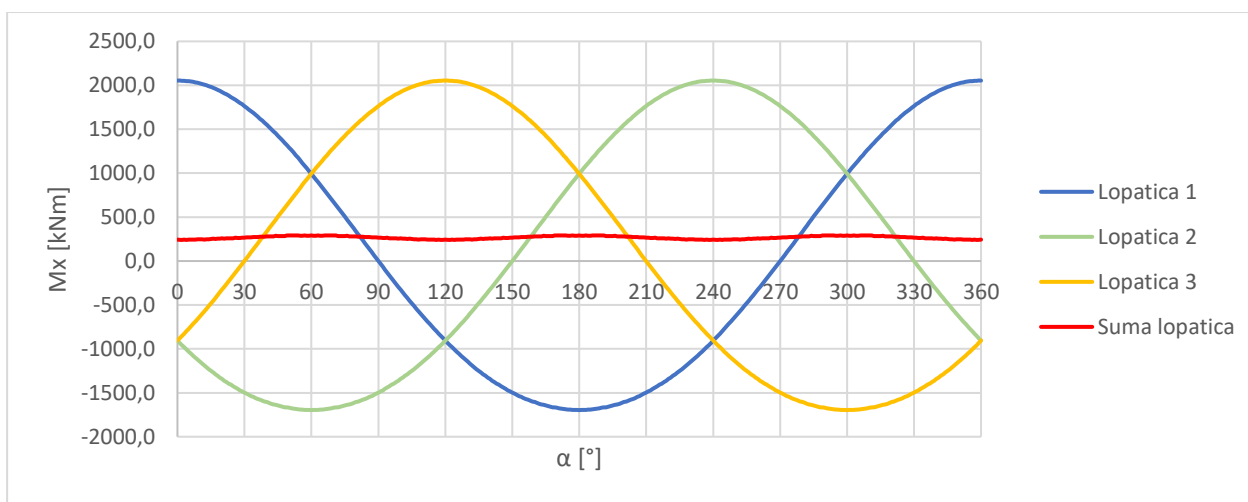
x_m i y_m – udaljenost sile od središta rotora po x i y osima.



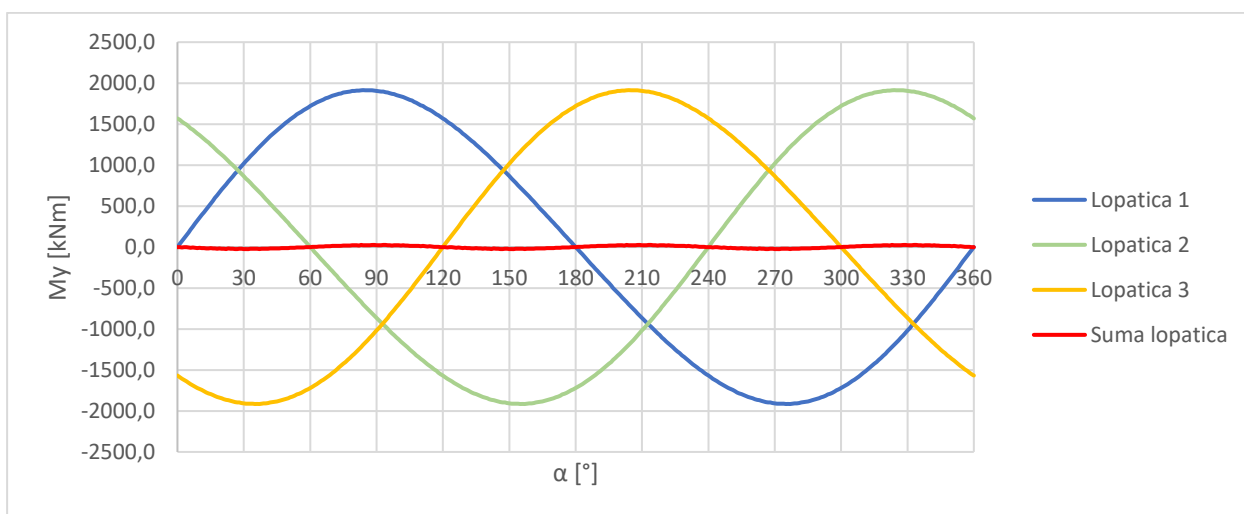
Graf 4.7: Moment savijanja lopatica po x osi za v_{ref}



Graf 4.8: Moment savijanja lopatica po y osi za v_{ref}



Graf 4.9: Moment savijanja lopatica po x osi za v_{isklj}



Graf 4.10: Moment savijanja lopatica po y osi za v_{isklj}

Iz grafova može se zaključiti kako se pojedini momenti lopatica oko osi x i y, kada se zbroje poništavaju. Međutim, u x osi ukupan moment dolazi veći od nule (ima značajnu vrijednost, koja se mora uzeti u obzir), dok u y osi ukupan moment dolazi jednak nuli. Razlog tome je da uzduž y osi se nalaze nejednolika opterećenja zbog razlike brzine vjetra i gustoće zraka u visini, pa dolazi do pojave momenta oko x osi.

Maksimalni moment oko osi x može se očitati iz grafova 4.7 i 4.9 ili izračunati prema prijašnjim podacima:

- $v_{ref} : F_{ref} = 62,253 \text{ kN}, y_{ref} = 2,39 \text{ m},$
- $v_{isklj} : F_{isklj} = 124,606 \text{ kN}, y_{isklj} = 2,4 \text{ m}.$

$$M_{x_{ref}} = F_{ref} \cdot y_{ref} = 148,78 \text{ kNm} \quad (4.21)$$

$$M_{x_{isklj}} = F_{isklj} \cdot y_{isklj} = 299,05 \text{ kNm} \quad (4.22)$$

Potrebno je odrediti moment zbog vjetra na postolju koji se pojavljuje na dnu postolja, gdje su poznate sile na određenim visinama za određene brzine:

$$M_p = \sum F_{vp}(z) \cdot z \quad (4.23)$$

Tablica 4.3: Vrijednosti momenta za poprečne profile postolja

| Brzine vjetra [m/s] | $v_{ref} = 15$ | $v_{isklj} = 30$ | $v_{max} = 50$ |
|----------------------------------|----------------|------------------|----------------|
| M_p [kNm] kružnog presjeka | 4939,17 | 19756,67 | 54879,64 |
| M_p [kNm] trokutastog presjeka | 6735,23 | 26940,91 | 74835,87 |
| M_p [kNm] kvadratnog1 presjeka | 6959,74 | 27838,95 | 77330,40 |
| M_p [kNm] kvadratnog2 presjeka | 8980,30 | 35921,22 | 99781,17 |
| M_p [kNm] n-kutnog presjeka | 5837,20 | 23348,79 | 64857,76 |

Preostalo je još odrediti moment rotora zbog sile teže i torzijski moment na vrhu postolja zbog rotacije kućišta.

Moment rotora zbog sile teže:

$$M_r = F_r \cdot a = 887,805 \cdot 2,4 = 2130,73 \text{ kNm} \quad (4.24)$$

pri čemu je:

a – udaljenost između glavine i centra postolja [m].

Torzijski moment na vrhu postolja:

$$M_{t_ref} = F_{ref} \cdot r_{vg} = 62,253 \cdot \frac{3}{2} = 93,38 \text{ kNm} \quad (4.25)$$

$$M_{t_isklj} = F_{isklj} \cdot r_{vg} = 124,606 \cdot \frac{3}{2} = 186,91 \text{ kNm} \quad (4.26)$$

pri čemu je:

r_{vg} – udaljenost na vrhu postolja od vanjskog promjera do centra postolja [m].

U ovom slučaju zanemaruju se dinamička (opterećenja koja se mijenjaju vremenski) i vibracijska opterećenja koja djeluju na postolje, te su definirana sva statička opterećenja koja su potrebna za daljnju analizu.

Svi proračuni sila, opterećenja i momenata rađeni su Excel programskom paketu i na temelju njih izrađeni su grafovi koji prikazuju vrijednosti koje su dobivene.

5. TEORIJE ČVRSTOĆE

Područje čvrstoće materijala, koje se također naziva i mehanika materijala, obično se odnosi na različite metode proračuna naprezanja i deformacija u konstrukcijskim elementima, kao što su grede, stupovi i osovine. Ona bavi se silama i deformacijama koje nastaju njihovim djelovanjem na materijal. Čvrstoća materijala je njegova sposobnost da izdrži primijenjeno opterećenje bez loma ili plastičnih deformacija. Naprezanja i deformacije koje se razvijaju unutar materijala treba izračunati kako bi se procijenila nosivost tog elementa. To zahtijeva potpuni opis geometrije, njegovih ograničenja, opterećenja i svojstava materijala od kojeg je konstrukcija sastavljena. S potpunim opisom opterećenja i geometrije može se izračunati stanje naprezanja i deformacija u bilo kojoj točki unutar elementa.

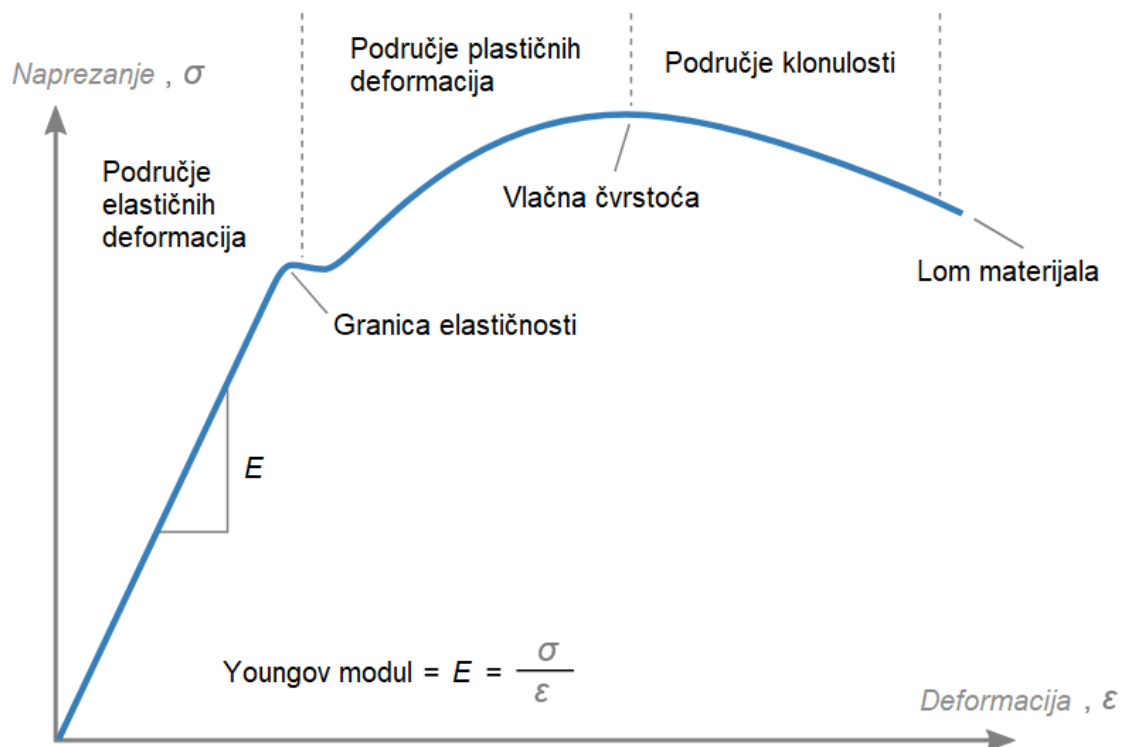
Metode koje se koriste za predviđanje konstrukcije pod opterećenjem uzimaju u obzir svojstva materijala kao što su granica elastičnosti, granica tečenja, vlačna čvrstoća, lomna čvrstoća i Poissonov omjer. Osim toga, razmatraju se i geometrijska svojstva mehaničkog elementa kao što su njegova duljina, širina, debljina, ograničenja i nagle promjene u geometriji, poput rupa, zareza i slično.

U inženjerstvu i znanosti o materijalima, dijagram naprezanja – deformacija prikazan na slici 5.1 prikazuje odnos između vanjskog opterećenja i promjene oblika nekog materijala. Dobiva se postupnim opterećenjem ispitnog uzorka i mjerenjem promjene duljine, iz koje se mogu odrediti naprezanje i deformacija. Ovaj dijagram otkriva mnoga svojstva materijala, kao što su: granica proporcionalnosti, granica elastičnosti, granica tečenja, vlačna čvrstoća, prekidna čvrstoća.

Ovisno o veličini vanjskog opterećenja deformacija može biti elastična ili plastična. U slučaju elastične deformacije materijal se vraća u prvobitni oblik koji je imao prije nastanka opterećenja dok kod plastične deformacije dolazi do pojave trajnih deformacija koje mijenjaju oblik i dimenzije nekog elementa, te element poprima novi oblik i dimenzije. [31]

Za svrhe ovog diplomskog rada promatrat će se naprezanje u elastičnom području dijagrama. Za navedeno područje vrijedi takozvani Hookeov zakon koji pokazuje vezu između naprezanja i deformacije, te matematički zapisuje prema izrazu 5.1:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (5.1)$$

Slika 5.1: Dijagram $\sigma - \epsilon$

Nagib linije u dijagramu poznat je kao Youngov modul ili modul elastičnosti. Modul elastičnosti može se koristiti za određivanje odnosa naprezanje – deformacija u linearno – elastičnom dijelu krivulje. Linearno – elastično područje je ili ispod granice tečenja, ili ako se granica tečenja ne može lako identificirati na dijagramu definira se kao deformacija između 0 i 0,2%, a definira se kao područje deformacije u kojoj dolazi do popuštanja (trajne deformacije).

Modul elastičnosti je mjera krutosti materijala što znači da će pri istom napreznju deformacija materijala biti manja kod materijala s većim modulom elastičnosti. Potrebno je napomenuti da svaki materijal ima drugačiji dijagram napreznja – deformacija pa je tijekom konstruiranja najveću pažnju potrebno posvetiti upravo odabiru materijala. [31]

Prilikom konstrukcije nekog elementa potrebno je postići određeni faktor sigurnosti u odnosu na maksimalno napreznje ili maksimalni pomak, tim načinom dobiva se dopušteno napreznja koje se uspoređuje sa stvarnim napreznjem (ekvivalentnim) i ono mora biti manje ili jednako dopuštenom napreznju. Prema sljedećim izrazima:

$$\sigma_{\text{ekv}} \leq \sigma_{\text{dop}} = \frac{\sigma_v}{S} \quad (5.2)$$

pri čemu je:

σ_{ekv} – ekvivalentno naprezanje dobiveno primjenom jedne od teorija čvrstoće [N/mm^2],

σ_{dop} – dopušteno naprezanje određeno izrazom [N/mm^2].

σ_v – granica tečenja [N/mm^2],

S – faktor sigurnosti.

Prilikom provjere kriterija čvrstoće mogu se pojaviti različiti oblici naprezanja kao što su:

- Osnovno stanje naprezanja (jednoosno naprezanje) je naprezanje kod kojeg se javlja samo normalno naprezanje – σ (čisto savijanje, aksijalno opterećenje) ili pak tangencijalno naprezanje – τ (smicanje, čisto uvijanje). Kako bi bio zadovoljen kriterij čvrstoće potrebno je da vrijednost maksimalnog naprezanja bude manja od dopuštenog naprezanja.
- Složeno stanje naprezanja (dvoosno ili troosno naprezanje) je kombinacije glavnih naprezanja $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \dots \sigma_n$, te se dobiva vrijednost stvarnog naprezanja. Koja se uspoređuje s vrijednošću kritičnog naprezanja, a ona se određuje eksperimentalno.

Teorija čvrstoće se koristi kako bi se osiguralo da konstrukcija postolja može podnijeti opterećenja koja djeluju na njega, kao što su vjetar, gravitacija i ostali vanjski faktori. Koristi se za analizu naprezanja i deformacija koje se javljaju u materijalu postolja pod opterećenjem. Ova analiza uključuje procjenu kritičnih opterećenja, kao što su maksimalne brzine vjetra, i određivanje sigurnosnih faktora kako bi se osigurala sigurnost i pouzdanost konstrukcije. Također pomaže u odabiru odgovarajućeg materijala za izradu postolja vjetroturbine, kao i u dimenzioniranju postolja kako bi se osigurala potrebna čvrstoća i stabilnost. Ovo uključuje dimenzije i debljine materijala postolja, kao i raspodjelu opterećenja duž postolja. Pravilno primijenjena teorija čvrstoće omogućuje da postolje vjetroturbine može podnijeti sve uvjete opterećenja s minimalnom deformacijom i rizikom od oštećenja ili sloma. To je ključno za osiguravanje sigurnosti, trajnosti i pouzdanosti vjetroturbine tijekom njenog radnog vijeka.

Eksperimentalno određivanje nije poželjno zbog velikih troškova financijskih sredstva i vremena. Zbog navedenog se u svrhu određivanja kritičnog napreznja koriste teorije čvrstoće ili kriteriji tečenja (duktilni materijali). Korištenjem teorija čvrstoće nastoji se predvidjeti trenutak pojave kritičnog stanja (lom ili pojava plastičnih deformacija) kod složeno opterećenog konstrukcijskog elementa. Za analitičko i numeričko određivanje čvrstoće materijala za dobivanje ekvivalentnog napreznja razvijene su četiri teorije čvrstoće. [31]

Teorija čvrstoće su:

- 1) Teorija najvećeg normalnog napreznja,
- 2) Teorija najveće duljinske deformacije,
- 3) Teorija najvećeg tangencijalnog napreznja,
- 4) Teorija najveće distorzijske energije.

5.1. Teorija najvećeg normalnog napreznja

Teorija najvećeg normalnog napreznja nam govori da se pod utjecajem složenog stanja napreznja na neki konstrukcijski element kritično stanje pojaviti kada najveće normalno napreznje dostigne, po apsolutnoj vrijednosti, vrijednost kritičnog napreznja kod jednoosnog stanja napreznja. [26]

U slučaju složenog stanja napreznja (dvoosno ili troosno) mjerodavno je ono napreznje koje ima najveću apsolutnu vrijednost što se može zapisati kao:

$$\sigma_{ekv} = \sigma_{max} = \max(|\sigma_1|, |\sigma_2|) \leq \sigma_{dop} - \text{za dvoosno stanje napreznja} \quad (5.3)$$

$$\sigma_{ekv} = \sigma_{max} = \max(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|) \leq \sigma_{dop} - \text{za troosno stanje napreznja} \quad (5.4)$$

pri čemu je:

σ_{dop} – dopušteno napreznje određeno izrazom 5.2 [N/mm²],

σ_{ekv} – ekvivalentno napreznje [N/mm²],

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – glavna napreznja [N/mm²].

Za materijale s različitom tlačnom i vlačnom čvrstoćom, kriterij čvrstoće se može izraziti pomoću sljedećeg izraza:

$$\sigma_{ekv} = \sigma_1 < \sigma_{vdop}, \quad \sigma_1 > 0 \quad (5.5)$$

$$\sigma_{ekv} = |\sigma_3| < \sigma_{tdop}, \quad \sigma_3 < 0 \quad (5.6)$$

pri čemu je:

σ_{vdop} – dopušteno vlačno naprezanje [N/mm²],

σ_{tdop} – dopušteno tlačno naprezanje [N/mm²].

U slučaju dvoosnog stanja naprezanja glavna naprezanja se mogu definirati sljedećim izrazom:

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_x + \sigma_y) \pm \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \cdot \tau_{xy}^2} \quad (5.7)$$

pri čemu je:

σ_x – glavno naprezanje po osi x [N/mm²],

σ_y - glavno naprezanje po osi y [N/mm²],

τ_{xy} – tangencijalno naprezanje [N/mm²].

Slučaj ravnog savijanja ono pripada ravninskom stanju naprezanja pri čemu je potrebno napomenuti da postoje samo normalno naprezanje koje djeluje na pravcu osi z - $\sigma_z = \sigma$ i tangencijalno naprezanje $\tau_{zy} = \tau$. Za opisani slučaj kriterij čvrstoće može se izraziti sljedećim izrazom:

$$\sigma_{ekv} = \sigma_{1,2} = \frac{1}{2} \cdot \sigma \pm \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\sigma^2 + 4 \cdot \tau^2} \leq \sigma_{dop} \quad (5.8)$$

Teorija najvećeg normalnog naprezanja najbolje rezultate daje za vlačno opterećene krhke materijale, ali u slučaju da su sva tri glavna naprezanja tlačna ona nije pouzdana. Nije pogodna za duktilne materijale zato što su osjetljivi na smicanje, međutim može se primijeniti kada je maksimalno smično naprezanje manje ili jednako ekvivalentnom naprezanju. [31]

5.2. Teorija najveće duljinske deformacije

Teoriju najveće duljinske deformacije je razvio znanstvenik Saint-Venanta u 17. stoljeću, te nam govori da pri složenom stanju naprezanja u točki napregnutog tijela kritično stanje nastupa kada najveća duljinska deformacija dostigne kritičnu vrijednost duljinske deformacije pri osnovnom stanju naprezanja (kod vlačnih ili tlačnih naprezanja):

$$\varepsilon_{\text{maks}} = \max(|\varepsilon_1|, |\varepsilon_2|, |\varepsilon_3|) \leq \varepsilon_{\text{dop}} = \frac{\sigma_{\text{dop}}}{E} \quad (5.9)$$

pri čemu je:

σ_{dop} – dopušteno naprezanje [N/mm^2],

E – modul elastičnosti [N/mm^2],

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – glavne deformacije.

Vrijednosti glavnih deformacija mogu se definirati prema sljedećim izrazima:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E} \cdot [\sigma_1 - \nu \cdot (\sigma_2 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} \cdot [\sigma_2 - \nu \cdot (\sigma_1 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E} \cdot [\sigma_3 - \nu \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)] \end{aligned} \quad (5.10)$$

pri čemu je:

E – modul elastičnosti [N/mm^2],

ν – Poissonov koeficijent,

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – glavna naprezanja [N/mm^2].

Korištenjem izraza 5.9 i 5.10 dobiva se da ekvivalentno naprezanje prema teoriji najveće duljinske deformacije za dvoosno stanje naprezanja iznosi:

$$\sigma_{\text{ekv}} = |\sigma_1 - \nu \cdot \sigma_2| \leq \sigma_{\text{dop}} \quad (5.11)$$

$$\sigma_{\text{ekv}} = |\sigma_2 - \nu \cdot \sigma_1| \leq \sigma_{\text{dop}} \quad (5.12)$$

U slučaj ravnog savijanja može se izraziti kao:

$$\sigma_{ekv} = \frac{1-\nu}{2} \cdot \sigma \pm \frac{1-\nu}{2} \cdot \sqrt{\sigma^2 + 4 \cdot \tau^2} \quad (5.13)$$

pri čemu je:

ν – Poissonov koeficijent,

σ – glavno naprezanje [$[N/mm^2]$],

τ – tangencijalno naprezanje [$[N/mm^2]$].

U slučaju da se koristi za proračun konstrukcije od čelika ($\nu = 0,3$) dobiva se takozvani Saint – Venantov izraz koji glasi:

$$\sigma_{ekv} = 0,35 \cdot \sigma \pm 0,65 \cdot \sqrt{\sigma^2 + 4 \cdot \tau^2} \quad (5.14)$$

Teorija najveće duljinske deformacije daje rezultate koji se slažu s onima dobivenih eksperimentalno za krhke materijale. U slučaju plastičnih materijala teorija nije pouzdana, pa se danas rijetko koristi. [31]

5.3. Teorija najvećeg tangencijalnog naprezanja

Teorija najvećeg tangencijalnog naprezanja nam govori da pri složenom stanju naprezanja u točki opterećenog tijela, kritično stanje nastupa kada najveće tangencijalno naprezanje dostigne kritičnu vrijednost tangencijalnog naprezanja kod osnovnog stanja naprezanja, to jest vrijednost

$$\tau_{dop} = \frac{\sigma_{dop}}{2}.$$

Teorija najvećeg tangencijalnog naprezanja se može izraziti sljedećim izrazom:

$$\tau_{maks} = \max(|\tau_1|, |\tau_2|, |\tau_3|) \leq \tau_{dop} = \frac{\sigma_{dop}}{2} \quad (5.15)$$

pri čemu je:

τ_{dop} – dopušteno tangencijalno naprezanje [$[N/mm^2]$],

σ_{dop} – dopušteno normalno naprezanje [$[N/mm^2]$],

τ_1, τ_2, τ_3 – ekstremne vrijednosti tangencijalnog naprezanja [$[N/mm^2]$].

Ekstremne vrijednosti tangencijalnog naprezanja za prostorno stanje naprezanja mogu se izračunati prema:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \pm \frac{1}{2} \cdot (\sigma_2 - \sigma_3) \\ \tau_2 &= \pm \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) \\ \tau_3 &= \pm \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 - \sigma_2)\end{aligned}\quad (5.16)$$

pri čemu je:

$$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 - \text{glavna naprezanja [N/mm}^2\text{]}.$$

Koristeći izraze 5.15 i 5.16 moguće je izraziti kriterij čvrstoće:

$$\sigma_{ekv} = \max(|\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_1 - \sigma_3|, |\sigma_1 - \sigma_2|) \leq \sigma_{dop} \quad (5.17)$$

Za ravninsko stanje naprezanja kriterij čvrstoće glasi:

$$\sigma_{ekv} = \max(|\sigma_2|, |\sigma_1|, |\sigma_1 - \sigma_2|) \leq \sigma_{dop} \quad (5.18)$$

Promatrajući izraz 5.18 može se zaključiti da se mogu javiti jedno od dvije mogućnosti prikazane sljedećim izrazom:

$$\begin{aligned}\sigma_{ekv} &= |\sigma_1| \leq \sigma_{dop} - \sigma_1 \text{ i } \sigma_2 \text{ istog predznaka} \\ \sigma_{ekv} &= |\sigma_2| \leq \sigma_{dop} - \sigma_1 \text{ i } \sigma_2 \text{ različitog predznaka}\end{aligned}\quad (5.19)$$

Za slučaj ravnog savijanja silama i kada su σ_1 i σ_2 različitog predznaka dobiva se sljedeće:

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma^2 + 4 \cdot \tau^2} \leq \sigma_{dop} \quad (5.20)$$

Teorija najvećeg tangencijalnog naprezanja daje rezultate pogodne za proračun duktilnih materijala i daje sigurnu, ali neekonomičnu predimenzioniranu konstrukciju koji se slažu s onima dobivenih eksperimentalno za plastične materijale. U slučaju krhkih materijala i konstrukcije napregnute hidrostatskim tlakom teorija nije pouzdana. [31]

5.4. Teorija najveće distorzijske energije

Teorija najveće distorzijske energije nam govori da pri složenom stanju naprezanja u točki opterećenog tijela, kritično stanje nastupa kada gustoća distorzijske energije dostigne kritičnu vrijednost distorzijske energije pri osnovnom stanju naprezanja. Naziva se još Von Mises ili Von Mises-Hencky teorija.

Tijelo se pod utjecajem opterećenja deformira tako da mijenja svoj volumen i oblik. Potencijalna energija koja nastaje zbog deformiranja sastoji se od dva dijela. Prvi dio energije vezan je s promjenom volumena i zove se dilatacijska energija, a drugi dio je vezan za promjenu oblika i zove se distorzijska energija. Količina distorzijske energije koja se javlja zbog deformiranja kod plastičnih materijala služi za opisivanje nastale plastične deformacije, odnosno loma. [31]

Ukupni rad unutarnjih sila to jest ukupna potencijalna energija deformiranja dobiva se pomoću sljedećeg izraza:

$$U_0 = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{zx} \gamma_{zx}) \quad (5.21)$$

Korištenjem Hookeovog zakona i izraza 5.21 dobiva se sljedeće:

$$U_0 = \frac{1}{2E} \cdot (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) - \frac{\nu}{E} \cdot (\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x) + \frac{1}{2G} \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \quad (5.22)$$

Ako se kao osi koordinatnog sustava postave kao pravci djelovanja glavnih naprezanja, tada ne postoje smične komponente i slučaj se pojednostavljuje. Gustoća potencijalne energije deformiranja se dijeli na dilatacijski i distorzijski dio:

$$U_0 = \frac{1}{2E} \cdot [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu \cdot (\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1)] \quad (5.23)$$

Korištenjem izraza volumenske dilatacije:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (5.24)$$

I uvrštavanjem Hookeova zakona u izraz 5.24 dobiva se sljedeće:

$$\varepsilon_v = \frac{1-2\nu}{E} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (5.25)$$

Izraza za srednje normalno naprezanje:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} \quad (5.26)$$

Pri čemu je moguće izraz 5.25 zapisati kao:

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma_0}{K}, \quad K = \frac{E}{3 \cdot (1-2\nu)} \quad (5.27)$$

pri čemu je:

K – modul kompresije [N/mm^2].

