

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Janjiš

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Dorian Marjanović, dipl. ing.

Student:

Ivan Janjiš

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svome mentoru, dr.sc. Dorianu Marjanoviću na ukazanom povjerenju, strpljenju, te danim savjetima i uputama.

Ivan Janjiš

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	XI
1. UVOD.....	1
2. VJETAR	2
2.1. Općenito o vjetru.....	2
2.1.1. Utjecaj vrste terena (hrapavosti površine) na vjetar.....	3
2.2. Parametri vjetra	4
2.3. Resursi vjetra - vjetropotencijal	8
3. VJETROELEKTRANA	11
3.1. Povijest.....	14
3.2. Karakteristike vjetroelektrana	15
3.2.1. Aerodinamički stupanj pretvorebe (efikasnost)	16
3.2.2. Koeficijent pretvorbe momenta - C_t	17
3.2.3. Koeficijent brzohodnosti.....	18
3.3. Vrste vjetroelektrana	20
3.3.1. Kopnene vjetroelektrane	20
3.3.2. Priobalne (offshore) vjetroelektrane	21
3.3.3. Plutajuće vjetroelektrane.....	22
3.3.4. Visinske vjetroelektrane.....	22
3.4. Vrste vjetroatregata	23
3.4.1. Horizontalni vjetroatregat	23
3.4.2. Vertikalni vjetroatregat	24
3.4.2.1. Darreiusov vjetroatregat.....	24
3.4.2.2. Savoniusov vjetroatregat.....	27
4. ANALIZA TRŽIŠTA	28
4.1. Svjetsko tržište	28

4.1.1.	Tržište vjetroelektrana.....	30
4.1.1.1.	Tržište vertikalnih vjetroelektrana	31
4.2.	Domaće tržište.....	33
4.2.1.	Tržište vjetroelektrana u Hrvatskoj	34
5.	RAZVOJ PROIZVODA – MALA VERTIKALNA VJETROTURBINA.....	36
5.1.	Potrošnja el. energije u stubištima zgrada.....	36
5.2.	Definicija cilja za razvoj proizvoda	37
5.3.	Detaljna razrada odabranog koncepta	47
5.3.1.	Određivanje snage vjetroturbine	47
5.3.2.	Određivanje momenta vrtnje na rotoru	48
5.3.3.	Dimenzioniranje vratila.....	49
5.3.3.1.	Određivanje reakcija u osloncima.....	50
5.3.3.2.	Proračun idealnog oblika vratila	51
5.3.3.3.	Odabir ležajeva	54
5.3.3.4.	Kontrolni proračun dinamičke sigurnosti vratila	55
5.4.	Proračun nosive konstrukcije	64
5.4.1.	Proračun zavora ukruta na lopaticama	70
5.4.2.	Odabir vijaka za pričvršćenje lopatica vjetroturbine	71
5.4.3.	Odabir generatora.....	73
5.4.4.	Odabir vijaka za pričvršćenje glavčine generatora	73
5.4.5.	Izrada 3D modela odabranog koncepta.....	75
6.	ZAKLJUČAK.....	77
7.	LITERATURA	78

POPIS SLIKA

Slika 1.	Smjer globalnog vjetra	2
Slika 2.	Ovisnost brzine vjetra o visini hrapavosti površine	3
Slika 3.	Površina koju zahvaćaju lopatice	4
Slika 4.	Teoretska snaga vjetroturbine	4
Slika 5.	Weibullova razdioba.....	5
Slika 6.	Van der Hovenov spektar na temelju osnovne komponente brzine vjetra	7
Slika 7.	Primjeri promjenjivih komponenata brzine.....	7
Slika 8.	Resursi vjetra u Europi (na visini 80 m, 2000. godina).....	8
Slika 9.	Resursi vjetra na Zemlji (na visini 50 m)	9
Slika 10.	Resursi vjetra u Hrvatskoj (na visini 10 m).....	10
Slika 11.	Skica protoka fluida kroz vjetroatregat	11
Slika 12.	Ovisnost aerodinamičkog stupnja pretvorbe o omjeru smanjenja brzine vjetra ...	13
Slika 13.	Razvoj vjetroelektrana kroz povijest.....	14
Slika 14.	Gradijent brzine vjetra.....	15
Slika 15.	Promjena aerodinamičkog stupnja pretvorbe u ovisnosti o koeficijentu brzohodnosti	16
Slika 16.	Promjena koeficijenta pretvorbe momenta s promjenom koeficijenta brzohodnosti	17
Slika 17.	Usporedba hodnosti i momenata za neke oblike vjetroturbina	18
Slika 18.	Kopnena vjetroelektrana Royd Moore, UK	20
Slika 19.	Priobalna vjetroelektrana Lilgrund, Švedska	21
Slika 20.	Prvi veći plutajući vjetroatregat Hywind, Norveška	22
Slika 21.	Visinski zračni vjetroatregat Kite Gen	22
Slika 22.	Glavni dijelovi vjetroatregata	23
Slika 23.	Darrieusov vjetroatregat	24
Slika 24.	H - tip vjetroturbine	25
Slika 25.	Spiralna vjetroturbina	26
Slika 26.	Shema sustava za zakretanje lopatica.....	26
Slika 27.	Savoniusov vjetroatregat	27
Slika 28.	Potrošnja električne energije u svijetu.....	28

Slika 29.	Proizvodnja električne energije u svijetu	29
Slika 30.	Postavljene elektrane koje koriste obnovljive izvore energije po MW u EU od 1995. do 2011. godine	29
Slika 31.	Novi oblici uređaja za generiranje el. energije.....	32
Slika 32.	Proizvodnja električne energije u Hrvatskoj	33
Slika 33.	Funkcijska struktura	39
Slika 34.	Morfološka matrica	41
Slika 35.	Koncept 1 – H-tip Darrieusove vjetroturbine.....	42
Slika 36.	Vjetroturbina sa zakrivljenim lopaticama	43
Slika 37.	Savoniusov tip vjetroturbine	44
Slika 38.	Opterećenje vratila	49
Slika 39.	Reakcije u osloncima.....	50
Slika 40.	Presjeci idealnog oblika vratila	51
Slika 41.	Stupnjevano vratilo vjetroturbine	55
Slika 42.	Konačni oblik vratila	64
Slika 43.	Profil nosive konstrukcije.....	66
Slika 44.	Presjek nosive konstrukcije	67
Slika 45.	Najveća sila na lopaticu.....	70
Slika 46.	Zavar na lopaticama	71
Slika 47.	Generator GL-PMG-180A	73
Slika 48.	3D Model vertikalne vjetroelektrane.....	76
Slika 49.	Prikaz lopatica i trokutastog nosača lopatica vjetroturbine.....	76

POPIS TABLICA

Tablica 1. Beaufortova ljestvica jačine vjetra	6
Tablica 2. Prednosti i nedostaci vjetroelektrana.....	19
Tablica 3. Najveće kopnene vjetroelektrane u svijetu.....	20
Tablica 4. Najveće priobalne elektrane u Europi	21
Tablica 5. Postavljene vjetroelektrane u 2012. godini u svijetu.....	30
Tablica 6. Najveći proizvođači vjetroturbina u svijetu	31
Tablica 7. Tvrtke vertikalnih vjetroagregata	33
Tablica 8. Vjetroelektrane u Hrvatskoj	34
Tablica 9. Broj rasvjetnih uređaja za analizu potrošnje el. energije u stubištu jedne zgrade.	36
Tablica 10. Analiza potrošnje i ukupne izlazne snage u vremenskim periodima za rasvjetu jedne zgrade.....	36
Tablica 11. Definicija cilja za razvoj proizvoda.....	37
Tablica 12. Glavne potrebe korisnika.....	38
Tablica 13. Ocjenjivanje i usporedba koncepata.....	46
Tablica 14. Osnovne karakteristike generatora GL-PMG-1800A.....	73

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

Oznaka crteža	Naziv crteža
IJ-8/13-001	Mala vertikalna vjetroelektrana
IJ-8/13-002	Postolje vjetroturbine
IJ-8/13-003	Vratilo vjetroturbine
IJ-8/13-004	Glavina generatora
IJ-8/13-005	Glavina vrtila za spoj s generatorom
IJ-8/13-006	Sklop nosača lopatica
IJ-8/13-007	Lopatica
IJ-8/13-008	Glavina trokutastog nosača lopatica
IJ-8/13-009	Trokutasti nosač lopatica
IJ-8/13-010	Kućište koničnog ležaja
IJ-8/13-011	Nosač kućišta kugličnog ležaja
IJ-8/13-012	Nosač kućišta koničnog ležaja
IJ-8/13-013	Nosač generatora
IJ-8/13-014	Vertikalni nosač 1
IJ-8/13-015	Vertikalni nosač 2
IJ-8/13-016	Horizontalni nosač
IJ-8/13-017	Rebro nosača generatora
IJ-8/13-018	Ploča vertikalnih nosača

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	mm	udaljenost težišta presjeka profila od težišta presjeka nosive konstrukcije
A	mm ²	površina presjeka na koju nastrujava zrak
A_d	mm ²	površina diska
A_j	mm ²	površina presjeka jezgre vijka
A_l	mm ²	površina lopatica vjetroturbine
A_{pot}	mm ²	potrebna površina presjeka nosive konstrukcije
A_s	mm ²	opterećena površina presjeka
A_y	mm ²	površina odabranog profila
A_{zav}	mm ²	površina zavora
b	mm	udaljenost ležajeva
b_1		faktor veličine
b_2		faktora kvalitete površine
C	N	dinamička nosivost ležaja
C_1	N	dinamička opterećenost ležaja
C_D		koeficijent otpora zraka
C_p		aerodinamični stupanj pretvorbe
$C_{p,max}$		najveći aerodinamični stupanj pretvorbe
C_t		koeficijent pretvorbe momenta
d	mm	promjer vratila na određenom presjeku
D	mm	promjer rotora
d_v	mm	nazivni promjer vijka
e	mm	udaljenost najudaljenije točke presjeka od promatrane osi presjeka
$\Delta E_{k_{vj}}$	J	promjena kinetičke energije vjetra
$E_{k_{vj}}$	J	kinetička energija vjetra
F	N	sila koja opterećuje promatrani presjek
F_a	N	aksijalna sila
F_A	N	sila u osloncu A
F_{BH}	N	horizontalna sila u osloncu B
F_{BV}	N	vertikalna sila u osloncu B

F_{max}	N	najveća sila na lopatici
F_r	N	radijalna sila
F_s	N	sila vjetra na srednjem promjeru lopatica
F_v	N	viskozne sile
g	m/s ²	ubrzanje Zemljine sile teže
G	N	ukupna težina vjetroturbine
G_{lop}	N	težina lopatica
G_{opt}	N	ukupna težina koja opterećuje nosivu konstrukciju
H	m	visina lopatica
I	mm ⁴	moment tromosti presjeka
I_y	mm ⁴	moment tromosti presjeka profila
L	mm	duljina vratila
l	mm	duljina na vratilu na kojoj djeluje kontinuirano opterećenje
l_x	mm	udaljenost koncentrirane sile kontinuiranog opterećenja od promatranog presjeka nosive konstrukcije
M	Nmm	moment savijanja promatranog presjeka
M_{red}	Nmm	reducirani moment
M_T	Nmm	stvarni moment dobiven na rotoru
M_{vj}	Nmm	moment kojeg bi teoretski radila struja brzine vjetra na rotoru
m_z	kg	masa zraka
$\dot{m}_z$	kg/s	maseni protok zraka
n	o/min	broj okretaja vjetroturbine
n_v		potreban broj vijaka
P_{naz}	W	nazivna snaga vjetroturbine
P_T	W	snaga dobivena od vjetra
$P_{T,max}$	W	najveća snaga dobivena od vjetra
P_{vj}	W	snaga vjetra u neporemećenoj struji vjetra
q	N/m	kontinuirano opterećenje na vratilu vjetroturbine
R	mm	polumjer rotora
r	mm	srednji polumjer lopatice
R_A	N	sila dodatnog otpora
R_e	N/mm ²	granica tečenja
R_m	N/mm ²	vlačna čvrstoća
S_{post}		postojeća sigurnost

