

ŠOLSKI CENTER CELJE



Srednja šola za strojništvo, mehatroniko in medije

Projektna naloga

VERTIKALNA VETRNA TURBINA IN MOŽNOSTI POSTAVITVE V SLOVENIJI

Avtorji:

Tristan Jan ŠEŠKO, M-4. c

Matic ZALOŽNIK, M-4. c

Gašper ŠRAMEL, M-4. c

Mentorja:

mag. Matej VEBER, univ. dipl. inž.

mag. Andro GLAMNIK, univ. dipl. inž.

Celje, april 2017

POVZETEK

V današnjem svetu se srečujemo z mnogimi problemi, eden glavnih pa je okolju prijazna proizvodnja električne energije oz. tako imenovani alternativni viri energije. V projektnem delu je predstavljena vetrna energija, najučinkovitejša postavitev vetrnice v Sloveniji in njena izdelava. Prikazane so konstrukcije že obstoječih tipov vetrnih turbin in njihove značilnosti. Na podlagi opravljenih raziskav in obstoječih konstrukcij je bila izdelana vetrna turbina, primerna za slovensko območje. Cilj projekta je narediti cenovno ugodnejšo vetrnico, primerno za postavitev v večini krajev v Sloveniji.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	OPIS SPLOŠNEGA PODROČJA DELA	1
1.2	OPREDELITEV PROBLEMA	1
2	PREMIKANJE ZRAČNIH MAS IN NASTANEK VETROV	2
2.1	NASTANEK VETROV	2
2.2	VRSTE VETROV	2
2.2.1	GLOBALNI VETROVI	2
2.3	MERJENJE VETRA	5
2.4	VETRNE RAZMERE V SLOVENIJI	6
3	TEORETIČNE OSNOVE VETRNIH TURBIN	9
3.1	VRSTE VETRNIC	11
4	KONSTRUIRANJE VETRNE TURBINE	13
4.1	KONCEPT VERTIKALNE VETRNE TURBINE	13
4.2	KONSTRUIRANJE ROTORJA TURBINE	13
4.3	KONSTRUIRANJE STATORJA	15
5	SESTAVLJANJE VETRNIC	17
6	SIMULACIJA	18
7	ZAKLJUČEK	19
8	SEZNAM UPORABLJENIH VIROV	20

KAZALO SLIK

Slika 1: Segrevanje površja in nastanek vetrov	2
<i>Slika 2: Planetarno kroženje zraka</i>	3
<i>Slika 3: Smeri obalnih vetrov</i>	4
<i>Slika 4: Smeri pobočnih vetrov</i>	4
<i>Slika 5: Prikaz vetrne rože</i>	5
<i>Slika 6: Beaufortova lestvica jakosti hitrosti</i>	6
<i>Slika 7: Grafični prikaz podatkov iz tabele 1</i>	8
<i>Slika 8: Sestavni deli vetrnice</i>	9
<i>Slika 9: Hitro tekoče vetrnice z enim, dvema in tremi listi.....</i>	11
<i>Slika 10: Savoniusov, Windside in Darriesov rotor</i>	12
<i>Slika 11: Prerez rotorja z lopaticami</i>	14
<i>Slika 12: Lopatica rotorja (skica)</i>	14
<i>Slika 13: Lopatica rotorja (3D).....</i>	15
<i>Slika 14: Prerez statorja z lopaticami</i>	15
<i>Slika 15: Lopatica statorja (skica)</i>	16
<i>Slika 16: Lopatica statorja (3D)</i>	16
<i>Slika 17: Razrez pločevine na laserskem rezalniku.....</i>	17
<i>Slika 18: Stroj za krivljenje pločevine</i>	17
<i>Slika 19: Simulacija sile na lopatice rotorja.....</i>	18

KAZALO TABEL

Tabela 1: Povprečna hitrost in največja polurna hitrost v obdobju 1995-2004.....	7
--	---

1 UVOD

1.1 OPIS SPLOŠNEGA PODROČJA DELA

Vetrna energija je v uporabi že vrsto let. Sprva je imela veliko vlogo, vendar pa zaradi cenejših naftnih derivatov in premoga ni doživela večjega razcveta. Kasneje je nastal problem, saj se zaloge fosilnih goriv znatno krčijo, to pa je ljudi vzpodbudilo k iskanju novih, trajnih oz. obnovljivih virov energije. Vključujejo vse vire energije, ki jih zajemamo iz stalnih naravnih procesov, kot so oblike vetrne in vodne energije, plimovanja, sončne svetlobe, solarne energije in geotermalne moči. Za njihov nastanek pa je glavni vzrok Sonce, ki dovaja toploto, s pomočjo katere se na Zemlji odvijajo različni procesi. V fizikalnem smislu se energija ne obnavlja, temveč se iz naštetih virov stalno na novo dovaja. Električna energija v Sloveniji nenehno narašča, zaradi gospodarske rasti pa se v prihodnje pričakuje, da bo še večja. To pomeni, da bo prišlo do pomanjkanja kapacitet električne energije doma. V ta namen nastajajo novi projekti pridobivanja električne energije, ki so usmerjeni v izkoriščanje obnovljivih virov, kot so voda, veter in sonce. Po svetu je vetrna energija zelo izkoriščena, saj tehnologija vetrnic ni pretirano zahtevna, pretvorba vetrne energije v električno pa ne povzroča emisij. Čeprav je v Sloveniji zelo slabo izkoriščena, je v industriji, ki se ukvarja z vetrnimi turbinami, čedalje večji napredek, ki pa predstavlja nove možnosti za podjetja, ki se ukvarjajo s strojništvom, elektrotehniko, računalništvom in gradbeništvo.

1.2 OPREDELITEV PROBLEMA

V projektne delu bo predstavljen sodobni pristop konstruiranja vetrne turbine, ki se prične z analizo vetrnega potenciala v slovenskem območju. Prikazani bodo podatki o povprečnih in maksimalnih hitrostih vetrov v obdobju enega desetletja v krajih, ki naj bi bili najbogatejši z vetrnim potencialom. Opisane bodo tudi značilnosti vetrov, ki so prisotni na področju Slovenije in so odločilnega pomena pri izbiri kraja za postavitev vetrnic. Z analizo že obstoječih tipov vetrnic lahko tako odpravimo težave pri konstrukciji nove vetrnice. Namesto da izgubljam čas z iskanjem že obstoječih dobrih rešitev, lahko uporabimo konstrukcijske rešitve, ki so se na dejanskih modelih vetrnic izkazale za dobre. Konstruiranju vetrnice bodo namenjene vse teoretične podlage in s pomočjo sodobnih inženirskih orodij opravljene analize. Sama konstrukcija bo izdelana s pomočjo 3D modelirnega okolja, ki inženirju omogoča hiter in natančen razvoj izdelka, hkrati pa se lažje sooča s problemi in jih odpravlja že med samim konstruiranjem.