Ako se u izraz za gustoću potencijalne energije deformiranja uvrsti komponente srednjeg normalnog naprezanja dobiva se izraz za gustoću dilatacijske energije deformiranja:

$$\begin{aligned} U_h &= \frac{3 \cdot (1-2\nu)}{2E} \cdot \sigma_0^2 = \frac{\sigma_0^2}{2K} \\ U_h &= \frac{3 \cdot (1-2\nu)}{2E} \cdot \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \right)^2 \\ U_h &= \frac{3 \cdot (1-2\nu)}{6E} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2}{18K} \end{aligned} \quad (5.28)$$

Gustoća distorzijske energije deformiranja iznosi:

$$\begin{aligned} U_d &= U_0 - U_h \\ U_d &= \frac{1}{2E} \cdot [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu \cdot (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] - \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2}{18K} \\ U_d &= \frac{1+\nu}{6E} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \end{aligned} \quad (5.29)$$

Dopuštena gustoća distorzijske energije kod osnovnog naprezanja, kada vrijedi $\sigma_1 = \sigma_{\text{dop}}$ i $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ iznosi:

$$U_{\text{d,dop}} = \frac{1+\nu}{3E} \cdot \sigma_{\text{dop}}^2 \quad (5.30)$$

Kao što je već rečeno, pri složenom stanju naprezanja u točki opterećenog tijela, kritično stanje nastupa kada gustoća distorzijske energije dostigne kritičnu vrijednost distorzijske energije pri osnovnom stanju naprezanja, što je moguće zapisati kao:

$$U_d \leq U_{d,dop} \quad (5.31)$$

Iz čega se dobiva:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \leq 2\sigma_{dop}^2 \quad (5.32)$$

Kriterij čvrstoće moguće izraziti preko sljedećeg izraza:

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq \sigma_{dop} \quad (5.33)$$

U slučaju ravninskog stanja naprezanja ($\sigma_3 = 0$) vrijedi:

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2} \leq \sigma_{dop} \quad (5.34)$$

U slučaju ravnog savijanja silama vrijedi:

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \sigma_{dop} \quad (5.35)$$

U slučaju čistog smicanja ($\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau$) vrijedi:

$$\begin{aligned} \sigma_{ekv} &= \tau \cdot \sqrt{3} \leq \sigma_{dop} \\ \tau_{dop} &= \frac{\sigma_{dop}}{\sqrt{3}} = 0,557 \cdot \sigma_{dop} \end{aligned} \quad (5.36)$$

Teorija najveće distorzijske energije daje rezultate koji se slažu s eksperimentalnim u slučajevima plastičnih materijala stoga je najpovoljnija za duktilne materijale, ali nije pouzdana za krhke materijale i za konstrukcije napregnute hidrostatičkim tlakom. [31]

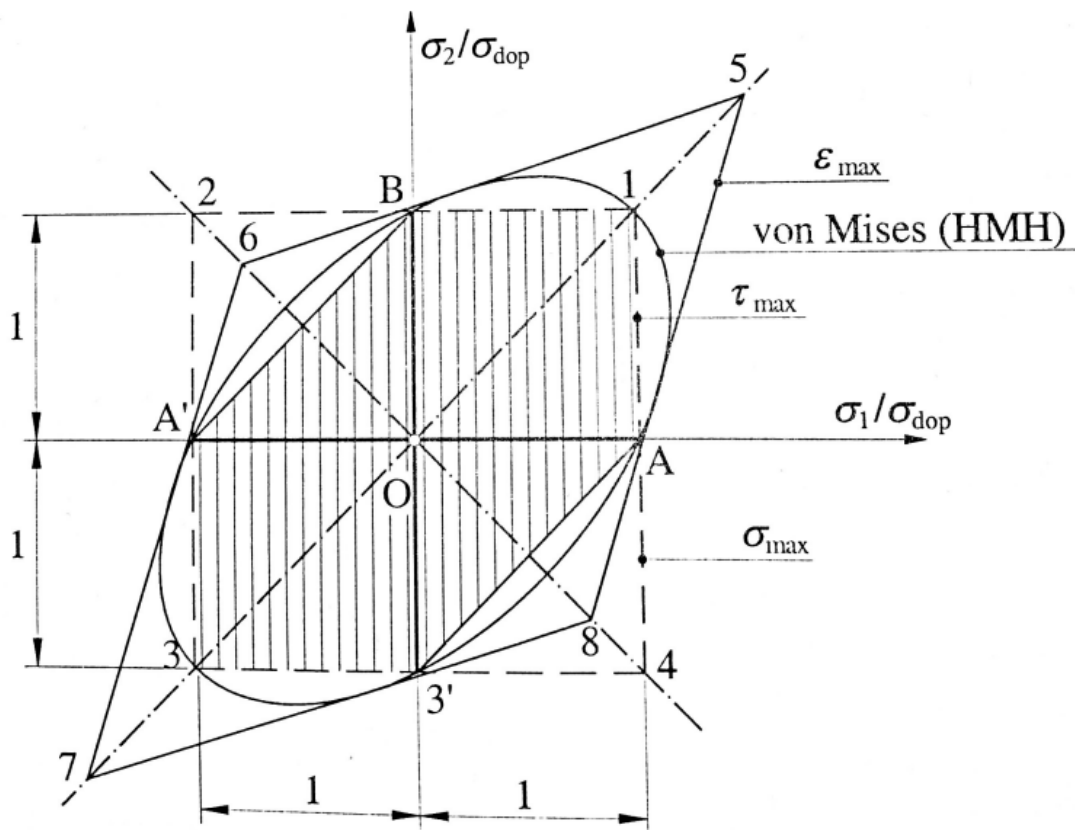
5.5. Usporedba navedenih teorija čvrstoće

U tablici 5.1 dana je usporedba svih spomenutih teorija čvrstoće:

Tablica 5.1: Usporedba spomenutih teorija čvrstoće

| | Ekvivalentno naprezanje | | |
|--|---|--|---|
| | Prostorno stanje naprezanja | Ravninsko stanje naprezanja | Ravno savijanje |
| Teorija najvećeg normalnog naprezanja | $ \sigma_1 \leq \sigma_{\text{dop}}$ $ \sigma_2 \leq \sigma_{\text{dop}}$ $ \sigma_3 \leq \sigma_{\text{dop}}$ | $ \sigma_1 \leq \sigma_{\text{dop}}$ $ \sigma_2 \leq \sigma_{\text{dop}}$ | $\frac{1}{2} \cdot \sigma \pm \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \leq \sigma_{\text{dop}}$ |
| Teorija najveće duljinske deformacije | $ \sigma_1 - \nu \cdot (\sigma_2 + \sigma_3) \leq \sigma_{\text{dop}}$ $ \sigma_2 - \nu \cdot (\sigma_3 + \sigma_1) \leq \sigma_{\text{dop}}$ $ \sigma_3 - \nu \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) \leq \sigma_{\text{dop}}$ | $ \sigma_1 - \nu \cdot \sigma_2 \leq \sigma_{\text{dop}}$ $ \sigma_2 - \nu \cdot \sigma_1 \leq \sigma_{\text{dop}}$ | $0,35 \cdot \sigma \pm 0,65 \cdot \sqrt{\sigma^2 + 4 \cdot \tau^2} \leq \sigma_{\text{dop}}$ |
| Teorija najvećeg tangencijalnog naprezanja | $ \sigma_2 - \sigma_3 \leq \sigma_{\text{dop}}$ $ \sigma_1 - \sigma_3 \leq \sigma_{\text{dop}}$ $ \sigma_1 - \sigma_2 \leq \sigma_{\text{dop}}$ | $ \sigma_1 \leq \sigma_{\text{dop}}, \sigma_2 \leq \sigma_{\text{dop}}$ - σ_1 i σ_2 istog predznaka ili $ \sigma_1 - \sigma_2 \leq \sigma_{\text{dop}}$ - σ_1 i σ_2 različitog predznaka | $\sqrt{\sigma^2 + 4 \cdot \tau^2} \leq \sigma_{\text{dop}}$ |
| Teorija najveće distorzijske energije | $\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq \sigma_{\text{dop}}$ | $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2} \leq \sigma_{\text{dop}}$ | $\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \sigma_{\text{dop}}$ |

Grafički prikaz usporedbe navedenih teorija čvrstoće nalazi se na slici 5.2:



Slika 5.2: Grafička usporedba spomenutih teorija čvrstoće [31]

Na slici 5.2 nalazi se grafička usporedba spomenutih teorija čvrstoće za materijale koji imaju istu granicu tečenja pri tlačnom i vlačnom opterećenju. Teorija najvećeg normalnog napreznja prikazana je pomoću kvadrata s točkama 1, 2, 3 i 4. Linije OA i OB služe za prikazivanje vlačnog napreznja na dvama međusobno okomitim pravcima. Vrijednost napreznja koja djeluju na spomenutim pravcima jednaka je vrijednosti dopuštenog napreznja. Kritično stanje napreznja neće se pojaviti ukoliko je napreznje definirano nekom od točaka koje se nalaze unutar kvadrata 1, 2, 3, 4. [31]

Teorija najveće duljinske deformacije prikazana je točkama 5, 6, 7 i 8 koje čine romb. Vlačno napreznje koje djeluje na jednom pravcu smanjuje produljenje na drugom pravcu. Do kritičnog stanja dolazi kada se točka koja opisuje napreznje nalazi izvan romba. U slučaju kada su oba glavna napreznja pozitivna, točka 5 se nalazi na koordinatama $\frac{\sigma_{dop}}{1-\nu}$, a točka 6 na $\frac{\sigma_{dop}}{1+\nu}$. Iste vrijednosti imaju točke 7 i 8. [31]

Teorija najvećeg tangencijalnog napreznja prikazana je šesterokutom kojeg čine točke A, B', 3, A', B, i 1 [1]. Teorija najveće distorzijske energije prikazan je elipsom.

Teorija čvrstoće je započela s razmatranjem ponašanja jednodimenzionalnih i dvodimenzionalnih konstrukcija, čija se stanja naprezanja mogu aproksimirati kao dvodimenzionalna, a zatim je generalizirana na tri dimenzije kako bi se razvila potpunija teorija elastičnog i plastičnog ponašanja materijala.

Učinci dinamičkog opterećenja vjerojatno su najvažnije praktično razmatranje čvrstoće materijala, posebice problema zamora. Ponovljeno opterećenje često izaziva krte pukotine, koje rastu sve dok ne dođe do kvara. Pukotine uvijek počinju pri koncentracijama naprezanja, osobito promjenama u presjeku proizvoda, u blizini rupa i uglova pri nominalnim razinama naprezanja daleko nižim od onih navedenih za čvrstoću materijala.

6. METODA KONAČNIH ELEMENATA

Metoda konačnih elemenata (eng. *FEM - finite element method*) bavi se problemima strukturne mehanike. To je alat za izračunavanje približnih rješenja složenih matematičkih problema. Općenito se koristi kada su matematičke jednadžbe prekomplikirane da bi se mogle riješiti na normalan („ručni“) način, a određeni stupanj pogreške je tolerantan. Umjesto toga, te jednadžbe mogu se aproksimirati pomoću metoda diskretizacije koje se tada mogu riješiti pomoću numeričkih metoda. Inženjeri obično koriste metodu konačnih elemenata jer se bave projektiranjem proizvoda za praktičnu primjenu i ne trebaju savršena rješenja. Metoda konačnih elemenata može se prilagoditi različitim zahtjevima točnosti i može smanjiti potrebu za fizičkim prototipovima u procesu projektiranja. Što smanjuje troškove testiranja prototipova i novih konstrukcijskih rješenja. [32]

Ukratko, metoda konačnih elemenata (FEM) daje numeričko rješenje za složenu materiju. To jest, numerička metoda koja se koristi za izvođenje analize konačnih elemenata (eng. *FEA - finite element analysis*) bilo kojeg fizičkog fenomena za predviđanje ponašanja strukture. U ovom slučaju metoda konačnih elemenata je numerička tehnika kojom se vrši analiza utjecaja fizičkih veličina na neki konstrukcijski element. [33]

Metoda konačnih elemenata se koristi kada su analitički modeli ograničeni u svojoj primjeni. To jest ako imamo:

- složene geometrije ili deformacije (npr. testiranje sudara i sl.),
- složena opterećenja (npr. primjena sile ovisna o vremenu i sl.),
- složeni materijalni zakoni kao što su:
 - zakon o anizotropnom materijalu (plastika ojačana vlaknima i sl.),
 - nehomogena svojstva materijala (Youngov modul i sl.),
 - hiperelastičan materijal.

Metodu konačnih elemenata (FEM) se često koristi prilikom analize i proračuna postolja vjetroturbina iz nekoliko razloga:

1. Kompleksnost geometrije:

Stupovi vjetroturbina često imaju složenu geometriju s različitim oblicima poput cijevi, konusnih dijelova, prirubnica, priključaka i slično. Metoda konačnih elemenata omogućuje modeliranje ovakvih složenih geometrija s velikom preciznošću, što omogućuje detaljnu analizu naprezanja, deformacija i ponašanja postolja pod opterećenjem.

2. Materijalno ponašanje:

Materijali korišteni u izradi postolja vjetroturbina, poput čelika ili kompozita, imaju kompleksno materijalno ponašanje. Metoda konačnih elemenata omogućuje uključivanje tih materijalnih svojstava, kao što su elastičnost, plastičnost ili lom, u analizu i proračun postolja. To omogućuje procjenu sigurnosti i pouzdanosti stupova pri različitim uvjetima opterećenja.

3. Interakcija s okolinom:

Postolja vjetroturbina su izloženi raznim vanjskim utjecajima, poput vjetra, gravitacije, seizmičkih sila i slično. Metoda konačnih elemenata omogućuje modeliranje i analizu interakcije postolja s okolinom, što je ključno za procjenu stabilnosti i pouzdanosti postolja.

4. Optimizacija dizajna:

Metoda konačnih elemenata omogućuje inženjerima da eksperimentiraju s različitim dizajnom postolja vjetroturbina kako bi optimizirali njihovu čvrstoću, stabilnost i performanse. Korištenjem FEM analize, moguće je brzo procijeniti različite scenarije i dimenzije postolja te odabrati najbolje rješenje.

5. Sigurnost i pouzdanost:

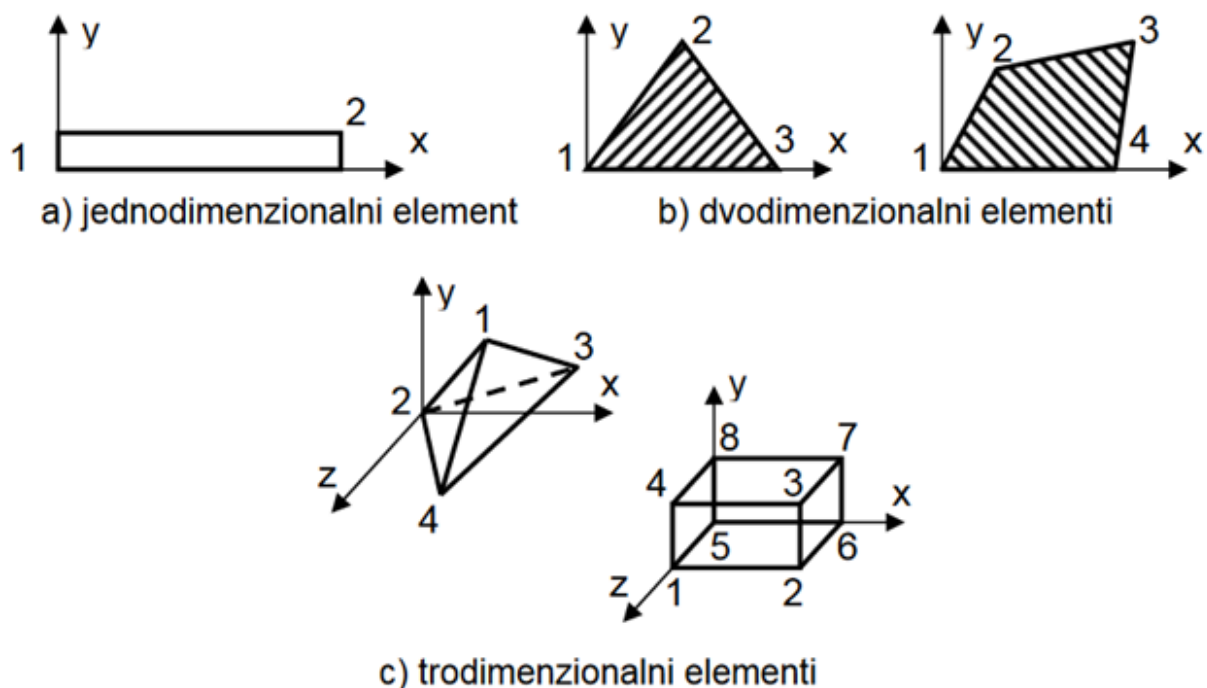
Metoda konačnih elemenata pruža detaljnu analizu naprezanja i deformacija postolja vjetroturbina, što pomaže u procjeni sigurnosti i pouzdanosti konstrukcije. FEM analiza može identificirati kritična područja, kao i predvidjeti ponašanje postolja pod različitim uvjetima opterećenja, što je ključno za osiguranje sigurnosti i dugoročne izdržljivosti postolja vjetroturbina.

6.1. Vrste elemenata

Rješavanje problema metodom konačnih elemenata svodi se na rješavanje sustava algebarskih jednadžbi. Dobivena rješenja su aproksimirana i odnose se na određene točke konstrukcije. Proces modeliranja sastoji se u diskretizaciji kontinuuma (dijela ili cijele strukture). Takav model se sastoji od konačnih elemenata, koji su povezani u čvorove (linijske elemente), duž rubnih zajedničkih linija (ravninske elemente), odnosno tvore zajednički prostori (prostorni elementi). Za svaku konačni elementi, postavljaju se jednadžbe i dobiva se njihova kombinacija jednadžbe cijele strukture. Osnovne jednadžbe konstrukcije sadrže pomake čvorova, a koriste se jednadžbe ravnoteže, te veze između sila i pomaka. Metoda konačnih elemenata koristi modele struktura u kojima su one međusobno povezane elementima koji se nazivaju konačni elementi. Svakom elementu je pridružena funkcija pomaka. Svi elementi povezani su izravno ili neizravno uključujući čvorove i/ili zajedničke granične linije elemenata i/ili zajedničkih površina. [34]

Vrste konačnih elemenata dijele se na:

- jednodimenzionalne (linijske),
- dvodimenzionalne (ravninske),
- trodimenzionalne (prostorne).



Slika 6.1: Prikaz vrste konačnih elemenata [34]

Na temelju poznatih vrijednosti naprezanja i deformacija u jednom čvoru i elementa, naprezanja i deformacije mogu se odrediti za bilo koji drugi čvor i element strukture koji se razmatra i čije su značajke materijala i opterećenja već poznata. Ukupan broj strukturnih jednadžbi opisuje ponašanje svih čvorova i predstavlja sustav algebarskih jednadžbi.

Prije opisa neophodnih koraka treba naglasiti da se modeliranje problema po metodi konačnih elemenata izvrši diskretizacijom strukture na odgovarajući broj konačnih elemenata, izabere vrsta (tip) elementa koji će se koristiti u analizi, vrsta materijala i njegova svojstva, te zatim definiraju vrste opterećenja i rubni uvjeti ili oslonci.

Metoda konačnih elemenata temelji se na fizičkoj diskretizaciji promatrane domene. npr. rešetkasta struktura je diskretizirana u linearne šipkaste elemente, ili pločasta ravnina se može podijeliti na trokutaste ili pravokutne površinske elemente.

Osnova za strukturnu analizu je poddomena, dio domene (strukture) koji se naziva konačni element. Konačni element nije različito malih dimenzija, već ima konačne dimenzije, zbog čega se i zove konačni element. Zato su jednadžbe koje opisuju stanje u pojedinim konačnim elementima ujedno i algebarske jednadžbe. Oni također definiraju stanje domene u cjelini. To znači da se razmatrana domena, koja ima beskonačan broj stupnjeva slobode, može podijeliti na konačan broj elemenata s konačnim brojem stupnjeva slobode. Budući da je broj konačnih elemenata za jedan problem beskonačno velik, zadatak je stvoriti model koji najbolje aproksimira odgovarajući rubni problem. Odabir najboljeg diskretnog modela ovisi o intuiciji, inženjerskoj praksi i poznavanju razmatranog problema. Tvorac modela sam procjenjuje točnost s kojom želi imati rezultate izračuna, pa se prema tome odlučuje za pojedine korake. Prvi korak u strukturnoj analizi, odnosno traženju naprezanja i deformacija je diskretizacija (modela) domene. [34]

Elementi moraju biti dovoljno mali da daju upotrebljive rezultate, ali i dovoljno veliki da se izbjegnu problemi koji se mogu pojaviti kod modela s velikim brojem elemenata koji se rješavaju na neadekvatnim računalima. Općenito se preferiraju mali elementi i elementi višeg reda gdje se rezultati brzo mijenjaju, tj. u području geometrijskih promjena (radijusi, otvori, mjesta koncentrata naprezanja itd.). Veliki elementi općenito se koriste tamo gdje su geometrijske promjene male ili ih nema. Nekad se diskretizacija domene radila ručno. Danas sav softver ima automatsko generiranje mreže u pretprocesorskom dijelu programa. Izbor elementa koji se koristi u FEM analizi ovisi o problemu koji se rješava i željenoj točnosti rezultata. [34]

Prvo što treba razmotriti je li problem jedno-, dvo- ili trodimenzionalan. Ako se radi o prostornim ili ravninskim mrežama, onda se koriste linearni ili jednodimenzionalni elementi. Ako je problem ravninski, koriste se dvodimenzionalni ravninski elementi, a ako je problem prostorni, koriste se trodimenzionalni elementi. [34]

Strukture koje su diskretizirane linijskim elementima (štapovima) su rešetke. Poprečni presjek štapa postoji, ali se može smatrati konstantnim. Najjednostavniji linearni element je linearni element s dva čvora, po jednim na svakom kraju. Elementi višeg reda imaju tri ili više čvorova i kvadratni su ili kubični elementi. Linijski elementi su najjednostavniji od svih elemenata i s njima je najlakše demonstrirati osnovni koncept metoda konačnih elemenata. Osnovni dvodimenzionalni ili ravninski elementi imaju opterećenja koja djeluju u ravnini elementa (ravninska naprezanja i deformacije). Takvi su trokutasti ili četverokutni elementi. Najjednostavniji dvodimenzionalni elementi imaju čvorove samo u vrhovima. Može se reći da su to linearni elementi s ravnim stranicama. Postoje i elementi višeg reda s čvorovima u sredini stranica. Takvi elementi imaju zakrivljene strane. Elementi mogu biti konstantne ili promjenjive debljine. Najčešći trodimenzionalni elementi su tetraedar i heksaedar. Koriste se u problemima gdje je potrebno analizirati prostorno stanje naprezanja. Osnovni trodimenzionalni elementi imaju čvorove na rubovima i ravnim stranicama. Postoje i elementi višeg reda s čvorovima na sredini stranica i/ili zakrivljenim površinama. [35,36]

Idealno čvrsto tijelo je glomazno s malim omjerom stranica. Smanjenjem debljine rubova 3D modela dolazi do povećanja utjecaja naprezanja na element što može dovesti do nepravilne konvergencije tijekom FEM analize. Kako bi se to spriječilo potrebno je posvetiti pažnju vrsti trodimenzionalnih elemenata koji se koriste tijekom 3D modeliranja. Navedeni trodimenzionalni elementi mogu se modelirati pomoću H – elemenata prvog i drugog reda u većini programskih paketa baziranim na takozvanom h – kodu. P – elementi se također mogu koristiti za isto modeliranje samo što je kod njih definicija rubova elemenata puno složenija. Tetraedri prvog reda se u slučaju korištenja h – koda su elementi konstantnog naprezanja što dovodi do njihovog ponašanja kao elementi prevelike krutosti u odnosu na elemente višeg reda. Rezultat navedenih svojstva je potreba za korištenjem većeg broja tetraedra prvog reda kako bi se postigla zadovoljavajuća preciznost mreže koja opisuje 3D model. U velikom broju slučajevi tetraedri nižeg reda konvergiraju prema drugačijim rješenjima u usporedbi s elementima višeg reda. Usprkos svojim nedostacima, mreže koje koriste tetraedra kao osnovni element koriste se u velikoj većini analiza jer se njihovom uporabom smanjuje vrijeme same analize. [37]

6.2. Matrica krutosti

U početku su matrice krutosti elemenata i jednadžbe elemenata određivane na temelju utjecajnih koeficijenata krutosti, što je izravno povezano s analizom konstrukcija. Nakon toga je razvijeno nekoliko metoda za određivanje matrice krutosti.

Matrica krutosti povezuje sile u čvorovima elementa i pomake čvorova elementa. Dobiva se iz ravnoteže sila za svaki razmatrani element. Izravan pristup u proračunu matrice krutosti je dobar samo u slučaju jednodimenzionalnih (štapnih) elemenata, međutim, vrlo je pogodan za objašnjenje osnovnog koncepta MKE. Izravna metoda je prikladna za jednodimenzionalne probleme, ali se druge metode koriste za dvodimenzionalne i trodimenzionalne probleme. [34]

Druga metoda se temelji na diferencijalnim jednadžbama razmatranog problema. Metoda se koristi tamo gdje nije moguće odrediti funkcional, te u problemima gdje funkcional uopće ne postoji. Od svih rezidualnih metoda najpoznatija je Galerkinova metoda. Na temelju metode reziduala dobivaju se jednadžbe koje opisuju ponašanje elementa. U obliku matrice to je:

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & k_{n3} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (6.1)$$

$$\{f\} = [k]\{d\} \quad (6.2)$$

pri čemu je:

$\{f\}$ – vektor sila u čvorovima elementa,

$[k]$ – matrica krutosti elementa,

$\{d\}$ – vektor pomaka čvorova elementa.

Primjenom direktne metode i superpozicije mogu se zbrajati matrice pojedinačnih elemenata. Na taj način se dobiva globalna ili ukupna matrica krutosti konstrukcije. Ovdje se mora poštivati koncept kontinuiteta ili kompatibilnosti, što zahtijeva da struktura zadrži cjelovitost (kontinuitet), tj. da nema prekida u strukturi. Jednadžba globalne strukture u matričnom obliku je:

$$\{F\} = [K]\{d\} \quad (6.3)$$

pri čemu je:

$\{F\}$ – vektor sila u globalnom koordinatnom sistemu,

$[K]$ – globalna matrica krutosti,

$\{d\}$ – vektor poznatih i nepoznatih pomaka svih čvorova strukture.

Globalna matrica krutosti $[K]$ je singularna matrica jer je njena determinanta jednaka nuli. Problem singularnosti matrice rješava se uvođenjem odgovarajućih rubnih uvjeta (ograničenja ili oslonaca), tako da konstrukcija zadrži postojeći položaj i ne kreće se kao kruto tijelo. Treba naglasiti da se poznata opterećenja unose u globalnu matricu sila $\{F\}$. Konstrukcije u koju su uneseni rubni uvjeti predstavlja spregnuti sustav algebarskih jednadžbi u obliku gdje je "n" ukupan broj nepoznatih stupnjeva slobode. Jednadžbe se mogu riješiti Gaussovom metodom eliminacije ili primjenom neke iterativne metode. Osnovne nepoznanice su pomaci u čvorovima. Ovo su prve veličine koje se određuju primjenom metode konačnih elemenata. Nakon toga, koristeći odnos između deformacija i pomak se izračunavaju naprezanja. [34]

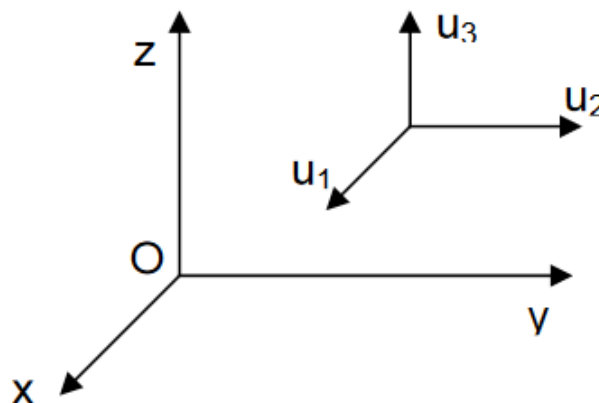
6.3. Koordinatni sustav

U prethodnom tekstu spomenuti su pojmovi lokalni i globalni koordinatni sustav. U općem slučaju, model koji se analizira definiran je pomoću čvorova smještenih u trodimenzionalnom prostoru. Položaj točaka u prostoru određen je koordinatnim sustavom. Pomaci točaka, kao i druge potrebne veličine, mogu se prikazati u koordinatnom sustavu različitom od onog u kojem su definirani čvorovi radi preglednosti. Koordinatni sustavi služe za izražavanje položaja ulaznih ili izlaznih veličina.