S_{potr}		potrebna sigurnost
T	Nm	moment vrtnje na rotoru
v	m/s	brzina vjetra
v_1	m/s	brzina na ulazu u vjetroatregat
v_2	m/s	brzina na izlazu iz vjetroatregata
$v_g(t)$	m/s	komponenta udarne promjene brzine vjetra
$v_n(t)$	m/s	komponenta promjene brzine vjetra koja je podložna šumu
v_{naz}	m/s	nazivna brzina vjetra
v_r	m/s	brzina vjetra na referentnoj visini
$v_r(t)$	m/s	komponenta linearne promjene brzine vjetra
$v_s(t)$	m/s	osnovna komponenta brzine vjetra
v_{sr}	m/s	srednja brzina vjetra u vjetroatregatu
$v_{vj}(t)$	m/s	apsolutna brzina vjetra
W	mm ³	moment otpora presjeka
W_{pot}	mm ³	potreban moment otpora opterećenog presjeka
x	mm	krak sila na promatranom presjeku
x_t	mm	udaljenost težišta presjeka nosive konstrukcije
y		aksijalni faktor ležaja
z	m	tražena visina
z_0	m	visina iznad sloja trenja
z_r	m	referentna visina mjerenja
α		koeficijent hrapavosti površine
α_0		faktor čvrstoće materijala obzirom na način njegova opterećenja
β_{kf}		faktor zareznog djelovanja kod savijanja
β_{kt}		faktor zareznog djelovanja kod uvijanja
λ		koeficijent brzohodnosti
ρ	kg/m ³	gustoća zraka
σ_{dop}	N/mm ²	dopušteno naprezanje
σ_{ekv}	N/mm ²	ekvivalentno naprezanje nosive konstrukcije
σ_{fDN}	N/mm ²	trajna dinamička čvrstoća na savijanje pri naizmjeničnom opterećenju
$\sigma_{fDN\ dop}$	N/mm ²	dopušteno savojno naprezanje
σ_{red}	N/mm ²	reducirano naprezanje na presjeku

σ_{sav}	N/mm^2	savojno naprezanje nosive konstrukcije
σ_{tlak}	N/mm^2	tlačno naprezanje nosive konstrukcije
$\sigma_{tlak,z}$	N/mm^2	tlačno naprezanje zavara
τ_{dop}	N/mm^2	dopušteno smično naprezanje
$\tau_{dop, v}$	N/mm^2	dopušteno smično naprezanje vijka
τ_{smik}	N/mm^2	smično naprezanje
$\tau_{smik, v}$	N/mm^2	smično naprezanje vijka
$\tau_{t dop}$	N/mm^2	dopušteno torzijsko naprezanje
τ_{tDI}	N/mm^2	trajna dinamička čvrstoća na uvijanje pri istosmjernom opterećenju

SAŽETAK

U ovom radu bilo je potrebno istražiti potencijalna područja primjene za male vertikalne vjetroelevtrane. Zatim je bilo potrebno definirati funkcionalne značajke za potencijalna područja primjene te predložiti sustav proizvoda pogonjenih malim vjetroelevtranama. Nakon definiranih značajki bilo je potrebno proračunati i konstruirati vjetroelevtranu pri čemu je trebalo koristiti sklopove i dijelove dostupne na tržištu.

Konačan cilj ovog rada bio je izraditi 3D računalne modele te tehničku dokumentaciju proizvoda.

Ključne riječi: vertikalna vjetroturbina; vjetroelevtrana; proračun lopatica; snaga vjetroturbine

1. UVOD

Razvojem obnovljivih izvora energije te njihovom sve većom popularizacijom, a posebno mogućnošću distribucije energije na mjestu proizvodnje pridaje se sve veći naglasak na tzv. "privatnu" proizvodnju energije.

Jedan od oblika energije koju svakodnevno koristimo je električna energija čija je glavna prednost mogućnost lakog prenošenja i pretvaranja u drugi oblik energije, ali problem predstavlja način proizvodnje koji je danas još uvijek najzastupljeniji putem termoelektrana čiji su resursi ograničeni te značajno zagađuju okoliš.

Iz tih razloga čovjek se okrenuo u smjeru obnovljivih izvora energije te tako danas imamo nekoliko uređaja (solarne ćelije, vjetroturbine, hidroelektrane,...) koji mogu proizvesti dovoljne količine električne energije po ekološki prihvatljivim uvjetima. Većina takvih uređaja namijenjena je za velika postrojenja, ali sve je veće usmjerenje k proizvodnji uređaja koji bi omogućili proizvodnju el. energije u "svakom dvorištu".

Od takvih uređaja najzastupljenije su solarne ćelije koje pretvaraju energiju Sunca u el. energiju. Glavni problem takvih uređaja jest velika ovisnost o poziciji tj. neisplativost ako nema dovoljno sunčanih sati u godini. Uređaji koji se koriste za pretvorbu energije vjetra u električnu energiju nazivaju se vjetroturbine. Danas su najviše zastupljene horizontalne vjetroturbine, ali glavni nedostatak im je nemogućnost rada na vjetru koji mijenja smjer te puše na udare i glomaznost same vjetroturbine. Rješenje tih i drugih problema horizontalnih vjetroturbina rješava vertikalna izvedba vjetroturbine. Vertikalne vjetroturbine ovim svojim prednostima te mogućnošću relativno jednostavnog postavljanja i široke primjene kako u velikim postrojenjima tako i u kućanstvu imaju veliki potencijal da postanu jedan od najzastupljenijih uređaja za dobivanje el. energije putem obnovljivih izvora energije (vjetra) u svijetu.

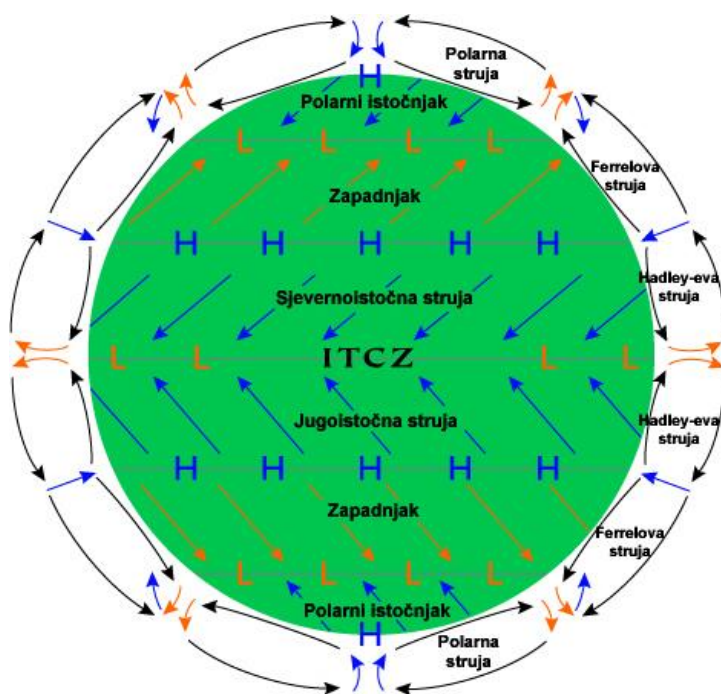
U ovom radu pokušati će se dati prijedlog konstrukcije takve jedne vertikalne vjetroelektrane koja bi zadovoljila potrebe potrošnje el. energije u kućanstvima.

2. VJETAR

2.1. Općenito o vjetru

Prirodno strujanje zraka zovemo vjetar. To je zapravo 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 i do razlike temperature u slojevima zraka (efekt zagrijavanja zraka preko tla). Taj gradijent temperature uzrokuje i gradijent tlaka te se zračne mase počinju gibati. Na osnovu ovoga može se zaključiti da vjetar indirektno nastaje iz sunčeve energije.

Grubo se mogu definirati dvije vrste vjetrova. Prvi su tzv. globalni vjetrovi, prikazani na Slici 1. Oni pušu od ekvatora prema hladnim Zemljinim polovima, a nalaze se na visinama većim od 1000 m te na njih tlo značajnije ne utječe. Oni nastaju djelovanjem Coriolisove sile na vektor brzine atmosferskih čestica. Coriolisovu komponentu generira vrtložno strujanje kao posljedica rotacije Zemlje. Takva kombinacija vertikalnog i horizontalnog pomaka tvori tri zone tj. tri struje: Haley-evu struju, Ferrelovu struju i Polarnu struju.

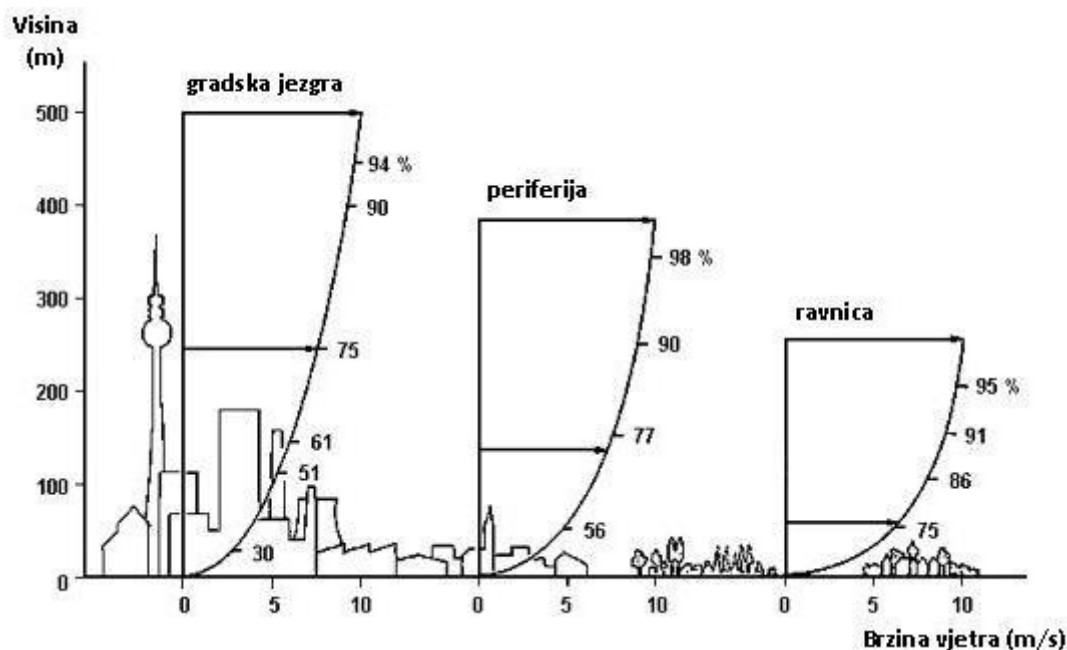


Slika 1. Smjer globalnog vjetra

Sa stajališta iskorištavanja energije vjetra, puno su nam značajniji lokalni vjetrovi koji pušu pri tlu (do 100 m visine). Oni ovise i o smjeru globalnih vjetrova, ali ponajviše ih pokreću razlike u temperaturi kopna i mora, te ostali reljefni i klimatski čimbenici na pojedinim lokacijama. Zato možemo reći da na lokalne vjetrove dosta utječe i vrsta terena (npr. ravnica, planine, dolina, naselja, šume...) te izgled terena (pješčani, kameni, vlažni, vodeni, snježni) iznad kojeg pušu.

