

ŠOLSKI CENTER VELENJE
ELEKTRO IN RAČUNALNIŠKA ŠOLA
Trg mladosti 3, 3320 Velenje
MLADI RAZISKOVALCI ZA RAZVOJ ŠALEŠKE DOLINE

RAZISKOVALNA NALOGA

**IZRABA VETRNE ENERGIJE S PRIMERJAVO ZMOGLJIVOSTI HITRO IN
POČASNO VRTEČIH VETRNIC**

Tematsko področje: ELEKTROTEHNIKA, ELEKTRONIKA IN ROBOTIKA

Avtorja: Boris Lesnjak 4. Letnik; Urh Pušnik, 4. letnik

Mentor: mag. Janko Malovrh, univ. dipl. ing. elektrotehnike

Velenje, 2011

Raziskovalna naloga je bila opravljena na Šolskem centru Velenje.

Mentor: mag. Janko Malovrh, univ. dipl. ing. elektrotehnike

Datum predstavitve:

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD ŠCV-ERŠ, 2010/2011

KG energija vetra/ hitro vrteča vetrnica/ počasno vrteča vetrnica

AV LESNJAK, Boris/ PUŠNIK, Urh

SA MALOVRH, Janko

KZ 3320 Velenje, SLO, Trg Mladosti 3

ZA Šolski center Velenje, Elektro in računalniška šola

LI 2011

IN IZRABA VETRNE ENERGIJE S PRIMERJAVO HITRO IN POČASNO VRTEČIH VETRNIC

TD RAZISKOVALNA NALOGA

OP VI, 25, 28, 1

IJ sl

JI sl/en

AI V današnjem času se vedno več ljudi zaveda negativnega vpliva na okolje, ter nepopravljive škode, ki jo povzroča uporaba fosilnih goriv. Zaradi teh razlogov so ljudje dandanes primorani investirati svoje znanje in sredstva v razvoj obnovljivih virov energije. Obnovljivi viri energije vključujejo vse vire energije, ki jih zajemamo iz stalnih naravnih procesov, kot so sončno sevanje, veter, vodni tok v rekah ali potokih (hidroenergija), fotosinteza, s katero rastline gradijo biomaso, bibavica in zemeljski toplotni tokovi (geotermalna energija). Cilj oziroma namen najine raziskovalne naloge je predvsem ta, da preizkusiva delovanje, ter učinkovitost počasi vrteče vetrnice s 6 elisami in hitro vrteče vetrnice s 3 elisami, ter primerjava njuni učinkovitosti.

KEY WORDS DOCUMENTATION

CX wind power/ fast rotating wind turbine/ slow rotating wind turbine

AU LESNJAK, Boris/ PUŠNIK, Urh

AA MALOVRH, Janko

PP 3320 Velenje, SLO, Trg Mladosti 3

PB Šolski center Velenje, Elektro in računalniška šola

PY 2011

TI USAGE OF WIND POWER WITH COMPARISON BETWEEN FAST AND SLOW ROTATING WIND TURBINES

DT secondary school research work

NO VI, 25, 28, 1

LA sl

AL sl/en

AB Nowadays, more and more people are aware of the negative impact on the environment, and irreparable damage caused by the use of fossil fuels. For these reasons, people are now forced to invest their knowledge and resources to develop renewable energy sources.

Renewable energy includes all energy sources, which are collected from ongoing natural processes, such as solar radiation, wind, water flow in rivers or streams (hydro), photosynthesis by which plants build biomass, tides and terrestrial heat flow (geothermal energy) . The aim and purpose of our research work is primarily to test operation and effectiveness of slowly rotating wind turbine with 6 blades and fast rotating wind turbines with 3 blades, and compare their effectiveness.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	III
KEY WORDS DOKUMENTATION.....	IV
KAZALO VSEBINE.....	V
KAZALO SLIK.....	VI
KAZALO TABEL.....	VI

KAZALO VSEBINE

1. Uvod.....	1
2. Zgodovina	2
3. Izkoriščanje vetrne energije v Sloveniji.....	3
4. Planetno gibanje zračnih mas.....	4
5. Vetrne razmere v Sloveniji	7
6. Izraba vetrne energije v Sloveniji	9
7. Merilnik hitrosti in smeri vetra	9
8. Proizvod vetrnice v mehansko delo:	11
9. Moč vetra in največja moč vetrnice:	12
10. Glavni elementi vetrnic:.....	13
11. Vrste vetrnic.....	15
11.1. Vetrnice z navpično osjo:.....	17
12. Ekološki in ekonomski vidiki vetrne elektrarne:	19
12.1. Statistični podatki za EU.....	20
13. Izdelava vetrnice	20
13.1. Nosilec generatorja	21
13.2. Plošča za pritrditev elis	22
13.3. Prirobnica	22
13.4. Elisa.....	23
13.5. Vetrnica- končni izdelek	23
14. Primerjava učinkovitosti med hitro vrtečo vetrnico in počasno vrtečo vetrnico	24
15. Rezultati in izsledki.....	24

16. Zaključek.....	26
17. Zahvala.....	26
18. Viri in literatura.....	26

KAZALO SLIK

Slika 1: Jadrnica, katero poganja energija vetra.....	2
Slika 2: Starodavni mlin na veter na Nizozemskem.....	2
Slika 3: Klopotec.....	3
Slika 4: Črpalka v solinah.....	3
Slika 5: Vetrnica na Kredarici.....	4
Slika 6: Razdelitev ovoja atmosfere.....	5
Slika 7: Gibanje zraka glede na zemljepisno dolžno.....	5
Slika 8: Vpliv vrtenja zemlje na smer vetrov.....	6
Slika 10: Povprečna letna hitrost vetra v Sloveniji 50 m nad tlemi.....	8
Slika 9: Povprečna letna hitrost vetra v Sloveniji 10 m nad tlemi.....	8
Slika 11: Krilni anometer.....	9
Slika 12: Propelerski anometer.....	9
Slika 13: Roža vetrov.....	9
Slika 14: Notranjost vetrnice.....	14
Slika 15: Počasi vrteča vetrnica.....	16
Slika 16: Vetrnice z dvema lopaticama.....	17
Slika 17: Vetrnica s tremi lopaticami.....	17
Slika 18: Savoniusov rotor.....	18
Slika 19: Wind side rotor.....	18
Slika 20: Derreiusov rotor.....	18
Slika 21: Primerjava med rotorji.....	19
Slika 22: Nosilec.....	21
Slika 23: Plošča.....	22
Slika 24: Prirobnica.....	22
Slika 25: Elisa.....	23
Slika 26: Vetrnica- končni izdelek.....	23
Slika 27:Preizkus s 6 elisami.....	25
Slika 28: Preizkus s 3 elisami.....	25

KAZALO TABEL

Tabela 1: Tabela učinkovitosti.....	24
-------------------------------------	----

1. Uvod

Izkoriščanje vetra, kot vira energije, je bilo poznano že več tisočletij nazaj. Že pred več kot 5000 leti so Egipčani izkoriščali veter za pogon ladij. Kasneje se je veter uporabljal za pogon mlinov na veter. Ponekod so tovrstne mline uporabljali za črpanje vode. Izum parnega stroja v 18. stoletju je vsaj za sto let zmanjšal pomen vetra kot energijskega vira, hkrati pa tudi zanimanje za njegovo izrabo. Šele zavedanje, da so nekateri viri energije omejeni, je zopet obudilo zanimanje za izrabo vetra. Danes veter s pomočjo vetrnic izkoriščamo predvsem za pridobivanje električne energije.

Raziskovalna naloga zajema proučevanje izkoriščanja vetrne energije z vetrnicami. Raziskovala sva kako je z izkoriščanjem vetrne energije v Sloveniji in kako po svetu. V raziskovalni nalogi sva navedla kako veter nastane. Opisala sva merilnike vetra in podala nekaj formul s katerimi lahko izračunamo izkoristek in moč vetra na podlagi hitrosti ter višine vetrnice. V nalogi so opisani tudi elementi večjih vetrnic, vrste vetrnic in primerjava izkoristka med njimi. Raziskala pa sva tudi ekološke in ekonomske vidike za postavitev vetrnice.

Učinkovitost vetrnice sva preizkusila na konkretnem primeru. Izdelala sva vetrnico, katera je pritrjena direktno na generator električne napetosti. Vetrnica je izdelana tako, da ima možnost spremembe števila elis in se lahko uporablja kot hitro vrteča vetrnica (3 elise), ali pa kot počasni vrteča vetrnica (6 elis). Vetrnico sva preizkušala pri točno določeni hitrosti vetra, ter primerjala učinkovitost obeh izvedb.