Svaki element ima jedan koordinatni sustav koji služi da se u njemu izraze tangencijalna i normalna naprezanja kao i momenti. U koordinatnom sustavu elemenata mogu se dati i ulazne karakteristike za jednodimenzionalne elemente. Ovi koordinatni sustavi se određuju prema elementu, a često kod jednodimenzionalnih elemenata koordinatna osa spaja čvorove elemenata. [34]

6.3.1. Osnovni ili globalni koordinatni sistem

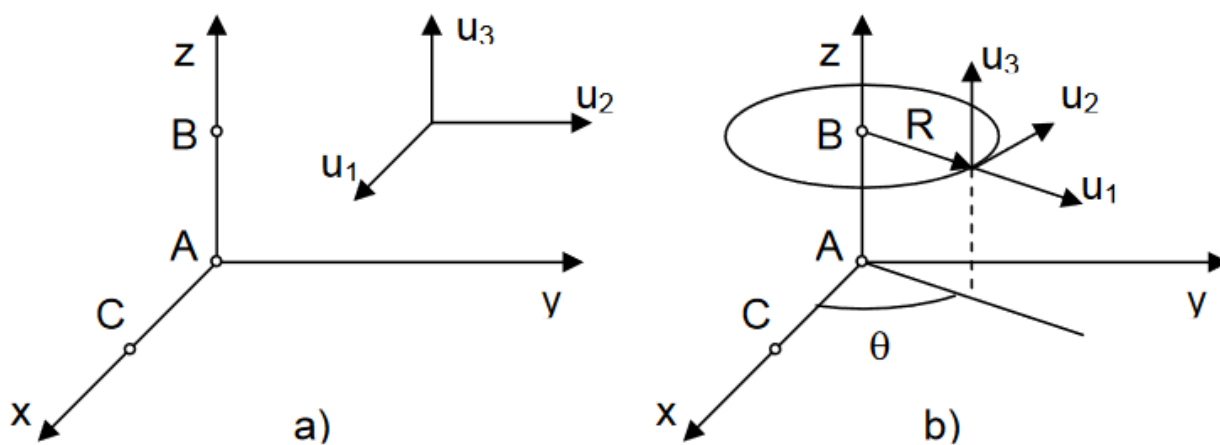
U globalnom koordinatnom sustavu, koji je osnovni sustav za sve računalne programe, definirane su granice, kao i izlazne veličine pomaka. Koordinatni početak globalnog sustava je nula.



Slika 6.2: Globalni koordinatni sustav

6.3.2. Lokalni koordinatni sistem

Lokalni koordinatni sustav može biti sustav s pravokutnim, cilindričnim ili sfernim koordinatama. Položaj lokalnog u odnosu na globalni sustav određuju tri točke. Lokalni koordinatni sustav koristi se za izražavanje rezultata pomaka i određivanje ograničenja.



Slika 6.3: Lokalni koordinatni sustav - a) Pravokutni i b) Cilindrični

6.4. Vrste analize

Proces analize konstrukcijskog elementa metodom konačnih elemenata sastoji se od 8 koraka:

- 1) izrade geometrije modela (CAD model),
- 2) definiranje materijala modela,
- 3) omreživanje ili diskretizacija modela
- 4) definiranje ograničenja i oslonaca modela,
- 5) definiranje opterećenja koja djeluju na model,
- 6) dobivanje rezultata,
- 7) analiza dobivenih rezultata,
- 8) modificiranje konstrukcije.

6.4.1. Kreiranje geometrije modela

U prvom koraku potrebno je napraviti model konstrukcijskog elementa na kojem se želi izvršiti analiza metodom konačnih elemenata. U idealnom slučaju, uklonjeni su svi suvišni dijelovi modela koji ne doprinose analizi ili zahtijevaju pretjerano postavljanje modela. Što je model jednostavnije geometrije, to bolje. Time olakšavamo programu da izradi rezultate brže i točnije, te i sami sebi olakšavamo analizu rezultata. [33]

6.4.2. Definiranje materijala modela

U ovom koraku potrebno je definirati materijal kod konstrukcijskog elementa, odnosno modela. Potrebno je definirati Youngov modul, Poissonov omjer, gustoću materijala i slično. Nakon što su osnovne značajke materijala definirane, može se i dodijeliti koji će se materijalni zakoni primijeniti, kao što je linearno elastično ponašanje ili hoće li materijal imati plastično ponašanje, te slično.

Nelinearnost materijala uključuje nelinearno ponašanje materijala na temelju trenutne deformacije, temperature, tlaka i tako dalje. Neki nelinearni modeli materijala su velika deformacija, odnos naprezanje-deformacija, elastoplastičnost, plastičnost, puzanje i hiperelastičnost. [33]

6.4.3. Omreživanje ili diskretizacija modela

Prilikom omreživanja modela potrebno je posvetiti pozornost gustoći mreže jer ona utječe na točnost i vrijeme provođenja analize. Mreža s velikom gustoćom povećava točnost dobivenih rezultata, ali i povećava vrijeme potrebno za dobivanje istih pa je potrebno koristiti mrežu koja će dati optimalni odnos između točnosti i vremena. Često su kritična naprezanja ograničena na mala područja modela. Kada se koristi globalno usklađivanje mreže, rezultirajuća mreža je često previše fina u područjima koja nisu relevantna. [33]

6.4.4. Definiranje ograničenja i oslonaca modela

Sljedeći korak je definiranja ograničenja i oslonaca koja djeluju na model. Ograničenja su potrebna kako ne bi došlo do pomaka modela zbog utjecaja vanjskih sila to jest do translacije modela. Do naprezanja i deformacije modela doći će upravo zbog djelovanja ograničenja i vanjskog opterećenja koje djeluje na model. [33]

6.4.5. Definiranje opterećenja koja djeluju na model

Opterećenja mogu biti sile, momenti, ubrzanja ili čak temperaturna opterećenja na modelu. Te je potrebno vrlo dobro i točno definirati rubne uvjete (ograničenja, oslonce i opterećenja), kako bi dobili što točnija i realnija prikazali stvarna opterećenja koja se pojavljuju na realnom modelu, te kako bi na taj način dobili što preciznija rješenja odnosno rezultate. [33]

6.4.6. Dobivanje rezultata

U ovom koraku softver rješava algoritme i sustave linearnih matematičkih jednadžbi kako bi prikazao nastale pomake, deformacije i naprezanja. Prilikom računanja rezultata program koristi razne teorije čvrstoće. [33]

6.4.7. Analiza dobivenih rezultata

Osim naprezanja mogu se dobiti informacije o pomacima, deformaciji, faktoru sigurnosti i slično. Potrebno je odrediti područje od interesa, kao što su lokacija i intenzitet naprezanja i deformacija. Softver može proizvesti impresivne, šarene rezultate koji mogu izgledati uvjerljivo, ali mogu biti potpuno beskorisni. Često je potrebno rezultate dobivene metodom konačnih elemenata usporediti s analitičkim rezultatima (ako su dostupni), te potrebno je provesti odgovarajuću studiju konvergencije i/ili usporedite svoje rezultate s postojećim radovima/literaturom. [33]

6.4.8. Modificiranje konstrukcije

U slučaju da se na konstrukciji pojavljuju konzentator naprezanja ili je maksimalno naprezanje veće od dopuštenog pristupa se modificiranju konstrukcije. Cilj modificiranja konstrukcije je eliminacija koncentatora naprezanja ili smanjenje maksimalnog naprezanja. [33]

6.5. Ključne pretpostavke prilikom analize

Prilikom vršenja analize metodom konačnih elemenata potrebno je usvojiti četiri ključne pretpostavke da bi se stvarni model što bolje opisao, a to su:

- geometrija,
- svojstva materijala,
- mreža,
- rubni uvjeti.

Geometrija mora biti specifično pripremljena za provođenje metode konačnih elemenata tako da bude u odgovarajućem formatu i bez lokalnih nepravilnosti na kojima će biti vrlo gusta mreža s malim elementima koji opterećuju rad računala i dovode do krivih rezultata. Elementi s manjom veličinom ili elementi višeg reda omogućavaju stvaranje mreže koja bolje prati geometriju konstrukcijskog elementa. Prilikom vršenja analize pretpostavlja se da mreža prati geometriju dovoljno precizno da su dobiveni rezultati analize zadovoljavajući.

Definiranjem svojstva materijala pretpostavlja se da će on tijekom cijelog proizvodnog procesa imati ista svojstva. Tipično se i pretpostavlja da su dijelovi od kojih se konstrukcijski element sastoji izotropni i homogeni. Prilikom odabira svojstva potrebno je uvijek posvetiti pažnju kao što su krutost materijala, debljina stijenke i slično.

Mreža je glavni alat komunikacije između softvera za rješavanje problema metodom konačnih elemenata. O postavljanju mreže i njezine kvalitete ovisi preciznost rješenja, ali ne i točnost. Kvaliteta mreže karakterizirana je konvergencijom prema konačnom rezultatu analize. Konvergencija treba biti takva da konvergira prema stabilnom rješenju. Nepisano pravilo je da izgledno dobra mreža daje kvalitetne rezultate što ne mora biti ispravno, ali zasigurno loše izgledna mreža neće dati dobro rješenje. Dobro postavljena mreža će imati dobro oblikovane elemente, što nužno ne mora značiti da će rezultati biti ispravni, međutim ako mreža loše izgleda tada postoji problem kod analize. Na mjestima gdje dolazi do promjene gustoće mreže potrebno je da tranzicija na tim područjima bude glatka i postepena bez iskrivljenih elemenata. Idealiziranjem elemenata s grednim ili ljuskastim elementima može se znatno smanjiti opterećenje rada računala i povećati točnost krajnjeg rješenja.

Postavljanje rubnih uvjeta je najzahtjevniji dio postupka provođenja metode konačnih elemenata gdje do izražaja dolazi korisnikovo poznavanje inženjerskih problema. Tijekom postavljanja rubnih uvjeta potrebno je posvetiti oprez postavljanju rubnih uvjeta kako se ne bi dobili nepouzdana rezultati. Ukoliko se rubni uvjeti postavbe krivo dobiti će se precizni rezultati, ali netočno rješenje koje će rezultirati odstupanjima u naprezanjima ili pomacima od stvarnih. [35,36]

6.6. Linearna statička analiza

Postoje različite vrste strukturnih analiza kod metoda konačnih elemenata, kao što su:

- **linearna statička,**
- nelinearno statička,
- dinamička,
- udarnih opterećenja.

Linearna statička analiza je koja se najčešće koristi tijekom analize konstrukcijskih elemenata. Razlog uporabe ove metode je njezina jednostavnost, brzina, dostupnost i cijena rješavanja problema. Kako bi vrijedila linearnost moraju vrijediti i dodatni uvjeti. Tri dodatna uvjeta su:

- svojstva materijala,
- geometrijska svojstva,
- rubni uvjeti.

6.6.1. Svojstva materijala

Svojstva materijala moraju biti takva da naprezanje i deformacije imaju linearan odnos, odnosno materijal se mora nalaziti u elastičnom području do granice tečenja na krivulji naprezanja deformacije (mora vrijediti Hookeov zakon).

Većina čelika i aluminijskih legura ostaju linearni do granice tečenja, međutim, ostali metali i materijali kao lijevano željezo i plastika imaju malo područje elastičnih deformacija. U praksi se najčešće materijali modeliraju kao linearni, te se tada rezultati interpretiraju u odnosu na tu pretpostavku. U gotovo linearnim uvjetima, pomaci koji nastaju uslijed nekog opterećenja su nedovoljno interpretirani dok je vrijednost naprezanja veća od stvarne. Pogreške pomaka je mala i obično je nadoknađena nedostatkom modeliranja geometrijskog ukrućenja prilikom linearne analize. U najgorem slučaju dolazi do predviđanja prevelike vrijednosti posmaka. [36]

6.6.2. Geometrijska svojstva

Prilikom povećanja opterećenja može doći do smanjenja pomaka, što se naziva geometrijsko skrućivanje i nije isto kao deformacijsko očvršćivanje koje je posljedica svojstva materijala. Za razliku od toga geometrijsko skrućivanje je posljedica geometrije koju je teško ili gotovo nemoguće predvidjeti kod modeliranja.

Geometrijskog ukrućenja može utjecati na rezultate analize metodom konačnih elemenata, taj utjecaj je veći što je veća vrijednost pomaka. Glavni rezultat ovog je smanjenje pomaka uslijed povećanja opterećenja na konstrukcijski element. Glavni razlog povećanja krutosti materijala je povećanje vlačnog naprezanja u područjima deformacije istog. Povećanjem aksijalnog vlačnog naprezanja kod grede ili ljsuke dolazi do već spomenutog ukrućenja materijala.

U praktičnoj primjeni lako je odrediti nelinearnost sustava zbog svojstva materijala, ali je gotovo nemoguće odrediti utjecaj ukrućenja materijala na rezultate analize. Kako bi se uzeo u obzir utjecaj geometrijskog ukrućenja potrebno je razviti nelinearno rješenje s velikim pomakom. U slučaju da je razlika između linearnog i nelinearnog rješenja za promatrano područje velika, potrebno je koristiti nelinearno rješenje. [35,36]

6.6.3. Rubni uvjeti

Posljednji uvjet koji je potrebno zadovoljiti da bi se analiza smatrala linearnom je nepromjenjivost rubnih uvjeta. Sila mora biti tijekom cijele analize konstantna po vrijednosti, orijentacije i nepromjenjivog smjera. U slučaju da se bilo koji od navedenih parametara znatno promijeni tijekom deformacije konstrukcijskog elementa, tada više ne vrijedi pretpostavka linearnosti, međutim u praksi vrlo često se dolazi do nelinearnih problema koji se ne mogu riješiti linearnom analizom. Zbog toga je razvijena metoda linearne pretpostavke gdje se pomoću sigurnosnih faktora linearna analiza svodi na nelinearnu.

Podjela opterećenja mora biti takva da sve sile budu primijenjene u svom punom iznosu, tada vrijedi linearna analiza. Ukoliko je sila primijenjena u obliku vibracije ili sinusoidno ona tada nije statička, odnosno ne vrijedi linearna analiza. Međutim, mnogi slučajevi iz prakse poput tijela koja se giba konstantnom brzinom mogu se svesti na statičko opterećenje. [35,36]

6.7. Smjernice za izradu geometrije konstrukcijskog modela

Prilikom konstruiranja modela potrebno je posvetiti pažnju sljedećim pojmovima:

- povezanosti značajki modela (eng. „*parent – child relationship*“),
- konstrukciji čiste geometrije.

Pojam „*parent – child relationship*“ obuhvaća parametarsko definiranje značajki konstrukcijskog modela. Parametarsko definiranje značajki od velikog je interesa inženjeru koji vrši FEM analizu jer velika većina vanjskih rubova i malih rupa nemaju nikakav utjecaj na strukturno ponašanje modela te samo kompliciraju model. Jedna od najkorisnijih značajki parametarskog definiranja je mogućnost supresije dijelova modela kako bi se pojednostavila njegova geometrija, a i time smanjilo vrijeme potrebno za FEM analizu. [37]

Pojam čiste geometrije obuhvaća konstrukciju CAD modela koji maksimizira mogućnost stvaranja mreže koja će u potpunosti obuhvatiti značajke tog istog CAD modela kako bi se dobili pouzdani rezultati FEM analize. Prilikom konstrukcije čiste geometrije, geometrijske značajke ne smiju sprječavati stvaranje mreže, te istodobno moraju imati konzistentne površine i omjere širine i visine kako bi se spriječilo stvaranje elemenata visokog omjera širine i visine te tranziciju između rubnih elementa koja bi mogla negativno utjecati na točnost i preciznost rezultata. Uz navedeno, potrebno je i posvetiti pažnju pojednostavljenju i manipulaciji značajki modela u svrhu dobivanja čiste geometrije. Prilikom pojednostavljenja značajki važno je da operacije koje se vrše u tu svrhu ne narušavaju integritet modela. Manipulacija modela kao što je promjena oblika, dimenzija ili uklanjanje neke značajke iz FEM analize u velikoj većini slučajeva neće bitno utjecati na dobivene rezultate. Potrebno je napomenuti da ovo vrijedi samo ako se te značajke nalaze daleko od područja interesa FEM analize. [37]

Neki od problema koji se javljaju prilikom konstrukcije čiste geometrije su:

- kratki rubovi - imaju male dimenzije u usporedbi s dimenzijama modela ili nominalnom veličinom mreže. U tom slučaju rub element mreže postaje iste duljine kao i spomenuti kratki rub. Glavni uzrok je nepravilno poravnanje značajki modela ili postavljanje zaobljenja preblizu nekom drugom rubu.
- „srebrne“ površine - su površine na modelu koje imaju veliki omjer širine i visine. One se najčešće pojavljuju u kombinaciji s kratkim rubovima te stvaraju probleme tijekom omreživanja modela. Uzrok jednak je uzroku pojave kratkih rubova.
- praznine u modelu - je rezultat nepravilnog poravnanja značajki te često uzrokuju stvaranja kratkih rubova i „srebrnih“ površina. U slučajevima kada su praznine male i nalaze se daleko od mjesta na kojem se vrši FEM analiza one ne predstavljaju problem, te je njihov utjecaj na rezultate FEM analize zanemariv. Potrebno je i napomenuti da je njihov utjecaj puno veći tijekom vršenja dinamičke analize jer tada utječu na masu i krutost elementa pa ih je tada nemoguće zanemariti.

Kako bi se izbjegli ti problemi te pojednostavila geometrija konstrukcijskog modela, prilikom FEM analize potrebno je napraviti supresiju pojedinih dijelova koji nemaju utjecaj na konačne rezultate. Neke od značajki na kojima je moguće izvršiti supresiju su:

- vanjski kutovi ili zaobljenja,
- mala zaobljenja na unutarnjim rubovima koji se nalaze daleko od zone interesa,
- navoji vijaka,
- male rupe koje se ne nalaze na pravcu djelovanja opterećenja,
- male izbočine koje se nalaze izvan zone djelovanja opterećenja,
- dekorativne značajke kao što je logo,
- veliki dijelovi geometrije na koje opterećenje nema utjecaj.

Razina nesigurnosti rezultata FEM analize zbog prilagodbe značajki modela je puno manja od nesigurnosti koja nastaje zbog prilagodbe rubnih uvjeta ili svojstva modela. U slučaju malih promjena dimenzije pojedinih značajki kako bi se dobila bolja mreža za FEM analizu smatra se da je to opravdano jer se time dobiva „čista“ geometrija na kojoj je lakše vršiti analizu. Ovaj pristup nije poželjan u slučaju detaljne analize kojom se nastoji utvrditi naprezanje kod kojeg dolazi do narušavanja strukture samog konstrukcijskog elementa. [37]

7. NUMERIČKA ANALIZA POSTOLJA

Prije opisa neophodnih koraka za izradu numeričke analize i dobivanje njezinih rezultata, važno je naglasiti da se modeliranje problema po metodi konačnih elemenata provodi na način da se najprije izradi čisti i jednostavniji model geometrije (bez suvišnih dijelova koji ne doprinose analizi ili zahtijevaju pretjerano postavljanje modela). Zatim se definira vrsta materijala i njegova svojstva, odabire se vrsta elementa koji će se koristiti u analizi, izrađuje se mreža ili diskretizacija modela (optimalna), te se na kraju definiraju vrste opterećenja i rubni uvjeti na modelu.

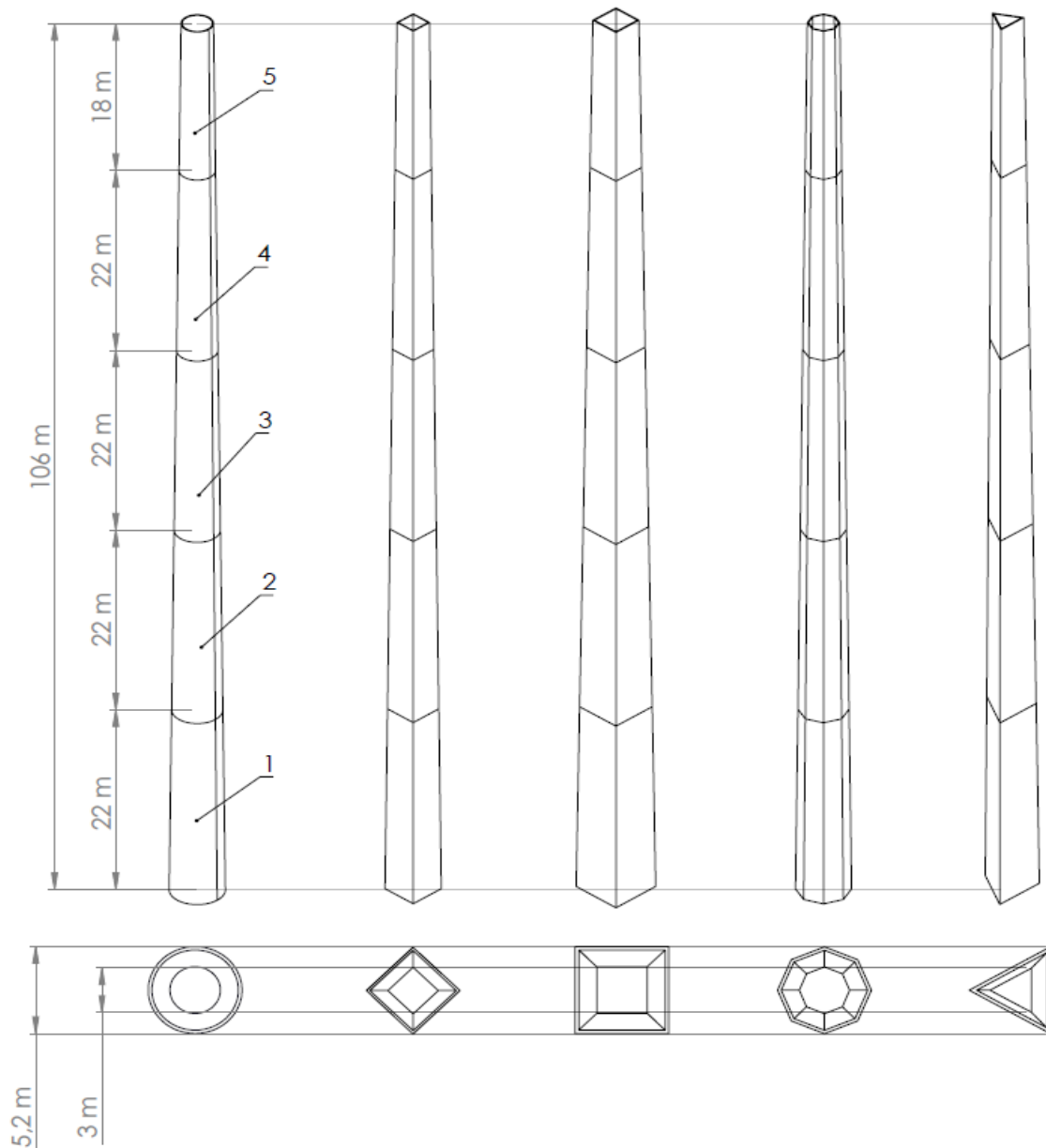
Za modeliranje 3D modela, numeričku analizu, optimizaciju, te obradu i prikaz podataka koristit će se programski paket Femap 2020.1 Student, koji je opremljen studentskom licencom. Važno je obratiti pažnju prilikom upisa podataka u Femap-u, jer program ne upravlja sustavom mjernih jedinica. Korisnik je odgovoran za osiguravanje koherentnog sustava jedinica između duljine, površine, sile, naprezanja i slično. U ovom slučaju, sve mjerne jedinice će biti izražene u metrima (m), paskalima (Pa), njutnima (N), kg/m^3 i slično.

Što se tiče geometrije modela, visina postolja, te dimenzije baze i vrha postolja ostat će nepromijenjene i neće se mijenjati tijekom izrade analize, jer je vjetroturbina dizajnirana za tu visinu i za te brzine vjetrova, već će se izraditi analiza i optimizacija različitih vrsta presjeka postolja za različite debljine stijenki.

Opterećenje je definirano (poglavlje 4.2) samo za uvjete koji pogoduju najvećem opterećenju, odnosno kada su najveća naprezanja u pojedinim dijelovima postolja. Dinamička opterećenja ili dinamička analiza kao što su vibracije, njihanje, promjene brzine vjetra i slično (kada su promjenjiva opterećenje u vremenu) neće se uzimati u obzir. Već će se izraditi linearna analiza, odnosno statičko opterećenje, s konstantnim maksimalnim opterećenjem za određene brzine vjetra na postolje vjetroturbine bez promjena u vremenu. Testirat će se i iz analizirati pod kojim maksimalnim opterećenjem postolje može izdržati za određene presjeke profila, s određenim karakteristikama.

7.1. Izrada 3D modela različitih izvedbi presjeka postolja

Postolje se sastoji od čeličnih cijevi (pune stijenke) koje se linearno sužavaju prema vrhu od 5 segmenata. Segmenti se međusobno spajaju prirubnicama koje su tvornički zavarene na krajeve segmenata, a na sebi imaju provrte za spajanje vijčanim spojem. Prirubnice se nalaze sa unutrašnje strane postolja. U ovom radu zanemaruje se vijčani spojevi i prirubnice, te se postolje izrađuje od 5 komada/sekcija (svaki segment ima određenu debljinu stijenke). Prva četiri segmenta imaju visinu od 22 m, dok je peti segment visine 18 m. Na taj način se dobiva jednostavnija geometrija potrebna za numeričku analizu. Na slici 7.1 prikazane su različite izvedbe postolja s njihovim geometrijskim karakteristikama.

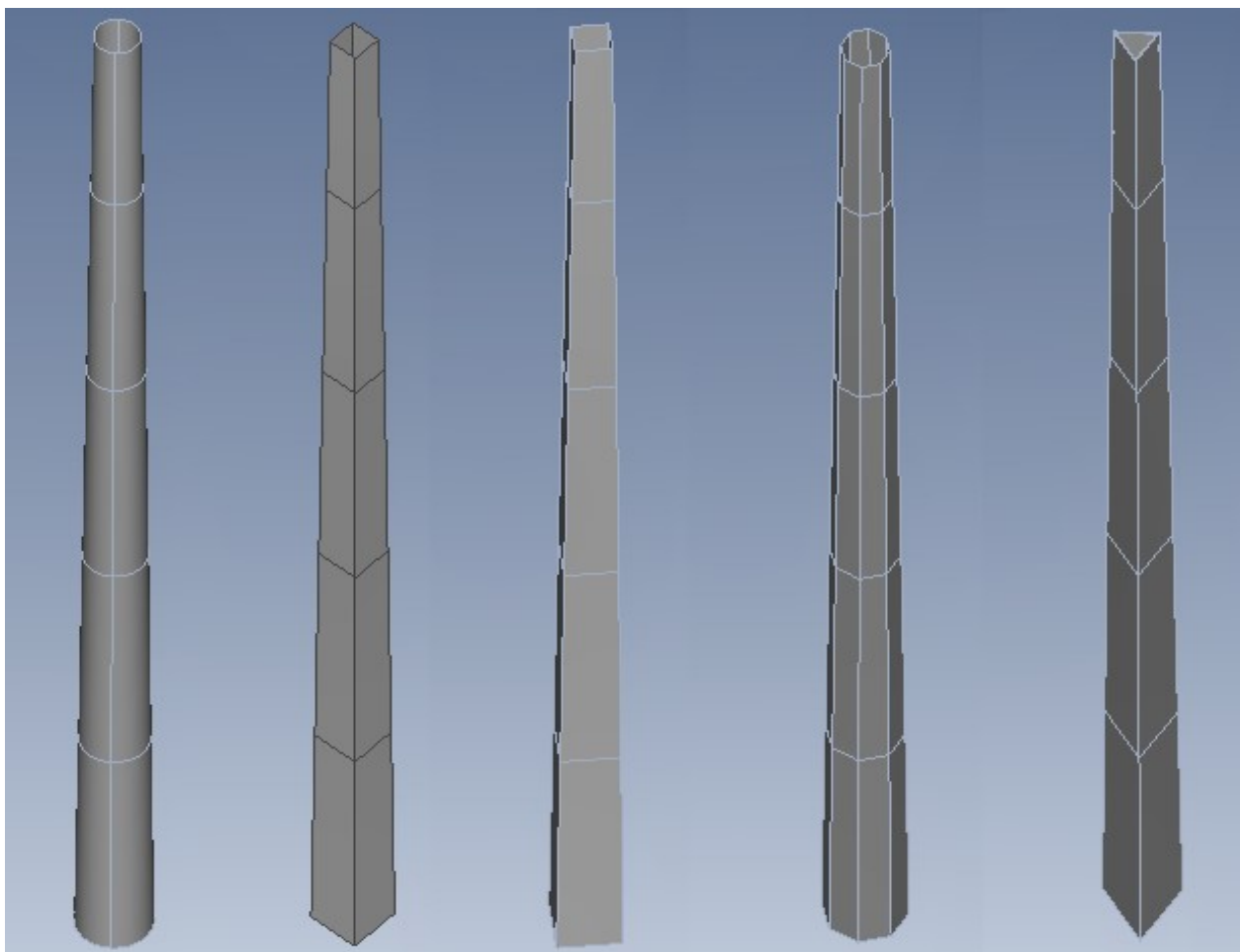


Slika 7.1: Prikaz geometrije različitih izvedbi postolja

Modeliranje 3D modela vrši se u programskom paketu Femap, tako da se najprije odredi koja vrsta elemenata će se koristiti za modeliranje i analizu. S obzirom na to da struktura postolja je tankostijena (mala debljina stijenke u odnosu na druge dimenzije), najbolje je koristiti ravninske ljuskaste ili *shell (plate)* elemente. Osim toga, *shell* elementi omogućavaju značajno smanjenje broja elemenata potrebnih za modeliranje tankostijenih struktura u odnosu na prostorne *solid* elemente, što rezultira bržim izračunima i manjim zahtjevima za računalne resurse.

U Femap programskom paketu, modeliraju se površine (*surfaces*) koje prate geometriju profila postolja. Na tim površinama se zatim dodaju i definiraju *shell* elementi s određenom debljinom stijenke. Uz pomoć „*Surfaces*“ naredbe u Femap-u, mogu se izraditi različite izvedbe postolja, gdje svaki dio segmenta ima definirani svojstvo (*property*) koje određuje materijal, vrstu elementa i debljinu stijenke. Trenutna debljina stijenki svih segmenata iznosi 100 mm.