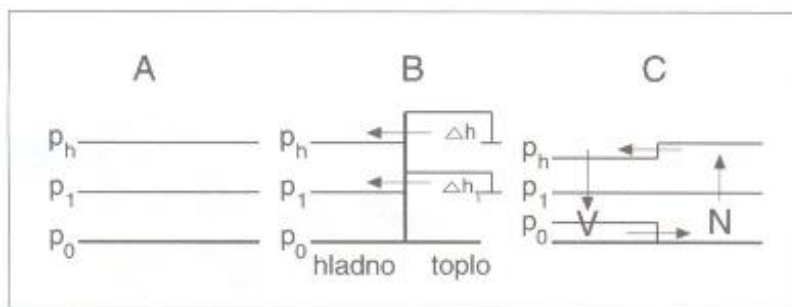
2 PREMIKANJE ZRAČNIH MAS IN NASTANEK VETROV

Zemeljska atmosfera je sestavljena iz več slojev, vendar je za nas najpomembnejša plast atmosfere, v kateri se vreme oblikuje in ustvarja – **troposfera**.

Moč vetrov je odvisna od zemeljskega površja v plasti do približno 100 m višine. Odvisna je od t. i. hrapavosti površja oz. ovir, ki so na površju in zmanjšujejo hitrost vetrov (Hau, 2006, 13).

2.1 NASTANEK VETROV

Zrak ima določeno težo, s katero pritiska na zemeljsko površje. Neposredno je z zračnim tlakom povezana tudi gostota zraka, ki se spreminja s temperaturo, kar pa pomeni, da tudi vsaka sprememba temperature povzroči spremembo tlaka (povečana temperatura povzroči zmanjšanje gostote, kar vpliva na zmanjšanje tlaka in obratno) (Kunaver, 1998, 22).



Slika 1: Segrevanje površja in nastanek vetrov

(Vir: https://sl.wikipedia.org/wiki/Ro%C5%BEEa_vetrov)

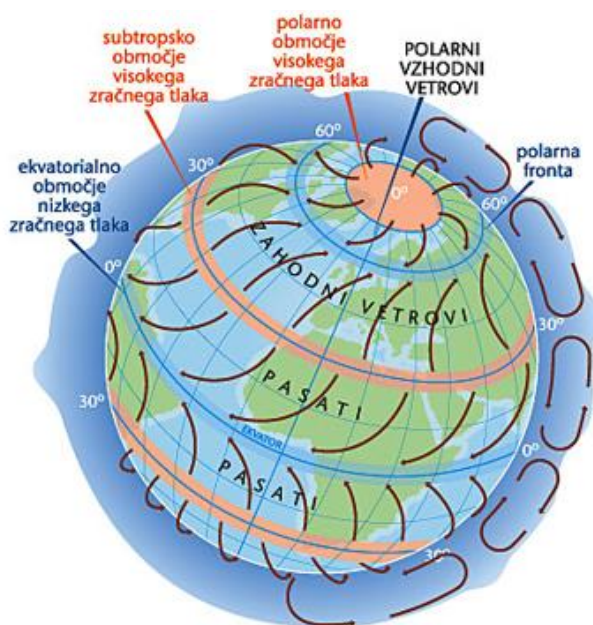
2.2 VRSTE VETROV

2.2.1 GLOBALNI VETROVI

Zrak se na ekvatorju vsak dan zelo segreva in zato se tudi dviga. Zaradi tega govorimo o ekvatorialnem območju stalnega nizkega zračnega tlaka. V višinah zrak potuje proti severu in jugu do tridesetega vzporednika, kjer se začno zračne mase spuščati proti tlam (stalno območje visokega zračnega tlaka). Delež zračnih mas se od tam pri tleh vrača proti ekvatorju. Ti vetrovi se nekoliko odklanjajo na severni poluti v desno ter na južni v levo. Do odklanjanja pride zaradi

vrtenja Zemlje in posledično nastanka Coriolisove odklonske sile. Govorimo o t. i. pasatih, ki imajo na južni polobli smer jugovzhoda, na severni pa smer severovzhoda.

Drugi del zračnih mas, ki se nakopičijo ob tridesetem vzporedniku, pa ne gre proti ekvatorju, ampak zavije naprej proti severu ali jugu. Tudi na tem območju se zaradi odklonske sile odklanjajo v levo ali desno, zato imajo okoli šestdesetega vzporednika smer zahodnih vetrov. Ob stiku hladnejših polarnih vetrov in toplejših zahodnih vetrov, ki pihajo s severa, nastane območje nizkega zračnega tlaka – **polarna fronta**. Cikloni, ki se premikajo z zahoda proti vzhodu, nastanejo prav na tem območju (Kunaver, 1998, 22).



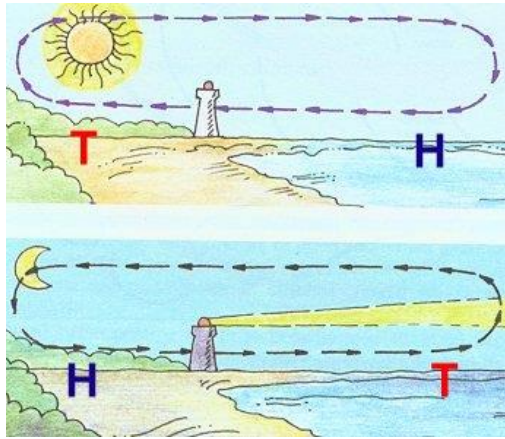
Slika 2: Planetarno kroženje zraka

(Vir: <http://www.modrijan.si/slv/content/search?SearchText=planetarno+kro%C5%BEenje>)

Vetrove, ki delujejo od višine 100 m in so v veliki meri odvisni od lastnosti površja Zemlje, imenujemo lokalni in površinski vetrovi. Kljub temu da so za vetrne elektrarne zelo pomembni globalni vetrovi, pa nikakor ne smemo zanemariti vpliva teh vetrovnih razmer, kot so:

- **Zamorec** – veter, ki piha podnevi z morja proti kopnemu. Kopno se zaradi sonca bolj segreje kot morje, zato topel segret zrak, ki se dviguje nad segretim kopnim zrakom, potuje nad morje. Ko praznino, ki pri tem nastane, zapolni hladen zrak z morja, nastane veter, ki piha z morja na kopno.

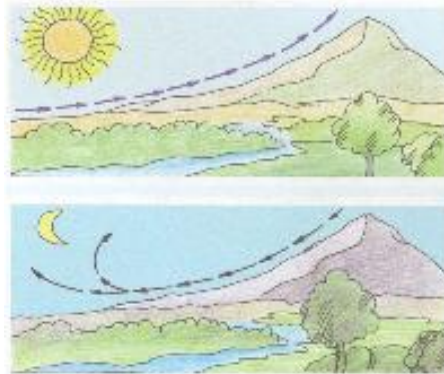
- **Kopnik** – veter, ki piha ponoči na morje. Veter nastane zaradi počasnejšega ohlajanja morja od kopnega, pri čemer se toplejši zrak nad morjem prične dvigovati in potuje nad kopno. Zaradi nižjih temperatur se tam prične spuščati in v spodnjih plasteh preide v veter, ki piha s kopnega na morje.