2. Zgodovina

Prvi so vetrno energijo uporabljali Egipčani. Pred približno 5 tisoč leti so že uporabljali jadrnice. Prve jadrnice so imele preprosta štiri kotna jadra. Nato so Arabci naredili jadrnice s trikotnimi jadri in se naučili jadрати proti vetru. V 7. stoletju so Vikingi prepluli Atlantik, tako so z jadrnicami odkrivali nove svetove.



Slika 1: Jadrnica, katero poganja energija vetra.

Šele kasneje so začeli energijo vetra uporabljati na kopnem. Pred 2000 leti so na Kitajskem, v Afganistanu in v Perziji za pogon namakalnih koles in za mletje žit uporabljali vetrnice.

V Evropi so mline na veter začeli izdelovati v 12. stoletju. Na začetku so ročno usmerjali vetrnico proti vetru, vendar so v 18. stoletju začeli delati vetrnice z repkom, ki je samodejno obračala glavno kolo v smeri vetra. Na Nizozemskem so mline uporabljali za mletje žita in za črpanje morske vode v kanale ter žaganje lesa. Med leti 1608 in 1612 so na Nizozemskem s 26 vetrnicami izsušili jezero Beerster. Z mlini na veter so kasneje poganjali tudi transmisije v industrijskih obratih. Okoli leta 1850 je v Evropi delovalo več ko 50.000 vetrnic. Tudi izum parnega stroja gradnje vetrnic ni ustavil. Tako je v začetku 20. stoletja še vedno delovalo okoli 10.000 vetrnic.



Slika 2: Starodavni mlin na veter na Nizozemskem.

Američani so konec devetnajstega stoletja že gradili mline na veter. Prvo vetrnico so zgradili v Windmill Pointu v Virginiji. Med 1880 in 1930 naj bi v ZDA delovalo 6,5 milijona različnih naprav na veter.

Leta 1931 je bila ob Kaspijskem jezeru postavljena vetrnica za proizvodnjo električne energije z močjo 100 kW. Leta 1941 pa so v Vermontu zgradili vetrnico z močjo 1,25 MW.

Kasneje je zanimanje za pogon z uporabo vetra zaradi poceni nafte nekako zamrlo. Leta 1970 je svetovna naftna kriza ponovno obudila zanimanje za izrabo energije vetra.

3. Izkoriščanje vetrne energije v Sloveniji

V Sloveniji so v 16. stoletju gradili mline na veter med rekama Muro in Dravo (Haloze, Slovenske gorice, Boč). Vendar so ti mlini v začetku 20. stoletja propadli in niso ohranjeni.

V poznem poletju vinogradniki postavijo v vinograde klopotce za odganjanje ptic.



Slika 3: Klopotec.

Na solinah so uporabljali vetrno energijo kot vodno črpalko. Prve vetrne črpalke so postavili sredi devetnajstega stoletja. Vetrne črpalke so delovale z uporabo platnenih kril, nameščenih na vodoravno os.



Slika 4: Črpalka v solinah.

Poznana je tudi vetrnica v Triglavskem narodnem parku, ki deluje že kar nekaj let in oskrbuje planinsko kočjo na Kredarici z električno energijo.

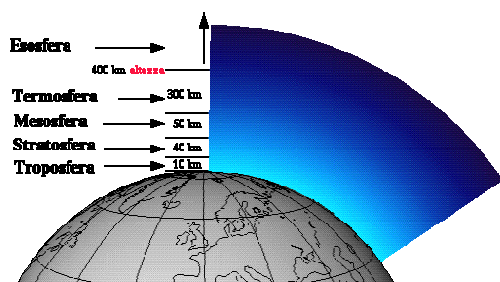


Slika 5: Vetrnica na Kredarici.

Danes se za proizvodnjo električne energije uporabljajo vetrnice, ki so zgrajene na stolpih visokih nad 100m. Razvoj tehnologij za izkoriščanje vetrne energije gre v smeri gradnje velikih skupin vetrnic. Sedaj že nekaj časa potekajo meritve vetrnega potenciala za postavitev prve vetrne elektrarne na Volovji rebri oziroma na nekaterih drugih planotah v JZ Sloveniji.

4. Planetno gibanje zračnih mas

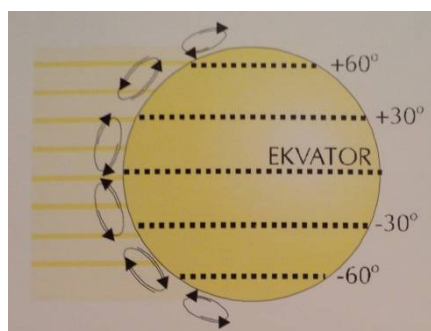
Zemeljska atmosfera je plinast ovoj nad površjem, ki ga zadržujejo sile gravitacije. Ovoj razdelimo na več slojev – na najnižji pas troposfero, v kateri se "dogaja vreme", saj se v njej pojavljajo padavine in zračni tokovi. Sledijo bolj umirjene stratosfera, mezosfera, pas ioniziranega zraka ter ionsfera. V ionsferi se absorbirajo nevarni ultravijolični in rentgenski žarki. Atmosfera se z višino redči, njena temperatura pa je močno odvisna od naravnih procesov, ki se dogajajo v posameznem sloju. Troposfera je najtoplejša od površju in se s povečanjem višine ohlaja. Na višini 10 do 16 km je temperatura $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ in se le malo spreminja. To je meja med troposfero in stratosfero.



Slika 6: Razdelitev ovoja atmosfere.

V troposferi je mnogo manjših lokalnih vrtnicev, ki merijo nekaj kilometrov, pa tudi velika področja nizkega in visokega zračnega tlaka, ki jih imenujemo cikloni in anticikloni. Spodnja plast teh prehodnih pojavov se giblje kot posledica segrevanja zraka in vrtenja Zemlje. Tako nastajajo vetrovi.

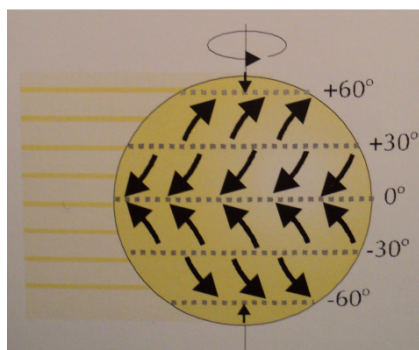
Na ekvatorju se topel zrak vzpenja, zamenja pa ga hladen zrak s severa. Ko se ta zrak segreje, se vzpne in vrača na večjih višinah vse do približno 30° severne zemljepisne širine. Podobno se giblje hladen polarni zrak pri tleh na jug do širine 60° , se medtem segreje in dvigne ter vrne v polarna področja. Med obema svitkoma (na južni polobli sta sicer še dva simetrična svitka) se oblikuje tretji svitek, ki se giblje v nasprotni smeri zaradi tlačnih razlik, ki se vzpostavijo v tem področju – zrak v tem svitku potuje pri tleh od širine 30° do širine 60° . Slovenija je prav v tem področju zemljepisne širine.



Slika 7: Gibanje zraka glede na zemljepisno dolžino.

Zemlja in z njo troposfera se vrtita od zahoda proti vzhodu s hitrostjo med 1667 kilometrov na uro na ekvatorju, do nič na polih. Zračna masa, ki se v prvem svitku začne gibati pri zemljepisni širini 30° s hitrostjo okoli 1000 km/h zaostaja za hitrostjo tal, ko doseže ekvator. Zato se zdi, da potuje od vzhoda na zahod. Podobno se zrak, ki se v srednjem svitku giblje od širine 30° k severni zemljepisni širini 60° giblje hitreje kakor tla, ko doseže to širino. Zato se zdi, da piha proti vzhodu. Ker so razlike v hitrosti vrtenja površja Zemlje na severnem

polarnem področju majhne, se polarni svitek na videz mnogo manj odmika od smeri sever – jug.



Slika 8: Vpliv vrtenja zemlje na smer vetrov.

To splošno sliko gibanja zračnih mas v troposferi zmotijo celine, kljub temu pa je ta poenostavljen prikaz vetrov mogoče opaziti v naravi.