Na slici 7.2 prikazane su različite izvedbe postolja koje su izrađene u Femap-u koristeći „*Surfaces*“ naredbu i definirajući odgovarajuća svojstva za svaki dio segmenta.



Slika 7.2: Prikaz geometrije različitih izvedbi postolja u Femap-u

Segmenti se međusobno spajaju prirubnicama, a na sebi imaju provrte za spajanje vijčanim spojem. Kako se zanemaruje vijčani spojevi i prirubnice, segmenti se u Femap-u spojeni su uz pomoć naredbe „Connect“, „Automatic“, te svaki dio je između vezan s opcijom *glue* (koja simulira vijčani ili zavareni spoj).

7.2. Definiranje materijala i omreživanja modela

Vrsta materijala koja će se uzeti u obzir za sve izvedbe postolja je konstrukcijski čelik oznake S-355. Za određene debljine uzroka granica tečenja konstrukcijskog čelika oznake S-355 iznosi: [38]

- $16 \text{ mm} < t \leq 40 \text{ mm}$ - 345 MPa
- $40 \text{ mm} < t \leq 63 \text{ mm}$ - 335 MPa
- $63 \text{ mm} < t \leq 80 \text{ mm}$ - 325 MPa
- $80 \text{ mm} < t \leq 100 \text{ mm}$ - 315 MPa
- $100 \text{ mm} < t \leq 150 \text{ mm}$ - 295 MPa

S obzirom na to da je početna debljina stijenki svih segmenata postolja 100 mm, granica tečenja iznosi:

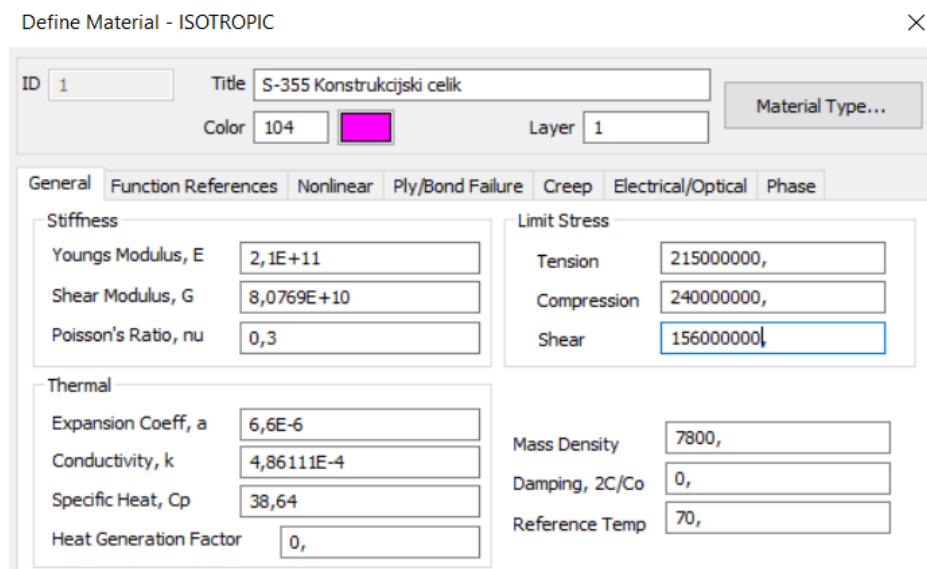
$$R_e = 315 \text{ MPa} \quad (7.1)$$

Dopušteno naprezanje se dobije tako da se prethodno navedena granica tečenja materijala podjeli s faktorom sigurnosti. Iz toga slijedi da dopušteno naprezanje iznosi:

$$\sigma_{dop} = \frac{R_e}{S} = \frac{315}{2} = 157,5 \text{ MPa} \approx 160 \text{ MPa} \quad (7.2)$$

Osim toga, pri izradi numeričkog modela nosača važno je postaviti parametre materijala koji za izotropni linearno-elastični materijal iznose:

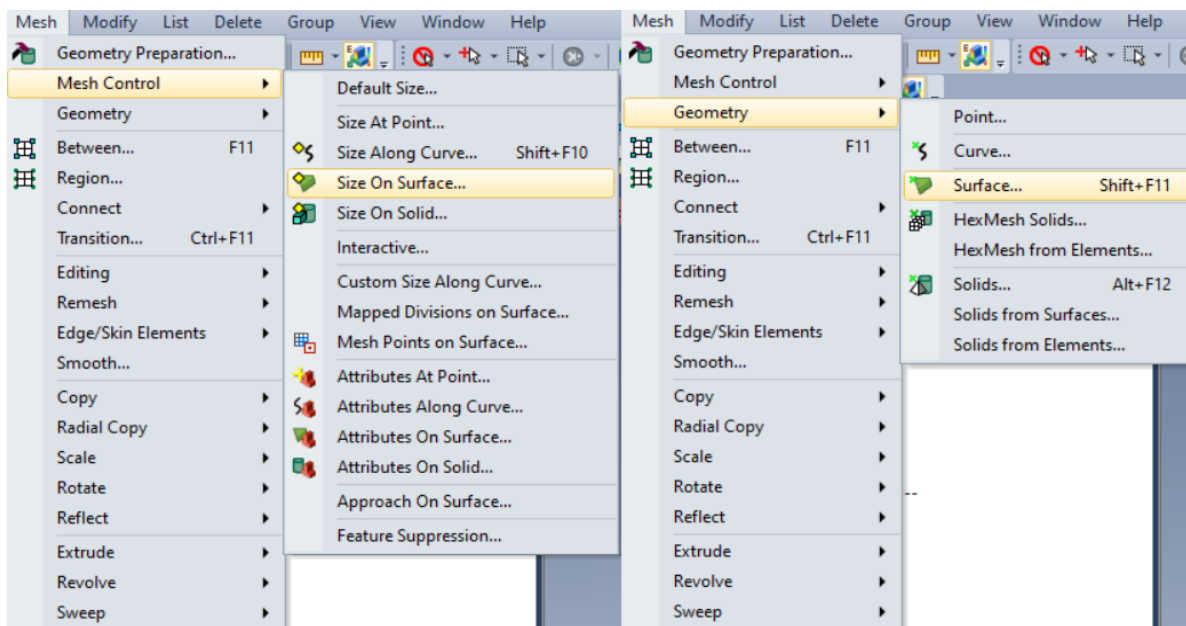
- modul elastičnosti: $E = 210 \text{ GPa}$,
- Poissonov koeficijent: $\nu = 0,3$,
- gustoća materijala: $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$.



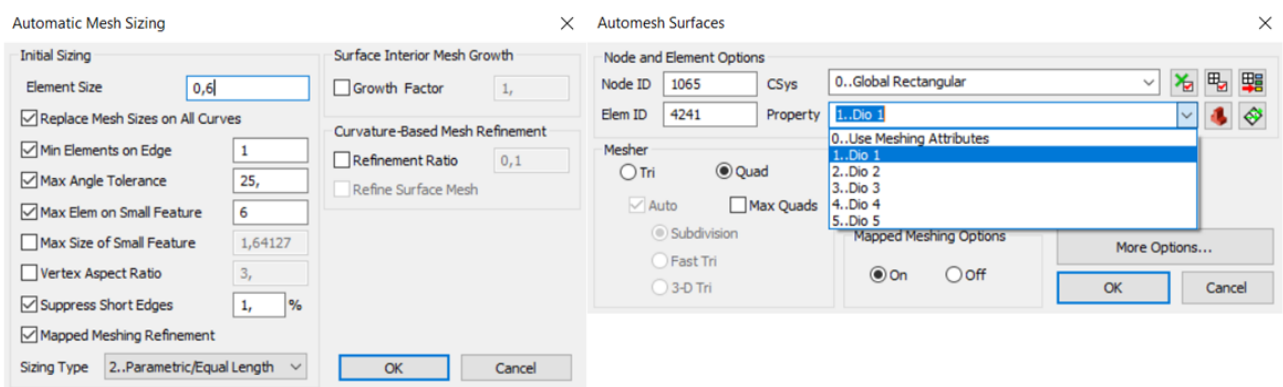
Slika 7.3: Definiranje materijala S-355 u Femap-u

Prilikom omrežavanja modela, važno je obratiti pažnju na gustoću i vrstu mreže, budući da to utječe na točnost i vrijeme potrebno za provođenje analize. Potrebno je pronaći ravnotežu između gustoće mreže - treba biti dovoljno gusta da se dobiju precizni rezultati, ali istovremeno dovoljno rijetka da bi se ubrzao proces računalne obrade.

Umrežavanje svih izvedbi postolja prikazan je na slici 7.4 i 7.5, te se izvršava isto i s jednakim brojem elemenata za sve izvedbe postolja. Najprije je potrebno odrediti broj elemenata na površini koju će mreža aproksimirati. To se vrši naredbom „Mesh“/„Mesh Control“/„Size On Surface“, odabiru se sve površine postolja i otvara se novi prozor pod nazivom „Automatic Mesh Sizing“, gdje se definira veličina elementa i slično. Kada je definirana veličina elementa, dalje je potrebno ih umrežiti. Sa naredbom pod „Mesh“/ „Geometry“/ „Surface“, otvara se novi prozor pod nazivom „Automesh Surfaces“, gdje se definira *property* za svaki segment postolja i određuju se trokutasti ili četverokutni elementi u mreži modela.

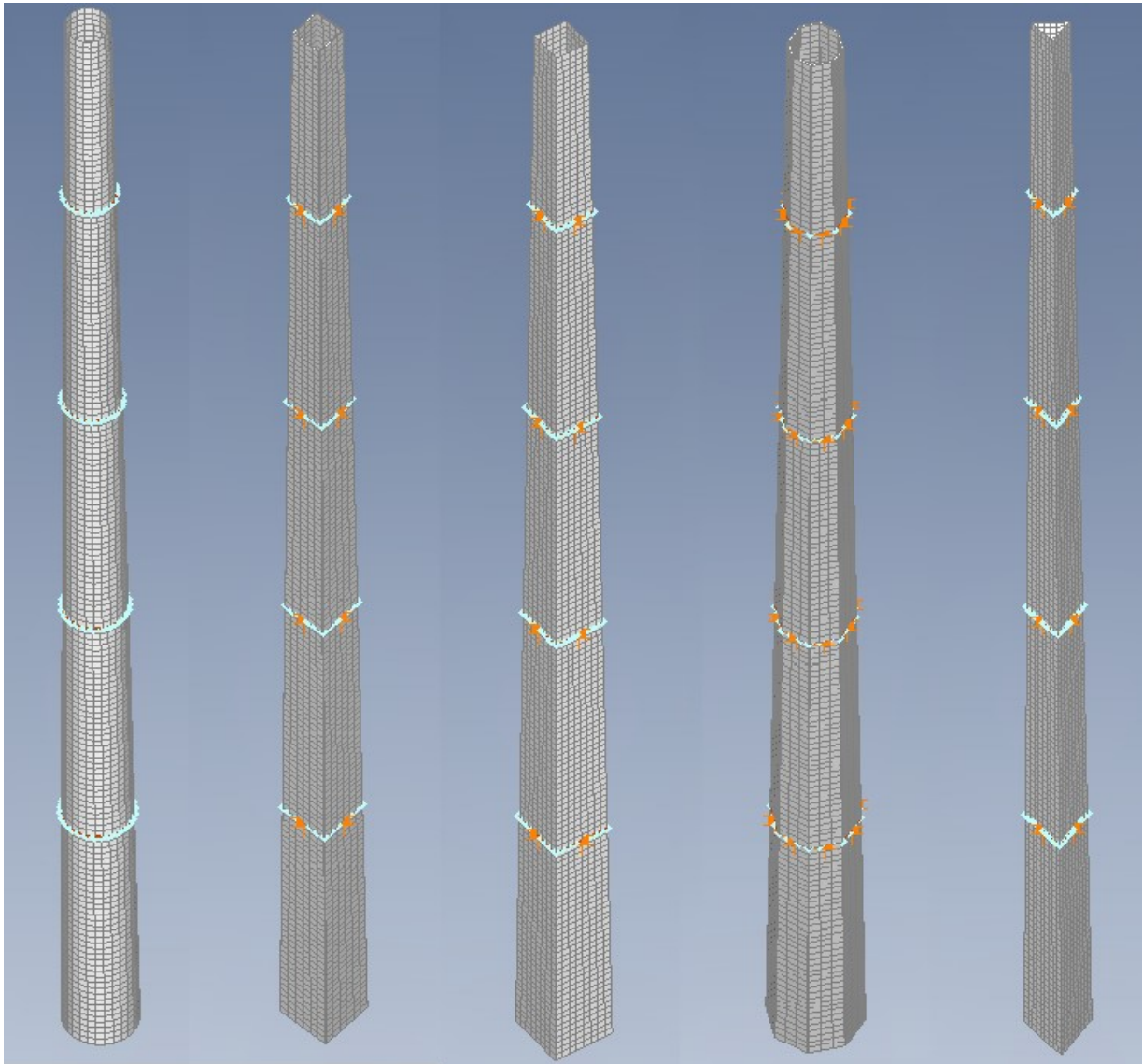


Slika 7.4: Naredbe za definiranje mreže



Slika 7.5: Postupak umrežavanja modela

Na slici 7.6 prikazani su umreženi modeli različitih izvedbi presjeka, gdje se može vidjeti veličina četverokutnih elementa i veze između pojedinih segmenata. Isto tako, može se vidjeti da su sve izvedbe postolja dobro umrežene, sadrže pravilan oblik mreže i dovoljno gustoće s obzirom na veličinu modela.



Slika 7.6: Prikaz mreže različitih izvedbi postolja u Femap-u

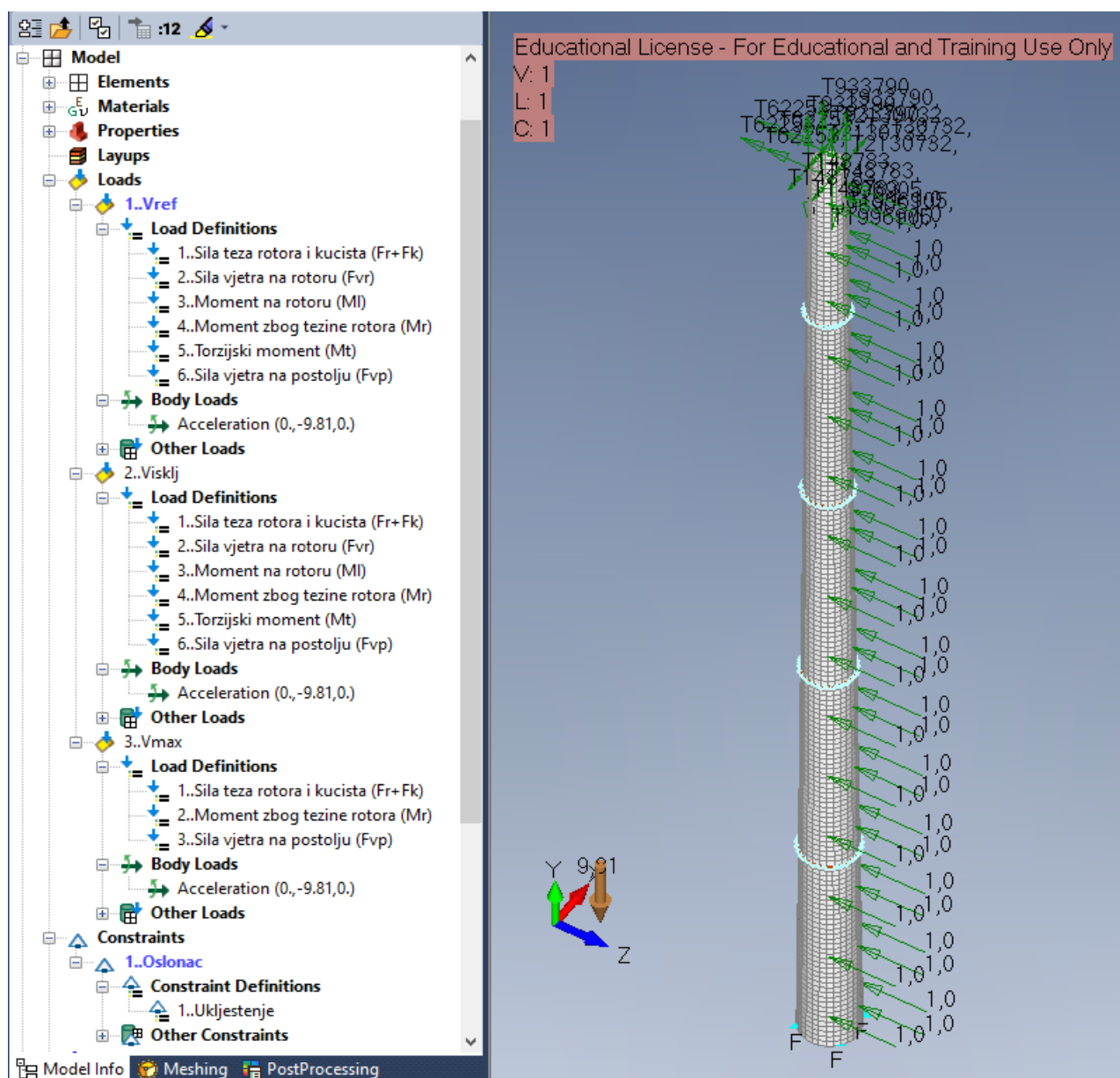
7.3. Definiranje ograničenja, oslonaca i opterećenja modela

Dalje je potrebno definirati rubne uvjete u programskom paketu Femap. To se postiže na način da na površine/krivulje/točke definiraju se oslonci i sile. Kod definiranja rubnih uvjeta potrebna je obratiti pozornost na njihovu: lokaciju, smjer, orijentaciju i vrijednost.

Na slici 7.7 prikazan je primjer kako su definirani rubni uvjeti kod kružnog presjeka postolja modela. Na slici se može vidjeti da se nalaze tri različita slučaja opterećenja na modelu za različite brzine vjetra: v_{ref} , v_{isklj} i v_{max} .

U tablici 7.1 prikazani su iznosi sila i momenata različite brzine vjetrova koja djeluju na postolje vjetroturbine.

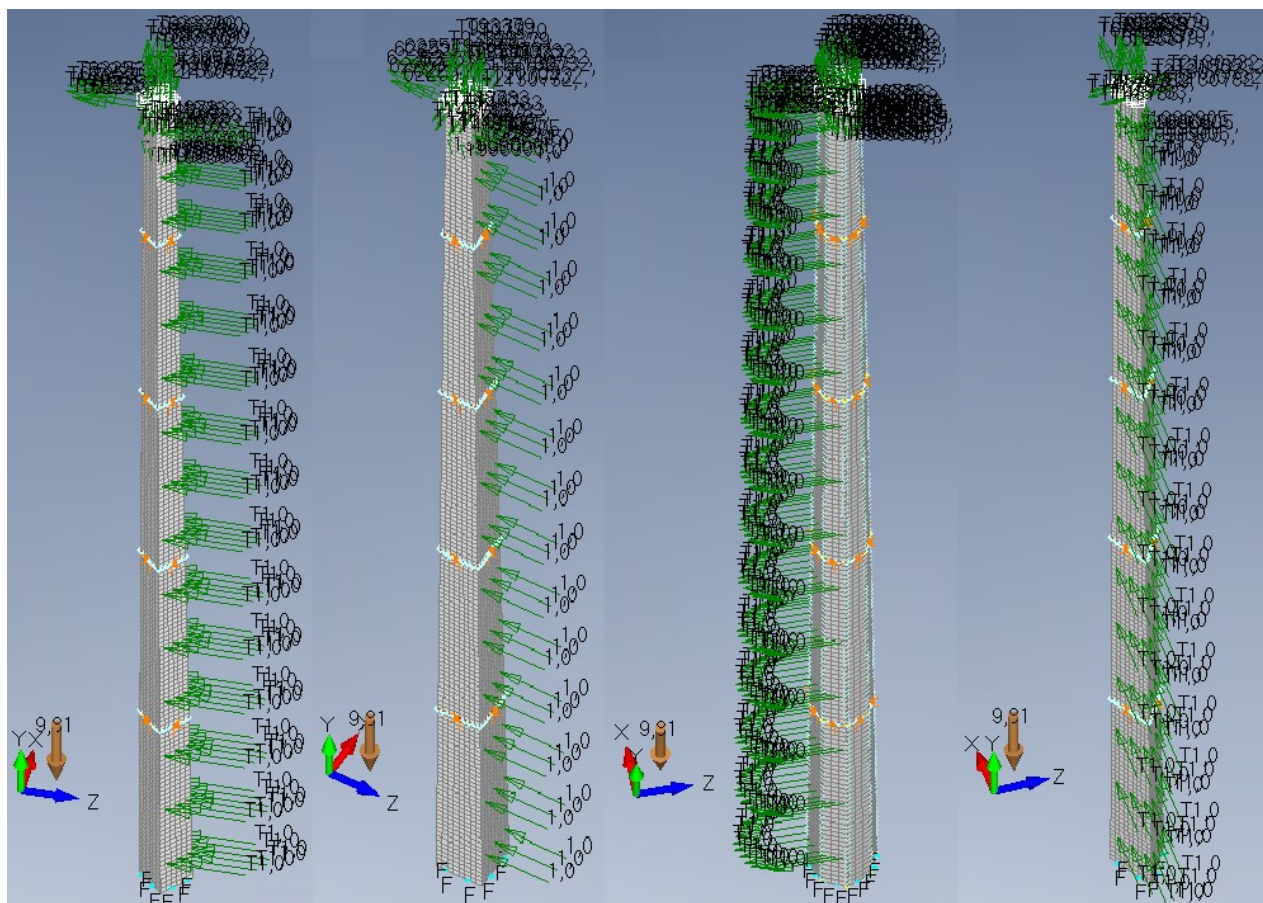
Sva opterećenja od „1. Sila teza rotora i kucista (F_r+F_k)“ do „5. Torzijski moment (M_t)“ nalaze se na vrhu postolja. Dok opterećenje „6. Sila vjetra na postolju (F_{vp})“ nalazi se duž cijele površine jedne strane postolja (udar vjetra na postolje), te se ono mijenja s visinom i oblikom postolja. Smjer i orijentacije opterećenja za ovaj slučaj su takve da se sile nalaze na z osi, a momenti na x osi. Za opterećenja v_{ref} i v_{isklj} smjer i orijentacija opterećenja su ista, ali vrijednosti sila su za v_{isklj} veće. Kod opterećenja v_{max} rotor i lopatice miruju, pa se ovdje nalaze samo tri opterećenja. Za sva tri slučaja opterećenja na modelu isto tako djeluje gravitacijska sila teža ($9,81\text{m/s}^2$) i definiran je oslonac kao uklještenje na dnu postolja. Na isti način su definirana opterećenja i oslonci za sve ostale izvedbe postolja, prikazani na slici 7.8.



Slika 7.7: Prikaz rubnih uvjeta na modelu u Femap-u

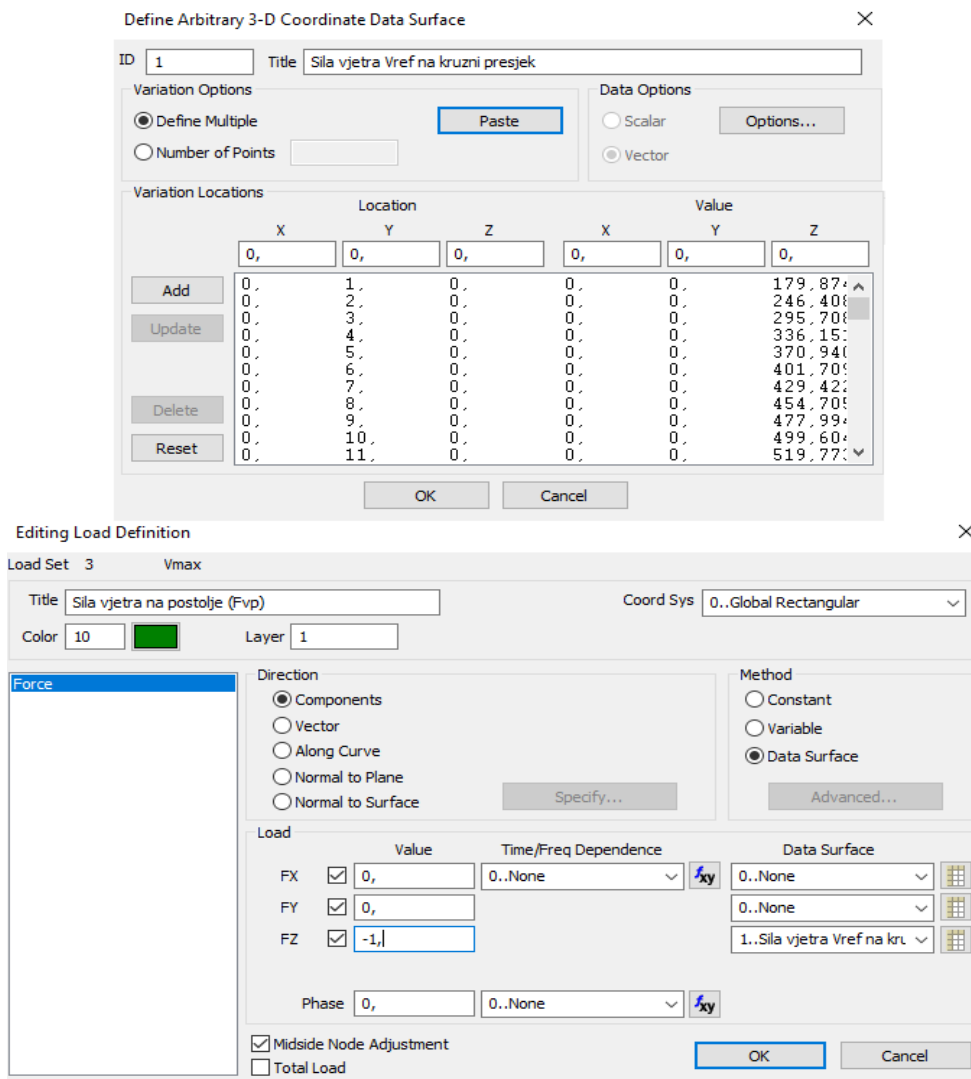
Tablica 7.1: Opterećenja za različite brzine vjetrova

| Opterećenja | | F_r [N] | F_k [N] | F_{vr} [N/m] | M_l [N/m] | M_r [N/m] | M_t [N/m] | F_{vp} [N] |
|----------------------------|-------------|-----------|-----------|----------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| Sve izvedbe postolja | v_{ref} | 887805 | 1079100 | 62252,6 | 148783 | 2130732 | 93378,9 | graf 4.3 |
| | v_{isklj} | 887805 | 1079100 | 124605,4 | 299053 | 2130732 | 186908,2 | graf 4.4 |
| | v_{max} | 887805 | 1079100 | 0 | 0 | 2130732 | 0 | graf 4.5 |



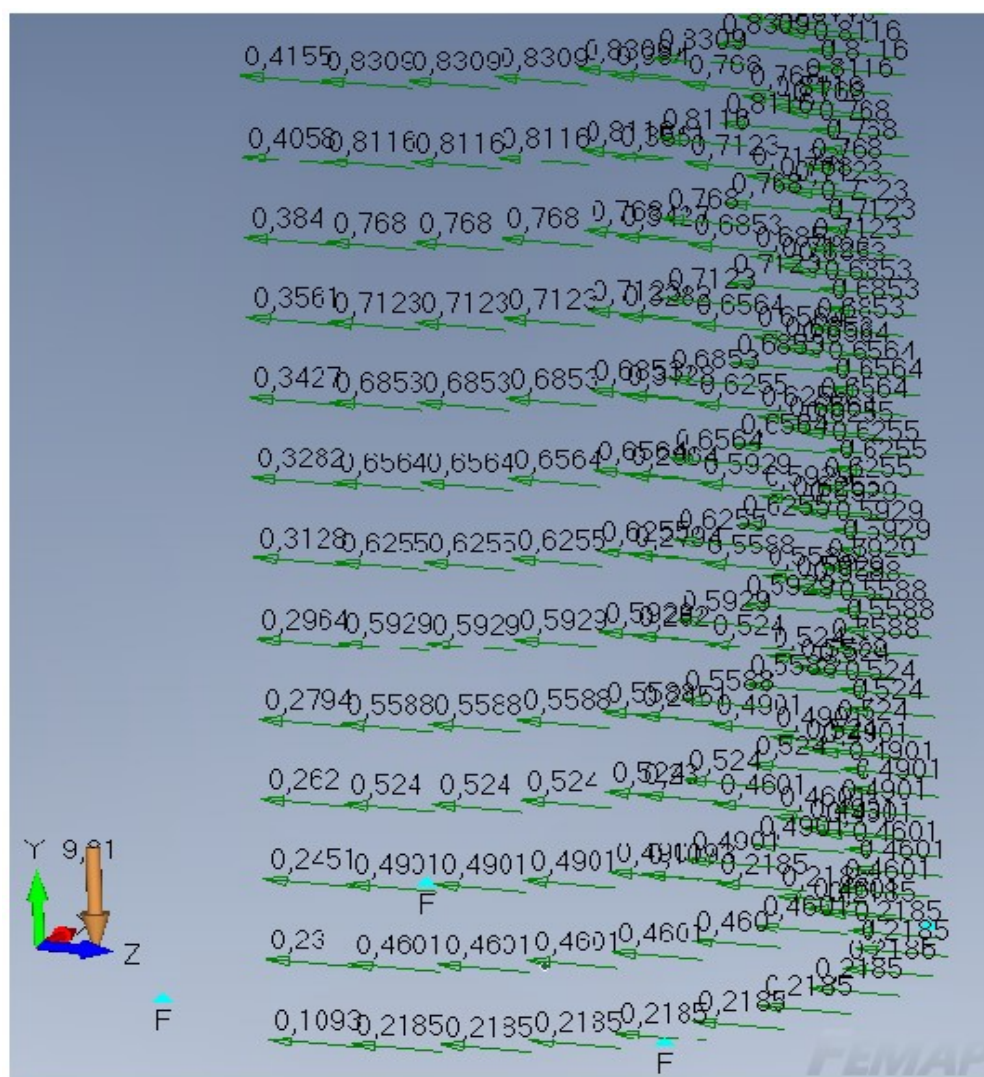
Slika 7.8: Prikaz rubnih uvjeta na ostalim modelima u Femap-u

Na slici 7.7 i 7.8 može se vidjeti da na modelu opterećenja „6. Sila vjetra na postolju (F_{vp})“ koje djeluje uzduž površine postolja iznosi 1 N (kao jedinična sila). Ovo je rezultat unosa podataka u obliku vektora pomoću Excel podataka, gdje se ti podaci množe s jediničnom silom.