Slika 3: Smeri obalnih vetrov

(Vir: <http://www.o-4os.ce.edus.si/gradiva/geo/podnebje-os/z12.htm>)

- **Dolnik** – vzponski dolinski veter, ki piha predvsem podnevi po dolini navzgor proti vrhovom.
- **Gornik** – gorski veter, ki se spušča s hribov proti dolini zaradi nižjih temperatur ponoči.

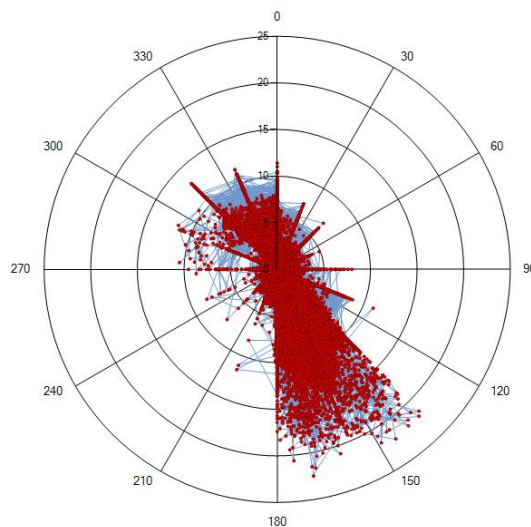


Slika 4: Smeri pobočnih vetrov

(Vir: <http://www.o-4os.ce.edus.si/gradiva/geo/podnebje-os/z12.htm>)

2.3 MERJENJE VETRA

Veter ima v vsaki točki določeno smer in hitrost. Da bi določili oba parametra, izvajamo meritve hitrosti in smeri vetra s pomočjo anemometrov na izbranih meteoroloških postajah, ki so postavljene po Sloveniji. Kako pogosto piha v določeni smeri in kakšna je takrat njegova hitrost, pa grafično prikazujemo z vetrnimi rožami. Vetrna roža je nekakšen kompas, na katerem so označene glavne nebesne smeri. Hitrosti vetrov podajamo v metrih na sekundo (m/s), lahko pa tudi v kilometrih na uro (km/h) oz. morskih miljah na uro (vozlih).



Slika 5: Prikaz vetrne rože

(Vir: <http://jj-eeti.si/veterne-elektrarne/izvajanje-meritev>)

Poleg natančnejših meritev, ki jih dobimo z meteoroloških postaj, lahko hitrost vetra približno določimo glede na učinek, ki ga povzroča na drevju in kopnem oz. na morski površini. Takšno približno hitrost lahko ocenimo s pomočjo Beaufortove lestvice jakosti hitrosti.

Hitrost [m/s]		Jakost [bf]	Naziv vetra	Učinek na kopnem
3,4	5,4	3	šibak veter	listje in vejice na drevju se ves čas gibljejo, lahke zastave plapolajo
5,5	7,9	4	zmeren veter	veter dviga prah in papir, ziblje tanjše veje
8	10,7	5	precej močan veter	zibljejo se tanjša listnata drevesa
10,8	13,8	6	močan veter	gibljejo se debele veje, sliši se žvižganje žic
13,9	17,1	7	zelo močan veter	majejo se cela drevesa, otežena je hoja proti vetru
17,2	20,7	8	viharni veter	veter lomi veje na drevju, hoja proti vetru v splošnem ni možna
20,8	24,4	9	vihar	prihaja do lažjih poškodb na stavbah; trga žlebove, ruši dimnike, odkriva opeko s streh
24,5	28,4	10	hud vihar	v notranjosti kopnega se redko pojavlja, ruje drevje, velika škoda na stavbah
28,5	32,6	11	orkanski vihar	zelo redek pojav, ki povzroča rušenje velikega obsega
32,7	56	12 – 17	orkan	opustošenje velikega obsega

Slika 6: Beaufortova lestvica jakosti hitrosti

(Vir: https://sl.wikipedia.org/wiki/Beaufortova_lestvica)

2.4 VETRNE RAZMERE V SLOVENIJI

V primerjavi z zahodno Evropo se Slovenija ne uvršča med vetrovne države. To je posledica dejstva, da leži v zmernih geografskih širinah na severni polobli, njeno površje je precej razgibano, velik vpliv pa imajo tudi Alpe, zaradi katerih leži v zavetrju za prevladujoče vetrove.

V Sloveniji se močni vetrovi pojavljajo na treh območjih:

- Na področju Primorja, Krasa in Vipavske doline se srečujemo z **burjo**, ki je značilno sunkovit veter, saj njeni sunki dosežejo hitrost tudi do 40 m/s. Piha skozi vse leto, najmočnejša pa je pozimi, ko prinaša suh in mrzel zrak. Takrat je nad severno in srednjo Evropo močno razvito področje visokega zračnega tlaka, nad Sredozemskim morjem pa področje nizkega zračnega tlaka. Običajno je burja severovzhodnik, vendar pa se lokalno lahko odklanja vse do severa in vzhodnika.
- Za področje Karavank, Logarske doline in doline Save Dolinke je značilen **severni fen**. Le-ta se pojavlja, ko je nad Sredozemljem področje nizkega zračnega tlaka, nad severno

in srednjo Evropo pa vlada področje visokega zračnega tlaka. Gre za močno sunkovit, topel veter, ki sicer zelo redko doseže rušilno hitrost.

- Kjerkoli po Sloveniji pa lahko ob nevihtah nastane kratkotrajen veter, ki piha iz vseh smeri, vendar so običajno močni le njegovi sunki. Izjemoma se lahko ta veter sprevrže v vrtnčasti veter z rušilno močjo, ki lahko odkriva strehe in lomi drevesa.

V Sloveniji imamo tudi splošne vetrove, s katerimi se srečujemo na širših območjih, kot so:

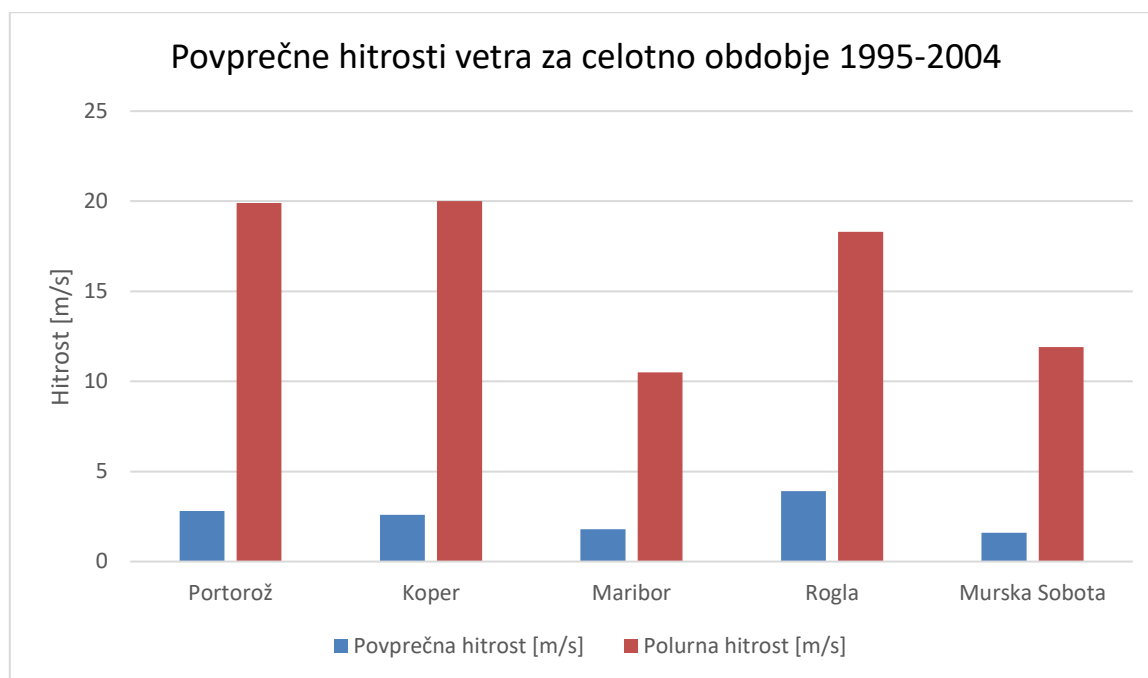
- **Severovzhodnik** – veter, ki se pojavlja na področju Prekmurja, Štajerske, Dolenjske in vzhodne Slovenije ter v Primorju, kjer se odraža kot burja.
- **Jugozahodnik** – veter, ki piha v osrednji Sloveniji, Prekmurju, na Štajerskem in Dolenjskem, ob obali pa se odraža kot jugo.
- **Sever** – ta veter srečujemo po vsej Sloveniji. Gre za vetrove s stalno smerjo, ki lahko pihajo tudi več dni.

V naslednji tabeli sta prikazani povprečna hitrost in največja polurna povprečna hitrost (merilo za najmočnejši, dalj časa trajajoč veter). Kot je znano, hitrost vetra običajno z višino narašča, kar je razvidno z grafa (najvišja povprečna hitrost je na Rogli, najnižja pa v Murski Soboti). Najvišje polurne povprečne hitrosti pa so bile izmerjene na Primorskem, kjer se kaže vpliv burje (<https://sl.wikipedia.org/wiki/Veter>).

Tabela 1: Povprečna hitrost in največja polurna hitrost v obdobju 1995-2004

(Vir: <http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2007/027.pdf>)

	Povprečna hitrost [m/s]	Polurna hitrost [m/s]
Portorož	2,8	19,9
Koper	2,6	20
Maribor	1,8	10,5
Rogla	3,9	18,3
Murska Sobota	1,6	11,9



Slika 7: Grafični prikaz podatkov iz tabele 1

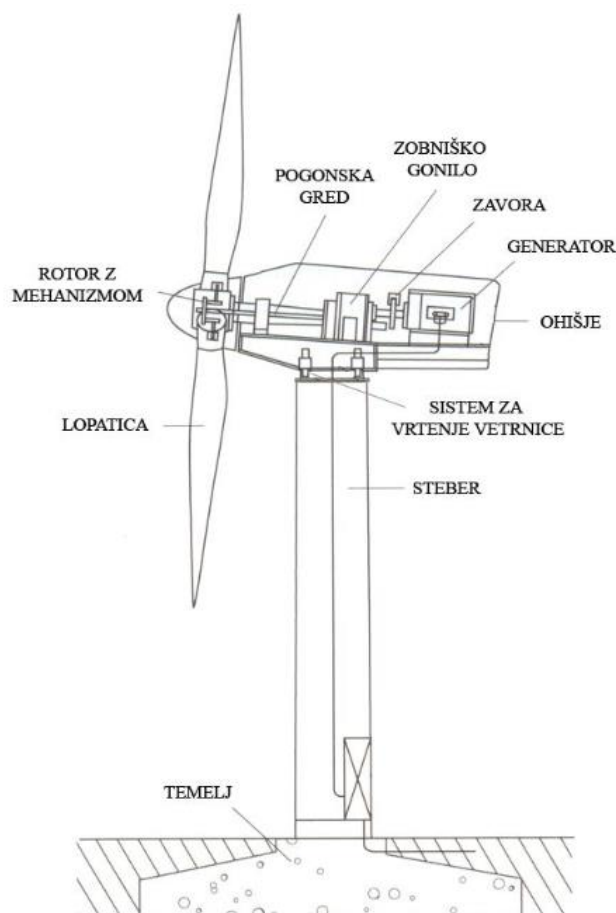
(Vir: <http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2007/027.pdf>)

3 TEORETIČNE OSNOVE VETRNIH TURBIN

Obstaja veliko različnih poti, kako pretvoriti kinetično energijo vetra v mehansko delo. Pri odločanju, kako bomo pretvarjali vetrno energijo v mehansko delo, se je potrebno zavedati, da ima pri tem glavno vlogo rotor turbine. Kljub vsemu pa rotor ni edina komponenta vetrne turbine. Prav tako so zelo pomembni mehansko-električni pretvorniki energije, kot so zobniški prenos, generator, sistemi za kontrolo itd. (<http://jj-eeti.si/veterne-elektrarne/izvajanje-meritev>, 2014).

Sestavni deli vetrnic

V sodobnem svetu nastajajo konstrukcije, ki jih zaradi omejitev pri transportu nikakor ne moremo skonstruirati tako, da bi jih lahko na željeni cilj pripeljali v enem kosu. Med tovrstne konstrukcije vsekakor spadajo tudi vetrnice, ki jih moramo sestaviti na kraju, kjer bodo opravljale svojo osnovno funkcijo.



Slika 8: Sestavni deli vetrnice

(Vir: <http://www.modrijan.si/slv/content/search?SearchText=planetarno+kro%C5%BEenje>)

- a) **STEBER OZ. STOLP** je nosilni element generatorja vetrne turbine. Njegova osnovna naloga je, da zagotovi stabilnost in nemoteno delovanje vetrnice na tej višini. Običajno so to betonske, železobetonske ali jeklene konstrukcije, ki se upirajo vetru. Večje izvedbe stolpov so običajno votle, tako da se lahko po njih povzpemo do vrha, kjer se nahaja večina bistvenih delov turbine.
- b) **OHIŠJE** ima aerodinamično obliko in varuje glavne dele vetrnice (generator, zobniške prenose, sklopko, zavorni sistem itd.) pred zunanjimi vplivi.
- c) **ROTOR** običajno sestavlja nosilna kapa, na katero so pritrjene ena ali več lopatic. Pri načrtovanju lopatic inženirji iščejo kompromis med ceno, težo, žilavostjo materiala, obliko, ki daje boljši izkoristek, in zahtevnostjo izdelave. Običajno so lopatice narejene iz materialov, kot so: les, steklena vlakna, karbonska vlakna ali pa tudi aluminij.
- d) **ZOBNIŠKO GONILO – MULTIPLIKATOR** je vezni člen med generatorjem in rotorjem. Zaradi relativno majhne hitrosti, ki jo dosežemo z vrtenjem rotorskih lopatic, lahko le-to s pomočjo ojačevalnika hitrosti povečamo na vrednost, ki jo potrebuje električni generator za svoje optimalno delovanje.
- e) **ZAVORNI SISTEM** se uporablja v ekstremnih situacijah, ko veter doseže visoke hitrosti in je potrebno zmanjšati obrate ali pa v času vzdrževanja, ki zahteva, da sistem miruje.
- f) **GENERATOR** skrbi za pretvorbo mehanske energije, ki jo dobimo s pogonske gredi, v električno energijo. Generatorji, ki se uporabljajo v vetrnicah, delujejo na principu elektromagnetne indukcije, ki nastane zaradi premikanja vodnika po magnetnem polju.
- g) **SISTEM ZA USMERJANJE VETRNICE V VETER** ves čas komunicira preko regulatorja z merilnikom smeri in hitrosti. S pomočjo podatkov o smeri in hitrosti vetra prilagaja kot lopatic, tako da dosežemo čim bolj optimalno delovanje vetrne turbine.
- h) **MERILNIK SMERI IN HITROSTI VETRA**, ki mu z drugo besedo pravimo tudi anemometer, je v večini primerov postavljen na vrhu ohišja vetrnice ter sproti pošilja informacije o smeri in hitrosti vetra v sistem za usmerjanje v veter.