Na opisano gibanje troposfere se dodajajo lokalna kroženja in vrtinci, ki povzročajo spremembo vremena. Zato je napoved kroženja zraka v troposferi zapletena, a s sodobnimi numeričnimi modeli, ki jih rešujemo z računalniki in s satelitskimi opazovanji, mogoča. Kljub temu še vedno vetrove spremljamo tudi z meritvami na meteoroloških postajah. Pri tem nas zanimata predvsem smer in hitrost vetra pa tudi trajanje ter sunki vetra. Trajanje vetra je podatek, ki navaja, koliko ur veter v letu piha z določeno hitrostjo. To je pomemben podatek za delovanje vetrnic. Podatke o vetru zbiramo z meritvami, trajanje pa določimo s statistično obdelavo izmerjenih vrednosti.

Vetrove ločujemo glede na prevladujočo smer in časovno pojavnost. Poznamo stalne vetrove, ki pihajo vse leto in take, ki so manj pogosti. Med stalne vetrove uvrščamo pasate, antipasate monsunne. Pasat je stalen suh tropski veter, ki piha iz subtropskega v ekvatorialni pas. Antipasati so stalni topli vetrovi, ki pihajo od ravnika proti severu. Monsuni se pojavljajo v širših področjih kopnega in oceanov. Nastajajo tam, kjer so velike vodne površine, ki mejijo na kontinente. Poleg stalnih vetrov ločimo tudi dnevne vetrove. To so vetrovi, ki podnevi pihajo v eni smeri, ponoči pa spremenijo smer. Poznamo še občasne krajevne vetrove. Značilni so za določena področja in imajo značilno smer in moč ter tudi vplivajo na vreme. Med najpomembnejše krajevne vetrove uvrščamo burjo, jugo, fen, borin,...

Burja je značilen sunkovit veter. Sunki burje dosežejo hitrost nad 40m/s. burja ni stalen veter in se lahko pojavi v katerem koli letnem času, čeprav je najmočnejša pozimi, ko prinaša suh in mrzel zrak. V severnem Jadranu burja navadno piha od marca do junija s povprečno hitrostjo 10 do 20 m/s. jugo je topel in vlažen veter, ki v Jadranu piha iz smeri med vzhodom in jugom. Jugo spremlja oblačno vreme in pogosto tudi padavine. Jugo traja poleti nekaj dni, pozimi pa teden ali več. Fen delimo na severni in južni. Nastajajo v srednjeevropskem prostoru. Severni fen nastane, ko je področje nizkega zračnega tlaka nad Sredozemljem, hkrati pa je ned celinskim delom Evrope področja visokega zračnega tlaka. Južni fen, imenujemo

tudi dinarski gorski fen, pa se pojavlja tedaj, ko je nizek zračni tlak nad Sredozemljem. Fen se vzpenja, ko je hladen in vlažen, spušča pa, ko je topel in suh. Zato močno vpliva na vreme.

5. Vetrne razmere v Sloveniji

Geografska lega, Alpe in razgibanost površja vplivajo na vetrove po Sloveniji. V Sloveniji prevladujejo zahodni vetrovi. Zračni tok, gledan v velikih razsežnostih, večinoma valovi, zato se odklanja tudi proti severu in jugu. Smer in hitrost vetra oblikujejo tudi območja visokega in nizkega zračnega pritiska – zračni vrtinci, v katerih zrak kroži. Slovenija v primerjavi z zahodno Evropo zaradi Alp ni zelo vetrovna za prevladujoče vetrove nad Evropo in je v zavetrju.

Na vetrovne razmere vpliva močno tudi zemeljska površina, njena površinska razgibanost, ki je značilna za Slovenijo. Hribi in gorovja po eni strani ustvarjajo pregrado vetrovom, po drugi pa odklanjajo tok zraka, ki se zato prilagaja površju. Za lokalne razmere so poleg tega pomembne tudi razporeditev vodnih površin in dnevno ogrevanje ter ohlajanje ozračja.

Povprečna hitrost vetra je v Sloveniji v splošnem manjša kot v ravninskem delu zahodne in srednje Evrope. Zaradi razgibanosti površja pride tudi do nastanka lokalnih vetrov, ki imajo značilen dnevni hod. To so pobočni vetrovi (ki pihajo podnevi po pobočjih navzgor, ponoči pa navzdol), vetrovi s kopnega na morje (ponoči) in z morja na kopno (podnevi). Njihova hitrost navadno ne preseže 5 m/s.

Poleg teh šibkih, lokalnih vetrov z dnevnim hodom so v Sloveniji še tudi mnogo močnejši vetrovi, ki so odvisni od vremenskih razmer, njihov nastanek pa je omejen na manjša območja. Ti vetrovi so burja, jugo in fen. Lahko so tudi veliko močnejši od lokalnih vetrov in lahko trajajo tudi po več dni. Tu so tudi močni vetrovi, ki prihajajo ob nevihtah.

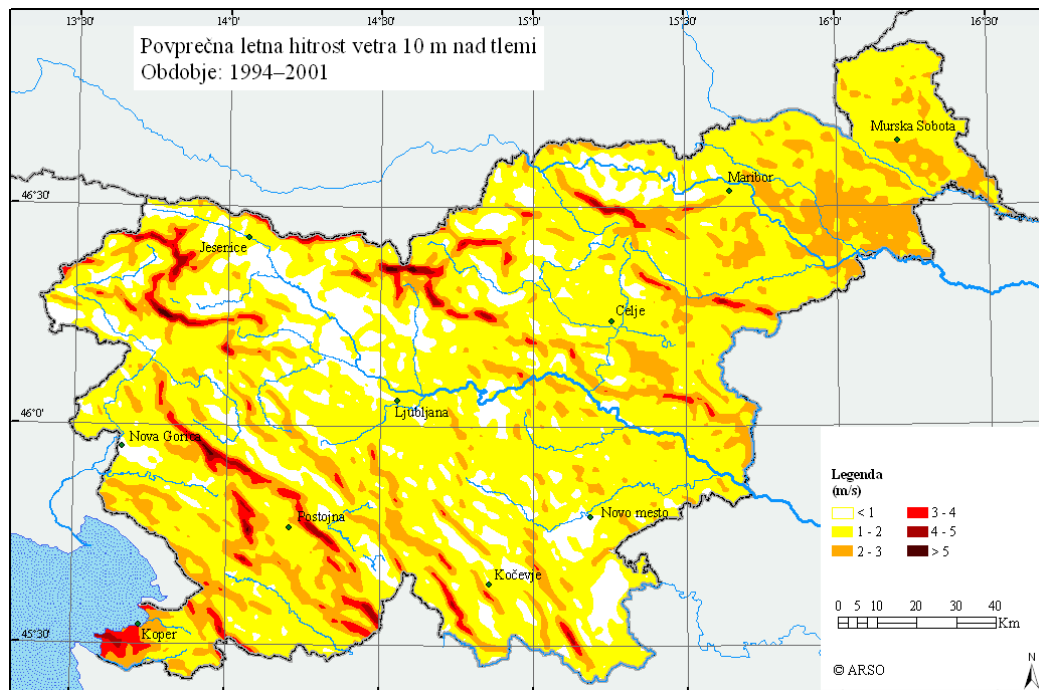
Močni vetrovi, ki so v Sloveniji:

- Primorje, Kras in Vipavsko dolino z burjo;
- vznožje Karavank, Logarske doline in doline Save Dolinke s severnim fenom, in
- kjerkoli v Sloveniji ob nevihtah.