Slika 7.9: Prikaz definiranja opterećenja

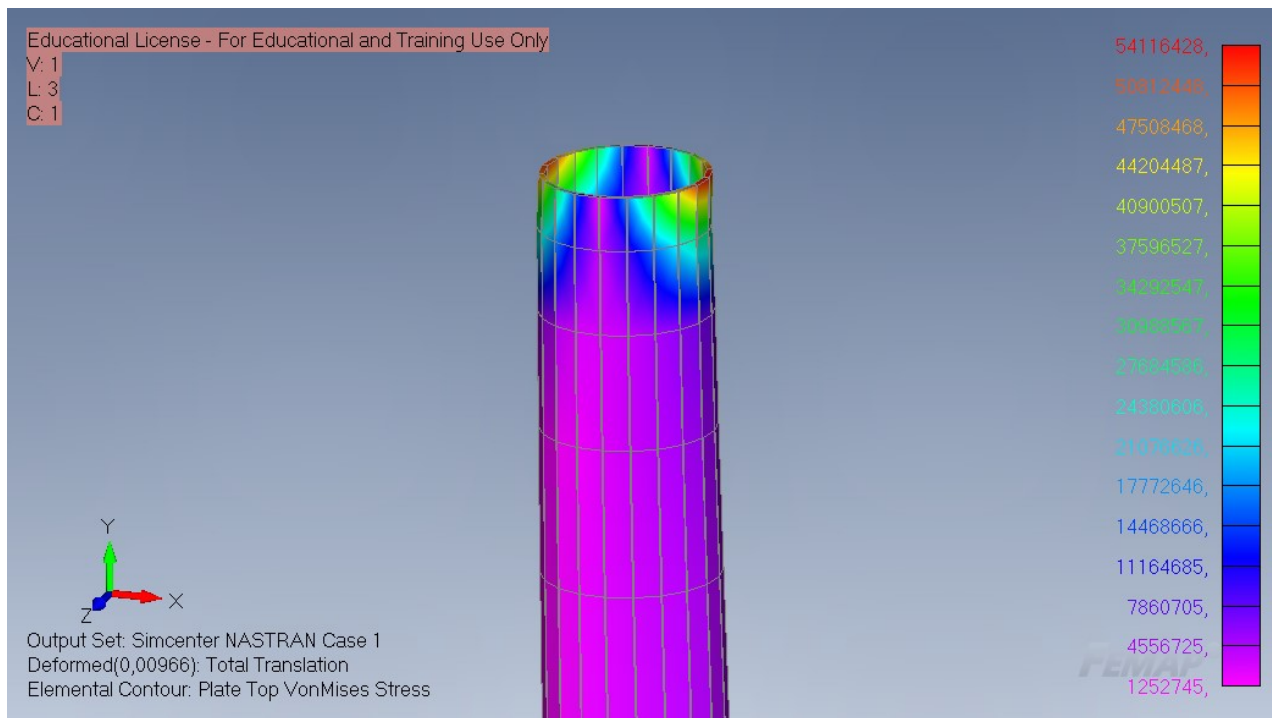
Uz pomoć naredbe „Load“/„Extract“ moguće je tada prikazati stvarne vrijednosti sila umjesto jediničnih sila, kao što je prikazano na slici 7.10.



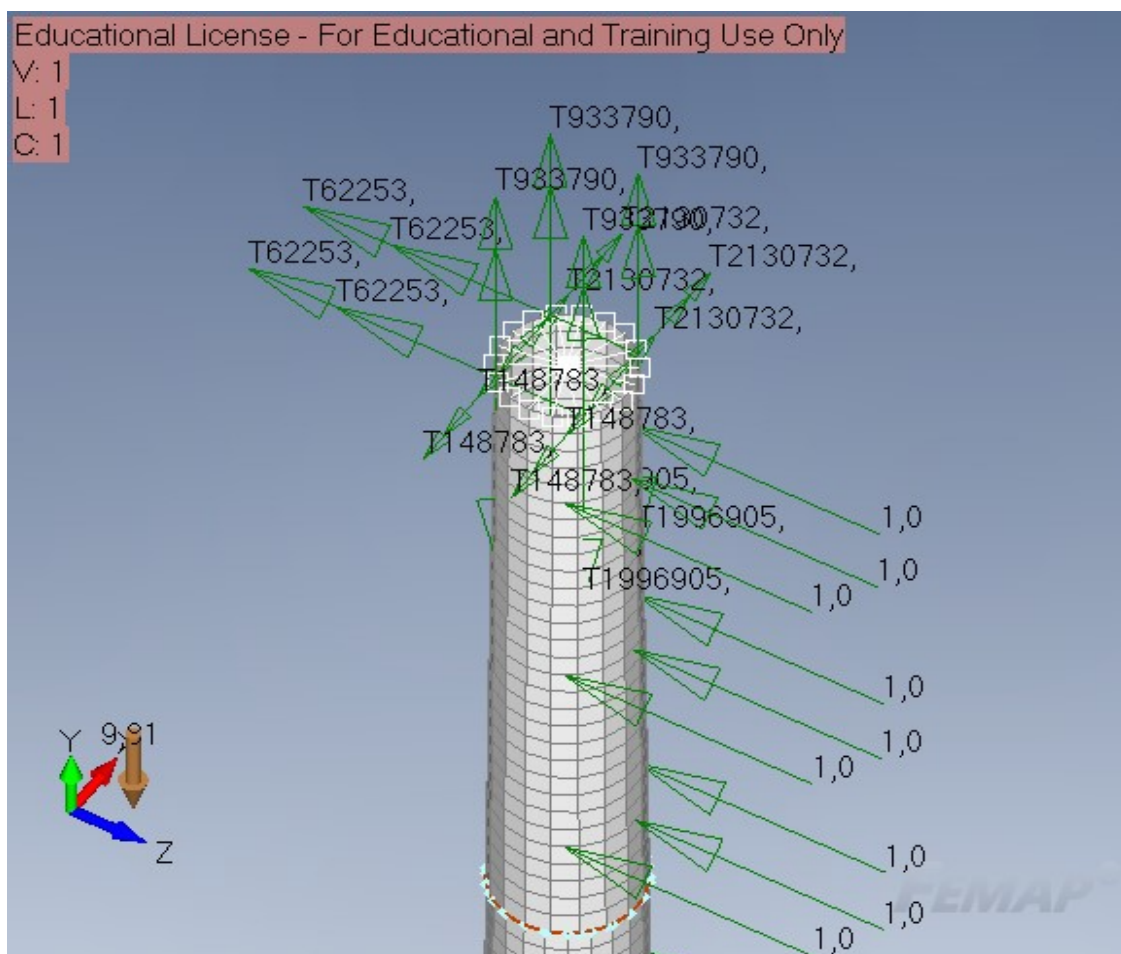
Slika 7.10: Prikaz naredbe "Expand"

Prilikom izrade analize i dobivanja prvih rezultata, primijećeno je da sa *shell* elementima se pojavljuje pojava singulariteta na vrhu stupa (gdje se nalaze skoro sva opterećenja). Pojava singulariteta je nepoželjna jer se tada analizom ne dobivaju točni rezultati, te singularitet predstavlja konzentator naprezanja što se može vidjeti na slici 7.11. Kako bi se eliminirala sama pojava tog koncentratora naprezanja potrebno je staviti *rigid* element na vrhu sa središtem u točki i povezati ih s rubom vrha postolja, na taj način se učvrstio vrh postolja. *Rigid* element na vrhu postolja simulira deblji i čvršći materijal oko gornjeg ruba postolja, zbog čega ne dolazi do velikih naprezanja i deformacija, već se sva opterećenja prenose dalje na postolje. Prikaz *rigid* elementa na vrhu postolja može se vidjeti na slici 7.12.

Na slici 7.11 prikazani su stvarni pomaci i stvarne deformacije vrha postolja.



Slika 7.11: Prikaz kocentratora naprezanja



Slika 7.12: Prikaz opterećenja i rigid elementa

7.4. Simulacije, rezultati i analize modela različitih izvedbi postolja

Nakon što su postavljene svi uvjeti od izrade geometrije modela do definiranja mreže, materijala i rubnih uvjeta, moguće je izraditi simulacije i analize modela. Stoga je najprije potrebno zadovoljiti uvjet da ekvivalentno naprezanje dobiveno prema Von Mises-u ne smije prelaziti granicu dopuštenog naprezanja. Isto tako je potrebno odrediti deformirane oblike konstrukcije i vrijednosti relevantnih progiba/pomaka.

S obzirom da iz jednadžbe 7.2 određena je vrijednost dopuštenog naprezanja i da ekvivalentno naprezanje dobiveno prema Von Mises-u ne smije prelaziti granicu dopuštenog naprezanja, iz toga slijedi da modeli postolja moraju zadovoljavati uvjet:

$$\sigma_{e,Mises} \leq \sigma_{dop} \quad (7.3)$$

Potrebno je odrediti krutost postolja, posebno maksimalni dopušteni progib vrha, kako bi se osiguralo da ne dođe do sudara vrhova lopatica s postoljem i izbjeglo prekomjerno izvijanje postolja koje bi moglo uzrokovati oštećenje vjetroturbine. Iz literature [5] dobiven je izraz za izračun dopuštenog progiba vrha postolja s obzirom na duljinu postolja:

$$\delta_{dop} = 1,25 \cdot \frac{H}{100} = 1,25 \cdot \frac{106}{100} = 1,325 \text{ m} \quad (7.4)$$

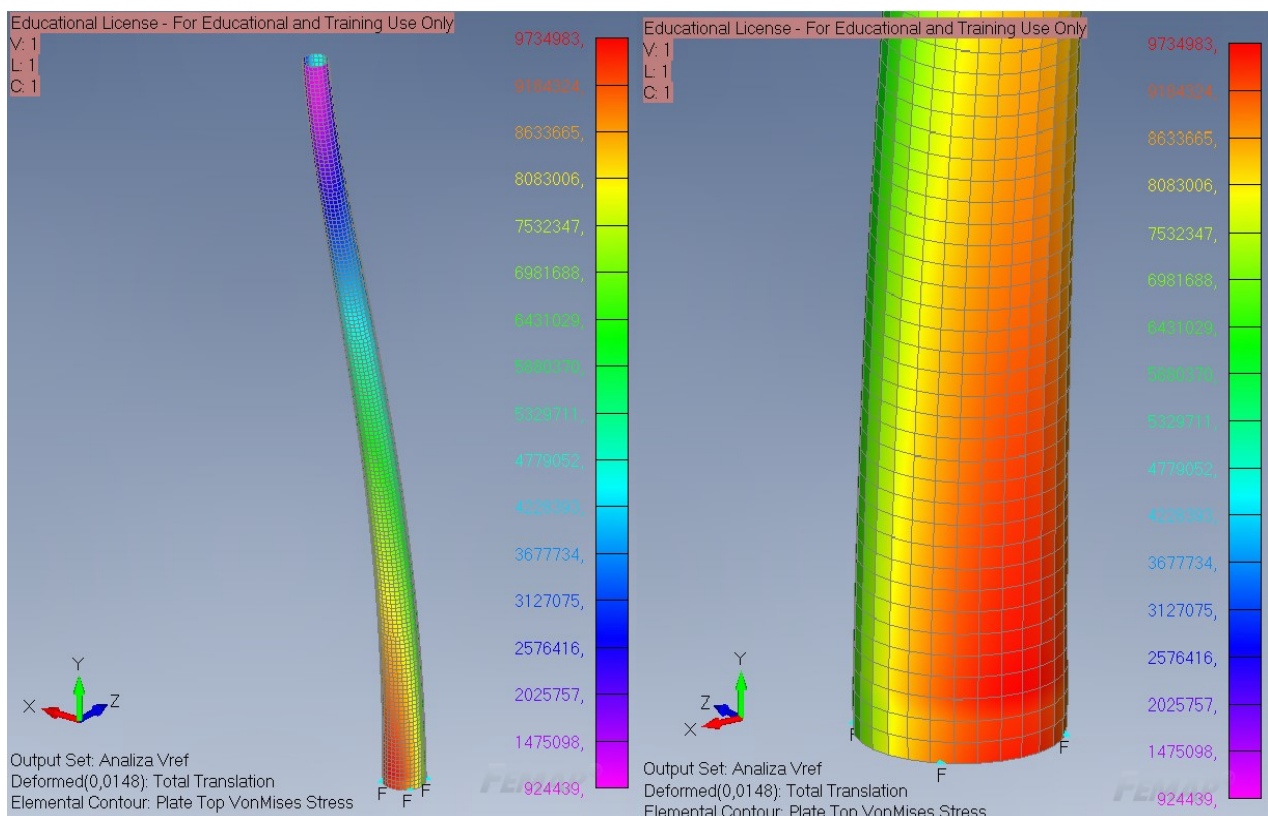
$$\delta_{max} \leq \delta_{dop} \quad (7.5)$$

Analize i njihovi rezultati bit će prikazani definiranjem dopuštenog naprezanja i dopuštenog progiba. Rezultati simulacija bit će prikazani za tri različita slučaja opterećenja na modelima za različite brzine vjetra: v_{ref} , $v_{i_{sklj}}$ i v_{max} . Rezultatima će biti prikazani maksimalna ekvivalentna naprezanja prema Von Mises-u u mjernoj jedinici Pa (paskal) i maksimalni progib vrha postolja u mjernoj jedinici m (metar).

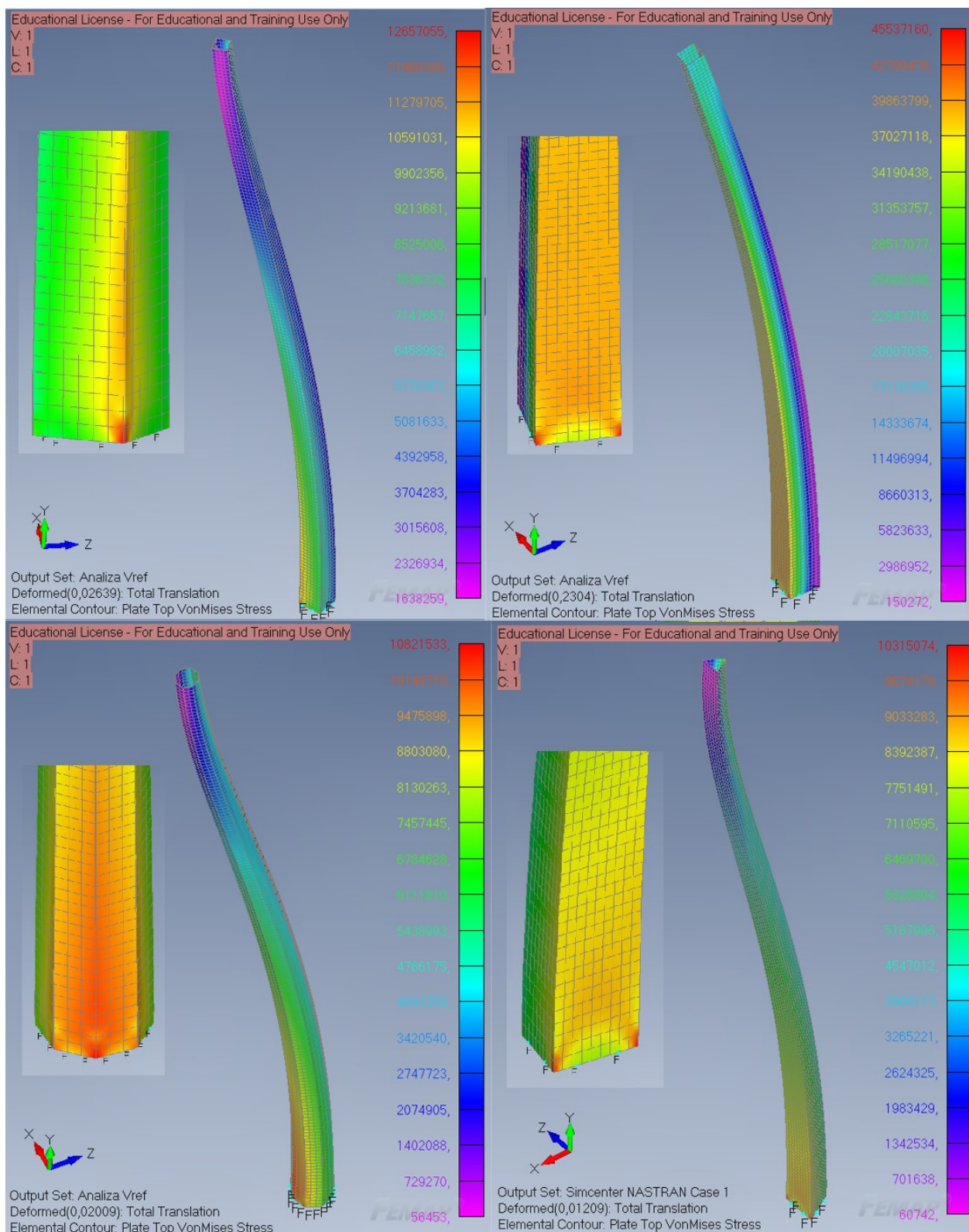
Prikazi rezultata progiba vrha postolja, odnosno pomaci i deformacije nisu prikazani kao stvarni, već su uvećani za 10% s obzirom na veličinu modela. Na taj način se dobiju veliki pomaci i izvijanja postolja, ali oni u stvarnosti nisu takvi. Razlog korištenja takvog pogleda je kako bi se dobio uvid u ponašanje postolja s obzirom na opterećenje koje djeluje na njega.

7.4.1. Rezultati analize za opterećenje vjetra pri brzini v_{ref}

Na slici 7.13 i 7.14, te u tablici 7.2 prikazani su rezultati analize različitih presjeka postolja za opterećenje pri brzini vjetra v_{ref} . Promatrajući naprezanja prema Von Mises-u i progibe vrha postolja, može se zaključiti kako kružni presjek postolja ima najbolje rezultate u usporedbi s ostalim izvedbama za opterećenje vjetra v_{ref} . Najlošiji za ovaj slučaj je kvadratni2 presjek, kod kojega se javlja naprezanje do 4 puta veće, te progib do 15 puta veći. Ostale izvedbe postolja imaju relativno dobre vrijednosti naprezanja (vrlo vjerojatno zbog toga jer im se na kutovima javljaju koncentracije naprezanja, pa imaju veće vrijednosti od kružnog presjeka), dok progibi su nešto veći. Međutim, trokutasti presjek ima najmanji progib i dobre vrijednosti naprezanja. Što se može zaključiti kako su kružni i trokutasti presjeci najbolji za opterećenja pri brzini v_{ref} .

Slika 7.13: Rezultati kružnog presjeka postolja pri v_{ref} Tablica 7.2: Rezultati naprezanja i progiba za brzinu vjetra v_{ref}

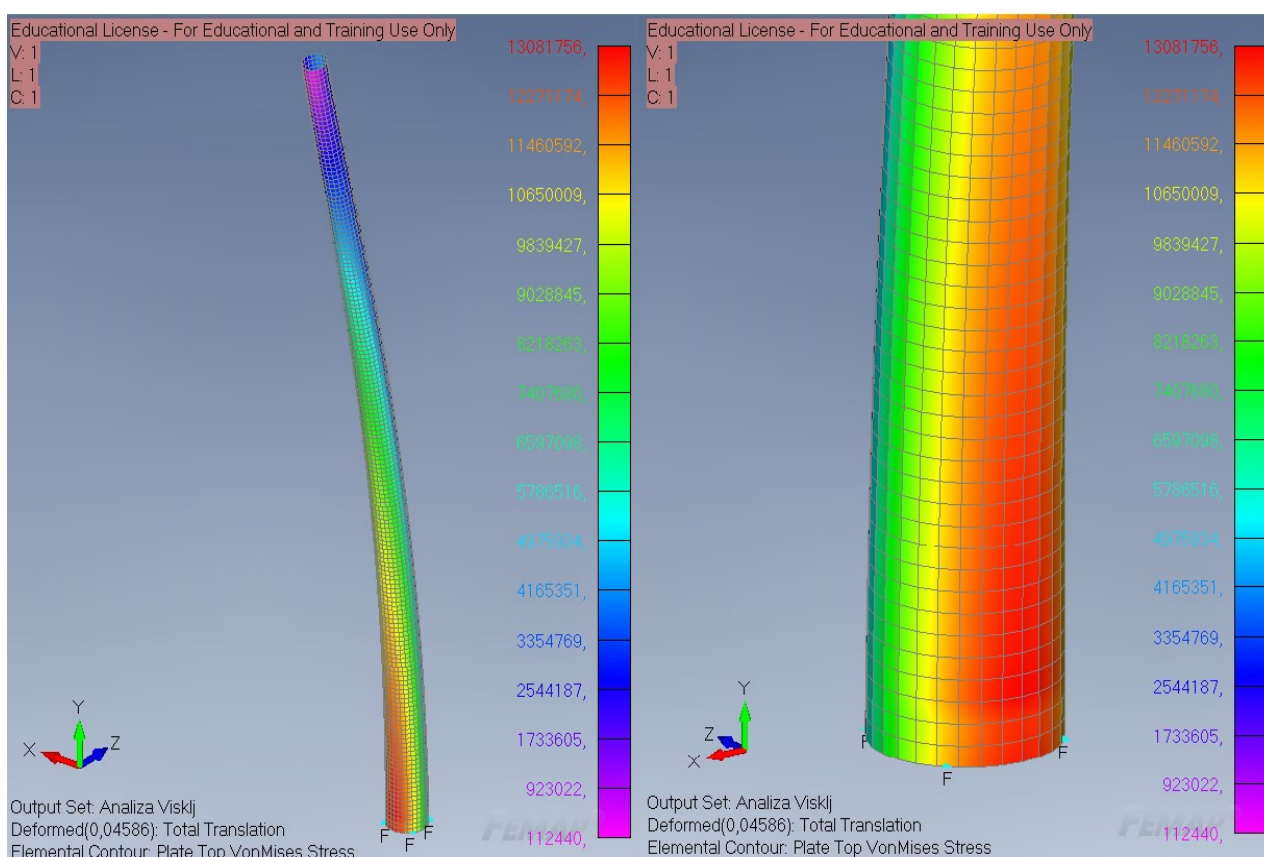
| v_{ref} | Kružni | Kvadratni 1 | Kvadratni 2 | Mnogokutni | Trokutasti |
|--------------------------|--------|-------------|-------------|------------|------------|
| $\sigma_{e,Mises}$ [MPa] | 9,734 | 12,657 | 45,537 | 10,821 | 10,315 |
| δ_{max} [m] | 0,0148 | 0,0264 | 0,2304 | 0,0201 | 0,0121 |



Slika 7.14: Rezultati ostalih izvedbi postolja pri v_{ref}

7.4.2. Rezultati analize za opterećenje vjetra pri brzini v_{isklj}

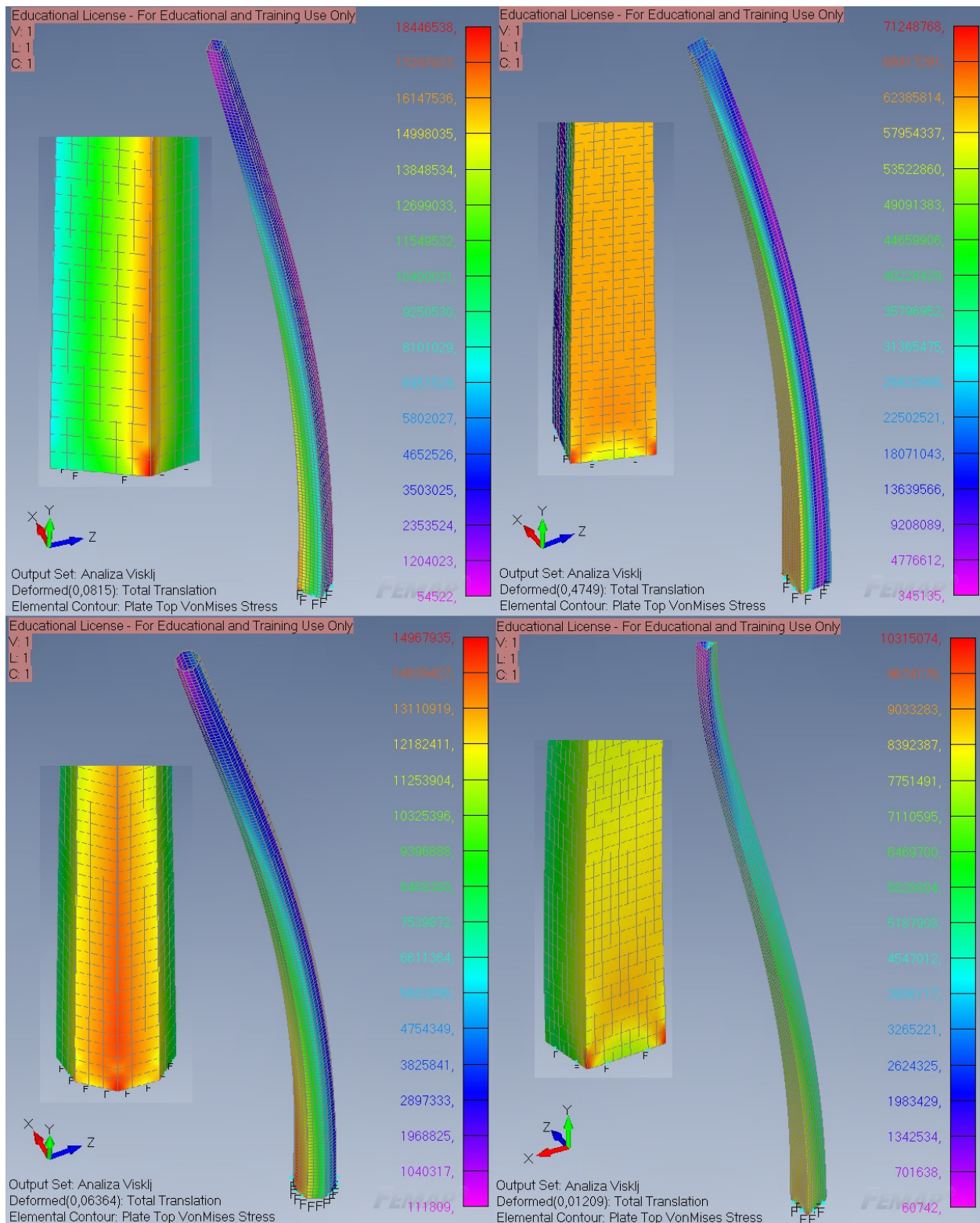
Na slici 7.15 i 7.16, te u tablici 7.3 prikazani su rezultati analize različitih presjeka postolja za opterećenje pri brzini vjetra v_{isklj} . Promatrajući naprezanja prema Von Mises-u i progibe vrha postolja, može se zaključiti kako kružni presjek postolja ima najbolje rezultate u usporedbi s ostalim izvedbama i za opterećenje vjetra v_{isklj} . Najlošiji za ovaj slučaj je opet kvadratni2 presjek, kod kojega se javlja naprezanje do 6 puta veće, te progib do 10 puta veći. Ostale izvedbe postolja imaju relativno dobre vrijednosti, dok progibi su nešto veći. U ovom slučaju trokutasti i mnogokutni presjeci pokazuju relativno dobre vrijednosti naprezanja i progiba.