2.1.1. Utjecaj vrste terena (hrapavosti površine) na vjetar

Hrapavost površine ima veliki utjecaj na brzinu vjetra pa tako s porastom visine hrapavosti raste i otpor te se vjetar usporava. 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 s druge strane travnate površine pune grmlja ipak usporavaju vjetar. Na Slici 2 prikazana je promjena brzine vjetra ovisno o hrapavosti (vrsti terena).



Slika 2. Ovisnost brzine vjetra o visini hrapavosti površine

2.2. Parametri vjetra

Sa stajališta iskorištavanja energije vjetra, najvažnija je naravno njegova snaga (jačina). Ako pogledamo opću Bernoullijevu jednadžbu (očuvanje ukupne mehaničke energije) gdje svi članovi imaju dimenziju energije po jediničnoj masi fluida:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = C = konst. \quad (1)$$

član $v^2/2$ označava specifičnu kinetičku energiju, a član $(p/\rho + gz)$ specifičnu potencijalnu energiju.

Zbog male mase zraka, potencijalnu energiju možemo zanemariti te nam ostaje samo kinetička energija vjetra:

$$E_{k_{vj}} = \frac{m_z v^2}{2} \quad (2)$$

Ako se gornja jednadžba derivira po vremenu, dobije se snaga vjetra (brzina v je konstantna):

$$\frac{dE_{k_{vj}}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m_z v^2}{2} \right) = P = \frac{\dot{m}_z v^2}{2} \quad (3)$$

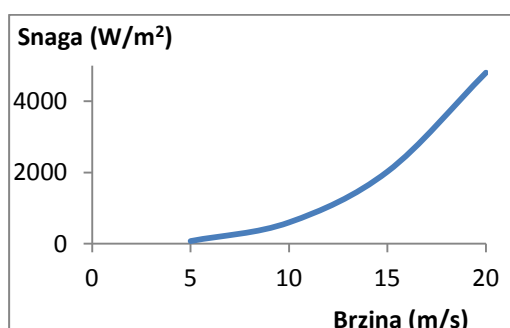
Maseni protok zraka gustoće ρ koji struji brzinom v kroz presjek površine A je jednak:

$$\dot{m}_z = \rho v A \quad (4)$$

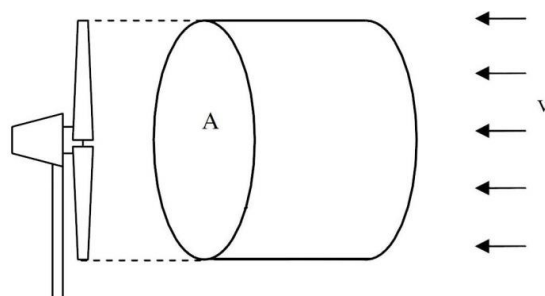
Ako se gornji izraz uvrsti u jednadžbu (2) i (3), dobije se konačni opći izraz za snagu vjetra:

$$P_{vj} = \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (5)$$

Iz gornje jednadžbe vidi se da snaga vjetra eksponencijalno raste s porastom brzine vjetra [Slika 3], stoga je ona njegov najznačajniji parametar, a vidi se također i da će vjetar veću snagu predavati turbini ukoliko je veća površina koju zahvaćaju njezine lopatice [Slika 4].

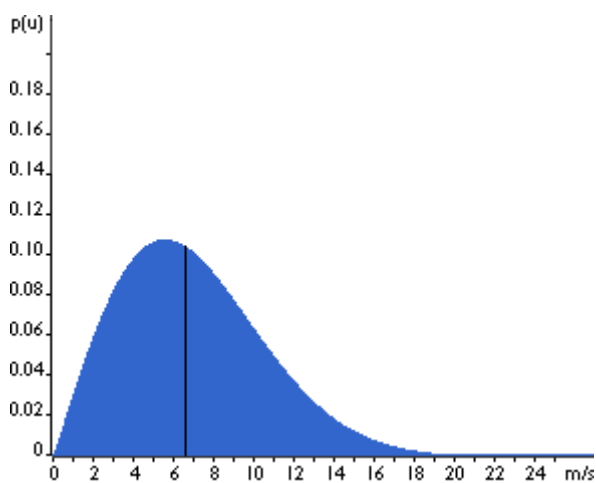


Slika 4. Teoretska snaga vjetroturbine



Slika 3. Površina koju zahvaćaju lopatice

Uz brzinu vjetra koja nam je najvažniji faktor, dosta velik utjecaj ima i njegova učestalost (kontinuitet). Idealni bi bili oni vjetrovi koji pušu svaki dan i to jednakom brzinom. To je dakako nemoguće stoga je poželjno napraviti osrednjavanje njegove brzine kroz neko vrijeme kako bi najbolje opisali njegovo pojavljivanje i odredili koliko nam je taj vjetar pogodan. To je moguće napraviti Weibullovom razdiobom (funkcijom) koja zapravo aproksimira podatke mjerene pri visini 10 m kroz više godina i daje nam vjerojatnost pojavljivanja određene brzine vjetra. Slika 5 pokazuje primjer Weibullove razdiobe za srednju brzinu vjetra od 7 m/s, gdje okomita linija dijeli površinu na 2 jednaka dijela te označuje medijan distribucije (50 % vremena brzina vjetra će biti manja od medijana distribucije, 50 % vremena veća). Razlikujemo dakle srednju brzinu (7 m/s), medijan distribucije ($\sim 6,6$ m/s) i najučestaliju brzinu ($\sim 5,5$ m/s).



Slika 5. Weibullova razdioba

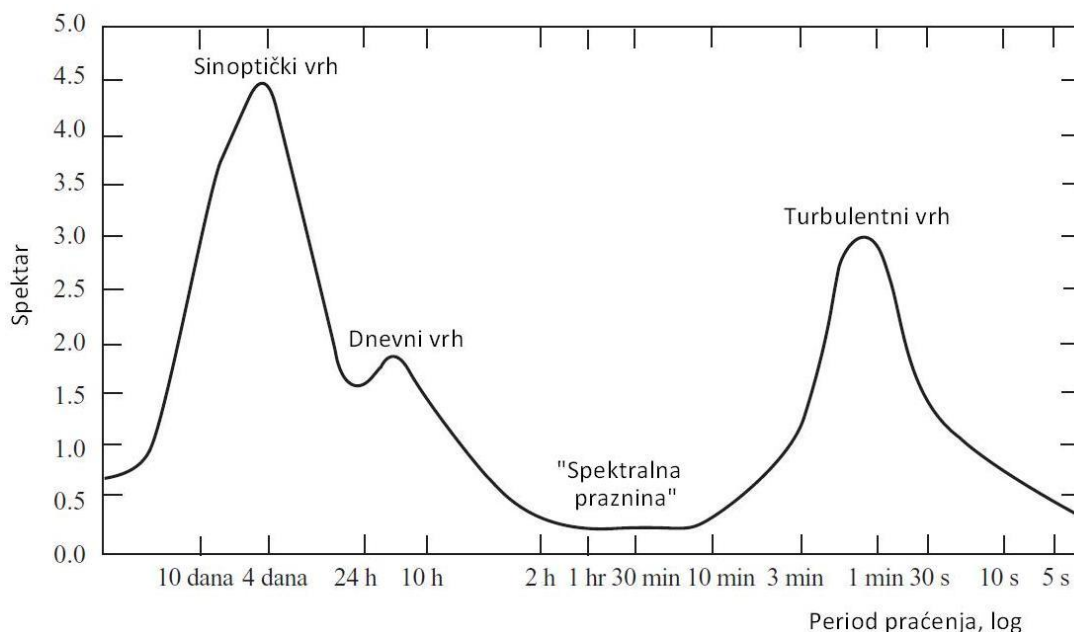
Jačina vjetra tradicionalno se prikazuje Beaufortovom ljestvicom [Tablica 1].

Tablica 1. Beaufortova ljestvica jačine vjetra

Jačina (Bf)	Naziv	Brzina		
		km/h	m/s	čvor
0	Tišina	<1	0-0,2	<1
1	Lahor	1-5	0,3-1,5	1-3
2	Povjetarac	6-11	1,6-3,3	4-6
3	Slabi vjetar	12-19	3,4-5,4	7-10
4	Umjereni vjetar	20-28	5,5-7,9	11-16
5	Umjereno jaki vjetar	29-38	8,0-10,7	17-21
6	Jaki vjetar	39-49	10,8-13,8	22-27
7	Žestoki vjetar	50-61	13,9-17,1	28-33
8	Olujni vjetar	62-74	17,2-20,7	34-40
9	Jaki olujni vjetar	75-88	20,8-24,4	41-47
10	Orkanski vjetar	89-102	24,5-28,4	48-55
11	Jaki orkanski vjetar	103-117	28,5-32,6	56-63
12	Orkan	>118	>32,7	>64

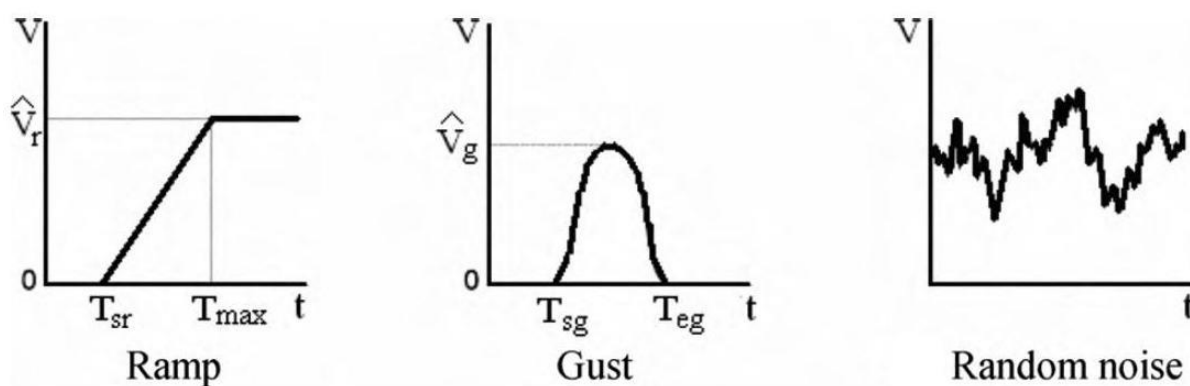
Mjerenje brzine vjetra može se vršiti i kratkoročno. To nam također može biti bitno kako bi projektirali turbinu na nagle turbulencije vjetra. Van der Hoven je 1957. napravio dijagram spektra snage za jedinicu mase kod različitih perioda praćenja vjetra [Slika 6], od ultra kratkih pa sve do duljih. Na dijagramu se vidi sinoptički vrh (formiran na osnovi par dana praćenja), dnevni vrh (na osnovi jednog dana) i turbulentni vrh (na osnovi par minuta). Od značaja nam je područje "spektralne praznine" koje nam pokazuje da se sinoptičke i dnevne promjene mogu tretirati sasvim drugačije od ultra kratkih turbulentnih promjena. To nam i dokazuje ta "praznina" u kojoj je energija jako mala te je beznačajna. Zaključujemo da su kratke turbulencije vjetra bitne za projektiranje vjetroturbina u smislu dinamičkih naprezanja, ali nisu toliko presudne koliko je primjerice brzina osrednjena u dužem vremenskom periodu.

Upravo se zbog tog razloga (turbulentnog karaktera vjetra) i osrednjavaju brzine u duljem vremenskom periodu.