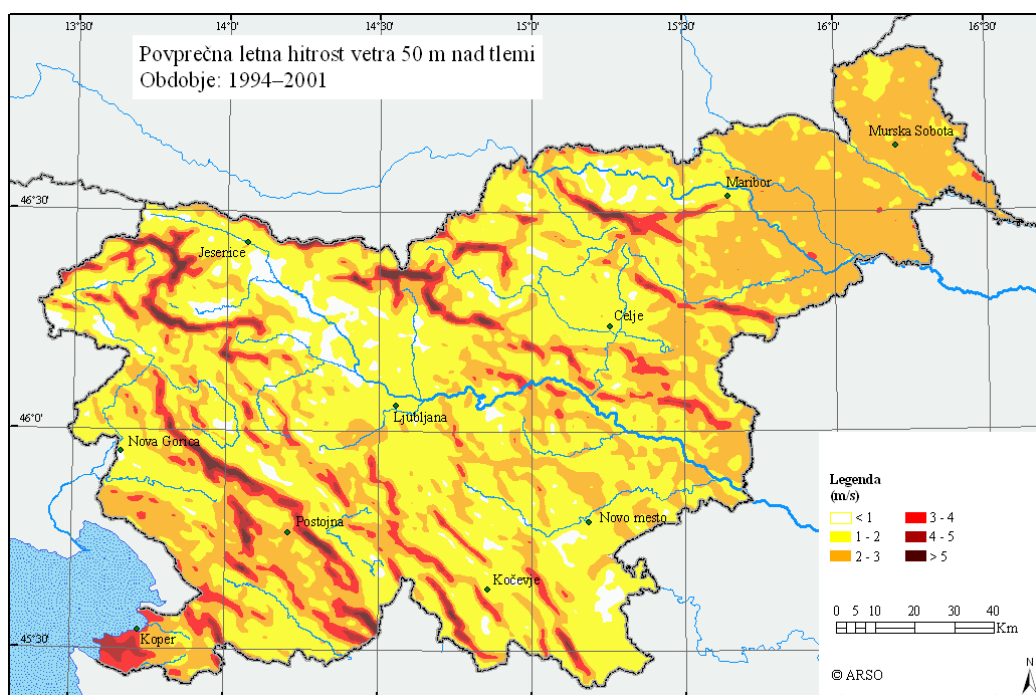
Tak veter je razmeroma kratkotrajen. Burja je v Sloveniji nestalen sunkovit veter, ki piha v Primorju in na Krasu. Za izrabo energije vetra ni primerna zaradi kratkega letnega trajanja. Fen se v Sloveniji pojavlja v dolini Save Bohinjke, pod Pohorjem, in v dolini Krke, pa tudi drugje. V gorah nastaja tudi južni fen, ki piha s pobočij Julijcev v dolino Save in severni fen kot padajoč, topel veter s Karavank. Veter ob nevihtah lahko piha iz vseh smeri, običajno so močni le njegovi sunki. Izjemoma se lahko sprevrže v vrtinčast veter, ki je rušilen, lahko odkriva strehe in lomi drevesa.

Vetrovi so v Sloveniji večinoma nestalni ali sunkoviti in kot taki manj primerni za gradnjo vetrnic. Območja s povprečnimi letnimi hitrostmi med 5 do 7 m/s, kjer bi lahko gradili sodobne vetrnice so redka. Povprečna letna hitrost je dobro merilo za upravičenost gradnje vetrnic saj se ujema z letnim trajanjem hitrosti vetra, potrebne za delovanje vetrnic.

Ker se hitrost vetra zvišuje z višino ozračja (do Ekermanovega sloja 2000 m nad površjem), moramo poleg hitrosti vetra na nižjih višinah, poznati tudi hitrosti višje v ozračju – na primer na 50m ali 100m.



Slika 9: Povprečna letna hitrost vetra v Sloveniji 10 m nad tlemi.



Slika 10: Povprečna letna hitrost vetra v Sloveniji 50 m nad tlemi.

6. Izraba vetrne energije v Sloveniji

V Sloveniji trenutno nimamo vetrnih elektrarn katere bi lahko množično oskrbovale naše potrebe po energiji. Imamo le manjše vetrnice, ki proizvajajo le nekaj energije. Že kar nekaj časa se dogovarjamo za postavitev vetrnice in analiziramo vetrne razmere v Sloveniji. Za enkrat je najobetavnejša regija za izgradnjo vetrnih elektrarn Primorska-Volovja rebra in Banjšice. Vendar pa so domačini proti postavitvi vetrnic, saj naj bi zaradi teh pomrlo veliko ptic in želijo ohraniti čisto naravo. Kar pa je seveda prevelika cena katero energija, ki bi jo proizvajala vetrnica, ne bi mogla poplačati.

7. Merilnik hitrosti in smeri vetra

Merilniki so poimenovani tudi anometri in jih imamo več vrst. Za meritve hitrosti vetra se najpogosteje uporabljajo krilni in propelerski anometri. Krilni imajo tri krilce v obliki polkrogle. Upor tokovnicam vetra je na konveksni strani polkrogle manjši kakor na konkavni in zato se krilca vrtijo v eno smeri. Krilni anometri merijo hitrost vetra v ravnini, ki je pravokotna os vrtenja krilnega sklopa. Ker s krilnem anometrom merimo le skalarno hitrost,

moramo smer vetra določiti z dodatnim instrumentom s smernim krilom.

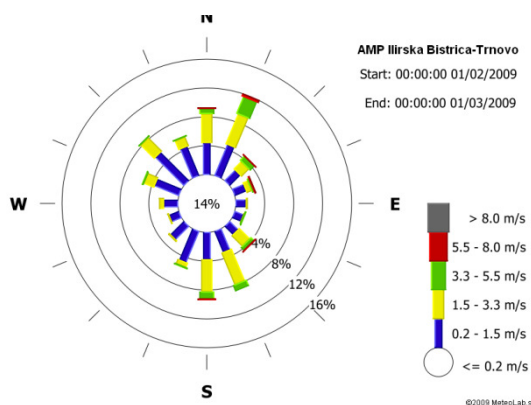
Smer in hitrost vetra pa prikazujemo v " rožah vetra ". To so grafi, ki za tipične nebesne smeri navajajo povprečne hitrosti vetra v letu.



Slika 12: Propelerski anometer.



Slika 11: Krilni anometer.



Slika 13: Roža vetrov.

Da bi napovedali koliko energije vetra bo pretvorila neka vetrnica v nekem časovnem obdobju (enem letu), moramo poznati porazdelitev verjetnosti hitrosti vetra v tem času. Določimo jo z Weibullovo porazdelitveno funkcijo, ki je podana z izrazom:

$$p(v) = \frac{k}{c} * \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

kjer je: **p(v)** verjetnost hitrosti vetra

v hitrost vetra

c, k konstanti, ki sta odvisni od lokalnih meteoroloških razmer

Pri vrednosti konstante k=2 preide splošna Weibullova porazdelitvena funkcija v Rayleighovo porazdelitveno funkcijo, s katero lahko določamo verjetnost hitrosti vetra samo na osnovi povprečne letne hitrosti vetra:

$$p(v) = \frac{2}{c} * \frac{v}{c} * e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

Konstanto c določimo z izrazom:

$$c = \frac{2 * \bar{v}}{\sqrt{\pi}}$$

Povprečno hitrost ločimo po definiciji z izrazom:

$$\bar{v} = \frac{\int_0^{\infty} p(v) \cdot v \cdot dv}{\int_0^{\infty} p(v) \cdot dv} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot c$$

$$\bar{v} = \frac{\int_0^{\infty} p(v) * v * dv}{\int_0^{\infty} p(v) * dv} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} * c \longrightarrow c = \frac{2 * \bar{v}}{\sqrt{\pi}}$$

Z upoštevanjem izraza, s katerim določimo konstanto c, lahko izraz za Rayleighovo porazdelitev zapišemo v obliki:

$$p(v) = \frac{p * v}{2 * \bar{v}^2} * e^{-\frac{p}{4} * \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2}$$

Kinetično energijo vetra spreminjamo z vetrnicami v mehansko delo. Vsaka vetrnica ima rotor z različno oblikovanimi listi. Vrtenje rotorja nastane zaradi različnih sil, ki delujejo na liste rotorja.

8. Proizvod vetrnice v mehansko delo:

Na liste vetrnice delujejo poleg sile težnosti tudi druge sile:

- sile, ki se pojavljajo zaradi upora lista toku zraka; nastanejo zaradi spreminjanja kinetične oziroma hitrostne energije v tlačno, saj se hitrost ob listu zmanjša; Bernoullijev zakon opisuje, da je vsota hitrostne, tlačne in položajne energije vedno konstantna. Razmerje pretvorbe kinetične energije v tlačno navajamo s **koeficientom zračnega upora** c_{zu} . Starejše vetrnice so imele liste, ki so na različnih straneh rotorja imeli različen koeficient zračnega upora. Tako je na delu rotorja A upor bistveno manjši kot na delu rotorja B, zato se rotor zavrti v smeri urnega kazalca;
- sile, ki so posledica aerodinamičnega vzgona; hitrost toka zraka je ob premeno oblikovanem aerodinamičnem telesu na spodnji strani telesa različna kakor na zgornji; tudi v tem primeru velja, da je vsota hitrostne energije in tlačne energije zraka konstantna; večja hitrost na zgornji strani lista zato pomeni, da bo zračni tlak ob zgornji površini lista manjši, kakor od spodnji in zato bo na spodnji strani lista sila, ki je zmnožek tlaka in površine lista, večja. Razlika v sili, ki jo imenujemo sila aerodinamičnega vzgona, povzroči vrtenje lista. Merilo za velikost sile aerodinamičnega vzgona je **koeficient vzgona** c_{zv} .