Slika 7.15: Rezultati kružnog presjeka postolja pri v_{isklj}

Tablica 7.3: Rezultati naprezanja i progiba za brzinu vjetra v_{isklj}

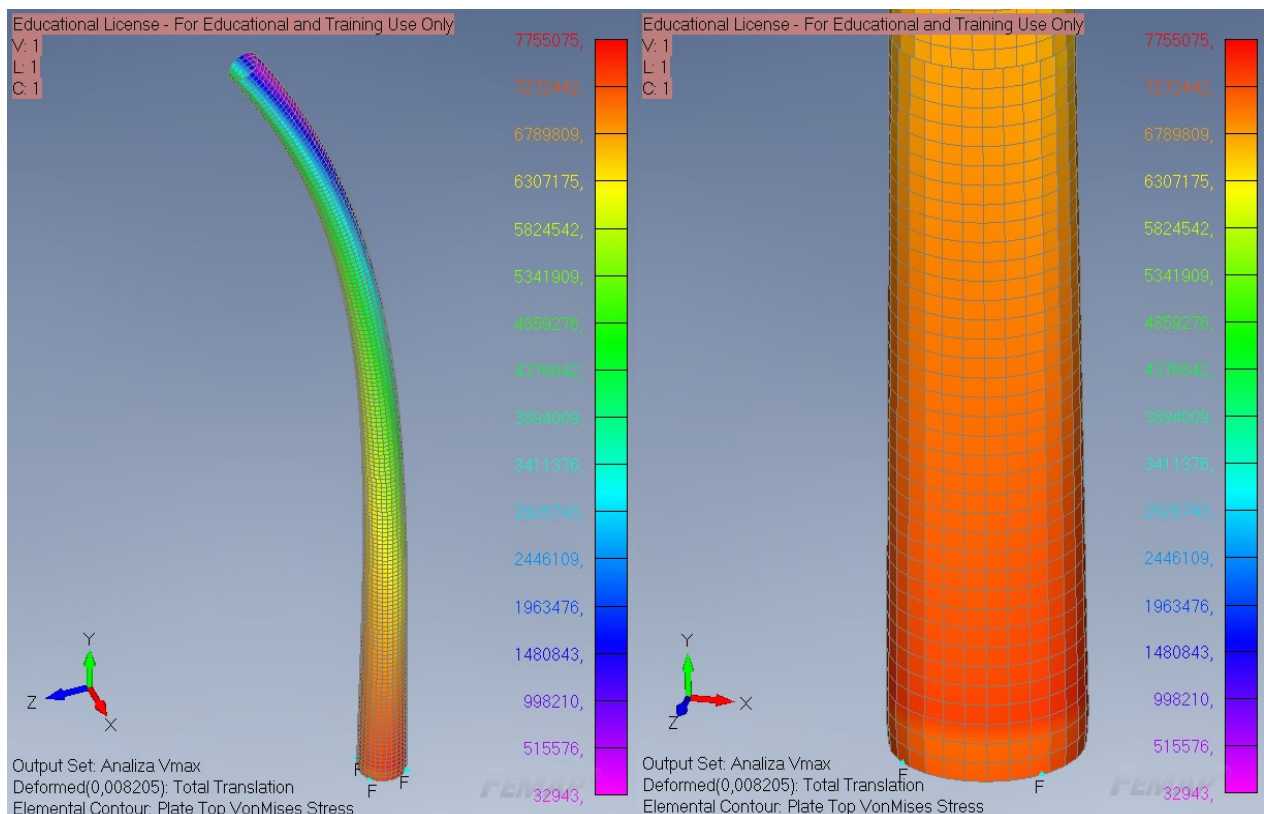
| v_{isklj} | Kružni | Kvadratni 1 | Kvadratni2 | Mnogokutni | Trokutasti |
|--------------------------|--------|-------------|------------|------------|------------|
| $\sigma_{e,Mises}$ [MPa] | 13,082 | 18,447 | 71,249 | 14,968 | 13,491 |
| δ_{max} [m] | 0,0459 | 0,0815 | 0,4749 | 0,0636 | 0,0637 |



Slika 7.16: Rezultati ostalih izvedbi postolja pri v_{isklj}

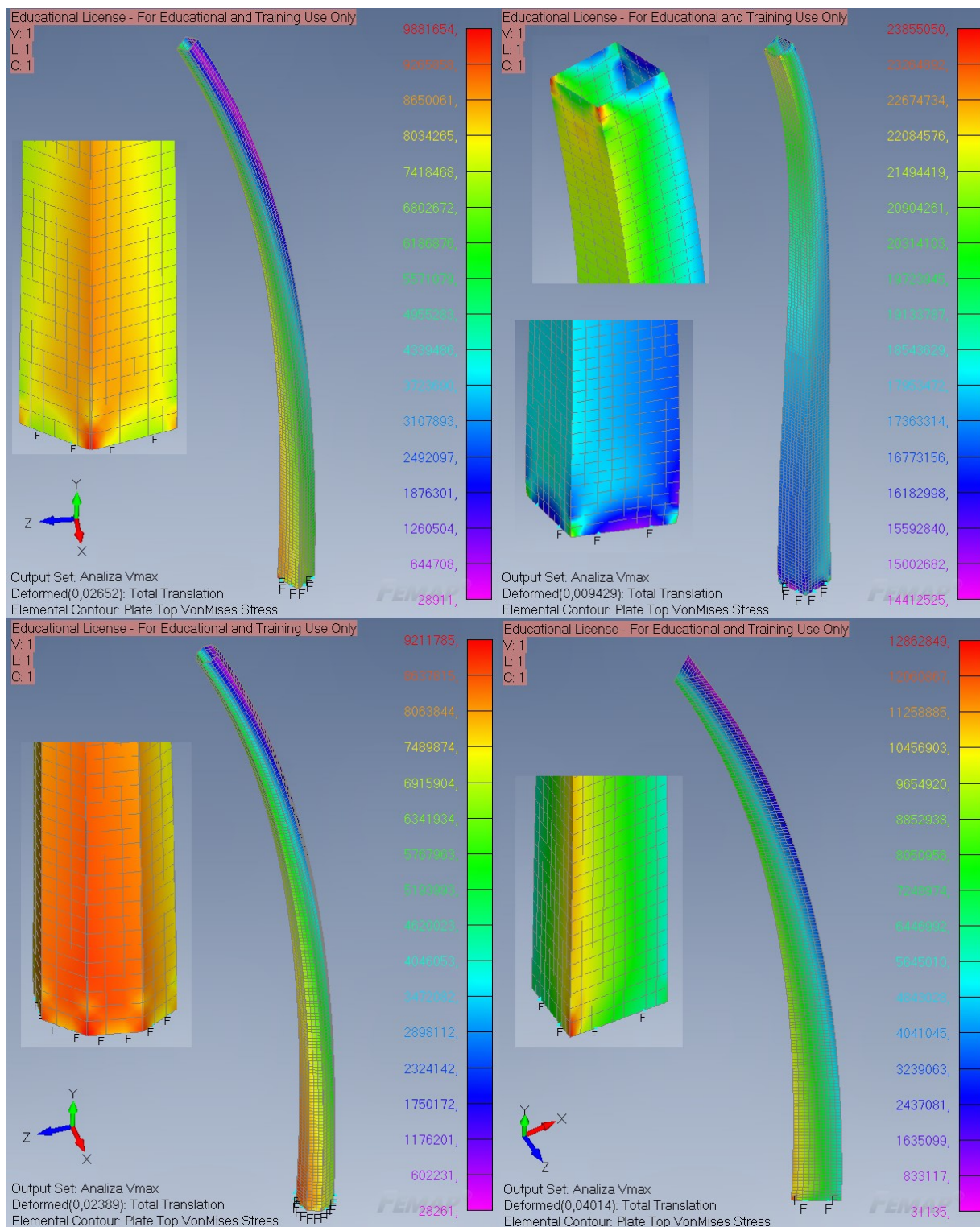
7.4.3. Rezultati analize za opterećenje vjetra pri brzini v_{max}

Na slici 7.17 i 7.18, te u tablici 7.4 prikazani su rezultati analize različitih presjeka postolja za opterećenje pri brzini vjetra v_{max} . Međutim, ovaj slučaj naprezanja je različiti od prethodnih, gdje je opterećenje v_{isklj} bilo identično opterećenju v_{ref} , ali je intenzitet sila bio veći kod opterećenje v_{isklj} . Stoga kod opterećenja pri brzini vjetra v_{max} nema pojave sile vjetra na rotoru, jer se rotor zaustavlja zbog prevelike brzine vjetra. Promatrajući naprezanja prema Von Mises-u i progibe vrha postolja, može se zaključiti kako kružni presjek postolja ima najbolje rezultate u usporedbi s ostalim izvedbama. Najlošiji za ovaj slučaj je kvadratni2 presjek, kod kojega se javlja naprezanje do 3 puta veće, ali je zato progib puno manji u odnosu na ostale izvedbe postolja. Ostale izvedbe postolja imaju relativno dobre vrijednosti, dok progibi su nešto veći. U ovom slučaju kvadratni1 i mnogokutni presjeci pokazuju relativno dobre vrijednosti naprezanja i progiba.



Slika 7.17: Rezultati kružnog presjeka postolja pri v_{max}

Na slici 7.18 uočljivo je da na kvadratnom2 presjeku najveća naprezanja se javljaju na vrhu postolja, gdje se vide dva koncentrata naprezanja na rubovima profila. Međutim, ostatak konstrukcije je jednako opterećene kao i ostale izvedbe, te na dnu postolja vrijednost naprezanja iznosi otprilike 15 MPa.



Slika 7.18: Rezultati ostalih izvedbi postolja pri v_{max}

Tablica 7.4: Rezultati napreznja i progiba za brzinu vjetra v_{max}

| v_{max} | Kružni | Kvadratni 1 | Kvadratni 2 | Mnogokutni | Trokutasti |
|--------------------------|---------|-------------|-------------|------------|------------|
| $\sigma_{e,Mises}$ [MPa] | 7,755 | 9,882 | 23,855 | 9,212 | 12,863 |
| δ_{max} [m] | 0,00821 | 0,0265 | 0,00943 | 0,0239 | 0,0401 |

7.5. Optimizacija modela različitih izvedbi postolja

Promatrajući prethodne rezultate vidljivo je da su progibi i naprezanja prema Von Mises-u bili daleko ispod razine od dopuštenog, što znači da su sva postolja predimenzionirana. Kako bi vrijednosti naprezanja i progiba bile što bliže dopuštenima, potrebno je smanjiti debljinu stijenke. Smanjenjem debljine stijenke, smanjuje se masa postolja, što rezultira nižom cijenom postolja. Naravno, uz smanjene stijenke pada krutost, progib i nosivost strukture. Postoje dvije vrste optimizacije, topološka i dizajna.

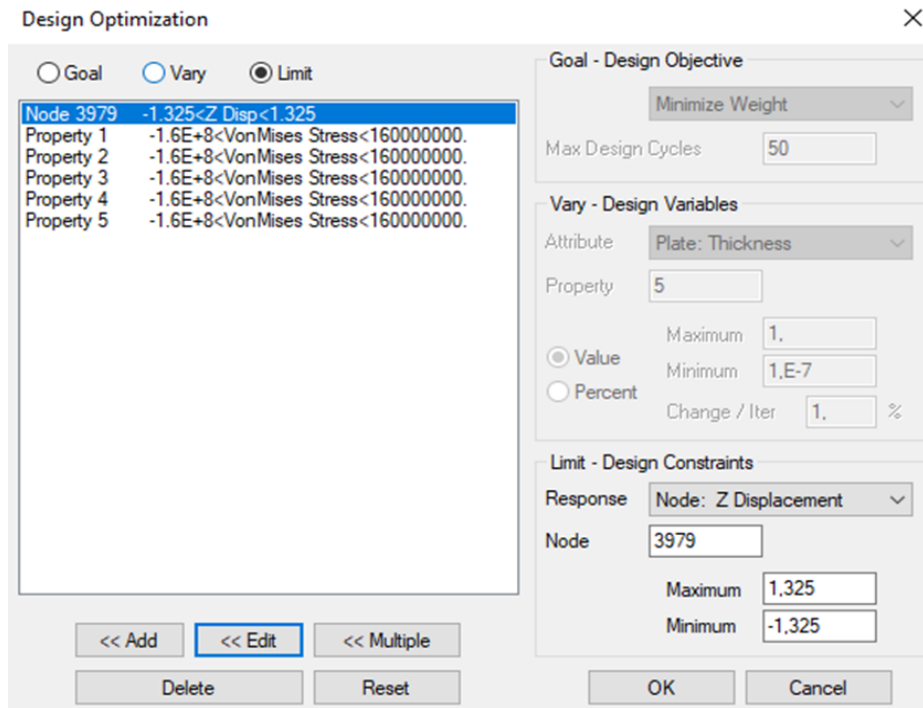
Topološka optimizacija se usredotočuje na optimizaciju raspodjele materijala unutar strukture, s ciljem minimiziranja težine strukture i maksimiziranja njezine čvrstoće i krutosti. Ova metoda koristi matematičke algoritme i analizu naprezanja kako bi identificirala najefikasniju raspodjelu materijala. Topološka optimizacija često rezultira složenim i nekonvencionalnim oblicima struktura, jer se nepotreban materijal uklanja, a preostali materijal se redistribuira na optimalan način.

S druge strane, optimizacija dizajna odnosi se na postupak identifikacije najboljeg mogućeg dizajna za određeni proizvod, sustav ili proces s obzirom na određene ciljeve i ograničenja. Ova metoda uključuje definiranje ciljeva i ograničenja, generiranje varijacija dizajna, evaluaciju i analizu tih varijacija, te primjenu algoritama optimizacije kako bi se pronašao najbolji dizajn. Optimizacija dizajna može uključivati različite parametre i ograničenja kao što su naprezanja, deformacije, pomaci strukture, težina, trajnost itd.

Kako je cilj optimizirati postolja da se smanji debljina stijenke uz određena ograničenja, primijenit će se metoda optimizacije dizajna umjesto topološke optimizacije. Topološka optimizacija se fokusira na uklanjanje viška materijala koji ne prenosi opterećenja, dok će optimizacija dizajna omogućiti pronalaženje najboljeg dizajna postolja uzimajući u obzir specifične ciljeve i ograničenja.

Za postavljanje parametara i ograničenja za optimizaciju otvara se naredba „*Model*“/„*Optimization*“, gdje se otvara prozor pod nazivom „*Design Optimization*“. Potrebno je definirati ciljeve, varijable i ograničenja, gdje je prikazano na slici 7.19. Najprije je potrebno pod „*Goal - Design Objective*“ odrediti da je cilj smanjenja mase postolja i da maksimalan broj iteracija iznosi 30. Kod „*Vary - Design Variables*“ će se definirati koje dijelove (segmente) postolja će se uzeti u obzir za optimizaciju, kao i maksimalnu i minimalnu dopuštenu debljinu stijenke.

Ograničenja će biti postavljena u „*Limit – Design Constraints*“ dijelu, kao što je ograničenje za pomak vrha postolja (progib) koji ne smije biti veći od 1,325 m, te ograničenje za naprezanje prema Von Mises-u za svaki segment postolja koje ne smije prelaziti 160 MPa.



Slika 7.19: Prikaz postavljanja parametara za optimizaciju

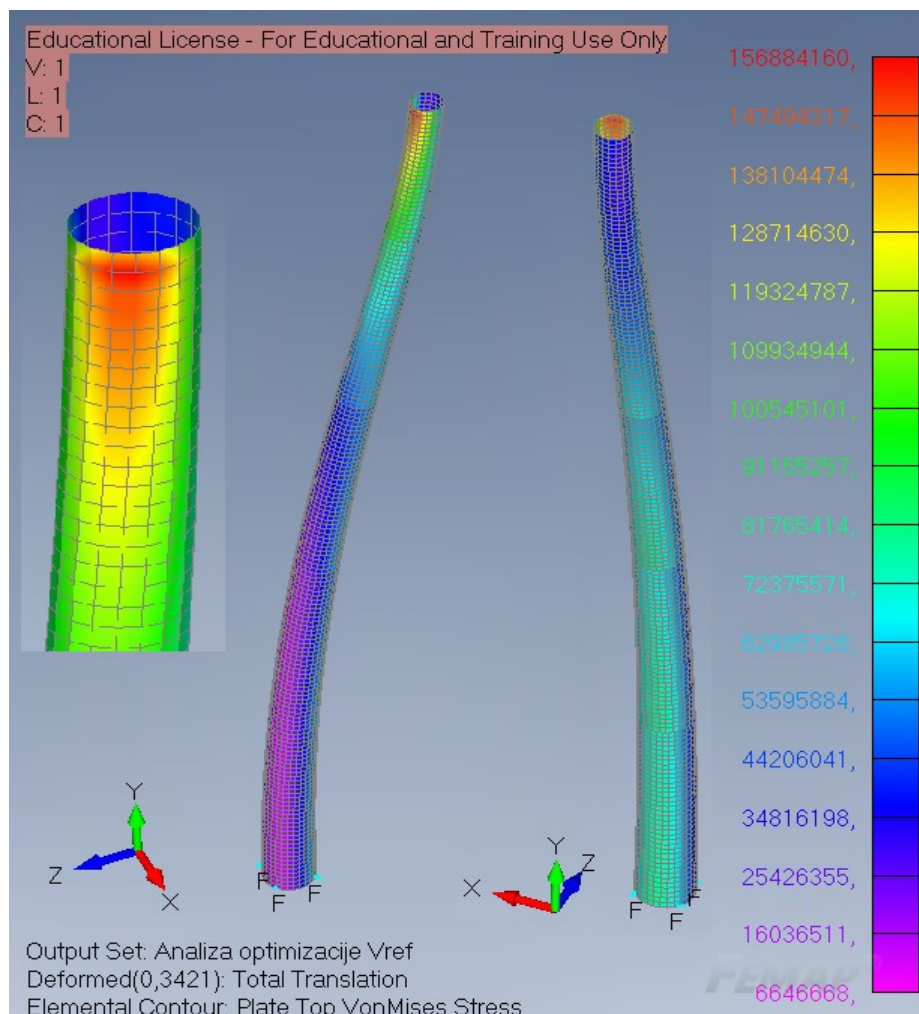
Nakon izvršene simulacije optimizacije, u tablici 7.5 prikazane su debljine stijenki pojedinih segmenata za različite izvedbe postolja za zadane uvjete i parametre, te broj iteracija da se dosegnu ti rezultati.

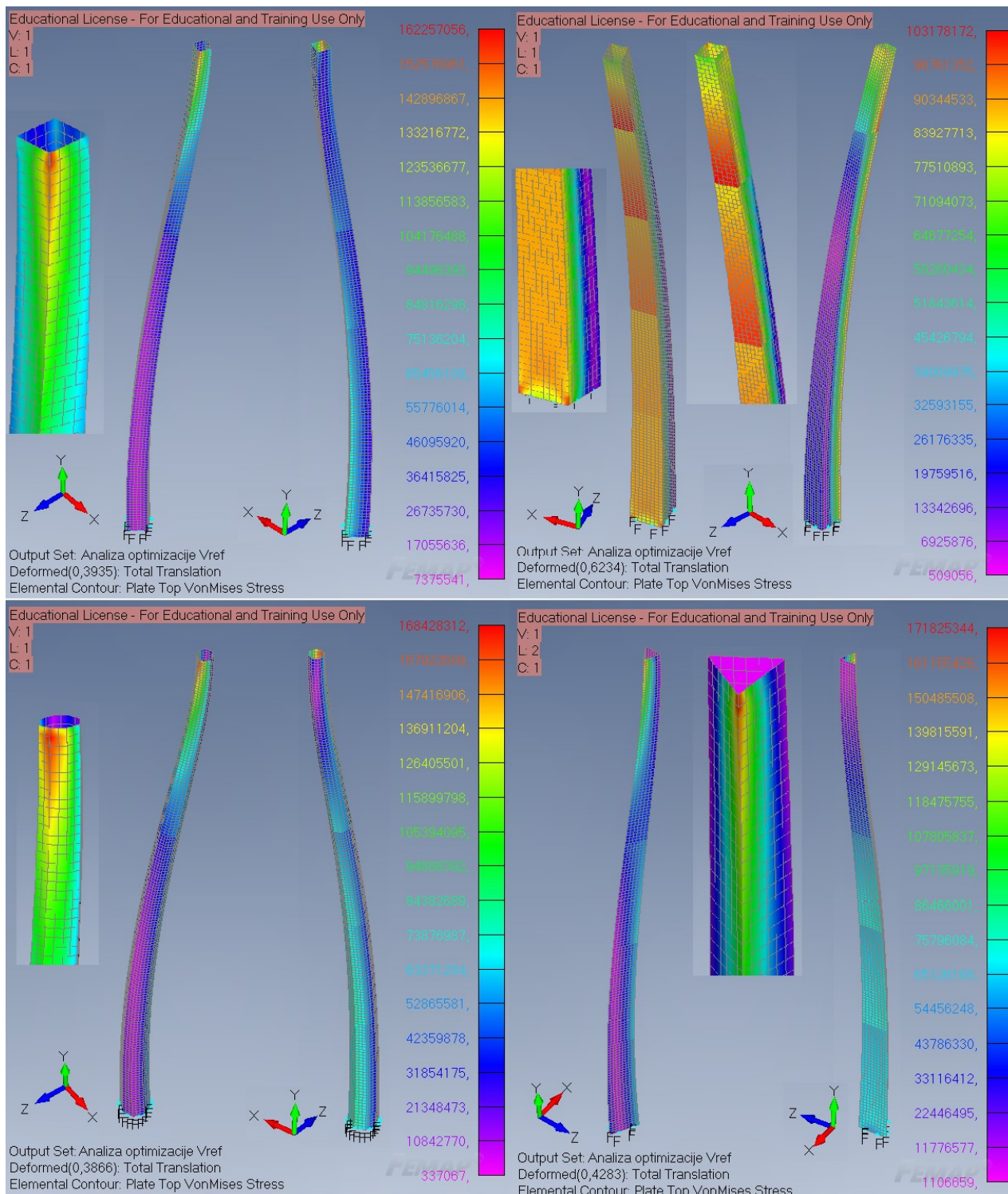
Tablica 7.5: Debljine stijenki segmenata postolja nakon optimizacije

| Segmenti [m] | Kružni | Kvadratni1 | Kvadratni2 | Mnogokutni | Trokutasti |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Dio 1 – 22 m | 0,00450267 | 0,00680209 | 0,03921210 | 0,00530301 | 0,00470288 |
| Dio 2 – 22 m | 0,00414194 | 0,00655134 | 0,03834540 | 0,00495105 | 0,00420573 |
| Dio 3 – 22 m | 0,00361887 | 0,00601335 | 0,03533900 | 0,00450050 | 0,00362690 |
| Dio 4 – 22 m | 0,00324002 | 0,00486433 | 0,03103770 | 0,00362124 | 0,00435579 |
| Dio 5 – 18 m | 0,00300349 | 0,00461694 | 0,02502140 | 0,00360124 | 0,00440131 |
| Broj iteracija | 16 | 16 | 18 | 16 | 16 |

7.5.1. Rezultati optimiziranih postolja za opterećenje vjetra pri brzini v_{ref}

Na slici 7.20 i 7.21, te u tablici 7.6 prikazani su rezultati analize optimiziranih presjeka postolja za opterećenje pri brzini vjetra v_{ref} . Promatrajući rezultate naprezanja prema Von Mises-u može se zaključiti kako kvadratni2 presjek postolja ima najbolje rezultate u usporedbi s ostalim izvedbama za opterećenje vjetra v_{ref} , međutim njegova cijela jedna strana je jako opterećena, dok ostatak izvedbi postolja ima najveća naprezanja na vrhu postolja. Najlošiji rezultati za naprezanja prema Von Mises-u ima trokutasti presjek, razlog tome bi mogao biti geometrija presjeka, gdje se na oštrim rubovima javljaju koncentracije naprezanja. Što se tiče uvjeta maksimalnog dopuštenog naprezanja, kružni i kvadratni2 zadovoljavaju uvjet jer su ispod 160 MPa. Dok ostatak izvedbi je preko te vrijednosti, ali u granicama koje dopuštaju. Izuzev trokutastog presjeka, koji premašuje naprezanja za 11,82 MPa. Što se tiče progiba, ovdje najbolje rezultate ima kružni presjek, dok najveći progib ima kvadratni2 presjek. Sve izvedbe imaju progib unutar dopuštene vrijednosti, stoga prolaze taj uvjet za opterećenje pri brzini vjetra v_{ref} .

Slika 7.20: Rezultati optimizirnog kružnog presjeka postolja pri v_{ref}



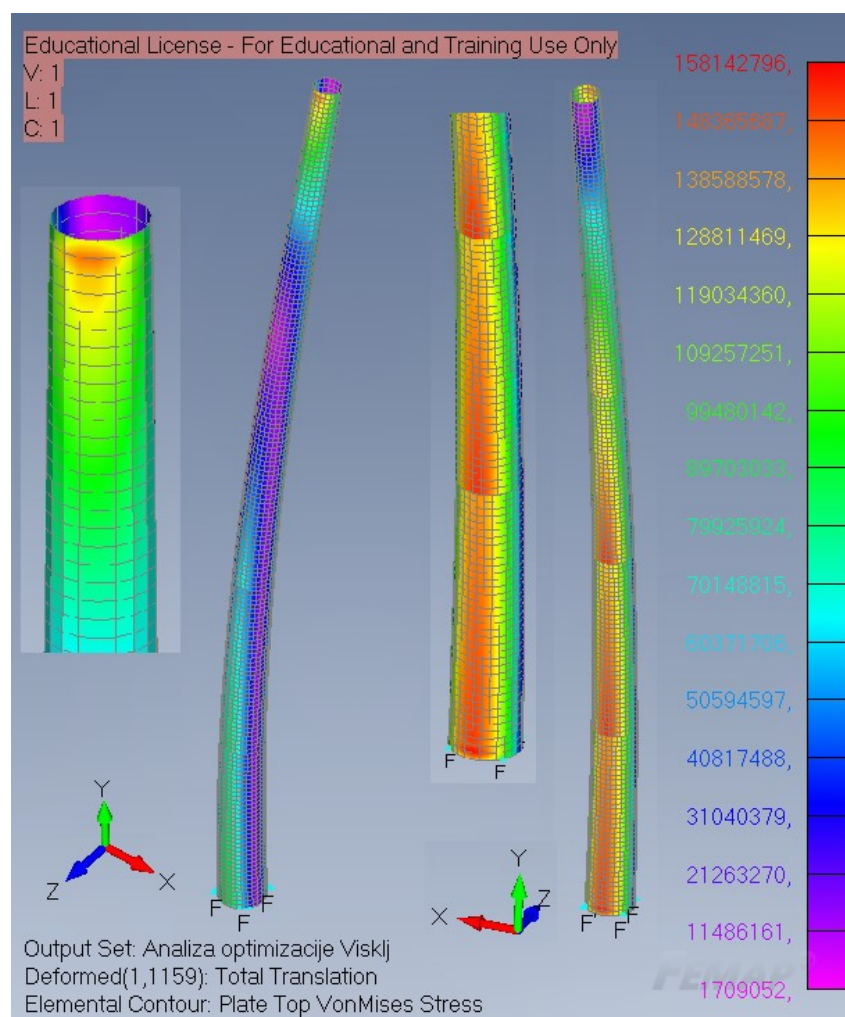
Slika 7.21: Rezultati ostalih optimiziranih izvedbi postolja pri v_{ref}

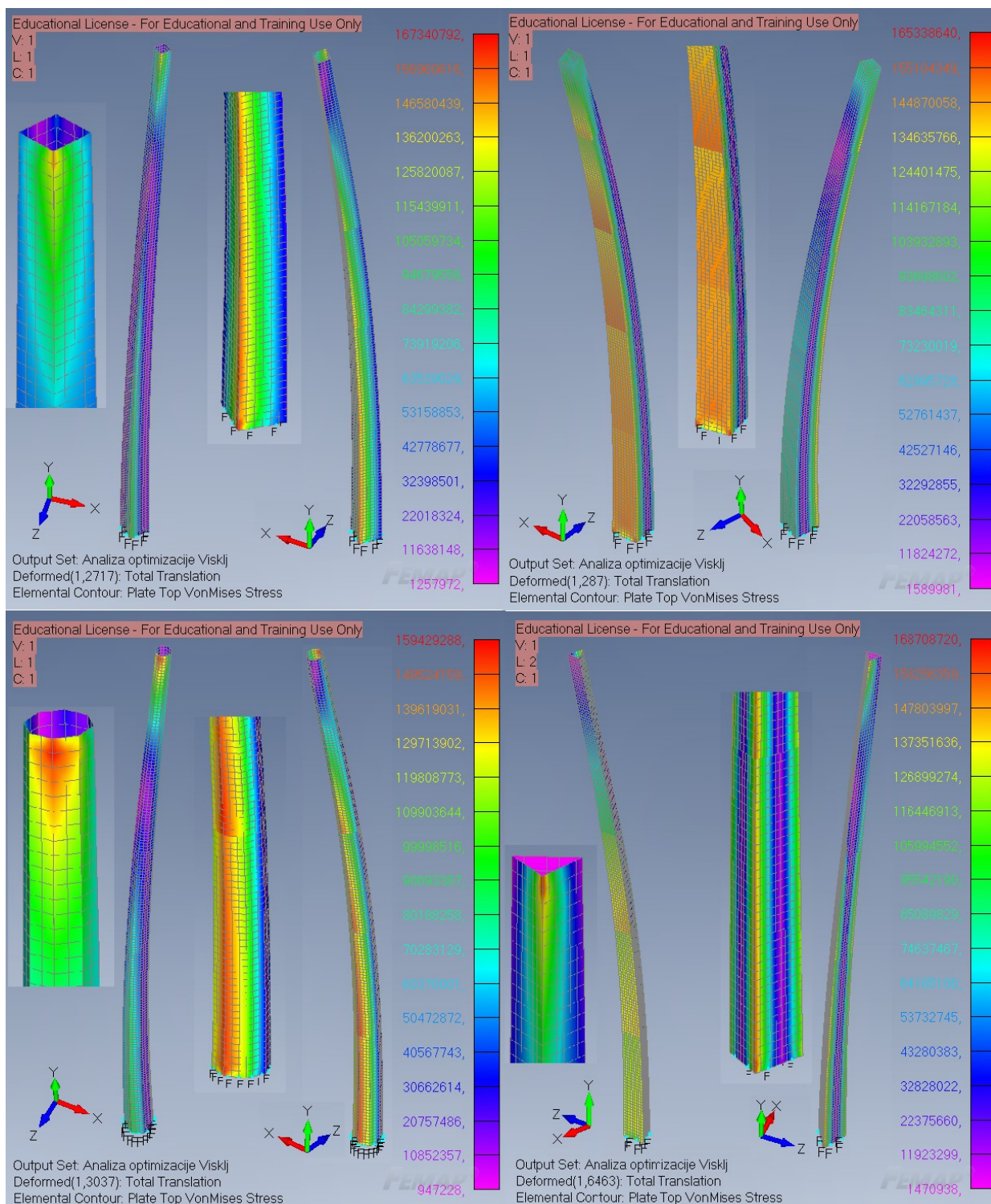
Tablica 7.6: Rezultati naprezanja i progiba optimiziranih postolja za brzinu vjetrova v_{ref}

| v_{ref} , optimizirano | Kružni | Kvadratni 1 | Kvadratni 2 | Mnogokutni | Trokutasti |
|--------------------------|---------|-------------|-------------|------------|------------|
| $\sigma_{e,Mises}$ [MPa] | 156,884 | 162,257 | 103,178 | 168,428 | 171,825 |
| δ_{max} [m] | 0,3241 | 0,3935 | 0,6234 | 0,3866 | 0,4283 |

7.5.2. Rezultati optimiziranih postolja za opterećenje vjetra pri brzini v_{isklj}

Na slici 7.20 i 7.21, te u tablici 7.6 prikazani su rezultati analize optimiziranih presjeka postolja za opterećenje pri brzini vjetra v_{isklj} . Kod brzine vjetra v_{isklj} dolazi do najvećih opterećenja na postolju, stoga su ovi rezultati jako važni da li će postolja zadovoljiti uvjete. Može se vidjeti na slikama kako maksimalna naprežanja se javljaju na dnu i vrhu postolja. Što se tiče uvjeta maksimalnog dopuštenog naprežanja, kružni i mnogokutni zadovoljavaju uvjet jer su ispod 160 MPa. Dok ostatak izvedbi je preko te vrijednosti, ali u granicama koje dopuštaju. Promatrajući rezultate progiba najbolji rezultat ima kružni presjek, dok najveći ima trokutasti presjek. Ostatak izvedbi ima progib unutar dopuštene vrijednosti. Promatrajući naprežanja prema Von Mises-u i progibe vrha postolja, može se zaključiti kako kružni presjek postolja ima najbolje rezultate u usporedbi s ostalim izvedbama za opterećenje vjetra v_{isklj} . Isto tako može se zaključiti kako sva postolja zadovoljavaju oba uvjeta, osim trokutastog presjeka, kod kojeg je progib iznosi 0,32 m preko dopuštene vrijednosti.