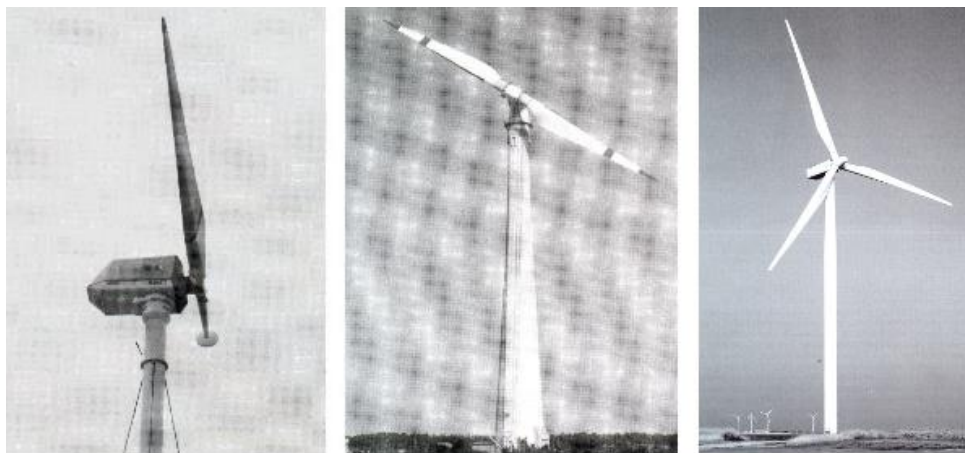
3.1 VRSTE VETRNIC

Skozi stoletja so se razvijali različni tipi vetrnic, vendar se je razvoj v glavnem omejil na dve osnovni vrsti vetrnic, ki se med seboj razlikujeta po položaju osi vrtenja rotorja. Vse kasnejše rešitve so bile nekakšne izpeljanke oz. izboljšane rešitve obstoječih (<http://jj-eeti.si/veterne-elektrarne/izvajanje-meritev>, 2014).

Vetrnice z vodoravno osjo vrtenja (HAWT)

- a) **Počasi tekoče vetrnice** obratujejo pri nižjih hitrostih vetra in imajo večje število lopatic (osem ali več). Ker običajno obratujejo na področjih, kjer je slabši vetrni potencial, in se zaradi tega počasneje vrtijo, kljub vsemu ustvarjajo velik moment na pogonski gredi. Zaradi omenjenih lastnosti jih uporabljamo v glavnem na odročnih krajih, kjer ni elektrike, ali pa služijo kot sistemi za črpanje vode.

- b) **Hitro tekoče vetrnice** običajno potrebujejo za zagon hitrosti vetra, ki so večje od 4 m/s. Sem spadajo vetrnice z enim, dvema ali največ tremi listi, ki dosegajo svoje nazivne moči pri hitrostih vetra med 10 m/s in 15 m/s. Čeprav je njihova izdelava cenejša, se zaradi dejavnikov, kot so hrup in slabši izkoristek, niso uveljavile na tržišču. Dvolopatični rotorji so v primerjavi z rotorji s tremi listi cenejši, vendar pa za doseganje enakih moči potrebujejo večjo vrtilno hitrost, kar povzroča večji hrup. Med vsemi tremi tipi so vetrnice s tremi listi najdražje, vendar so se zaradi enakomernejših obremenitev, predvsem na rotorju, med vsemi najbolj uveljavile.



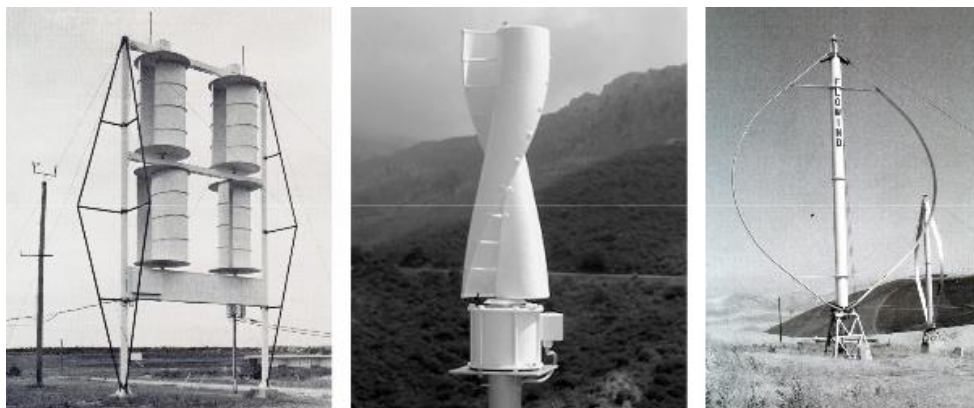
Slika 9: Hitro tekoče vetrnice z enim, dvema in tremi listi

(Vir: Hau Erich. *Wind Turbines*: Springer – Verlag Belin Heidelberg, 2006)

Vetrnice z navpično osjo vrtenja (VAWT)

Glavna prednost sistemov z navpično osjo v primerjavi s sistemi z vodoravno osjo je v tem, da je njihovo delovanje neodvisno od smeri delovanja vetra. Omenjena prednost pa se lahko v določenih primerih izkaže tudi kot slabost, saj je pri močnih vetrovih potrebno tovrstne sisteme zavirati.