Napadni kot:

Napadni kot je kot med tetivo lista (zveznica med prvo in zadnjo točko aerodinamičnega profila) in vektorjem hitrosti vetra. Na velikost rezultante sil, ki povzročajo vrtenje rotorja, lahko vplivamo s spreminjanjem napadnega kota α . Pri velikem napadnem kotu se tokovnica ob zgornjem robu (na strani manjšega tlaka) lopatice lahko ločijo in vrtničijo, kar povzroči

sunkovito zmanjšanje sile aerodinamičnega vzgona. Ta pojav se imenuje "stall učinek" in ga uporabljamo za zaustavljanje vetrnice v primeru prevelike hitrosti vetra.

Lopaticice pri sodobnih vetrnicah so oblikovane tako, da je napadni kot α enak na celotni dolžini lista. Ker se z oddaljenostjo od vrtilišča povečuje odbojna hitrost, je to mogoče le, če je lopatica od konice proti korenu vedno bolj zavita.

9. Moč vetra in največja moč vetrnice:

Pri površju Zemlje se sončna energija preoblikuje v kinetično energijo zraka. Če je masa zraka m in se premika s hitrostjo v , potem je njena kinetična energija enaka:

$$Ek = \frac{1}{2} * m * v^2 \left[kg * \frac{m^2}{s^2} = J \right]$$

Če maso zraka nadomestimo s spremembo mase po času, kar je masni pretok, dobimo izraz za moč vetra:

$$P = \frac{1}{2} * \frac{dm}{dt} * v^2 = \frac{1}{2} * \dot{m} * v^2 \left[\frac{kg}{s} * \frac{m^2}{s^2} = \frac{J}{s} = W \right]$$

In če nadomestimo masni tok s prostorninskim, izračunom moč vetra z enačbo:

$$P = \frac{1}{2} * \dot{m} * v^2 = \frac{1}{2} * V * \rho * v^2 = \frac{1}{2} * A * v * \rho * v^2 = \frac{1}{2} * A * \rho * v^3 [W]$$

Moč vetra je odvisna od površine (A), ki jo opiše vrteči se rotor ter hitrost vetra (v) na tretjo potenco. Torej je hitrost vetra zelo pomembna veličina. Ker je moč vetrnice odvisna tudi od gostote zraka, bo kljub enaki hitrosti vetra moč vetrnice manjša, če bo nameščena na kraju z višjo nadmorsko višino. Ta razlika sicer ni velika – na Kredarici (n.v 2350 m) bo na primer moč vetrnice za 10% nižja kot v Kopru. Če moč vetrnice delimo z površino, ki jo pri vrtenju opiše rotor, dobimo podatek o specifični moči ali gostoti moči vetra v W/m^2 .

Hitrost vetra se povečuje z višino zaradi neravne podlage in trenja. Tip od podlagi je hitrost 0, največjo vrednost pa doseže približno 2000m nad površjem. Ker hitrost vetra merimo na meteoroloških postajah na višini 10 m nad tlemi, sodobne vetrnice pa so visoke od 50 do 150 m, moramo izmerjene hitrosti vetra preračunati na ustrezno višino. Pri tem nam je v pomoč izraz, s katerim hitrost vetra $v(z)$ na poljubni višini z določimo na osnovi znane hitrosti vetra

na višini 10m in ustreznega koeficienta porazdelitve hitrosti α , ki je odvisen od hrapavosti površja:

$$\frac{v_z}{v_{10}} = \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha$$

Primer: hitrost vetra na višini 60 m je pri koeficientu porazdelitve $\alpha=0,13$ v primerjavi z hitrostjo 11,2 m/s na višini 10m nad tlemi višja za več ko eno četrtno:

$$\frac{v}{11,2} = \left(\frac{60}{10}\right)^{0,13} \rightarrow v = 14,1 \left[\frac{m}{s}\right] \rightarrow +26\%$$

Z znano hitrostjo vetra na poljubni oddaljenosti od površja lahko izračunamo moč vetra P (W) in specifično moč vetra v v vatih na m^2 površine, ki je pravokotna na vektor hitrosti vetra.

Vse kinetične energije zraka vetrnica ne more izkoristiti, ker se mora zrak za vetrnico umikati zraku pred vetrnico. Torej hitrost zraka za vetrnico ne sme biti enaka 0. Optimalna je, če hitrost zmanjšamo na 1/3. Takrat vetrnica deluje s teoretično največjo močjo. Razmerje med teoretično največjo močjo vetra pri isti hitrosti imenujemo Betzov koeficient (c_{Betz}). Njegova vrednost je 16/27 oziroma 0,597. Torej lahko z vetrnico pretvorimo teoretično največ, to je 59,7%, kinetične energije vetra.

$$P = c_{Betz} * \frac{1}{2} * A * \rho * v^3 [W]$$

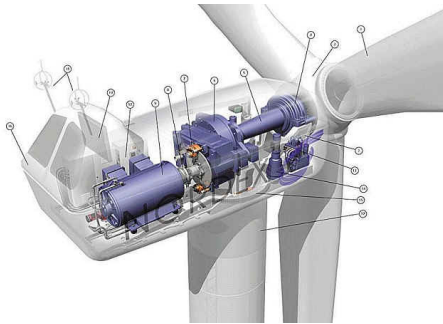
Zaradi vrtnčenja zraka in trenja mehanskih delov vetrnice je dejanski izkoristek sodobnih vetrnic med 38 do 42%. V tem primeru Betzov koeficient nadomestimo s koeficientom c_p .

10. Glavni elementi vetrnic:

Sodobne vetrnice uporabljamo za proizvodnjo električne energije. Čeprav poznamo več vrst vetrnic, so večini skupni naslednji elementi:

- **rotor:** je element z listi, katerih prerez je oblikovan tako, da zaradi hitrosti vetra in vrtenja rotorja na njih deluje rezultanta sil zračnega upora in vzgona, ki povzroča vrtenje rotorja; pravimo, da imajo listi aerodinamični prerez; ta spominja na prerez letalskega krila;
- **prenosniki (?) vrtilnega momenta;** število vrtljajev rotorja sodobnih vetrnic je med 10 in 30 na minuto; ker mora generator električne energije bistveno večje število

- vrtljajev (običajno 1500 vrtljajev na minuto), moramo med rotor in generator vgraditi menjalnik, ki poveča število vrtljajev; imenujemo ga tudi multiplikator;
- **generator električne energije**; je elektrotehnični element, s katerim mehansko delo pretvorimo v električno energijo. Uporabimo lahko različne vrste generatorjev, vsi pa delujejo po načelu elektromagnetne indukcije, ki nastane, ko se električni vodnik premika v magnetnem polju. V sodobnih napravah se skoraj izključno uporabljajo asinhronski generatorji;
 - **strojnica** je del vetrnice, ki je nameščena na stolpu in v katerem so prenosniki vrtilnega momenta, generator električne energije, elektronske enote za sinhronizacijo vetrnice z električnim omrežjem;



Slika 14: Notranjost vetrnice.

- **sistem za sledenje vetru**; veter poleg moči spreminja tudi smer, zato se morajo vetrnice temu prilagajati. Vse večje vetrnice imajo vgrajen merilnik smeri vetra in mehanizem s pogonom za vrtenje strojnice na stolpu. Tako se vetrnica prilagodi trenutni smeri vetra;
- **stolp vetrnice**; rotor vetrnice mora imeti velik premer, da je zbirna površina dovolj velika. Zato mora biti vrtilišče rotorja postavljeno visoko nad tlemi. Drug razlog za to, da gradimo vetrnice z visokimi stolpi je dejstvo, da se hitrost vetra z višino nad tlemi povečuje; stolpi so navadno jekleni in cilindrične oblike. Večje stolpe gradimo kot paličja, kar je ceneje in povzroča manjše vrtnčenje zraka in zato bolj učinkovito delovanje vetrnice;
- **temelji**; stolp vetrnice postavimo na poprej izdelane temelje iz armiranega betona.

Generatorji električne energije

Mehansko delo, ki ga proizvaja rotor vetrnice, pretvorimo v električno energijo z generatorjem električne energije. Uporabimo lahko različne vrste generatorjev, vsi pa delujejo po načelu elektromagnetne indukcije, ki nastane ko se vodnik premika v magnetnem polju. Izvedbe so lahko naslednje:

- **generatorji enosmerne napetosti ali alternatorji**; imajo stator s permanentnim magnetom, ki ustvarjajo magnetno polje; rotor z navitjem električno izoliranega vodnika je z omrežjem povezan z drsečimi kontakti, ki jih imenujemo komutator.