Slika 7.22: Rezultati optimizirnog kružnog presjeka postolja pri v_{isklj}



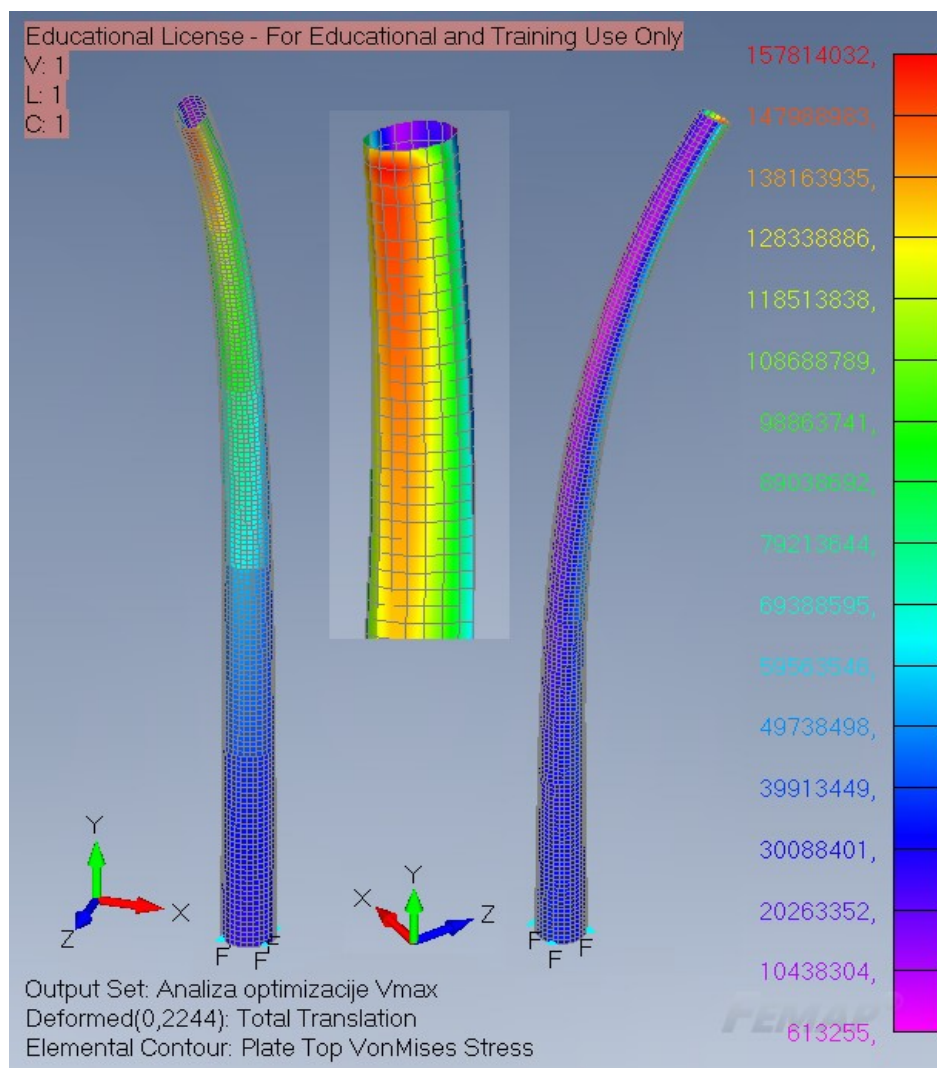
Slika 7.23: Rezultati ostalih optimiziranih izvedbi postolja pri visklj

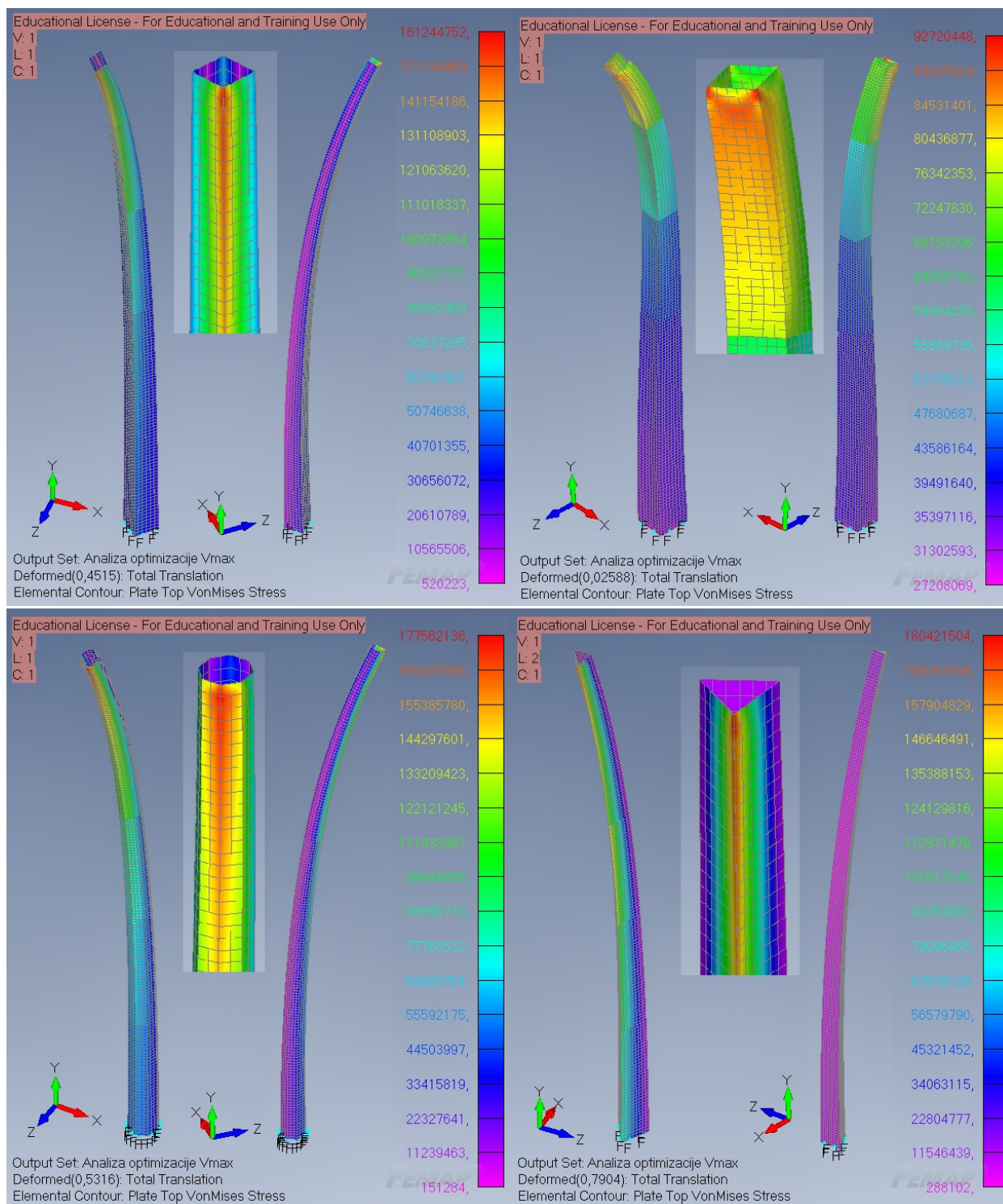
Tablica 7.7: Rezultati napreznja i progiba optimiziranih postolja za brzinu vjetra visklj

| v_{isklj} , optimizirano | Kružni | Kvadratni 1 | Kvadratni2 | Mnogokutni | Trokutasti |
|----------------------------|---------|-------------|------------|------------|------------|
| $\sigma_{e,Mises}$ [MPa] | 158,143 | 167,341 | 165,339 | 159,429 | 168,709 |
| δ_{max} [m] | 1,1159 | 1,2717 | 1,287 | 1,3037 | 1,6463 |

7.5.3. Rezultati optimiziranih postolja za opterećenje vjetra pri brzini v_{max}

Na slici 7.24 i 7.25, te u tablici 7.8 prikazani su rezultati analize optimiziranih presjeka postolja za opterećenje pri brzini vjetra v_{max} . Promatrajući rezultate naprezanja prema Von Mises-u može se zaključiti kako kvadratni2 presjek postolja ima najbolje rezultate u usporedbi s ostalim izvedbama za opterećenje vjetra v_{max} . Najlošiji rezultati za naprezanja prema Von Mises-u ima trokutasti presjek, zajedno s mnogokutnim presjekom, koji premašuju naprezanja za otprilike 20 MPa. Što se tiče uvjeta maksimalnog dopuštenog naprezanja, kružni i kvadratni2 zadovoljavaju uvjet jer su ispod 160 MPa, te presjek kvadratni1 zadovoljava taj uvjet s obzirom da je blizu maksimalnom dopuštenom naprezanju. Što se tiče progiba, ovdje najbolje rezultate ima kvadratni2 presjek koji ima do 10 i više puta manji progib od ostatak izvedbi postolja. Najveći progib ima trokutasti presjek. Sve izvedbe imaju progib unutar dopuštene vrijednosti, stoga prolaze taj uvjet za opterećenje pri brzini vjetra v_{max} .

Slika 7.24: Rezultati optimizirnog kružnog presjeka postolja pri v_{max}



Slika 7.25: Rezultati ostalih optimiziranih izvedbi postolja pri v_{max}

Tablica 7.8: Rezultati napreznaja i progiba optimiziranih postolja za brzinu vjetra v_{max}

| v_{max} , optimizirano | Kružni | Kvadratni 1 | Kvadratni 2 | Mnogokutni | Trokutasti |
|--------------------------|---------|-------------|-------------|------------|------------|
| $\sigma_{e,Mises}$ [MPa] | 157,814 | 161,245 | 92,720 | 177,562 | 180,422 |
| δ_{max} [m] | 0,2244 | 0,4515 | 0,0259 | 0,5316 | 0,7904 |

7.6. Izvijanje optimiziranih modela različitih izvedbi postolja

Izvijanje (eng. *buckling*) je pojava u kojoj konstrukcija ili materijal pod određenim opterećenjem gubi stabilnost i počinje se deformirati ili savijati. To može rezultirati nepoželjnim izobličenjima ili čak kolapsom konstrukcije. U kontekstu mehanike materijala, izvijanje je pojava koja nastaje kada stlačeni materijal gubi stabilnost i počinje se savijati pod opterećenjem. Ovo se obično javlja kod tankih štapova ili stupova pod kompresijskim opterećenjem. Dakle, „*buckling*“ se koristi kao termin za opisivanje izvijanja ili savijanja konstrukcija ili materijala pod određenim opterećenjem

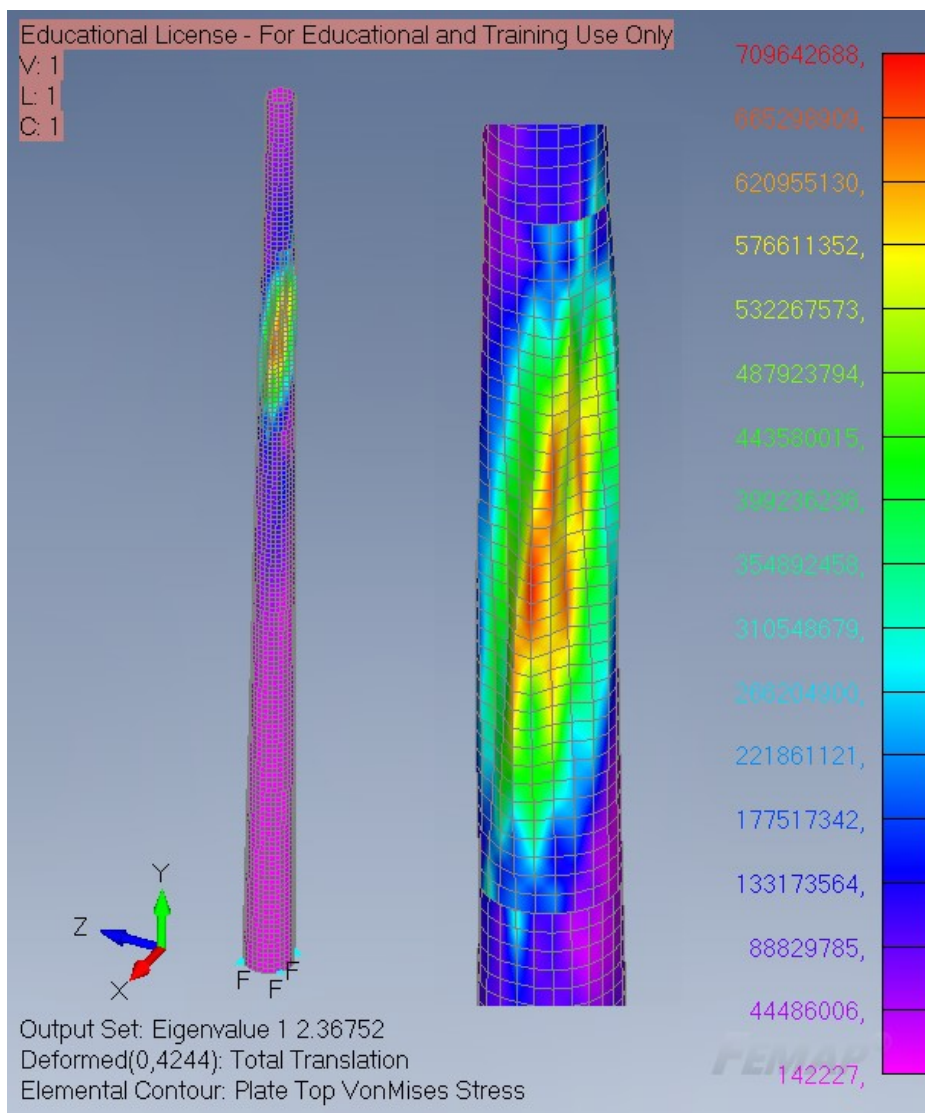
Primjerice, kod postolja vjetroturbina, izvijanje se može javiti kada postolje ne može podnijeti horizontalne sile vjetra i počne se izvijati. Ovo je jedan od glavnih problema s kojima se susreću inženjeri prilikom projektiranja vjetroturbina, jer izvijanje postolja može dovesti do smanjenja performansi ili čak oštećenja konstrukcije i vjetroturbine.

U numeričkoj analizi, kada se rade analize i rezultati o izvijanju (*buckling*), dobije se vrijednost koja predstavlja kritično opterećenje pri kojem će se konstrukcija ili materijal izviti ili saviti. Ovo opterećenje je obično nazvano kritično opterećenje ili kritična sila izvijanja. Vrijednost kritičnog opterećenja je važna jer omogućuje procjenu stabilnosti konstrukcije ili materijala pod određenim uvjetima opterećenja. Ako je primijenjeno opterećenje veće od kritičnog opterećenja, konstrukcija će izgubiti stabilnost i doživjeti izvijanje ili savijanje. Prilikom numeričke analize izvijanja uzima se u obzir geometrija konstrukcije, svojstva materijala i uvjeti opterećenja kako bi se odredila vrijednost kritičnog opterećenja.

Potrebno je utvrditi da li sve izvedbe postolja podržavaju trenutno najveće opterećenje koje nastupa pri brzini vjetra v_{isklj} . Također je važno analizirati koliko se to opterećenje može povećati da bi se dosegla vrijednost kritičnog opterećenja.

Na slici 7.26 za optimizirani kružni presjeka postolja može se vidjeti mjesto gdje dolazi do deformacija i izvijanja, te da vrijednost kritičnog opterećenja iznosi 2,36752. Što znači da je potrebno uvećati opterećenje koje nastupa pri brzini vjetra v_{isklj} za 2,36752 kako bi se dosegla vrijednost kritičnog opterećenja, to jest pojavilo izvijanje postolja.

Rezultati postolja na izvijanje i njihove deformacije prikazani su kao stvarni, nisu uvećani za 10% s obzirom na veličinu modela kao u prethodnim analizama. Što se jasno vidi kako pri kritičnom opterećenju dolazi do pojave izvijanja u pojedinim mjestima, te koliko stvarno iznose i izgledaju njihove deformacije koja mogu dovesti do smanjenja performansi ili čak oštećenja konstrukcije.

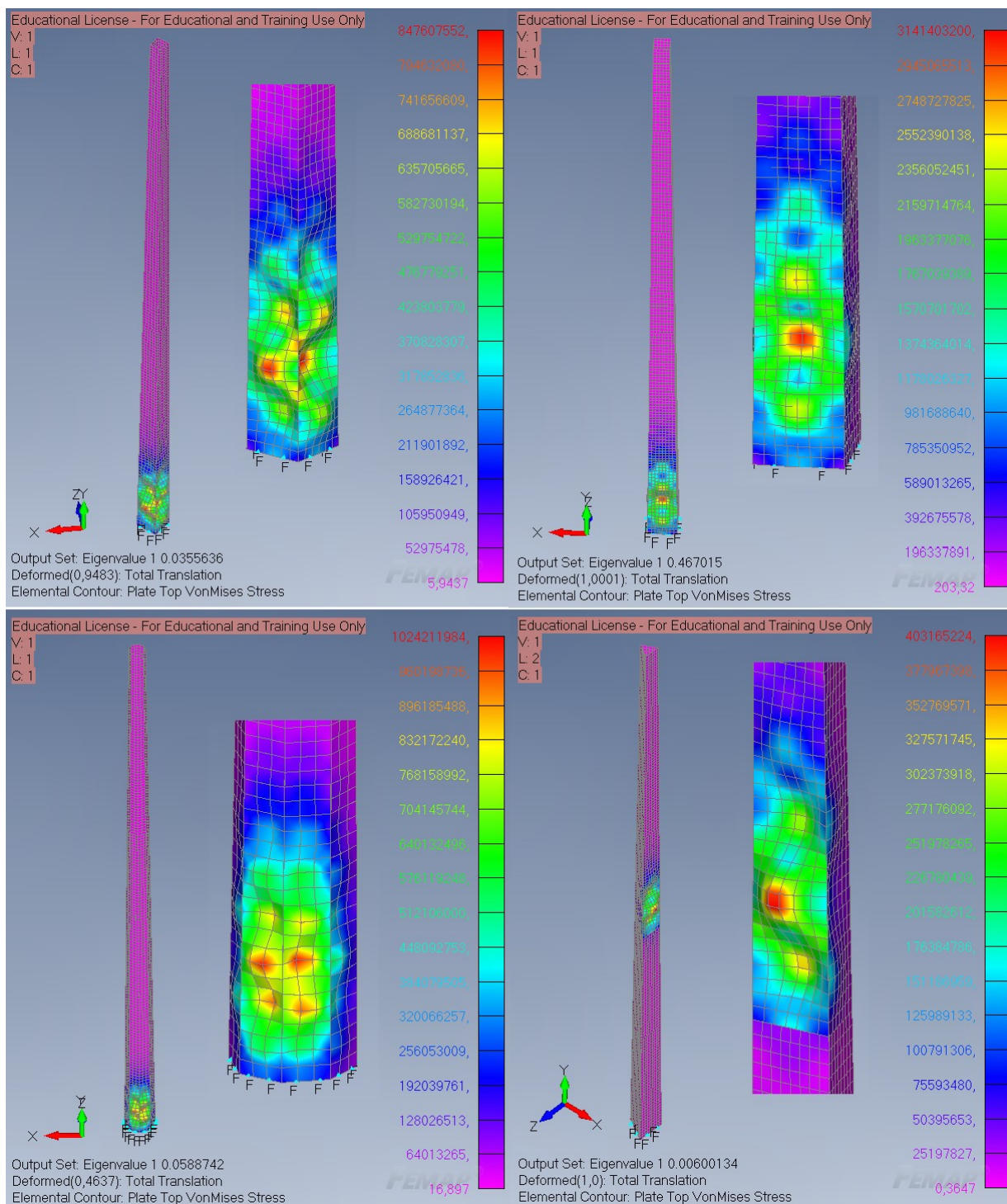


Slika 7.26: Rezultati izvijanja optimiziranog kružnog presjeka postolja

Iz tablice 7.9, te slikama 7.26 i 7.27 može se zaključiti kako kružni presjek postolja ima najbolju otpornost prema izvijanju i da se može opterećenje uvećati za 2,36752. Trokutasti presjek postolja ima najmanju vrijednost i to u iznosu od 0,006, stoga kod njega dolazi do rizika od izvijanja ako se trenutno opterećenje čak neznatno promijeni. Kod ostalih izvedbi postolja je taj iznos puno manji, ali nijedan rezultat nije došao negativan što znači da sva postolja mogu izdržati trenutno opterećenje bez pojave izvijanja.

Tablica 7.9: Rezultati izvijanja optimiziranih izvedbi postolja

| Visklj, optimizirano | Kružni | Kvadratni 1 | Kvadratni 2 | Mnogokutni | Trokutasti |
|----------------------|---------|-------------|-------------|------------|------------|
| kritično opterećenje | 2,36752 | 0,03556 | 0,46701 | 0,05887 | 0,006 |



Slika 7.27: Rezultati izvijanja ostalih optimiziranih izvedbi postolja

7.7. Usporedba rezultata

U tablici 7.10 prikazani su svi rezultati analize progiba i naprezanja prema Von Mises-u za prvobitne debljine stijenki ($t = 0,1$ m) različitih presjeka postolja. Vidljivo je kako skoro na svim opterećenjima najbolje rezultate za progib i naprezanje prema Von Mises-u ima kružni poprečni presjek postolja. Međutim, iznimka je rezultat progiba kod opterećenja brzina vjetra pri v_{ref} . Gdje je trokutasti presjek postolja ima najbolje rezultate, ali za jaku malu vrijednost od kružnog presjek postolja. Isto tako trokutasti presjek postolja ima najlošije rezultate za progib pri opterećenju vjetra na brzini v_{max} . Dok za ostale rezultate opterećenja najlošije rezultate ima kvadratni2 presjek postolja.

U tablici 7.11 prikazani su svi rezultati analize progiba i naprezanja prema Von Mises-u za optimizirane presjeke postolja. Vidljivo je kako skoro na svim opterećenjima najlošije rezultate za progib i naprezanje prema Von Mises-u ima trokutasti presjek postolja. Međutim, iznimka je rezultat progiba kod opterećenja brzina vjetra pri v_{ref} . Vidljivo je kako kvadratni2 presjek sada kada je optimiziran ima puno bolje rezultate nego s prvobitnom debljinom stijenki. Potrebno je pomno promotriti rezultate pri opterećenju brzine vjetra v_{isklj} , kako je to slučaj kada se pojavljuje najveće i najsloženije opterećenje na postolju. Može se zaključiti kako kružni poprečni presjek postolja i ovdje ima najbolje rezultate za progib i naprezanje prema Von Mises-u.

Tablica 7.10: Ukupni rezultati naprezanja i progiba postolja

| | | Kružni | Kvadratni1 | Kvadratni2 | Mnogokutni | Trokutasti |
|--------------------------|-------------|---------|------------|------------|------------|------------|
| $\sigma_{e,Mises}$ [MPa] | v_{ref} | 9,734 | 12,657 | 45,537 | 10,821 | 10,315 |
| | v_{isklj} | 13,082 | 18,447 | 71,249 | 14,968 | 13,491 |
| | v_{max} | 7,755 | 9,882 | 23,855 | 9,212 | 12,863 |
| δ_{max} [m] | v_{ref} | 0,0148 | 0,0264 | 0,2304 | 0,0201 | 0,0121 |
| | v_{isklj} | 0,0459 | 0,0815 | 0,4749 | 0,0636 | 0,0637 |
| | v_{max} | 0,00821 | 0,0265 | 0,00943 | 0,0239 | 0,0401 |

Tablica 7.11: Ukupni rezultati naprezanja i progiba optimiziranih postolja

| | | Kružni | Kvadratni1 | Kvadratni2 | Mnogokutni | Trokutasti |
|--------------------------|-------------|---------|------------|------------|------------|------------|
| $\sigma_{e,Mises}$ [MPa] | v_{ref} | 156,884 | 162,257 | 103,178 | 168,428 | 171,825 |
| | v_{isklj} | 158,143 | 167,341 | 165,339 | 159,429 | 168,709 |
| | v_{max} | 157,814 | 161,245 | 92,720 | 177,562 | 180,422 |
| δ_{max} [m] | v_{ref} | 0,3241 | 0,3935 | 0,6234 | 0,3866 | 0,4283 |
| | v_{isklj} | 1,1159 | 1,2717 | 1,287 | 1,3037 | 1,6463 |
| | v_{max} | 0,2244 | 0,4515 | 0,0259 | 0,5316 | 0,7904 |

U tablici 7.12 prikazani su rezultati izvijanja optimiziranih i ne optimiziranih ($t = 0,1$ m) postolja. Rezultati ne optimiziranih postolja nisu detaljno razrađeni i prikazani u prethodnim poglavljima zbog toga jer su prvobitna postolja bila predimenzionirana, te bi sigurno zadovoljila uvjete na izvijanje. Međutim, zanimljivo je usporediti rezultate izvijanja prvobitnih debljina stijenki i optimiziranih postolja. Vidljivo je da za prvobitno debljinu stijenki kružni presjek postolja ima dvostruko veće kritično opterećenje na izvijanje. Ali zato kvadratni2 presjek postolja ima najmanju, do 3 puta manju od ostalih izvedbi postolja i do 6 puta manju od kružnog presjeka postolja. Očekivalo bi se da rezultati izvijanja prvobitnih debljina stijenki i optimiziranih postolja budu približni. Međutim, izgleda da najmanje kritično opterećenje može podnijeti trokutasti, a ne kvadratni2 presjek postolja. Razlog tome su vjerojatno geometrija i specifičnost opterećenja. Može se zaključiti kako je kružni presjek postolja najbolje rješenje za oba slučaja debljine stijenki, te da ima dovoljno prostora u slučaju dodatnih opterećenja na postolje.

Tablica 7.12: Rezultati izvijanja postolja

| | | Kružni | Kvadratni1 | Kvadratni2 | Mnogokutni | Trokutasti |
|---------------------------|--|---------|------------|------------|------------|------------|
| $v_{isklj}, t = 0,1$ m | | 40,079 | 23,264 | 7,122 | 29,133 | 23,912 |
| $v_{isklj},$ optimizirano | | 2,36752 | 0,03556 | 0,46701 | 0,05887 | 0,006 |

U tablicama 7.13 i 7.14 prikazane su vrijednosti ne optimiziranih i optimiziranih izvedbi postolja s debljanima stijenki i masama pojedinih poprečnih presjeka postolja.