Slika 6. Van der Hovenov spektral na temelju osnovne komponente brzine vjetra

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) i komponentu promjene brzine vjetra koja je podložna šumu (eng. noise). Taj se model koristi kod složenih modeliranja i opisan je jednadžbama (2 - 6). Ako sagledamo sve 4 komponente, jedino je osnovna komponenta brzine vjetra konstantna, ostale su promjenjive i modeliramo ih prema iskustvenim podacima i tablicama. Primjeri promjenjivih komponenata brzine prikazani su na slici 7.



Slika 7. Primjeri promjenjivih komponenata brzine

Jednadžba koja opisuje taj 4-komponentni model brzine vjetra, glasi:

$$v_{vj}(t) = v_b(t) + v_r(t) + v_g(t) + v_n(t) \quad (6)$$

gdje je:

$v_{vj}(t)$ - apsolutna brzina vjetra,

$v_b(t)$ - osnovna komponenta brzine vjetra,

$v_r(t)$ - komponenta linearne promjene brzine vjetra,

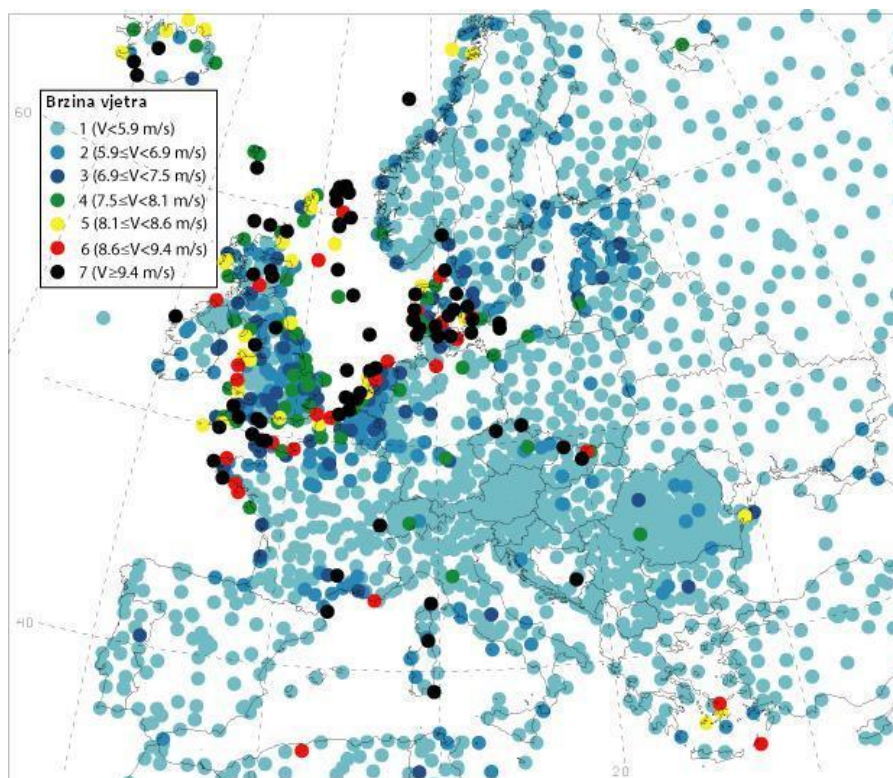
$v_g(t)$ - komponenta udarne promjene brzine vjetra

$v_n(t)$ - komponenta promjene brzine vjetra koja je podložna šumu

Zbog jednostavnosti se u literaturi najčešće ipak koristi i govori samo o osnovnoj komponenti brzine vjetra jer ona ipak zauzima najveći udio u formiranju apsolutne brzine.

2.3. Resursi vjetra - vjetropotencijal

Atlasi (karte) resursa vjetra formiraju se najčešće na temelju brzine vjetra budući je ona njegov najvažniji parametar. Pri tome se naravno uzima u obzir osrednjena brzina vjetra tako da je tu njegova učestalost već uzeta u obzir. Sljedeće slike prikazuju resurse vjetra u Europi [Slika 8], svijetu [Slika 9] i Republici Hrvatskoj [Slika 10].

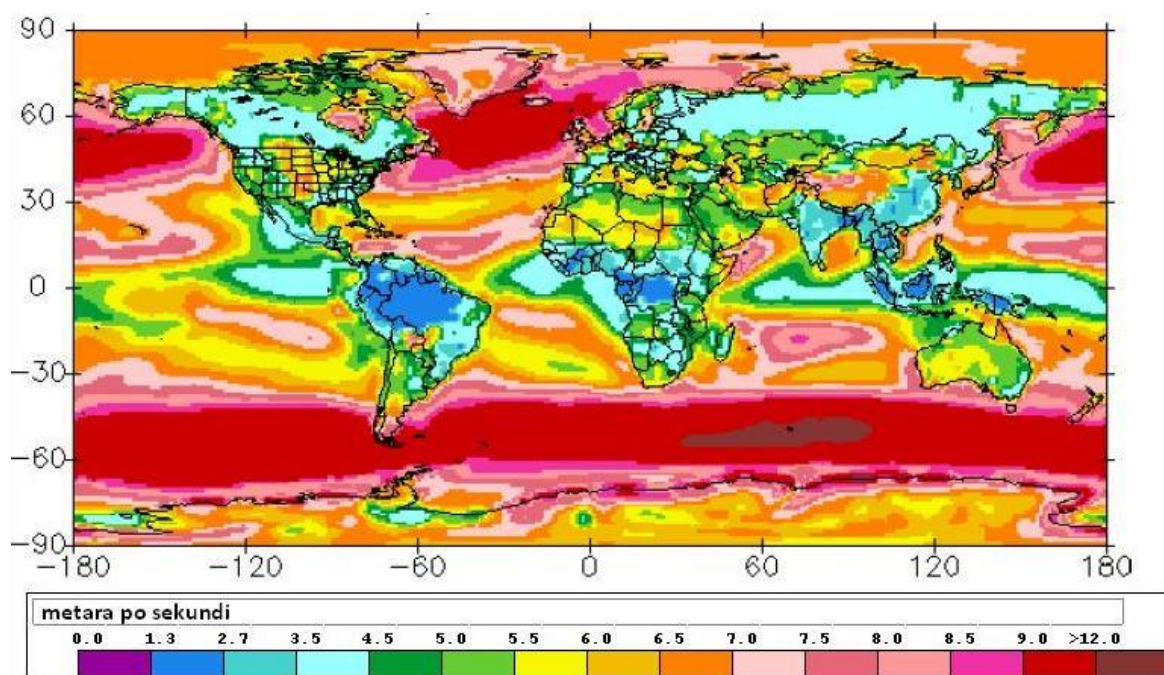


Slika 8. Resursi vjetra u Europi (na visini 80 m, 2000. godina)

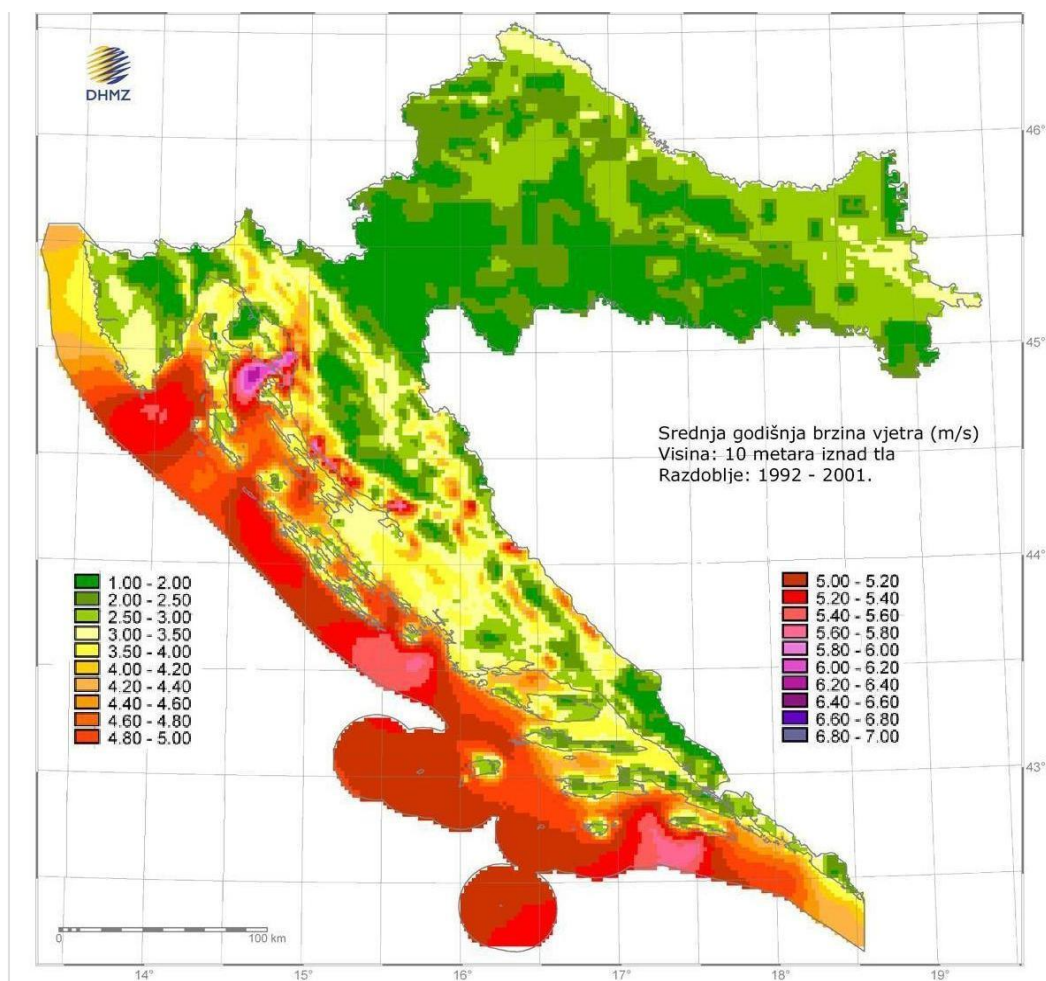
Vidi se iz slike da praktički jedino sjeverna i sjeverozapadna Europa imaju dobre resurse vjetra. To su hladni jaki vjetrovi s Atlantika i Sjevernog mora.

Ako pogledamo situaciju u svijetu [Slika 9], vidi se da najjači vjetrovi na Zemlji pušu u područjima neiskoristivim čovjeku, nad velikim oceanima. Dobro iskoristivih vjetrova ima u nekim priobalnim područjima. Najslabiji vjetrovi su u područjima daleko od mora.

Sa stajališta iskorištavanja vjetra, situacija u Hrvatskoj je dosta loša u odnosu na sjever Europe. Na karti [Slika 10] se vidi da na kopnu imamo vrlo slab vjetropotencijal, a niti uz obalu nije puno bolja situacija, iako na obali je vjetar jednolikije. Bolja situacija je iznad mora (crveno područje), ali i to je isto dosta slabo gledano u nekim europskim i svjetskim okvirima. U Kvarnerskom zaljevu imamo buru koja je dosta jak vjetar, ali nažalost nije kontinuirana da puše svakodnevno, a i kad puše, puše na mahove



Slika 9. Resursi vjetra na Zemlji (na visini 50 m)



Slika 10. Resursi vjetra u Hrvatskoj (na visini 10 m)

3. VJETROELEKTRANA

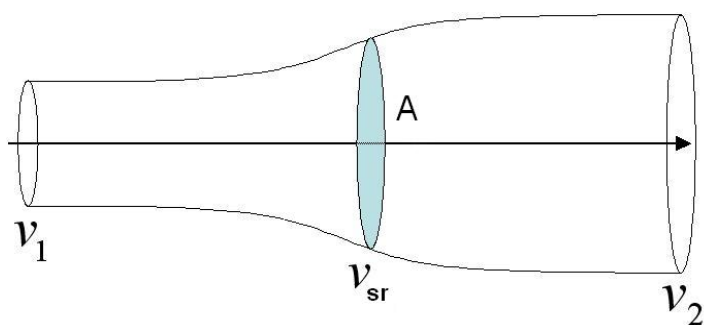
Vjetroelektrana se sastoji od niza blisko smještenih vjetroatregata (najčešće istog tipa) izloženih istom vjetru i priključenih posredstvom zajedničkog rasklopnog uređaja na elektroenergetski sustav.