- a) **Savoniusov rotor** je prikazan na sliki 10. Sestavljen je iz dveh vertikalnih cilindričnih polovic. Ena polovica cilindra je konveksne oblike, druga pa je konkavna. Do vrtenja rotorja pride zaradi razlike tlakov oz. sil upora na konveksni in konkavni strani, pri čemer je tlak na konkavni strani večji (obstaja pa tudi mrtva točka, kjer je smer vetra 180°).
- b) **Windside rotor** je novejša izpeljanka iz Savoniusovega rotorja z lopaticama v obliki spiralnega valja. Zaradi spiralne oblike valja je njihovo delovanje neodvisno od smeri in moči vetra. Zanimivo za njih je, da delujejo že pri zelo majhnih hitrostih vetra (2–3 m/s), zdržijo pa tudi, ko veter doseže orkanske hitrosti 60 m/s.
- c) **Darriesov rotor** sodi med najbolj razširjene izvedbe vetrnic z navpično osjo vrtenja. Ima ukrivljene lopatice, in sicer z namenom, da bi se zmanjšale obremenitve, ki se pojavijo na konstrukciji kot posledica centrifugalne sile na obodu. Tudi Darriesov rotor deluje neodvisno od smeri vetra, ampak za zagon potrebuje dodatno silo, ki jo ustvarimo s pomočjo zaganjalnika oz. mu lahko celo dodamo Savoniusov rotor.



Slika 10: Savoniusov, Windside in Darriesov rotor

(Vir: Hau Erich. Wind Turbines: Springer – Verlag Belin Heidelberg, 2006)

4 KONSTRUIRANJE VETRNE TURBINE

Vetrno turbino smo snovali na podlagi teoretičnih osnov in praktičnih napotkov iz literature. Na podlagi rezultatov že obstoječih vetrnih turbin smo skonstruirali sodobno vertikalno vetrnico, ki bi delovala pri najnižjih hitrostih vetra.

Za modeliranje geometrije bi lahko uporabljali različna CAD-orodja, ki uporabniku omogočajo, da dobi tridimenzionalni računalniški model. V našem primeru je bil uporabljen program SolidWorks 2013 – **računalniški program za 3D-modeliranje**, ki uporabniku ponuja prijazno modelirno okolje, hkrati pa zelo hitro dobimo geometrijo, ki jo lahko uporabimo tudi za kasnejše numerične simulacije.

4.1 KONCEPT VERTIKALNE VETRNE TURBINE

Pri sami konstrukciji je potrebno najprej pojasniti, da gre za prototipno izvedbo vetrnice, v katero smo skušali vključiti določene novosti, ki bi povečale izhodno moč pri nižjih hitrostih vetra. Če se bodo potrebne meritve, ki bodo izvedene, v prihodnje izkazale za dobre, bomo konstrukcijo vetrne turbine v končni fazi tudi povečali.

Da bi dosegli željene cilje, smo si konstrukcijo zamislili na naslednji način:

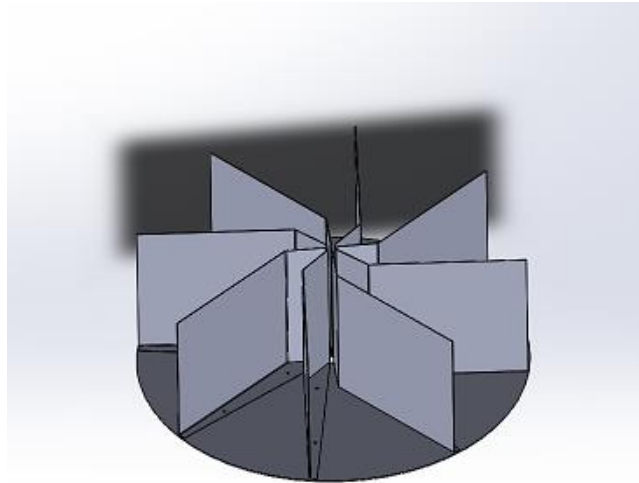
- Lopatice rotorja in statorja so iz aluminija, saj je zelo lahek, kar pripomore pri lažjem zagonu rotorja. Aluminij (H22) smo izbrali tudi zato, ker se ga da dobro oblikovati, ob tem pa je tudi dovolj tog.
- Držalo spodnjega ležaja, noge, plošči rotorja in statorja so iz nerjavečega jekla (1.403). Izbrali smo ga predvsem zaradi njegove specifične teže, nosilnosti in togosti.
- Podnožje, ojačitev držala za spodnji ležaj in držalo za zgornji ležaj smo izdelali iz črne pločevine (S355MC), prav tako zaradi njene specifične teže in cenovne ugodnosti.
- Ohišji ležajev smo izdelali s pomočjo CNC-stroja.

4.2 KONSTRUIRANJE ROTORJA TURBINE

Že teorija nam pokaže, da ni možno izkoristiti vse energije, ki s pomočjo vetrov priteče na lopatico rotorja. Dejansko se pri pretvorbi kinetične energije vetra, ki se pretvarja preko

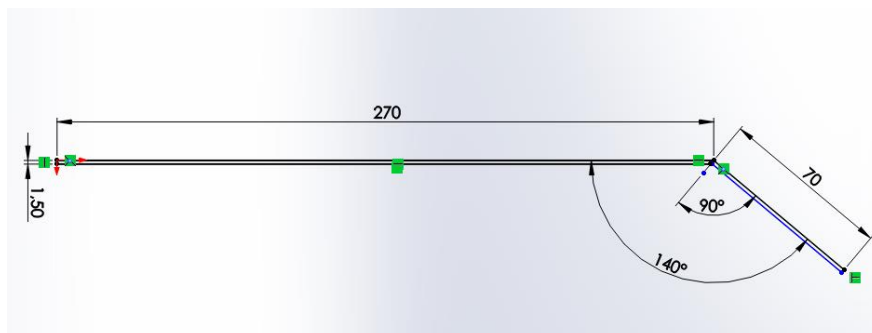
profiliranih lopatic v rotacijsko gibanje rotorja, izgubi največ energije. Zaradi omenjenega razloga so inženirji skušali na različne načine izboljšati izkoristek v tem območju.

Tudi mi smo se pri razvijanju vetrnice soočali s podobnimi problemi, vendar smo dobre rešitve, ki so bile že uporabljene in preizkušene, skušali vključiti v našo konstrukcijo. Preden smo izbrali velikost in površino lopatice, smo morali v grobem definirati največje mere celotne vetrne turbine.



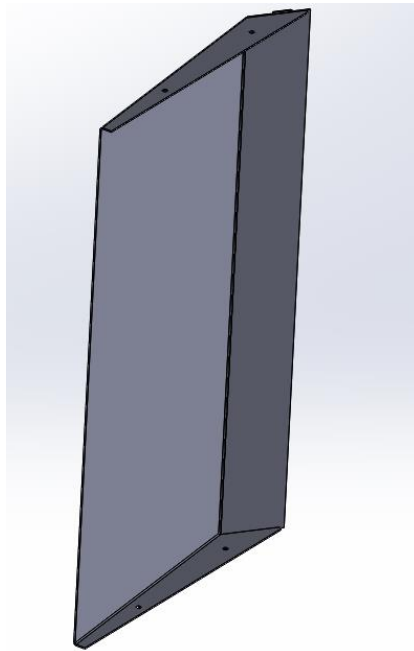
Slika 11: Prerez rotorja z lopaticami

(Osebni vir)



Slika 12: Lopatica rotorja (skica)

(Osebni vir)