Tako teče v rotorju generatorja, ki ga vrti rotor vetrnice, tok vedno v isti smeri ne glede na smer sekanja magnetnih silnic;

- **sinhronski generatorji**; imajo rotor, ki je povezan z omrežjem z ločenima drsnima kontaktoma, zato pri vrtenju rotorja v magnetnem polju, ki ga s permanentnimi ali elektromagneti ustvarja stator, teče tok v dve smeri, glede na smer sekanja magnetnih silnic – električni tok je izmeničen. Frekvenca toka je proporcionalna številu magnetnih parov n in frekvenci vrtenja rotorja f_1 : $f=n*f_1$; pri vetrnicah, ki so priključene na javno električno omrežje moramo zagotoviti stalno frekvenco proizvedenega električnega toka, ki mora biti enaka omrežni frekvenci 50Hz. To pomeni, da mora biti število vrtljajev rotorja vetrnice vedno enaka. To zagotovimo na primer s samodejnim spreminjanjem napadnega kota glede na trenutno moč vetra.
- **Asinhronski generatorji**; so zasnovani tako, da "sodelujejo" z omrežjem. Pri hitrostih vrtenja rotorja generatorja, ki so enake ali večje od sinhrone, frekvenca proizvedenega električnega toka ni nikoli večja od frekvence v omrežju (50Hz). Prav enostavnejša sinhronizacija vetrnice z omrežjem je glavni razlog, da v sodobnih vetrnicah uporabljamo asinhronne generatorje. Prednost asinhronih generatorjev je tudi "slip efekt". To omogoča prilagajanje hitrosti vrtenja generatorja od malenkostih nihanja momenta vetrnice.

11. Vrste vetrnic

Vetrnice delimo na vetrnice z vodoravno osjo vrtenja rotorja in vetrnice z navpično osjo vrtenja rotorja.

Vetrnice z vodoravno osjo vrtenja rotorja:

Te vetrnice so najbolj razširjene po svetu. Delimo pa jih na počasi vrteče vetrnice in hitro vrteče:

Počasi vrteče vetrnice: to so vetrnice z 8 ali več lopatic. Imajo velik vrtilni moment že pri nizkih hitrostih vetra. Uporabljamo jih za pogon batnih vodnih črpalk in pri shranjevanju energije.



Slika 15: Počasi vrteča vetrnica.

Hitro tekoča vetrnica: ima en, dva ali tri liste. Pri nizkih hitrostih vetra imajo majhno moč in moment.

- **Eno lopatični rotorji** imajo prednost v nizki ceni in v prilagodljivosti hitrosti ter smeri vetra. Potrebujemo pa proti utež kot nadomestilo za drug list. Pretvarjajo 10% manj energije kot vetrnice z večjimi lopaticami in so hrupnejši. Vendar pa skorajda ni teh vetrnic.
- **Dve in tri lopatični rotorji** to so najbolj razširjeni tipi. Vetrnice z dvema lopaticama so cenejše in imajo lažjo namestitev rotorja na stolp. So tudi hrupnejše od vetrnice s tremi lopaticami.

Vemo, da se smer vetra neprestano premika in tako se mora premikati tudi vetrnica. Pri majhnih vetrnicah tako uporabimo dodatno krilo za sledenje vetru. Pri velikih pa uporabimo mehanski pogon, ki je voden preko anometra na vetrnici.

Vetrnice z vodoravno osjo začnejo delovati pri hitrosti vetra nekje med 3 in 4 m/s. Imajo pa tudi omejitev, do katere hitrosti vetra lahko delujejo. Omejitev je od 20 do 25 m/s. Nazivna moč ja je vmesna hitrost vetra in je od 10 do 15 m/s.



Slika 16: Vetrnice z dvema lopaticama.



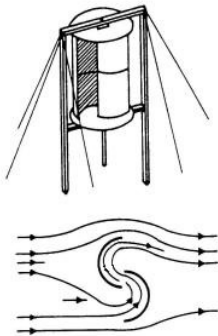
Slika 17: Vetrnica s tremi lopaticami.

11.1. Vetrnice z navpično osjo:

Poznamo več vrst vetrnic:

- **Vetrnice, ki uporabljajo Savoniusov rotor:** leta 1924 je Savoius s Finske predstavil vetrnico z rotorjem, ki ga sestavljata pokončna položna valja, ki sta z zamikom eden

proti drugemu. Ta vetrnica je neodvisna od smeri pihanja vetra. Ima pa slab izkoristek.



Slika 18: Savoniusov rotor.

- **Windside rotor** to je novejša izvedba Savonusovega rotorja. Deluje pri zelo majhnih hitrostih vetra in je manj hrupnejša. Zdržijo hitrosti vetra do 60 m/s. Imajo tudi Magnusov učinek.

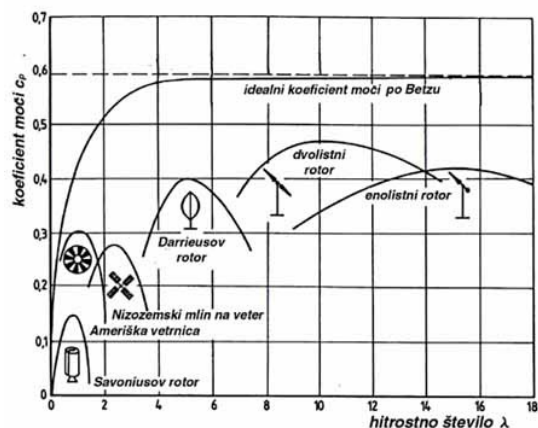


Slika 19: Wind side rotor.

- **Derreiusov rotor** je najbolj razširjena vetrnica z navpičnim rotorjem. Ima dve do tri lopatice. Te vetrnice se ne poženejo same. Pognati jih mora nek dodatni vir. Tako lahko kot zagon dodatno vgradimo Savoniusov rotor.



Slika 20: Derreiusov rotor.



Slika 21: Primerjava med rotorji.

12. Ekološki in ekonomski vidiki vetrne elektrarne:

Vetrnice morajo v okolju, v katerem delujejo, izpolnjevati vsaj naslednje okoljske zahteve:

- ne smejo ogrožati okolja; zaradi majhnega potrebnega prostora za postavitev vetrnic je vpliv na rastlinstvo zelo majhen, toda vetrnica je nevarna pticam zaradi možnih trkov ter zmanjšanja njihovega življenjskega prostora.; študije so sicer pokazale, da je možnost trkov podnevi zanemarljiva, toda kljub temu so potrebne ornitološke študije pred odločitvijo o postavitvi vetrnice;
- vetrnice morajo biti odporne na visoke hitrosti in sunke vetra, saj odtrgani listi rotorja lahko jadrajo tudi več sto metrov daleč;
- zračna vodna para ne sme zmrzovati na listih rotorja, saj so leteči deli odlomljenega ledu nevarni;
- hrup, ki ga povzroča vrtinčenje zraka oziroma listi rotorja (aerodinamični hrup) ter ostali mehanski sklopi vetrnice (mehanski hrup), ne sme presegati motečega nivoja na izbrani oddaljenosti; hrup, ki ga povzročajo vetrnice, je najbolj moteč pri nižjih hitrostih vetra, saj je tedaj hrup ozadja nizek; nastajanje aerodinamičnega hrupa zmanjšamo z zasnovo listov in njihovega vrha (tu nastajajo vzdolžni vrtinci), širjenje mehanskega hrupa z zvočno izolacijo strojnice; na Švedskem je dovoljena jakost hrupa 45 dB na oddaljenosti 400 m od vetrnice ali pri najbližji zgradbi; v Nemčiji so izdelali sistem subvencij graditeljem vetrnic glede na površino okolice vetrnice, kjer jakost hrupa presega 45 dB;
- ne smejo onesnaževati okolja z oljem za mazanje iz multiplikatorja pri okvarah in poškodbah (velike sodobne vetrnice imajo v multiplikatorju nekaj sto litrov olja);
- vetrnic ne postavljamo med oddajnike in sprejemnike elektromagnetnih signalov, kajti stolp in vrteči rotor povzroča razpršitev elektromagnetnih valovanj;
- pred izgradnjo je potrebno z računalniškimi vizualizacijskimi tehnikami analizirati vpliv vetrnice in vrtenje rotorja na videz pokrajine.