Vidljivo je iz tablice 7.13 kako najveću masu ima kvadratni2 presjek postolja, dok najmanju ima kvadratni1. S obzirom da je kvadratni1 presjek postolja imao relativno dobre rezultate na progibu, naprezanju prema Von Mises-u i kritičnom opterećenju na izvijanje, te da ima najmanju masu konstrukcije izrađenu od konstrukcijskog čelika S-355, bio bi najpovoljniji izbor za izradu takvog postolja. Isto tako ništa lošije rješenje ne bi bilo izabrati mnogokutni presjek postolja, uz malo povećanje mase dobivaju se mala poboljšanja na progibu, na naprezanju prema Von Mises-u i na kritičnom opterećenju na izvijanje.

Tablica 7.13: Debljine stijenki i mase postolja

| Segmenti [m] | Kružni | Kvadratni1 | Kvadratni2 | Mnogokutni | Trokutasti |
|--------------------|---------|------------|------------|------------|------------|
| Dio 1 do 5 – 106 m | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Masa [kg] | 1113657 | 958828,7 | 1289881 | 983052,9 | 1016985 |

Iz tablice 7.14 vidljivo je kako je svim izvedbama postolja s optimizacijom umanjena je masa. U tablici 7.14 također je vidljivo kako se debljina stijenki od dna prema vrhu postolja postupno smanjuje sa svaki segmentom. Iznimka je postolje trokutastog presjeka kod kojeg se od baze pa do trećeg dijela segmenta smanjuje debljina stijenke i tada se dalje do vrha postupno povećava debljina stijenki. Može se vidjeti kako presjek kvadratni2 ima vrlo dobre rezultate progiba i naprezanja prema Von Mises-u za brzine vjetra v_{ref} i v_{max} , što može ukazivati kako takav oblik postolja može podnijeti puno bolje opterećenja kada brzina vjetra na rotoru nije velika, te ako su tlačna opterećenja znatno veća i ako je težina određenih komponenti (rotora, kućišta i slično) puno veća. Zbog veće težine rotora pojavljuje se veći moment na vrhu postolja, kojeg kvadratni2 presjek može puno bolje podnijeti s obzirom na druge izvedbe presjeka postolja. Također, može se primijetiti kako trokutasti presjek postolja s prvobitnom debljinom stijenki je imao bolje rezultate s obzirom na optimizirani, što dovodi do zaključka kako takvom obliku presjeka puno bolje odgovara konstantan debljina stijenki kroz sve segmente postolja.

Kako za optimizirana postolja najveću masu ima kvadratni2 presjek postolja, dok najmanju masu ima kružni presjek i ako se promatraju rezultati progiba, naprezanja prema Von Mises-u i kritično opterećenje na izvijanje, tada najbolji izbor za izradu postolja u ovim uvjetima je svakako kružni presjek. Svaki presjek ima svoje prednosti i karakteristike koje mogu biti korisne u određenim uvjetima, stoga nije nužno odbacivati druge oblike presjeka.

Tablica 7.14: Debljine stijenki i mase optimiziranih postolja

| Segmenti [m] | Kružni | Kvadratni1 | Kvadratni2 | Mnogokutni | Trokutasti |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Dio 1 – 22 m | 0,00450267 | 0,00680209 | 0,03921210 | 0,00530301 | 0,00470288 |
| Dio 2 – 22 m | 0,00414194 | 0,00655134 | 0,03834540 | 0,00495105 | 0,00420573 |
| Dio 3 – 22 m | 0,00361887 | 0,00601335 | 0,03533900 | 0,00450050 | 0,00362690 |
| Dio 4 – 22 m | 0,00324002 | 0,00486433 | 0,03103770 | 0,00362124 | 0,00435579 |
| Dio 5 – 18 m | 0,00300349 | 0,00461694 | 0,02502140 | 0,00360124 | 0,00440131 |
| Masa [kg] | 42398,7 | 56964,05 | 450070,5 | 44552,67 | 43375,47 |

8. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu provedena je numerička analiza elemenata postolja vjetroturbine koristeći metodu konačnih elemenata uz pomoć programskog paketa Femap 2020.1 Student. Cilj analize bio je proučiti ponašanje i performanse različitih presjeka (izvedbi) postolja pod različitim uvjetima opterećenja kako bi se poboljšala sigurnost i dugotrajnost vjetroturbine, te dobili optimalni parametri presjeka i debljina stijenki. Kroz analizu vjetra i vjetroturbina, identificirani su ključni faktori koji utječu na opterećenje postolja, uključujući brzinu vjetra, geometriju vjetroturbine i karakteristike materijala. Također su opisane teorije čvrstoće koje su korištene za proučavanje ponašanja postolja pod opterećenjem. Metoda konačnih elemenata i njezin programski paket Femap pokazali su se kao moćan alat za numeričku analizu postolja vjetroturbine. Kroz stvaranje 3D modela, definiranje materijala, omreživanje modela i definiranje opterećenja, omogućeno je simuliranje ponašanja postolja pod različitim uvjetima. Analiza rezultata pružila je uvid u naprezanja, deformacije i izvijanja zbog opterećenja koja djeluju na postolje. Optimizacija modela postolja provedena je kroz analizu rezultata i identifikaciju optimalnih parametara presjeka i debljina stijenki koje osiguravaju smanjenu masu postolja. Kroz prilagodbu geometrije i debljine stijenki, postignuta je značajna smanjena masa postolja pojedinih presjeka, čak do 95% ukupne mase prvobitne debljine stijenki presjeka. Proučavajući dobivene rezultate, može se zaključiti da za ovu vrstu vjetroturbine, s obzirom na sve parametre kao što su geometrija, materijal, vrsta opterećenja i slično, najbolji izbor za izradu postolja je kružni presjek. Međutim, ostali presjeci također imaju svoje prednosti i karakteristike koje mogu biti korisne u određenim uvjetima, stoga nije potrebno odbacivati druge izvedbe presjeka. Ovaj rad ima značajan utjecaj na područje obnovljivih izvora energije jer pruža uvid u optimizaciju dizajna postolja vjetroturbine. Smanjenje mase postolja doprinosi smanjenju troškova proizvodnje, transporta i instalacije vjetroturbina, a istovremeno pridonosi održivosti i ekonomičnosti konstrukcije. Budući da se obnovljivi izvori energije sve više koriste kao alternativa tradicionalnim izvorima, daljnji razvoj numeričke analize elemenata postolja vjetroturbine bit će od ključne važnosti za unapređenje održivih izvora energije i smanjenje negativnog utjecaja na okoliš.

9. POPIS LITERATURE

- [1] Danish Wind Industry Association: „Guided Tour on Wind Energy“ , s Interneta <http://ele.aut.ac.ir/~wind/en/tour/index.htm>, 29.11.2021.
- [2] Yu Hu: „Improvement of the structural response of steel tubular wind turbine towers by means of stiffeners“, The University of Birmingham, 2015.
- [3] Britannica: “Wind Energy: Sea breeze“ , s Interneta, <https://www.britannica.com/science/sea-breeze>, 29.11.2021.
- [4] Janjiš I.: „Mala vertikalna vjetroelektrana“, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2013.
- [5] „Guidelines for Design of Wind Turbines“, DNV/Riso in technical co-operation, Wind Energy Department, Risø National Laboratory, Copenhagen, Danska, 2001.
- [6] Wikipedia: „Wind“, s Interneta, <https://en.wikipedia.org/wiki/Wind>, 2.12.2021.
- [7] Veljkovic M.: „High-Strength Steel Tower for Wind Turbines“, Luleå Tekniska, Universitet Luleå University of Technology, Universitetsområdet, Porsön, SE-97187 Luleå, Švedska, 2015.
- [8] Burton T., Sharpe D., Jenkis N., Bossanyi E.: „Wind Energy Handbook“, John Wiley & Sons, Ltd., Baffins Lane, Chichester, West Sussex, PO19 1UD, Engleska, 2011.
- [9] Državni hidrometeorološki zavod RH: „Klima Hrvatske – atlas vjetra“, s Interneta, https://meteo.hr/klima.php?section=klima_hrvatska¶m=k1_8, 2.12.2021.
- [10] For Wind - Center for Wind Energy Research: „European Wind Atlas“, NEWA, 2019. s Interneta <https://map.neweuropeanwindatlas.eu/>, 2.12.2021.
- [11] Martinez J.: „Modelling and Control of Wind Turbines“, Master of Science in Process Systems Engineering and for the Diploma of Imperial College, Imperial College London, UK, 2016.
- [12] Sahin S.: „Wind Turbine Tower Structure Analysis According to Wind Load in Terms of Cost“, Master Thesis – EMSHIP, West Pomeranian University of Technology, Szczecin, Poljska, 2016.

- [13] Patel R. M.: „Wind and Solar Power Systems – Design, Analysis and Operation (Second Edition)“, U.S. Merchant Marine Academy Kings Point, Taylor & Francis Group, New York, U.S.A., 2006.
- [14] Tech B.: „Lecture Notes on Renewable Energy Sources“, Department of Electrical Engineering, Veer Surendra Sai University of Technology Burla, Odisha, Indija.
- [15] Joselin Herbert G.M., Iniyam S., Sreevalsan E., Rajapandian S.: „A review of wind energy technologies“ , St. Joseph’s College of Engineering, Anna University, C-WET, Sathyabama Institute of Science and Technology, Elsevier Ltd., Indija, 2005.
- [16] Parker Lord EMEA, Parker Hannifin Corp.: „Structural Adhesives for Wind Energy“, s Interneta <https://www.lord.com/emea/industries/power-generation/wind-energy/wind-turbine-structural-adhesives>, 15.12.2021.
- [17] Tan J., Zhu C., Song C., Xu X.: „Study on the dynamic modeling and natural characteristics of wind turbine drivetrain considering electromagnetic stiffness“, Mechanism and Machine Theory, Caichao Zhu's Lab, Elsevier Ltd, 2019.
- [18] Namiranian A.: „3D Simulation of a 5MW Wind Turbine“, Department of Mechanical Engineering Blekinge Institute of Technology Karlskrona, Master's Degree Thesis, Švedska, 2011.
- [19] Wikipedia: „Coupling“, s Interneta, <https://en.wikipedia.org/wiki/Coupling>, 10.1.2022.
- [20] Flender Products: „Couplings for Wind Turbines“, ARPEX ARV wind coupling, <https://www.flender.com/en/Products/Couplings/COUPLINGS-FOR-WIND-TURBINES/p/ATN09001>, 11.1.2022.
- [21] CNBM International Wind Power: „Onshore Wind Tower Foundation Types“, s Interneta, <http://www.steelwindtower.com/onshore-wind-tower-foundation-types/>, 21.1.2022.
- [22] Windpower engineering and development: „Comparing offshore wind turbine foundations“, Marla Keene , s Interneta, <https://www.windpowerengineering.com/comparing-offshore-wind-turbine-foundations/>, 27.1.2022.
- [23] Wikipedia: „Wind turbine design“, s Interneta, https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine_design#Power_control , 28.1.2022.
- [24] Petrov M.: “Renewable Energy Technology MJ2411“, Lecture series on Wind Turbines, KTH – ITM – Dept. of Energy Technology.

- [25] Yadneshwar S. J.; Alandkar P.M.: "Finite Element Analysis of Connections for Wind Turbine Towers", Department of Civil Engineering, SCOE. Pune
- [26] Elaborat zaštite okoliša za ocjenu o potrebi procjene utjecaja zahvata na okoliš, Izmjena zahvata izgradnje druge faze vjetroelektrane Vrataruša (VE Vrataruša II), Grad Senj, Ličko-senjska županija, Eko Invest d.o.o., Zagreb, travanj 2021.
- [27] Vlada Republike Hrvatske: „Vjetroelektrana Senj otvorena za probni rad, projekt će pridonijeti zelenoj tranziciji Hrvatske“, s Interneta, <https://vlada.gov.hr/news/senj-wind-farm-opened-for-trial-run-the-project-will-contribute-to-croatia-s-green-transition/33504?big=>, 15.3.2023.
- [28] Specifikacije vjetroturbine Vestas V136-4.2 MW, s Interneta, <https://us.vestas.com/en-us/products/4-mw-platform/V136-4-2-MW>, 20.3.2023.
- [29] Elaborat zaštite okoliša izmjena tehničkog rješenja vjetroelektrane Senj, promjena tipa vjetroagregata i smanjenje broja vjetroagregata, Zagreb, travanj 2018.
- [30] C. F. Heddleson, D. L. Brown, R. T. Cliffe: „Summary of Drag Coefficients of Various Shaped Cylinders“, AIRCRAFT NUCLEAR PROPULSION DEPARTMENT, Cincinnati 15/Ohio, Technical Publications Sub-Section.
- [31] Brnić. J.; Turkalj. G.: "Nauka o čvrstoći I", Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka, 2004.
- [32] IEEE Innovation: „What is the Finite Element Method“, s Interneta, <https://innovationatwork.ieee.org/what-is-the-finite-element-method/>, 22.1.2023.
- [33] Murad J.: “The Finite Element Method (FEM) – A Beginner's Guide“, s Interneta, <https://www.jousefmurad.com/fem/the-finite-element-method-beginners-guide/>, 28.1.2023.
- [34] N. Zaimović-Uzunović, S. Lemeš: „Metod konačnih elemenata“, Dom štampe Zenica, BIH Zenica, 2002.
- [35] Šančić T.: Diplomski rad – „Numerička analiza i optimizacija središnjeg nogara motocross motocikla“, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka, 2021.
- [36] Ortner P.: Diplomski rad – „Eksperimentalna analiza konzolno opterećenog nosivog elementa metodom korelacije digitalne slike“, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka, 2022.
- [37] R. Basan: „CAE u razvoju proizvoda“, Tehnički fakultet Rijeka, ak. god. 2020./2021.

[38] MEADinfo: “Material Properties of S355 Steel - An Overview“, s Interneta,
<https://www.meadinfo.org/2015/08/s355-steel-properties.html>, 25.8.2023.

10. POPIS SLIKA, TABLICA I GRAFOVA

| | |
|---|----|
| <i>Slika 2.1: Prikaz sustava smjerova globalnih vjetrova [2]</i> | 3 |
| <i>Slika 2.2: Cirkulacije zraka - nastanak vjetra [2]</i> | 4 |
| <i>Slika 2.3: Stvaranje morskog i kopnenog povjetarca [3]</i> | 5 |
| <i>Slika 2.4: Stvaranje dolinskog vjetra [3]</i> | 6 |
| <i>Slika 2.5: Brzina vjetra ovisna o hrapavosti površine</i> | 7 |
| <i>Slika 2.6: Gradijent brzine vjetra</i> | 11 |
| <i>Slika 2.7: Primjer Weibullove razdiobe</i> | 12 |
| <i>Slika 2.8: Van der Hovenov dijagram</i> | 13 |
| <i>Slika 2.9: Prikaz protoka zraka [7, 8]</i> | 16 |
| <i>Slika 2.10: Aerodinamički stupanj pretvorbe i omjer brzine</i> | 19 |
| <i>Slika 2.11: Prikaz srednje godišnje brzine vjetra za Zemlju na visini 100 metara iznad tla [10]</i> | 20 |
| <i>Slika 2.12: Prikaz srednje godišnje brzine vjetra za Europu na visini 100 metara iznad tla [10]</i> | 21 |
| <i>Slika 2.13: Prikaz srednje godišnje brzine vjetra za Hrvatsku na visinama 10 metara i 80 metara iznad tla [9]</i> | 21 |
| <i>Slika 2.14: Prikaz srednje godišnje gustoće snage vjetra za Hrvatsku na visinama 10 metara i 80 metara iznad tla [9]</i> | 22 |
| <i>Slika 2.15: Ruža vjetrova za Riječko područje Kozale [9]</i> | 23 |
| <i>Slika 2.16: Ruža vjetrova za Riječko područje Martinsćica – Grčevo [9]</i> | 24 |
| <i>Slika 3.1: Prikaz vjetroturbina prema položaju osi vrtnje</i> | 26 |
| <i>Slika 3.2: Prikaz glavnih dijelova vjetroturbine [13]</i> | 27 |
| <i>Slika 3.3: Prikaz strujanja vjetra na lopatice vjetroturbine [7]</i> | 28 |
| <i>Slika 3.4: Dijagram koeficijenta brzohodnosti vjetroturbine λ i koeficijenta snage rotora različitih tipova turbina [7]</i> | 29 |
| <i>Slika 3.5: Prikaz vjetroturbina sa različitim brojem lopatica</i> | 30 |
| <i>Slika 3.6: Prikaz dijelova lopatice [16]</i> | 31 |
| <i>Slika 3.7: Glavina rotora</i> | 32 |
| <i>Slika 3.8: Prikaz glavnih komponenti gondole [17]</i> | 34 |
| <i>Slika 3.9: Tipovi postolja kod vjetroturbina</i> | 39 |
| <i>Slika 3.10: Prikaz različitih tipova temelja kopnenih vjetroturbina [21]</i> | 42 |
| <i>Slika 3.11: Prikaz različitih tipova temelja priobalnih vjetroturbina [22]</i> | 44 |
| <i>Slika 3.12: Prikaz zavjetrine, pojava turbulencije (Stall control)</i> | 47 |
| <i>Slika 3.13: Prikaz promjene kuta lopatica rotora (Pitch control)</i> | 48 |
| <i>Slika 4.1: Prikaz opterećenja vjetroturbine</i> | 51 |
| <i>Slika 4.2: Prikaz vjetroturbine – konzola</i> | 52 |
| <i>Slika 4.3: Tri načina spajanja segemenata vijcima</i> | 53 |
| <i>Slika 4.4: Dimenzije vjetroturbine „Vestas V136-4.2“</i> | 56 |
| <i>Slika 4.5: Prikaz sila i kontinuiranog opterećenja, te koordinatne osi za postolje i rotor vjetroturbine</i> | 62 |
| <i>Slika 4.6: Poprečni presjeci profila postolja i iznosi koeficijenta aerodinamičkog otpora</i> | 62 |
| <i>Slika 4.7: Prikaz aproksimacije površine postolja na koju djeluje vjetar</i> | 63 |
| <i>Slika 4.8: Prikaz volumena opterećenja na rotoru</i> | 66 |
| <i>Slika 4.9: Prikaz rotora vjetroturbine</i> | 68 |

| | |
|---|------------|
| <i>Slika 5.1: Dijagram $\sigma - \varepsilon$</i> | <i>74</i> |
| <i>Slika 5.2: Grafička usporedba spomenutih teorija čvrstoće [31]</i> | <i>85</i> |
| <i>Slika 6.1: Prikaz vrste konačnih elementa [34]</i> | <i>89</i> |
| <i>Slika 6.2: Globalni koordinatni sustav.....</i> | <i>94</i> |
| <i>Slika 6.3: Lokalni koordinatni sustav - a)Pravokutni i b) Cilindrični</i> | <i>94</i> |
| <i>Slika 7.1: Prikaz geometrije različitih izvedbi postolja</i> | <i>104</i> |
| <i>Slika 7.2: Prikaz geometrije različitih izvedbi postolja u Femap-u</i> | <i>105</i> |
| <i>Slika 7.3: Definiranje materijala S-355 u Femap-u.....</i> | <i>107</i> |
| <i>Slika 7.4: Naredbe za definiranje mreže</i> | <i>108</i> |
| <i>Slika 7.5: Postupak umrežavanja modela</i> | <i>108</i> |
| <i>Slika 7.6: Prikaz mreže različitih izvedbi postolja u Femap-u</i> | <i>109</i> |
| <i>Slika 7.7: Prikaz rubnih uvjeta na modelu u Femap-u</i> | <i>110</i> |
| <i>Slika 7.8: Prikaz rubnih uvjeta na ostalim modelima u Femap-u.....</i> | <i>111</i> |
| <i>Slika 7.9: Prikaz definiranja opterećenja</i> | <i>112</i> |
| <i>Slika 7.10: Prikaz naredbe "Expand"</i> | <i>113</i> |
| <i>Slika 7.11: Prikaz kocentratora naprezanja</i> | <i>114</i> |
| <i>Slika 7.12: Prikaz opterećenja i rigid elementa.....</i> | <i>114</i> |
| <i>Slika 7.13: Rezultati kružnog presjeka postolja pri v_{ref}.....</i> | <i>116</i> |
| <i>Slika 7.14: Rezultati ostalih izvedbi postolja pri v_{ref}.....</i> | <i>117</i> |
| <i>Slika 7.15: Rezultati kružnog presjeka postolja pri v_{isklj}.....</i> | <i>118</i> |
| <i>Slika 7.16: Rezultati ostalih izvedbi postolja pri v_{isklj}.....</i> | <i>119</i> |
| <i>Slika 7.17: Rezultati kružnog presjeka postolja pri v_{max}.....</i> | <i>120</i> |
| <i>Slika 7.18: Rezultati ostalih izvedbi postolja pri v_{max}.....</i> | <i>121</i> |
| <i>Slika 7.19: Prikaz postavljanja parametara za optimizaciju</i> | <i>123</i> |
| <i>Slika 7.20: Rezultati optimizirnog kružnog presjeka postolja pri v_{ref}.....</i> | <i>124</i> |
| <i>Slika 7.21: Rezultati ostalih optimiziranih izvedbi postolja pri v_{ref}.....</i> | <i>125</i> |
| <i>Slika 7.22: Rezultati optimizirnog kružnog presjeka postolja pri v_{isklj}.....</i> | <i>126</i> |
| <i>Slika 7.23: Rezultati ostalih optimiziranih izvedbi postolja pri v_{isklj}.....</i> | <i>127</i> |
| <i>Slika 7.24: Rezultati optimizirnog kružnog presjeka postolja pri v_{max}.....</i> | <i>128</i> |
| <i>Slika 7.25: Rezultati ostalih optimiziranih izvedbi postolja pri v_{max}.....</i> | <i>129</i> |
| <i>Slika 7.26: Rezultati izvijanja optimiziranog kružnog presjeka postolja.....</i> | <i>131</i> |
| <i>Slika 7.27: Rezultati izvijanja ostalih optimiziranih izvedbi postolja.....</i> | <i>132</i> |
| | |
| <i>Tablica 2.1: Parametar hrapavosti terena (Zemljine površine) [5]</i> | <i>9</i> |
| <i>Tablica 2.2: Beaufortova ljestvica snage vjetra [6]</i> | <i>14</i> |
| <i>Tablica 4.1: Specifikacije vjetroturbine "Vestas model V136-4.2" [28].....</i> | <i>55</i> |
| <i>Tablica 4.2: Brzine vjetra na visini $H=110$ m i područje rada vjetroturbine.....</i> | <i>57</i> |
| <i>Tablica 4.3: Vrijednosti momenta za poprečne profile postolja.....</i> | <i>71</i> |
| <i>Tablica 5.1: Usporedba spomenutih teorija čvrstoće</i> | <i>84</i> |
| <i>Tablica 7.1: Opterećenja za različite brzine vjetrova.....</i> | <i>111</i> |
| <i>Tablica 7.2: Rezultati naprezanja i progiba za brzinu vjetra v_{ref}.....</i> | <i>116</i> |
| <i>Tablica 7.3: Rezultati naprezanja i progiba za brzinu vjetra v_{isklj}.....</i> | <i>118</i> |
| <i>Tablica 7.4: Rezultati naprezanja i progiba za brzinu vjetra v_{max}.....</i> | <i>121</i> |
| <i>Tablica 7.5: Debljine stijenki segmenata postolja nakon optimizacije.....</i> | <i>123</i> |

| | |
|--|------------|
| <i>Tablica 7.6: Rezultati naprezanja i progiba optimiziranih postolja za brzinu vjetra v_{ref}.....</i> | <i>125</i> |
| <i>Tablica 7.7: Rezultati naprezanja i progiba optimiziranih postolja za brzinu vjetra v_{isklj}.....</i> | <i>127</i> |
| <i>Tablica 7.8: Rezultati naprezanja i progiba optimiziranih postolja za brzinu vjetra v_{max}.....</i> | <i>129</i> |
| <i>Tablica 7.9: Rezultati izvijanja optimiziranih izvedbi postolja.....</i> | <i>131</i> |
| <i>Tablica 7.10: Ukupni rezultati naprezanja i progiba postolja.....</i> | <i>133</i> |
| <i>Tablica 7.11: Ukupni rezultati naprezanja i progiba optimiziranih postolja.....</i> | <i>134</i> |
| <i>Tablica 7.12: Rezultati izvijanja postolja</i> | <i>134</i> |
| <i>Tablica 7.13: Debljine stijenki i mase postolja.....</i> | <i>135</i> |
| <i>Tablica 7.14: Debljine stijenki i mase optimiziranih postolja</i> | <i>136</i> |
| | |
| <i>Graf 4.1: Snaga vjetroturbine ovisna o brzini vjetra</i> | <i>58</i> |
| <i>Graf 4.2: Raspodjela brzine vjetra i gustoće zraka po visini vjetroturbine.....</i> | <i>60</i> |
| <i>Graf 4.3: Raspodjela opterećenja na postolju za brzine v_{ref}.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Graf 4.4: Raspodjela opterećenja na postolju za brzine v_{isklj}</i> | <i>64</i> |
| <i>Graf 4.5: Raspodjela opterećenja na postolju za brzine v_{max}</i> | <i>65</i> |
| <i>Graf 4.6: Kontinuirano opterećenje rotora vjetroturbine.....</i> | <i>66</i> |
| <i>Graf 4.7: Moment savijanja lopatica po x osi za v_{ref}</i> | <i>69</i> |
| <i>Graf 4.8: Moment savijanja lopatica po y osi za v_{ref}</i> | <i>70</i> |
| <i>Graf 4.9: Moment savijanja lopatica po x osi za v_{isklj}.....</i> | <i>70</i> |
| <i>Graf 4.10: Moment savijanja lopatica po y osi za v_{isklj}.....</i> | <i>70</i> |

11. SAŽETAK

U ovom diplomskom radu provedena je numerička analiza elemenata postolja vjetroturbine s ciljem optimizacije dizajna i smanjenja mase postolja. Glavni fokus analize bio je izrada analize i optimizacija različitih vrsta presjeka postolja za različite debljine stijenki kako bi se postigla smanjena masa bez ugrožavanja sigurnosti i performansi konstrukcije. Kroz analizu vjetra, vjetroturbine i opterećenja postolja, identificirani su ključni faktori koji utječu na dimenzioniranje postolja. Metoda konačnih elemenata i programski paket Femap korišteni su za stvaranje 3D modela postolja, definiranje materijala i opterećenja, te simuliranje ponašanja konstrukcije pod različitim uvjetima. Metoda konačnih elemenata se koristi za modeliranje i analizu postolja, uzimajući u obzir naprezanja, deformacije i izvijanja. Provedena je optimizacija modela postolja kroz analizu rezultata i identifikaciju optimalnih parametara presjeka i debljinu stijenki. Kroz prilagodbu geometrije i debljine stijenki, postignuta je smanjena masa postolja bez ugrožavanja sigurnosti i stabilnosti konstrukcije. Zaključno, numerička analiza elemenata postolja vjetroturbine s ciljem optimizacije dizajna i smanjenja mase postolja pokazala se kao uspješna metoda za postizanje učinkovitijih i sigurnijih konstrukcija. Smanjenje mase postolja ima potencijal za smanjenje troškova proizvodnje, transporta i instalacije vjetroelektrane, te pridonosi održivosti i ekonomičnosti konstrukcije. Ovaj rad ima važnu ulogu u razvoju obnovljivih izvora energije i održivosti.

Ključne riječi: vjetar, vjetroturbina, opterećenje postolja, metoda konačnih elemenata, numerička analiza postolja, optimizacija dizajna.

12. SUMMARY

In this master's thesis, a numerical analysis of wind turbine support structure elements was conducted with the aim of optimizing the design and reducing the weight of the support structure. The focus of the analysis was to develop an analysis and optimization of different types of support structure cross-sections with varying wall thicknesses to achieve reduced weight without compromising the safety and performance of the structure. Through the analysis of wind, wind turbines, and support structure loads, key factors influencing the dimensioning of the support structure were identified. The finite element method and the Femap software package were used to create 3D models of the support structure, define materials and loads, and simulate the behavior of the structure under different conditions and loads. The finite element method was employed to model and analyze the support structure, considering stresses, deformations, and buckling. The optimization of the support structure models was achieved through analysis of the results and identification of optimal cross-section parameters and wall thicknesses. By adjusting the geometry and wall thicknesses, a reduced weight of the support structure was achieved without compromising safety and stability. In conclusion, the numerical analysis of wind turbine support structure elements with the aim of design optimization and weight reduction proved to be a successful method for achieving more efficient and safer structures. The weight reduction of the support structure has the potential to reduce production, transportation, and installation costs of wind turbines, contributing to sustainability and cost-effectiveness. This master's thesis plays an important role in the development of renewable energy sources and sustainability.

Key words: wind, wind turbine, wind turbine support structure loads, finite element method, numerical analysis of wind turbine support structure, design optimization.

Sveučilište u Rijeci

Tehnički fakultet

IZJAVA STUDENTA - AUTORA
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG DIPLOMSKOG RADA

Izjavljujem da kao student - autor diplomskog rada dozvoljavam Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Tehničkog fakulteta u Rijeci.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa diplomskim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Tehničkog fakulteta u Rijeci, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima Creative Commons licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>.

U Rijeci, 11.9.2023.

Ime i prezime: Mateo Halužan

Potpis: Mateo Halužan