Vjetroatregat je rotirajući stroj koji pretvara kinetičku energiju vjetra prvo u mehaničku, a zatim preko električnih generatora u električnu energiju. Pri tome se rotor vjetroturbine i rotor električnog generatora nalaze na istom vratilu.

Kod pretvaranja kinetičke energije vjetra u mehaničku energiju (okretanje osovine generatora) iskorištava se samo razlika brzine vjetra na ulazu i izlazu [Slika 11]. Albert Betz, njemački fizičar dao je još davne 1919. zakon energije vjetra, poznat kao Betzov zakon.

Betzov zakon :

$$P_{T,max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \quad (7)$$



Slika 11. Skica protoka fluida kroz vjetroatregat

Vrijedi da je :

$$v_{sr} = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) \quad (8)$$

a maseni protok $\dot{m}$ fluida kroz disk je onda:

$$\dot{m} = \rho v_{sr} A_d = \rho A_d \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad (9)$$

Gdje je:

A_d - površina diska

v_1 - brzina na ulazu u vjetroatregat

, v_2 - brzina na izlazu iz vjetroatregata

Prolaskom kroz disk vjetru oduzimamo snagu (smanjuje mu se kinetička energija) pa njegova brzina pada s vrijednosti v_1 na vrijednost v_2 . Gledajući s našeg stajališta, mi smo tu snagu dobili i ona iznosi:

$$P_T = \Delta E_{k_{vj}} = \dot{m}_z \cdot \frac{1}{2} (v_1^2 - v_2^2) \quad (10)$$

Ako se u gornju jednadžbu uvrsti izraz (9) za maseni protok dobiva se:

$$\begin{aligned} P_T &= \rho A \frac{(v_1 + v_2)}{2} \cdot \frac{1}{2} (v_1^2 - v_2^2) \\ &= \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2) \\ &= \frac{1}{4} \rho A v_1^3 \cdot \left[1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^3 \right] \end{aligned} \quad (11)$$

Maksimum gornje funkcije dobije se ako ju deriviramo po količniku (v_2/v_1) i nakon toga izjednačimo s nulom. Dobivamo:

$$3 \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 + 2 \left(\frac{v_2}{v_1} \right) - 1 = 0 \quad (12)$$

iz čega slijedi rješenje odnosno maksimum za danu brzinu vjetra v_1 i površinu diska A_d :

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3} \quad (13)$$

Uvrstivši gornje rješenje (maksimum) u jednadžbu (11) dobiva se maksimalna snaga koju možemo dobiti (preuzeti) od vjetra tj. Betzov zakon:

$$P_{T,max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^3 \cdot A_d \quad (14)$$

Sada se može definirati i aerodinamički stupanj pretvorbe C_p koji je jednak omjeru dobivene (preuzete) snage od vjetra P_T i raspoložive snage u slobodnoj (neporemećenoj) struji vjetra (prije diska) P_{vj} :

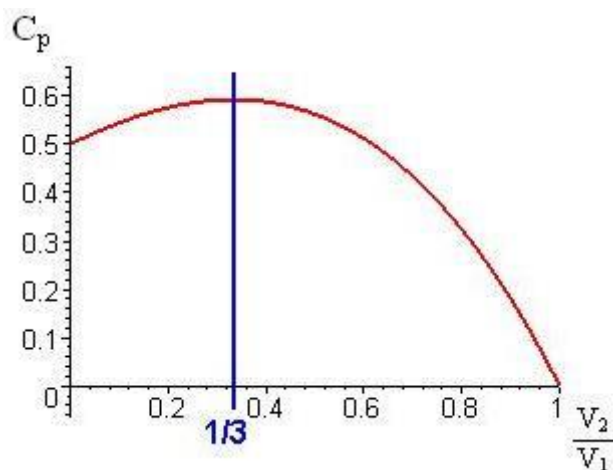
$$C_p = \frac{P_T}{P_{vj}} \quad (15)$$

Za $P_T = P_{T,\max}$, C_p iznosi:

$$C_{p,\max} = \frac{P_{T,\max}}{P_{vj}} = \frac{\frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^3 \cdot A}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^3 \cdot A} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (16)$$

Ova vrijednost nam predstavlja maksimalni udio koji možemo dobiti iz raspoložive snage vjetra i naziva se Betzova granica prema njemačkom fizičaru i pioniru vjetroturbina Albertu Betzu. Očito će to biti idealan slučaj, a realna situacija će uvijek biti lošija odnosno aerodinamički stupanj pretvorbe C_p će biti manji. Danas primjerice najmodernije vjetroturbine mogu doseći vrijednost oko 0,5.

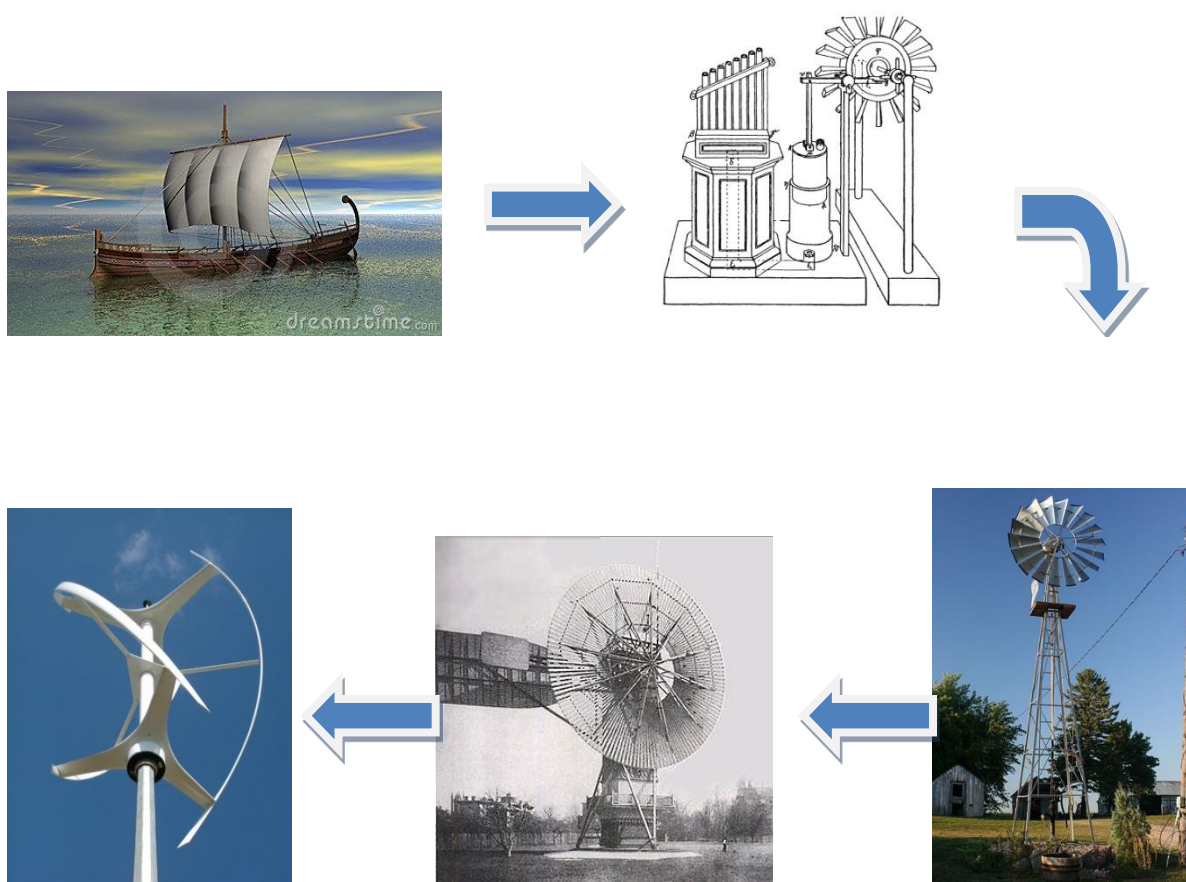
Na slici 12. prikazana je ovisnost aerodinamičkog stupnja pretvorbe C_p o omjeru smanjenja brzine vjetra nakon prolaza diska (rotora).



Slika 12. Ovisnost aerodinamičkog stupnja pretvorbe o omjeru smanjenja brzine vjetra

3.1. Povijest

Povijest vjetroelektrana i korištenja energije vjetra seže još od doba kada je čovjek izumio jedra koja su omogućila olakšani transport ljudi i robe. Dugo vremena nakon prvih jedara uslijedilo je korištenje energije vjetra za obavljanje mehaničkog rada u mlinovima i za pokretanje vodenih pumpi (posebice u Nizozemskoj, na srednjem zapadu SAD-a i u zabačenim dijelovima Australije). U modernim vremenima s dolaskom i izumom električne energije počinju se upotrebljavati u svrhu proizvodnje iste, no tek u zadnja dva desetljeća zbog sve većeg zagađenja okoliša počinju svoj značajan uzlet, da bi danas to bio jedan od glavnih izvora energije za blisku budućnost [Slika 13].

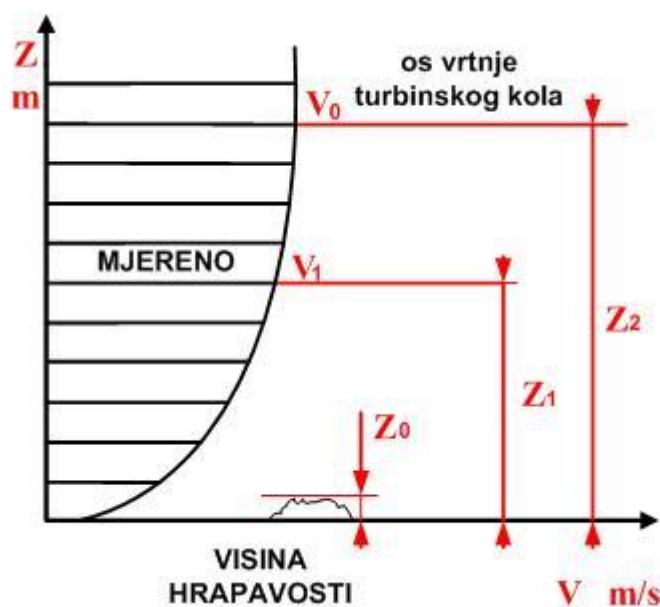


Slika 13. Razvoj vjetroelektrana kroz povijest

3.2. Karakteristike vjetroelektrana

Karakteristike vjetroelektrana najviše ovise o vjetropotencijalu odnosno karakteristikama vjetra na pojedinoj lokaciji. Najvažnija karakteristika je srednja godišnja brzina vjetra na određenoj visini iznad tla. Pomoću mjerenja na standardnim visinama od 10 metara iznad tla s pripadnim faktorom hrapavosti moguće je izračunati brzinu vjetra na potrebnoj visini od tla.

Ta promjena profila brzine vjetra po visini naziva se gradijent brzine vjetra [Slika 14].