12.1. Statistični podatki za EU

Evropski Uniji je bilo leta 2009 inštaliranih 10,163 MW novih vetrnic. To pomeni da se je izraba vetrne energije povečala za 23% od leta 2008 in se povečuje. 9581 MW je bilo inštaliranih na kopnem in 582 MW na vodni gladini. Na vodni gladini se je od leta 2008 do 2009 povečala kar za 56%.

Za leto 2009 so v Evropski uniji investirali 13 bilijonov evrov za izgradnjo vetrnih elektrarn. 11,5 bilijonov evrov za vetrne elektrarne na kopnem in približno 1,5 bilijonov evrov za vetrne elektrarne na vodni gladini.

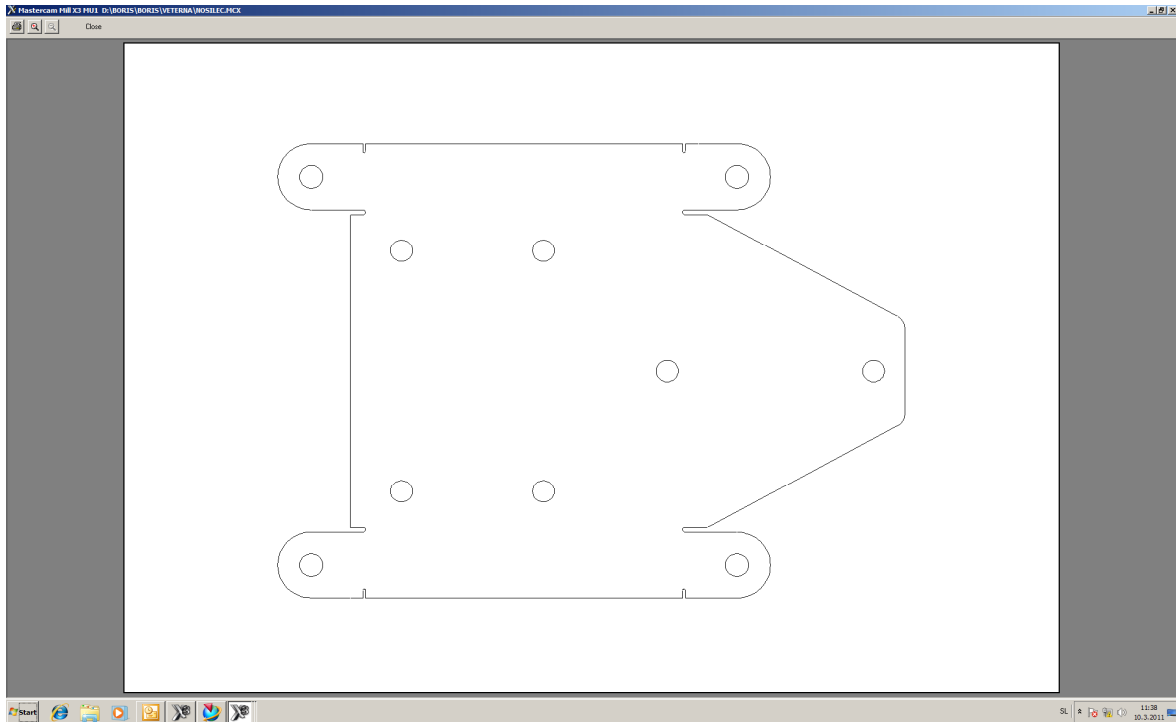
V Evropski uniji je bila leta 2009 vodilna Nemčija z 25,777 MW priključene moči, kar pomeni 35% v celotni EU. Na drugem mestu je Španija z 19,149 MW – 26%. Nato pa Italija z 4,850 MW – 6% in Francija z 4,492 kar pomeni 6%.

Danes je vetrna energija na drugem mestu vseh obnovljivih virov (4,8%). Ta številka pa naj bi rasla. In leta 2050 naj bi vetrnih elektrarn imeli toliko da bi dajala 50% energije (gledano samo med obnovljivimi viri).

13. Izdelava vetrnice

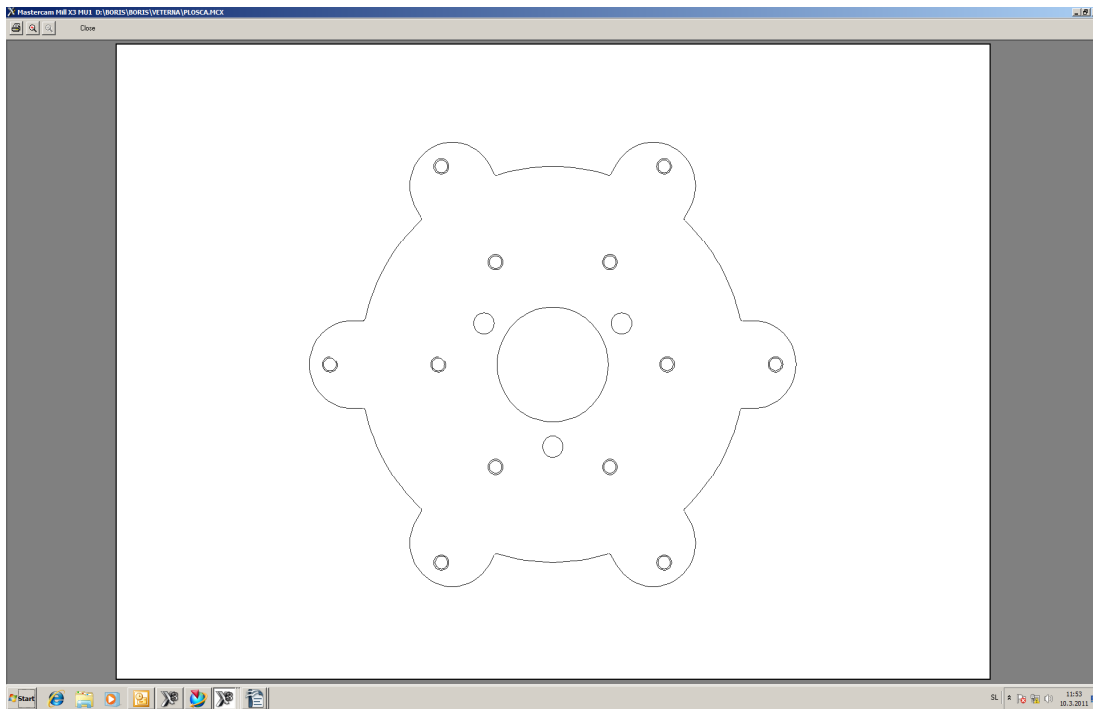
Za izdelavo vetrnice z možnostjo spremembe števila elis sva se odločila zato, ker sva želela na praktičnem primeru preizkusiti učinkovitosti obeh izvedb. Odločila sva se za izdelavo vetrnice s premerom 118 cm, kateri bo možno dodati in odvzeti elise. Tako sva dosegla, da lahko na enostaven način spremeniva hitro vrtečo vetrnico v počasno vrtečo vetrnico in obratno. Kot generator enosmerne napetosti sva uporabila star elektro motor, ki je služil za pogon pralnega stroja. Ta motor je bil primeren za najine potrebe iz razloga, ker deluje pri nizkih obratih in tako je bilo moč z njim pridobiti nekaj enosmerne napetosti pri nizkih obratih. Kar se tiče konstrukcijskih delov vetrnice, nama je bil omogočen laserski razrez elementov, ter krivljenje pločevine v podjetju Gorenje Orodjarna d.o.o. Namembnost najine vetrnice ni proizvodnja električne energije, ker za ta namen nisva imela ustreznega generatorja električne napetosti, ampak je raziskovalne narave in ta je, primerjati učinkovitosti obeh izvedb vetrnice.