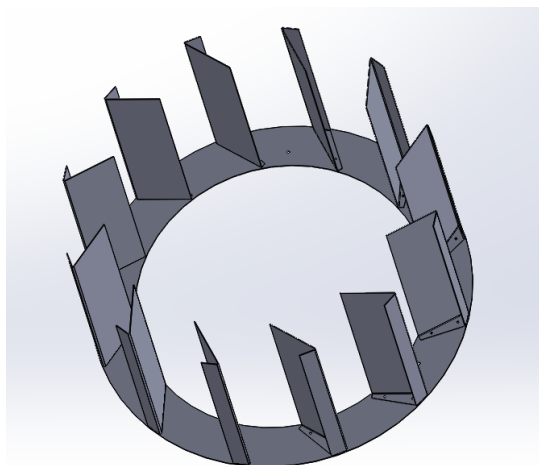


Slika 13: Lopatica rotorja (3D)

(Osebni vir)

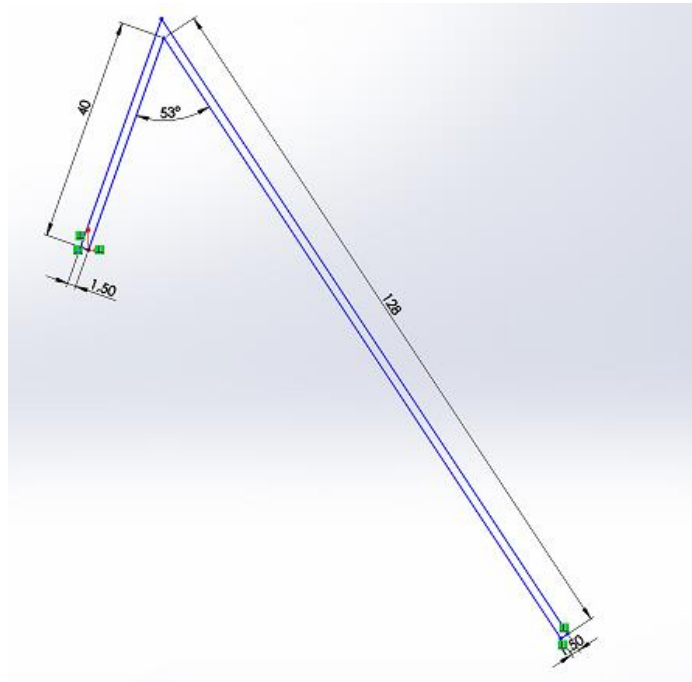
4.3 KONSTRUIRANJE STATORJA

V primeru naše vetrne turbine ima stator zelo velik pomen, saj usmerja veter na lopatice rotorja. Poleg samega usmerjanja vetra imajo lopatice na statorju zakrivljeno obliko, ki je namenjena za ustvarjanje podtlaka med rotorjem in statorjem.

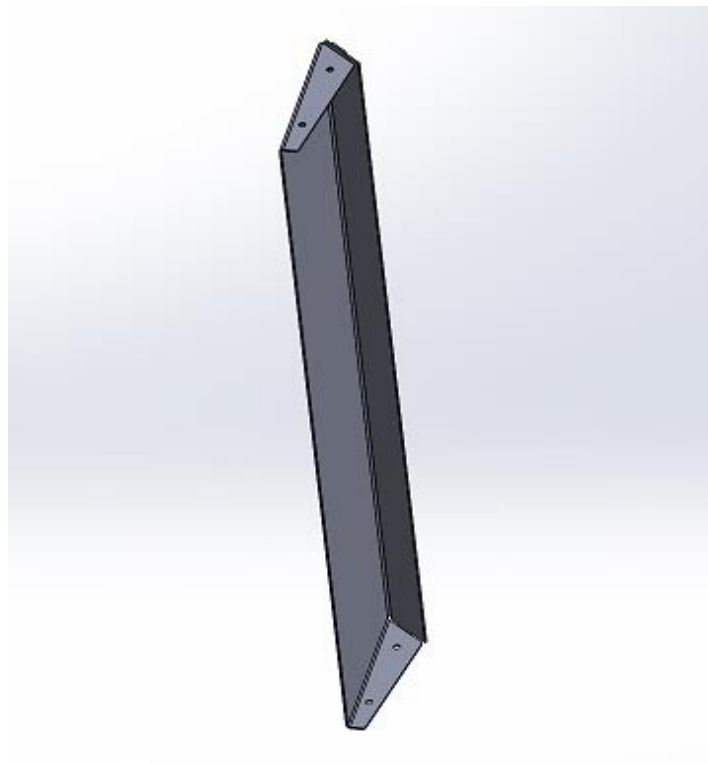


Slika 14: Prerez statorja z lopaticami

(Osebni vir)



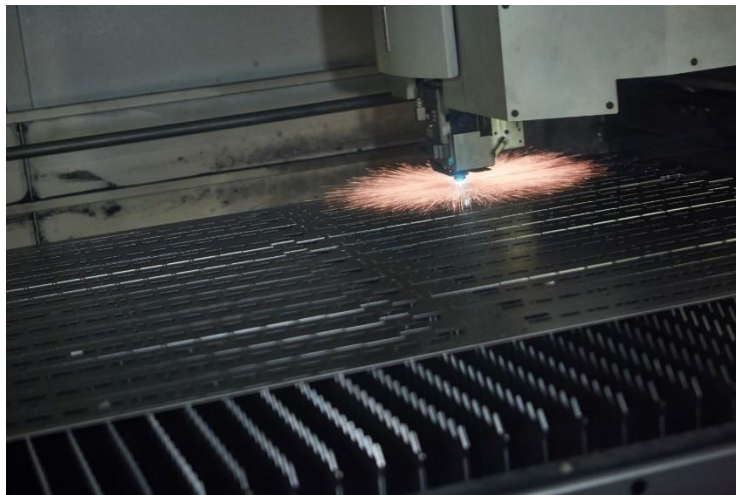
Slika 15: Lopatica statorja (skica)
(Osebni vir)



Slika 16: Lopatica statorja (3D)
(Osebni vir)

5 SESTAVLJANJE VETRNIC

Po končani konstrukciji v računalniškem programu je sledil razrez, krivljenje in sestavljanje naše vetrne turbine. Razrez pločevine je opravil programsko voden laserski rezalnik (ByStronic BySpeed 4000), krivili pa smo jo s pomočjo 6-osnega stroja za krivljenje pločevine (ByStronic Xpert 40).