Slika 14. Gradijent brzine vjetra

Vertikalni gradijent brzine se definira kao :

- Logaritamska funkcija

$$v = v_r \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_r/z_0)} \quad (17)$$

- Eksponencijalna funkcija

$$\frac{v}{v_r} = \left(\frac{z - z_0}{z_r} \right)^\alpha \quad (18)$$

Gdje je:

v - brzina vjetra

z - tražena visina

v_r - brzina vjetra na referentnoj visini

z_r - referentna visina mjerenja

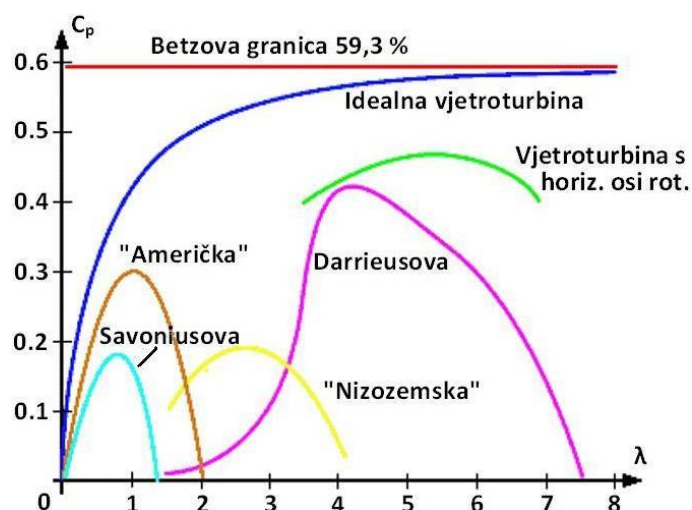
z_0 - visina iznad sloja trenja (za nisko raslinje može se uzeti da je jednaka nuli)

α - koeficijent hrapavosti površine (od 0,1 do 0,32)

Brzine vjetrova na kojima se vjetrogenerator pokreće su oko 3 m/s pri čemu je proizvodnja el. energije prilično mala. Optimalna brzina vjetra je oko 15 m/s (max. proizvodnja el. energije), a daljnjim porastom brzine količina el. energije se ne povećava i na brzinama od 25 do 30 m/s vjetroatregat se isključuje zbog velikog mehaničkog opterećenja

3.2.1. Aerodinamički stupanj pretvorebe (efikasnost)

Stupanj učinkovitosti ili efikasnosti je kod svih strojeva uvijek najvažnija karakteristika jer iz njega direktno slijedi isplativost samog rada stroja. Teži se naravno uvijek što većem stupnju učinkovitosti, a on se u našem slučaju zove aerodinamički stupanj pretvorbe. Kao što svaki stupanj učinkovitosti predstavlja omjer dobivenog i uloženog, tako i aerodinamički stupanj pretvorbe predstavlja omjer dobivene i "uložene" snage. "Uložena" je napisano pod navodnicima jer je u slučaju vjetroturbina ta uložena snaga besplatna budući da se radi o snazi vjetra. Na slici 15. prikazan je aerodinamički stupanj pretvorbe C_p u ovisnosti o koeficijentu brzohodnosti λ za različite tipove vjetroturbina.



Slika 15. Promjena aerodinamičkog stupnja pretvorbe u ovisnosti o koeficijentu brzohodnosti
Unatoč konstrukcijama koje se sve više približavaju gornjoj granici iskoristivosti, horizontalne vjetroturbine se suočavaju s vrtlozima koji nastaju na vrhovima i na čeonj strani

lopatica pa je time dobivena energija umanjena, između ostalog i za te gubitke. Kod vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje nema pojave vrtloga na vrhovima lopatica.

3.2.2. Koeficijent pretvorbe momenta - C_t

Prema uzoru na aerodinamički stupanj pretvorbe C_p možemo definirati i koeficijent pretvorbe momenta C_t :

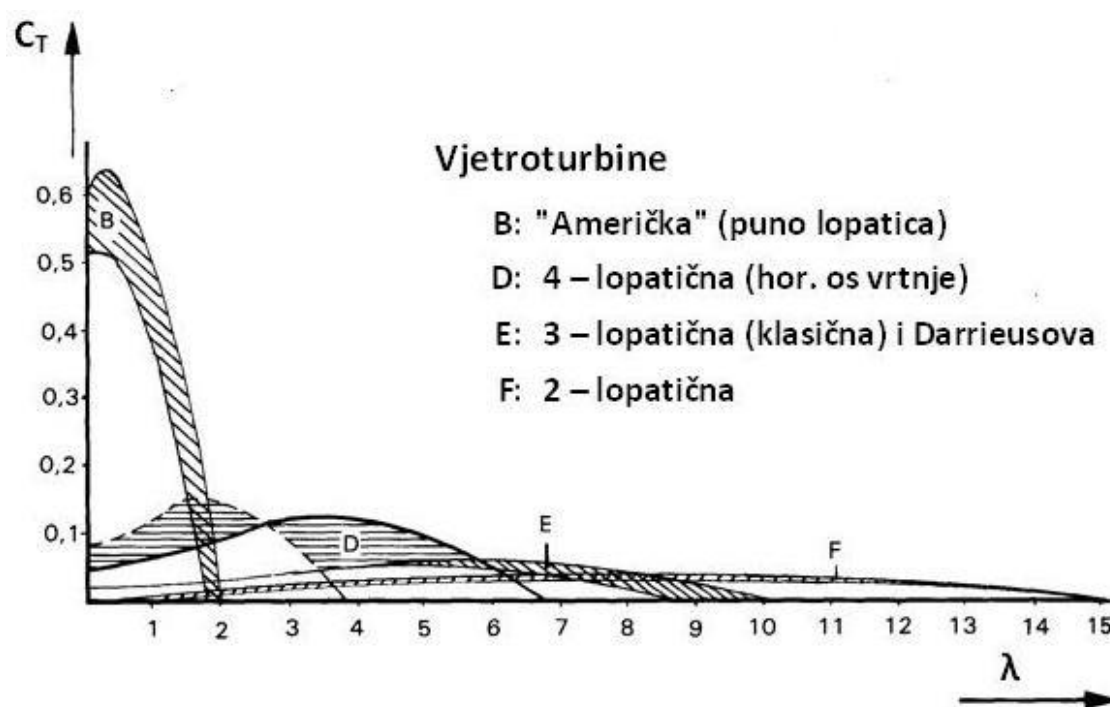
$$C_t = \frac{M_T}{M_{vj}} = \frac{M_T}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_{vj}^2 \cdot r} \quad (19)$$

gdje ej:

M_T - stvarni moment dobiven na rotoru,

M_{vj} - moment kojeg bi teoretski radila struja vjetra brzine v_{vj} na rotoru zadanog polumjera r .

Na osnovu toga možemo također usporediti neke tipove vjetroturbina u dijagramu zavisnosti koeficijenta pretvorbe momenta C_t s promjenom koeficijenta brzohodnosti λ [Slika 16]:



Slika 16. Promjena koeficijenta pretvorbe momenta s promjenom koeficijenta brzohodnosti

3.2.3. Koeficijent brzohodnosti

Možemo također usporediti i koeficijente brzohodnosti (brzine rotacije) za neke tipove vjetroturbina te prema njima zaključiti jesu li brzohodne ili sporohodne [Slika 17]. Gotovo uvijek je koeficijent brzohodnosti (hodnost) veći što je manji okretni moment vjetroturbine. Konkretnije, za klasične vjetroturbine (horizontalna os vrtnje) on varira od $\lambda = 5$ do 7, kod Darrieusovih varira od $\lambda = 2$ do 4, kod Savoniusovih najčešće $\lambda \leq 1$ (obodna brzina ne može biti veća od brzine vjetra) te kod višelopatičnih (tzv. "Američkih") oko $\lambda = 1$. Prema tome, možemo zaključiti da su klasične moderne vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje te Darrieusove vjetroturbine brzohodne, a Savoniusove i "Američke" sporohodne.

	Propeler	Darrieus	Višelopatične	Savonius
Os vrtila	horizontalna	vertikalna	horizontalna	vertikalna
Moment	nizak	nizak	visok	visok
Hodnost	brzohodne	brzohodne	sporohodne	sporohodne

Slika 17. Usporedba hodnosti i momenata za neke oblike vjetroturbina

Upravo ovi faktori, brzina vjetra na određenoj visini, hrapavost podloge, brzohodnost najviše utječu na karakteristike samih vjetroelektrana [Tablica 2].

Tablica 2. Prednosti i nedostaci vjetroelektrana

VJETROELEKTRANE	
PREDNOSTI	NEDOSTACI
- obnovljiv izvor energije	- nemogućnost rada pri velikim brzinama vjetra
- pozitivan utjecaj na smanjenje vjetra	- učinkovitost ovisna o području gdje se vjetroelektrana nalazi
- nema štetnih emisija	- "estetsko zagađenje" kod velikih vjetroelektrana
- smanjena ovisnost o fosilnom gorivu	- stvaranje buke, pogotovo kod velikih vjetroelektrana
- kemijski i biološki ne zagađuju okoliš	- učinkovitost manja nego kod klasičnih elektrana
- mogućnost proizvodnje el. energije na mjestima gdje el. mreža nije provedena	- visoka cijena ugradnje i visoki troškovi održavanja, pogotovo kod velikih vjetroelektrana
- široka mogućnost upotrebe (velika postrojenja, poslovni centri, kućanstva, itd.)	- za usklađivanje broja okretaja vjetroturbine sa brojem okretaja generatora potreban multiplikator
- veliki potencijal da postane vodeći način dobivanja el. energije u budućnosti	

3.3. Vrste vjetroelektrana

Vjetroelektrane se mogu podijeliti na kopnene, priobalne, plutajuće i zračne vjetroelektrane.

3.3.1. Kopnene vjetroelektrane

Kopnene vjetroelektrane najčešći su oblik vjetroelektrana. Postavljaju se na čvrsto tlo i često se izvode kao "parkovi vjetroelektrana" [Slika 18] .



Slika 18. Kopnena vjetroelektrana Royd Moore, UK

Najveće kopnene vjetroelektrane u svijetu su:

Tablica 3. Najveće kopnene vjetroelektrane u svijetu

VJETROELEKTRANA	NAZIVNA SNAGA (MW)	DRŽAVA
Jaisalmer Wind Park	1,064	Indija
Alta (Oak Creek-Mojave)	1,020	SAD
Roscoe Wind Farm	781.5	SAD
Fowler Ridge Wind Farm	599.8	SAD
Dabancheng Wind Farm	500	Kina

3.3.2. Priobalne (offshore) vjetroelektrane

Priobalne vjetroelektrane [Slika 19]grade se na moru u priobalnom području do 60m dubine i na udaljenosti do maksimalnih 50 km. Kako voda ima puno manju površinsku "hrapavost" od kopna to ima velik utjecaj na brzinu vjetra koje su mnogo veće. Održavanje i instalacija priobalnih vjetroelektrana su skuplji od kopnenih, a potrebna je dodatna zaštita od korozije.



Slika 19. Priobalna vjetroelektrana Lilgrund, Švedska

Najveće priobalne elektrane nalaze se u Europi:

Tablica 4. Najveće priobalne elektrane u Europi

VJETROELEKTRANA	NAZIVNA SNAGA (MW)	DRŽAVA
Walney	367	Ujedinjeno Kraljevstvo
Thanet	300	Ujedinjeno Kraljevstvo
Horns Rev II	209	Danska
Rødsand II	207	Danska
Lynn and Inner Dowsing	194	Ujedinjeno Kraljevstvo

3.3.3. Plutajuće vjetroeletkrane

Plutajuće ili pučinske vjetroeletkrane [Slika 20] postavljaju se na plutajuću strukturu u dubljem moru, gdje nije moguće postaviti priobalne vjetroeletkrane. Njihova izvedba je dosta složenija i troškovi održavanja su prilično veliki, ali zbog mogućnosti da pristupe jačim vjetrovima dalje na moru su isplative.