13.1. Nosilec generatorja



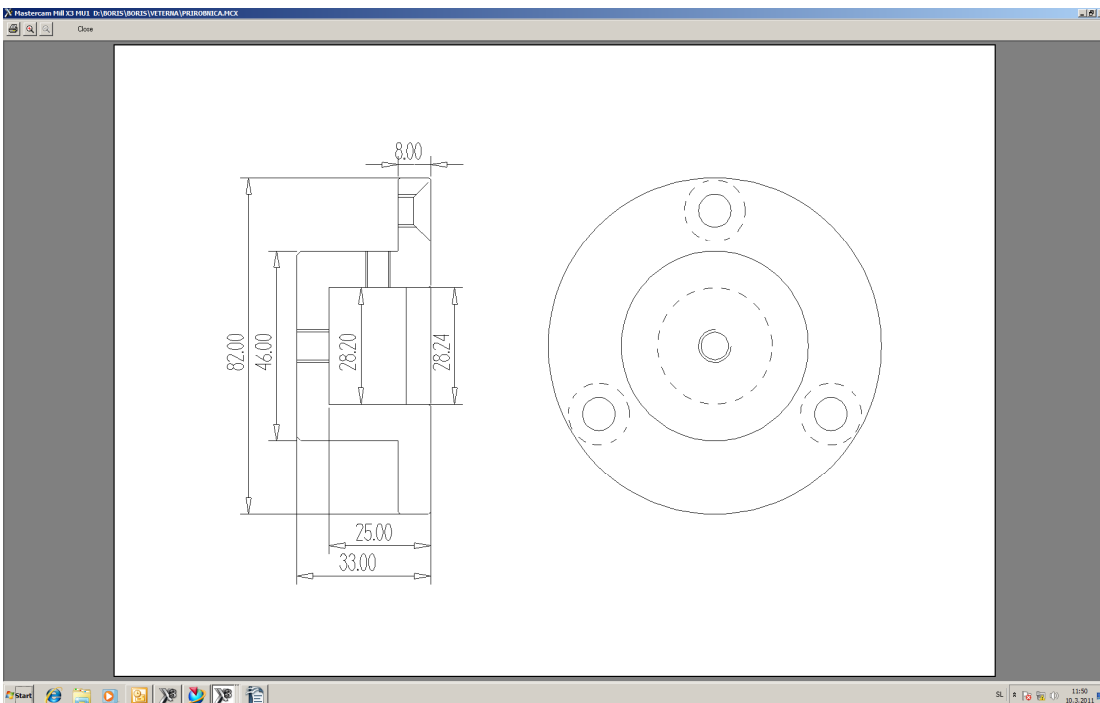
Slika 22: Nosilec.

13.2. Plošča za pritrditev elis



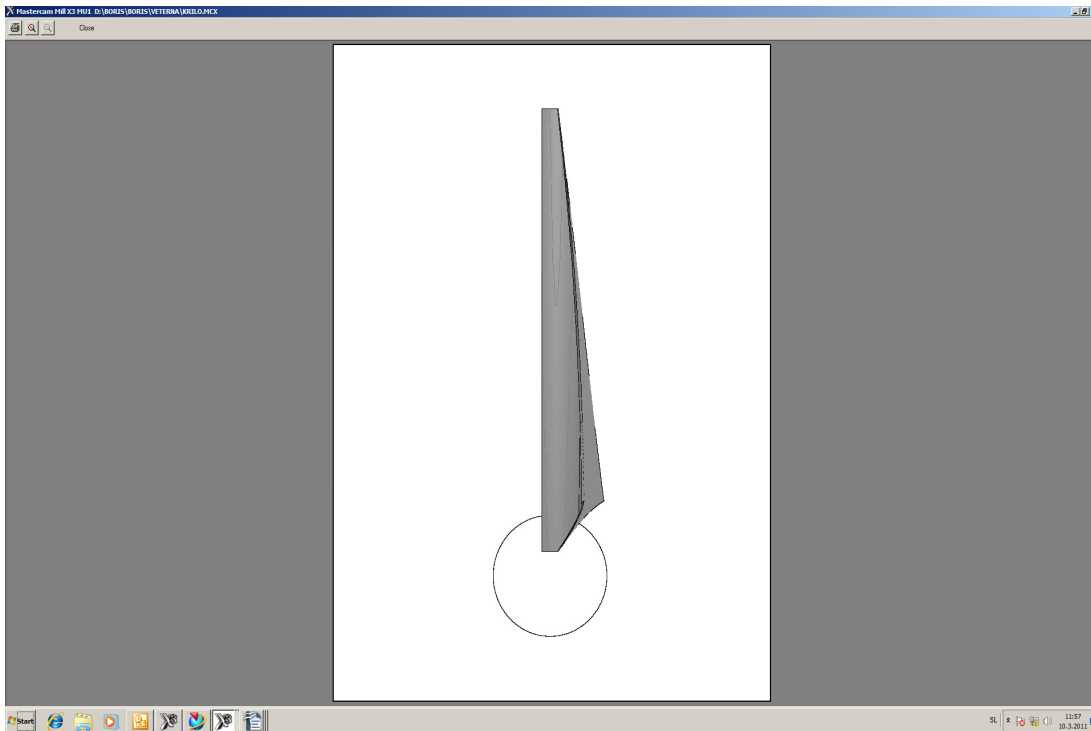
Slika 23: Plošča.

13.3. Prirobnica



Slika 24: Prirobnica.

13.4. Elisa



Slika 25: Elisa.

13.5. Vetrnica- končni izdelek



Slika 26: Vetrnica- končni izdelek.

14. Primerjava učinkovitosti med hitro vrtečo vetrnico in počasno vrtečo vetrnico

Učinkovitosti obeh izvedb vetrnic sva preizkusila tako, da sva vetrnico pritrdila na streho avtomobila in jo tako preizkusila pri točno določeni hitrosti vetra. Najprej sva na vetrnico pritrdila 3 elise. Določila sva 3 različne hitrosti vetra (3.5 m/s, 6.5 m/s in 12.5 m/s). Nato sva pri vsaki hitrosti opravila po 4 vožnje z avtomobilom, napetost, ki jo je proizvedel generator enosmerne napetosti sva merila z merilnim instrumentom. Za rezultate pri posamezni hitrosti sva izračunala srednjo vrednost, ter jih zapisala v tabelo.

15. Rezultati in izsledki

HITROST VETRA (m/s)	3 ELISE (V)	6 ELIS (V)
3.5	2.7	2.9
6.5	5.3	5.5
12.5	12.3	8.8

Table 1: Tabela učinkovitosti vetrnic.

Iz tabele je razvidno, da obe vetrnici, tako vetrnica s šestimi elisami kot vetrnica s tremi elisami, pri nižji in pri srednji hitrosti vetra generirata precej podobno napetost. Razlika pa je dobro vidna pri višji hitrosti vetra, pri kateri vetrnica s tremi elisami generira za približno 3.5 višjo napetost kot vetrnica s šestimi elisami.



Slika 27: Preizkus s 6 elisami.



Slika 28: Preizkus s 3 elisami.

16. Zaključek

S to raziskovalno nalogo se nama je zagotovo odprl povsem drugačen pogled na obnovljive vire energije, ki v današnjem času vedno bolj pridobivajo na pomembnosti in jih bomo v prihodnosti primorani izkoriščati v čim večjem obsegu in izkoriščanje energije vetra je eden od obnovljivih virov energije, ki so v nenehnem razvoju. Izdelava vetrnice je potekala v skladu z najinimi pričakovanji, izdelala sva jo v raziskovalne namene in ne za pridobivanje električne energije. Je pa mogoča modifikacija sedanje vetrnice, v učinkovit vir električne energije ob pogoju, da se uporabi ustrezen generator električne energije.

17. Zahvala

Zahvaljujeva se mentorju g. Janku Malovrhu za pomoč in usmerjanje pri izdelavi raziskovalne naloge. Zahvala gre najinim staršem, ki so nama ob izdelavi raziskovalne naloge vseskozi stali ob strani. Posebna zahvala gre podjetju Gorenje Orodjarna d.o.o, ki so nama omogočili laserski razrez elementov za izdelavo vetrnice.

18. Viri in literatura

Bibliografija:

Sašo Medved, C. A. (2009). *Energija in Okolje obnovljivi viri energije*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani. str. 143-153

Sašo Medved, P. N. (2000). *Varstvo okolja in obnovljivi viri energije*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo. str.

Spletni naslovi:

-http://www2.arnes.si/~soppzupa/tehnika/izdelki/savonius/050202_Savonius_pdf.pdf

-<http://www.digitaljournal.com/article/286219>

-<http://laurassocialcontextblog.blogspot.com/2010/06/green-marketing-2-pepsi-refresh-project.html>

-<http://frank-media.info/fr/partie-c/lenergie-eolienne/rotors-a-axe-vertical/rotor-savonius.html>

-<http://www.greencheck.nl/index.php?/archives/250-Kleine-Wind-Turbine-Fabrikanten.html>

-<http://www.reuk.co.uk/Darrieus-Wind-Turbines.htm>

-http://www.ee.fs.uni-lj.si/diploma1/stran_54.htm

-http://www.users.kabelnet.net/mjaksa/literatura/alternativni_viri_energije.pdf

-<http://www.ee.fs.uni-lj.si/diploma1/index5.htm>

http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/statistics/100401_General_Stats_2009.pdf