Slika 17: Razrez pločevine na laserskem rezalniku

(Osebni vir)

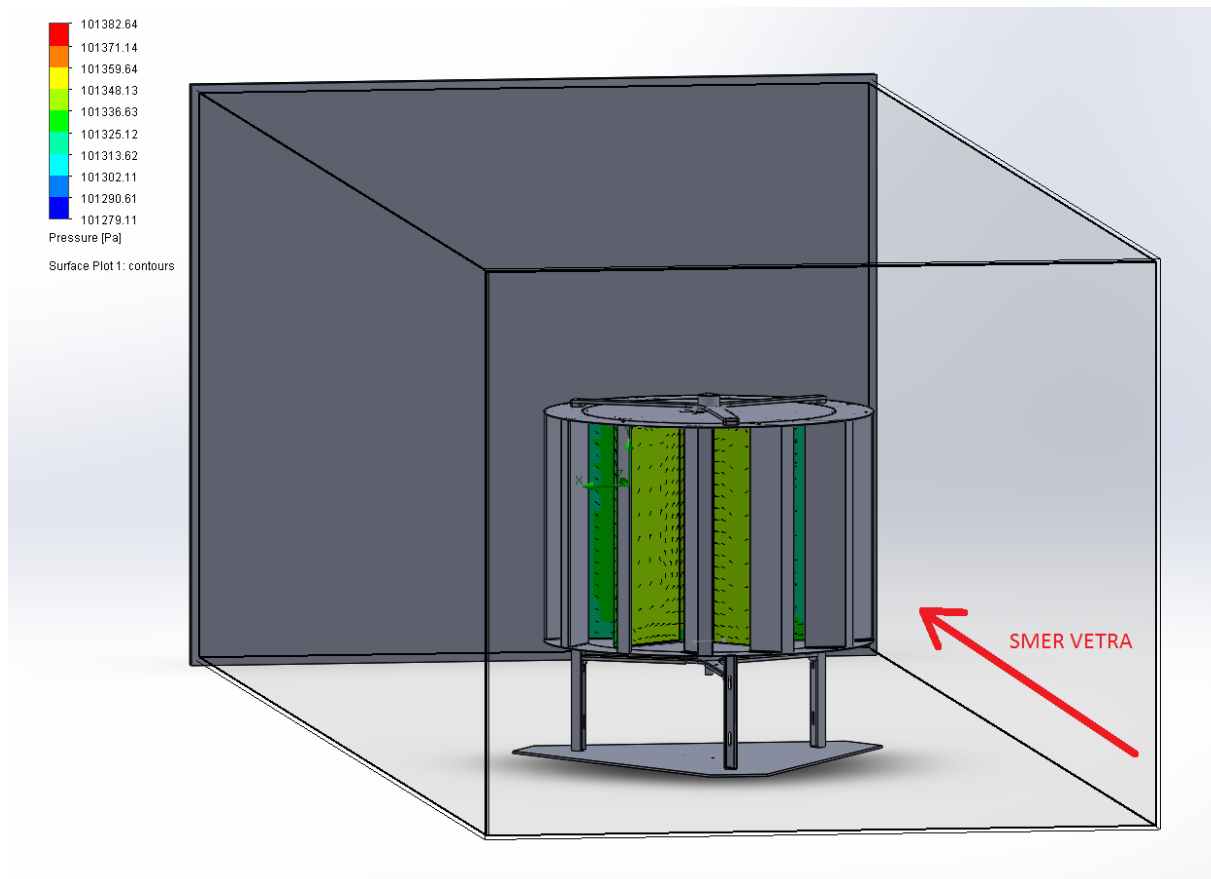


Slika 18: Stroj za krivljenje pločevine

(Osebni vir)

6 SIMULACIJA

V programskem paketu **SolidWorks Flow Simulation** smo naredili simulacijo sile na lopatice rotorja.



Slika 19: Simulacija sile na lopatice rotorja

(Osebni vir)

Simulacije običajno zahtevajo veliko časa, ki je odvisen od hitrosti računalnika. Vse je odvisno tudi od velikosti konstrukcijskih komponent in željene resolucije. V našem primeru je bil uporabljen računalnik s 4-jedrnim procesorjem Intel® Core™2 z zmogljivostjo 2.83 GHz. Simulacija je trajala približno 10 min. Z opravljeno simulacijo smo prišli do ugotovitve, da bi se v teoriji vetrnica morala zavrteti.

7 ZAKLJUČEK

V današnjem času, ko tehnika iz dneva v dan bolj napreduje, želimo čim bolj izkoristiti vsako sekundo časa, ki preteče od razvoja do fizične izvedbe izdelka. Zato se inženirji poslužujejo sodobnih programskih orodij, ki omogočajo razvoj izdelkov, numerične analize itd. S pomočjo teh orodij skušajo izdelke narediti zanesljivejše, lažje izvedljive, skratka cenejše. V projektni nalogi smo s pomočjo računalniškega programa za 3D-modeliranje **SolidWorks 2013** izdelali konstrukcijo vertikalne vetrne turbine. Pri konstruiranju smo se srečevali s različnimi problemi, ki smo jih kar se da hitro in učinkovito reševali. Probleme zaradi montaže smo odpravili že znotraj 3D modelirnega okolja, kajti celotno vetrno turbino smo pred fizično izdelavo sestavili v samem programu. Pri tem smo ugotovili, kje so najbolj problematična mesta, hkrati pa smo lahko preizkusili, kako se posamezni deli, ki smo jih skonstruirali ločeno, med seboj ujemajo. Posebno pozornost smo posvetili samemu statorju vetrne turbine, ki smo ga s pomočjo programskega paketa za numerične analize tokovnih razmer tudi preračunali. Kot nadgradnjo naše projektne naloge bi bilo smiselno poleg statorja preračunati tudi celotno vetrno turbino skupaj z rotorji in rezultate numerične analize primerjati z meritvami, izvedenimi na prototipu vetrne turbine. Takšna analiza pa je precej zahtevna in terja obsežno inženirsko znanje.

8 SEZNAM UPORABLJENIH VIROV

- [1] HAU, E.. *Wind Turbines*. Springer – Verlag Belin Heidelberg, 2006.
- [2] KUNAVER, J. et al. *Obča geografija*. Ljubljana: DZS, 1998.
- [3] ŽALAR, Z. *Obnovljivi viri energije*. Ljubljana: BOOKSTORE.SI, 2016.
- [4] *Beaufortova lestvica* (online). (citirano 16. 3. 2017). Dostopno na naslovu: https://sl.wikipedia.org/wiki/Beaufortova_levstvica.
- [5] *Kroženje zraka* (online). (citirano 9. 2. 2017). Dostopno na naslovu: https://sl.wikipedia.org/wiki/Planetarno_kro%C5%BEenje_zraka.
- [6] *Planetarno kroženje zraka* (online). 2010. (citirano 16. 3. 2017). Dostopno na naslovu: <http://www.modrijan.si/slv/content/search?SearchText=planetarno+kro%C5%BEenje>.
- [7] *Podnebje* (online). (citirano 6. 4. 2017). Dostopno na naslovu: <http://www.o-4os.ce.edus.si/gradiva/geo/podnebje-os/zt2.htm>.
- [8] *Roža vetrov* (online). (citirano 10. 2. 2017). Dostopno na naslovu: https://sl.wikipedia.org/wiki/Ro%C5%BEa_vetrov.
- [9] *Veter* (online). (citirano 10. 2. 2017). Dostopno na naslovu: <https://sl.wikipedia.org/wiki/Veter>
- [10] *Vetrna elektrarna* (online). 2014. (citirano 10. 2. 2017). Dostopno na naslovu: <http://jj-eeti.si/veterne-elektrarne/izvajanje-meritev>.
- [11] *Vetrovnost v Sloveniji leta 2006* (online). (citirano 17. 3. 2017). Dostopno na naslovu: <http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2007/027.pdf>.