Slika 20. Prvi veći plutajući vjetroatregat Hywind, Norveška

3.3.4. Visinske vjetroeletkrane

Koncept visinskih vjetroeletkrana [Slika 21] zasniva se na iskorištenju energije vjetra u višim slojevima atmosfere i izrađuju se bez potpore tornja. Predviđene su za iskorištavanje vjetra na većim visinama koji su puno snažniji te su potpuno neovisne o području u kojem se postavljaju. Na taj način visinske vjetroeletkrane mogu proizvoditi el. energiju 90% vremena, dok one na zemlji mogu proizvoditi el. energiju tek 35% vremena. Posljednjih 20 godina napravljeno je dosta konceptata i projekata od kojih bi neki vrlo brzo mogli biti realizirani.



Slika 21. Visinski zračni vjetroatregat Kite Gen

3.4. Vrste vjetroatregata

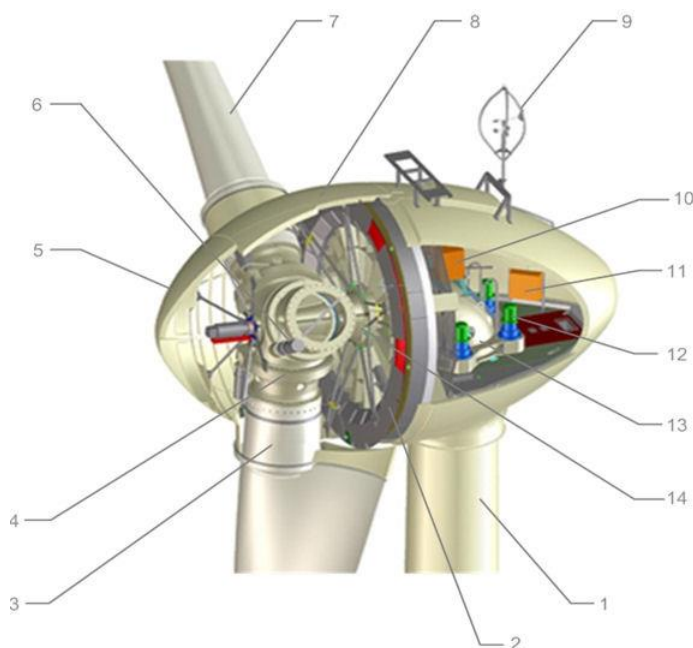
Podjela vjetroatregata prema položaju osi vrtnje rotora :

- Horizontalni vjetroatregati
- Verikalni vjetroatregati

3.4.1. Horizontalni vjetroatregat

Vjetroatregati sa horizontalnom (vodoravnom) osi vrtnje danas su najzastupljeniji tip vjetroturbina. Rotirajuće vratilo i generator postavljaju se na vrh tornja (visine do 90 m) u smjeru strujanja vjetra, a najčešće se izvode sa 3 lopatice (ponekad i 2 lopatice) duljine od 20 do 40 m. Većina vjetroatregata mora imati multiplikator preko kojeg se pogoni generator. Sve vjetroturbine opremljene su uređajima koji sprečavaju okretanje u slučaju jakih i udarnih vjetrova. [Slika 22]. Razvijenost horizontalnih vjetroatregata prilično je visoka tako da danas već imamo vjetroatregate sa izlaznim snagama od nekoliko MW. Horizontalni vjetroatregati najčešće se postavljaju u tzv. "vjetroparkove" i zahtjevaju dosta velik dio zemljišta za ugradnju.

- 1 - toranj
- 2 - sinkroni generator
- 3 - adapter
- 4 - glavčina
- 5 - prednji dio oplata(spiner)
- 6 - klizni koluti
- 7 - lopatice
- 8 - oplata gondole(rotirajući dio)
- 9 - anemometar
- 10 - priključna kutija generatora
- 11 - uzbuda generatora
- 12 - elektromotorni pogon
za zakretanje gondole(yaw)
- 13 - glavni nosač
- 14 - osovinski rukavac



Slika 22. Glavni dijelovi vjetroatregata

3.4.2. Vertikalni vjetroagregat

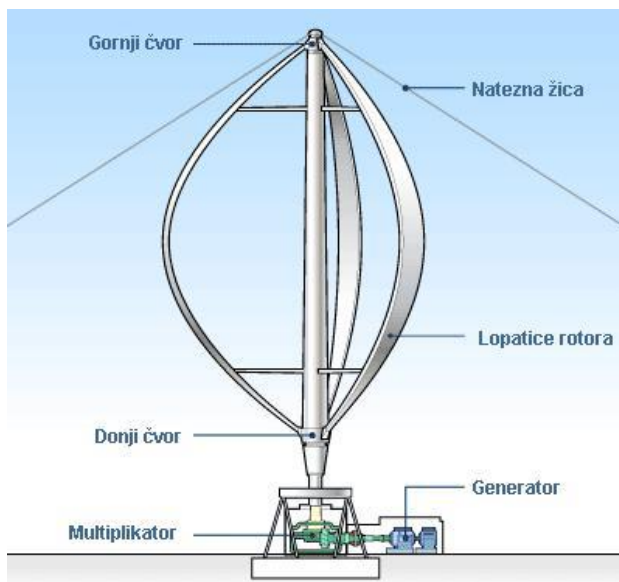
Vjetroagregati sa vertikalnom osi vrtnje imaju glavno rotirajuće vratilo postavljeno vertikalno pa stoga ne ovise o smjeru strujanja vjetra. To predstavlja veliki potencijal za ugradnju na mjesta gdje su promjene smjera strujanja vjetra učestale (turbulencije) kao što su zgrade, poslovni centri, kućanstva i općenito niži objekti. Kod vertikalnih vjetroagregata generator i reduktor mogu biti smješteni na postolju čime je održavanje uvelike olakšano. Glavni nedostatak ovakvog tipa vjetroagregata jest manja brzina vrtnje (od horizontalnih vjetroagregata) odnosno manje su izlazne snage i zbog dinamičnog strujanja vjetra lopatice su opterećene.

Osnovni tipovi vertikalnih vjetroagregata su :

- Darrieusov rotor [Slika 23]
- Savoniusov rotor [Slika 27]

3.4.2.1. Darrieusov vjetroagregat

Osnovnu izvedbu ove vjetroturbine patentirao je 1927. godine francuski inženjer zrakoplovstva Georges Jean Marie Darrieus prema kojoj su se kasnije razvijale druge izvedbe.



Slika 23. Darrieusov vjetroagregat

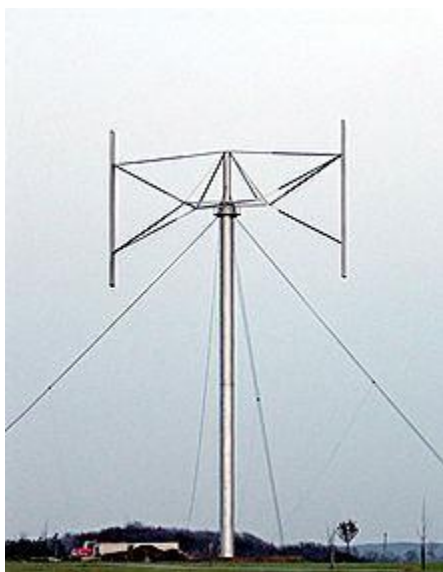
Oko rotirajućeg vratila raspoređene su parabolične lopatice. Generator i multiplikator smješteni su u podnožje same konstrukcije te je tako njihovo održavanje uvelike olakšano. Glavna prednost ovakve vjetroturbine jest neovisnost o smjeru strujanja vjetra.

Ovakvoj izvedbi vjetroturbine potrebna je pomoć pri pokretanju jer moraju postići određenu brzinu vrtnje prije nego što se počnu same vrtjeti. Pri malim brzinama Darrieusova turbina ima vrlo mali moment pa se vrlo lako zaustavlja zbog trenja u sustavu.

Izvedbe Darrieusovih vjetroturbina su:

- H - tip

Lopatice postavljene paralelno s obzirom na os vrtnje. Ovakva izvedba jednostavnija je od klasične Darreiusove, ali je problem što je masa lopatica odmaknuta u odnosu na simetralu nosivog tornja pa lopatice moraju biti čvršće.



Slika 24. H - tip vjetroturbine

- Spiralne lopatice

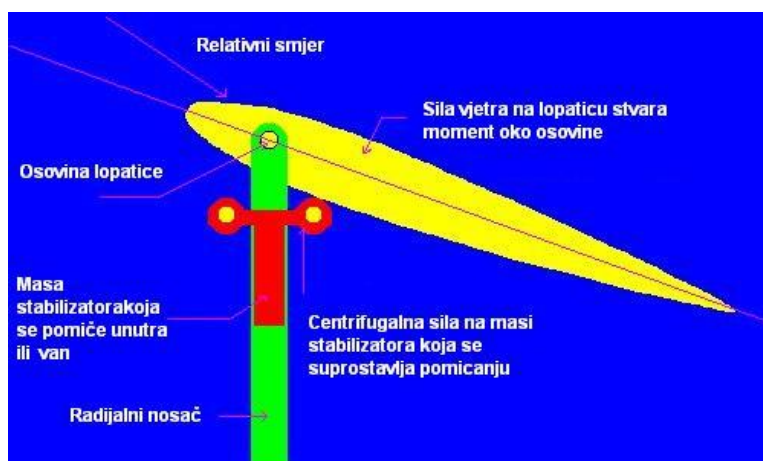
Lopatice tvore spiralu te tako omogućuju dobar napadni kut vjetra s obje strane. Moment je tako ujednačen tijekom cijelog okreta i nema naglih promjena, a kako se aksijalne sile poništavaju opterećenje na ležajeve je manje u odnosu na ostale tipove Darrieusovih turbina. Ovakva izvedba omogućuje hvatanje turbulentnih struja koje se pojavljuju iznad krovova objekata te ne treba pomoć pri pokretanju.



Slika 25. Spiralna vjetroturbina

- Cikloturbine

Izvedba je ista kao H - tip vjetroturbine samo što lopatice imaju mogućnost zakretanja oko vlastite osi. To omogućuje lopaticama postavljanje u takav položaj da uvijek imaju neki kut napada vjetra čime se ostvaruje povećanje momenta vrtnje odnosno dobivamo više energije. Povoljna karakteristika je i mogućnost samopokretanja jer se zakretanjem lopatica može ostvariti dovoljan potisak.

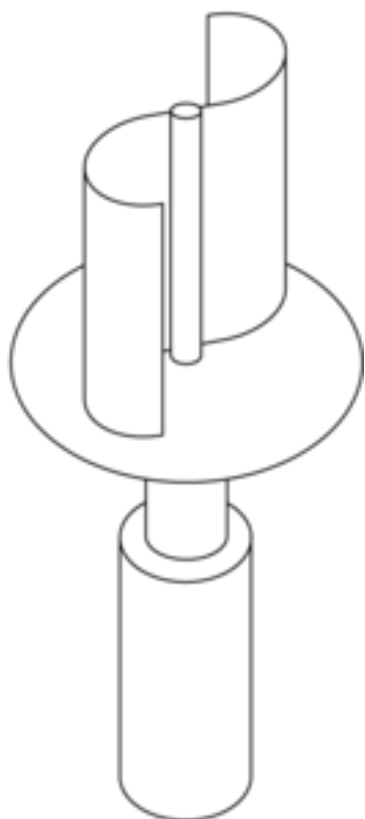


Slika 26. Shema sustava za zakretanje lopatica

3.4.2.2. Savoniusov vjetroagregat

Savoniusov rotor radi na principu otpornog djelovanja koji kombinira sa potiskom. Sastoji se od dvaju polucilindričnih lopatica koje su otvorene na suprotnim stranama. Blizu osi, lopatice se preklapaju tako da preusmjereni vjetar može strujati iz jedne lopatice u drugu. Ova vrsta rotora ima veću iskoristivost od rotora baziranih samo na otpornom djelovanju, ali manju od rotora primarno baziranih na potisku. Ovaj tip rotora ima prednost koja se bazira na tome da se mogu početi vrtjeti na malim brzinama vjetra, dok im je loša strana u tome što je potrebno puno materijala za njihovu izradu.

Savonius-Rotor

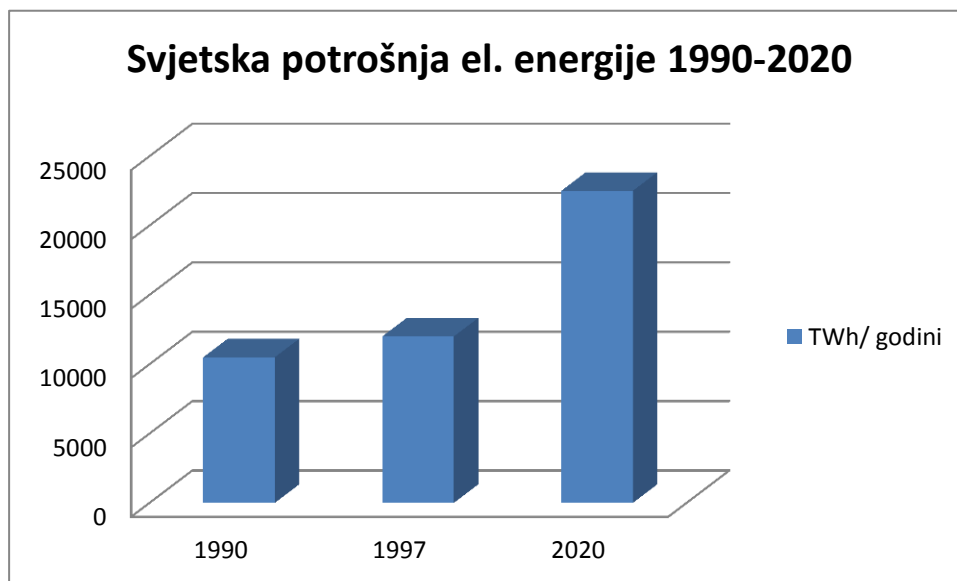


Slika 27. Savoniusov vjetroagregat

4. ANALIZA TRŽIŠTA

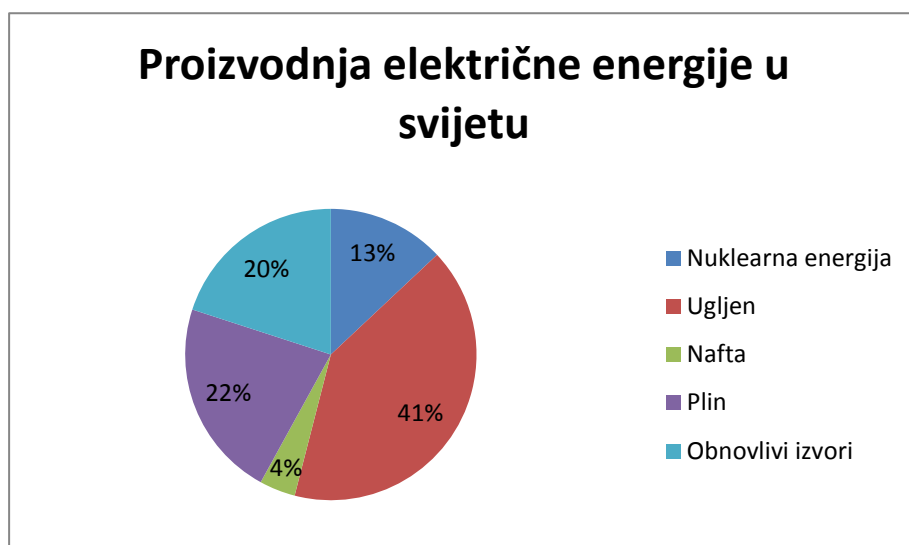
4.1. Svjetsko tržište

Kako je potrošnja električne energije u stalnom porastu [Slika 28], sve je veći broj potrebnih elektrana za proizvodnju električne energije.

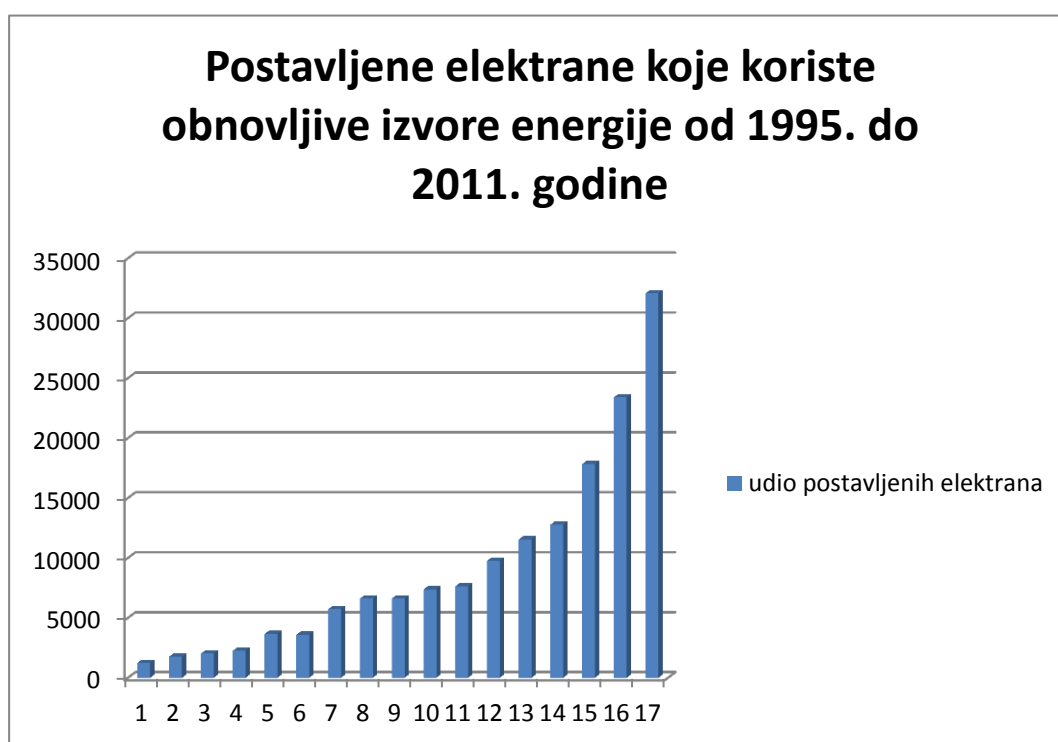


Slika 28. Potrošnja električne energije u svijetu

Iako je još uvijek najzastupljenija proizvodnja el. energije putem obnovljivih izvora energije (termoelektrane) [Slika 29], tendencija razvoja proizvoda i usluga usmjerena je prema korištenju obnovljivih izvora energije pa tako i svjetsko tržište prati taj trend. To se može vidjeti u sve većem broju vjetroelektrana, solarnih ćelija i sl. kako u većim postrojenjima tako i u kućanstvima i privatnim posjedima. Na slici 30. može se vidjeti porast udjela obnovljivih izvora energije u proizvodnji električne energije od 1995. do 2011. godine. Može se vidjeti kako je udio postavljenih elektrana koje koriste obnovljive izvore energije 1995. godine bio svega 13.1% (najveći udio vjetroelektrane i hidroelektrane) dok je 2011. godine udio postavljenih elektrana koje koriste obnovljive izvore energije bio čak 71.3% (najveći udio solarne ćelije i vjetroelektrane).



Slika 29. Proizvodnja električne energije u svijetu



Slika 30. Postavljene elektrane koje koriste obnovljive izvore energije po MW u EU od 1995. do 2011. godine

4.1.1. Tržište vjetroelektrana

Usporedno sa porastom upotrebe obnovljivih izvora energije raste i broj vjetroelektrana u svijetu. U tablici 5 može se vidjeti broj postavljenih vjetroelektrana u svijetu. Najveći broj postavljenih vjetroelektrana nalazi se u Kini (75324 MW) dok se najmanje postavljenih vjetroelektrana nalazi u Južnoj Africi (23 MW).

Tablica 5. Postavljene vjetroelektrane u 2012. godini u svijetu

Država	Kapacitet (MW)
SAD	60007
UK	8445
Danska	4162
Italija	8134
Španjolska	22796
Rumunjska	1905
Poljska	2497
Njemačka	31332
Francuska	7916
Hrvatska	130
EU	105696
Turska	2312
Kanada	6200
Brazil	2508
Kina	75324
Japan	2614
Indija	18421
Južna Koreja	483
Južna Afrika	23
Australija	2584
Ukupno	363539

Najveći proizvođači vjetroturbina u svijetu dani su u tablici 6. gdje se može vidjeti da najveći dio tržišta pojedinačno ima tvrtka Vestas (Danska) – 12.7% sa postavljenih 50 GW vjetroelektrana u svijetu, dok najveći dio tržišta kao država ima Kina sa 21.3 % i nastavlja se širiti. Danas je u sektoru „vjetra“ zaposleno više od 700 000 ljudi i godišnje se napravi promet više od 40 milijardi eura.

Tablica 6. Najveći proizvođači vjetroturbina u svijetu

Tvrtka	Država	Udio tržišta	Isporuka u 2011. g.(MW)	Ukupno postavljenih vjetroelektrana (GW)
Vestas	Danska	12.7%	5217	50
Suzlon Group	Indija	7.6%	3116	20
Sinovel	Kina	9.0%	3700	13
Siemens Wind Power	Njemačka	6.3%	2591	6.7
Ming Yang	Kina	3.6%	1500	
Guodian United Power	Kina	7.4%	3042	
Goldwind	Kina	8.7%		
GE Energy	SAD	7.7%	3170	
Gamesa	Španjolska	8.0%	3308	24
Enercon	Njemačka	7.8%	3203	24

4.1.1.1. Tržište vertikalnih vjetroelektrana

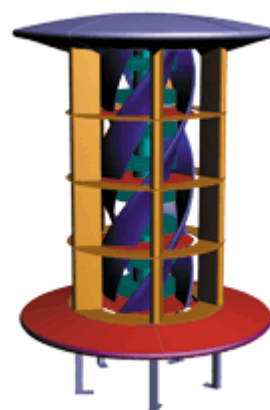
Iz prethodnog poglavlja može se vidjeti da danas na tržištu vjetroelektrana dominiraju horizontalne vjetroelektrane zbog mogućnosti veće količine generirane el. energije. Kako su tržišta danas usmjerenija na razvoj novih, manjih i isplativijih proizvoda tako su se i na tržištu pojavila nova rješenja za generiranje el. energije putem vjetra gdje predvode vertikalne izvedbe vjetroelektrana. Neki od novih oblika uređaja za generiranje el. energije mogu se vidjeti na slici 31.

Prema navedenim prednostima u poglavlju 2 može se zaključiti kako vertikalna izvedba vjetroelektrana ima dobar potencijal za generiranje el. energije za „individualne korisnike“ tj. glavni cilj im je generiranje el. energije za manje zahtjevne potrošače (rasvjeta stubišta zgrada, napajanje pojedinih kućanskih aparata i sl.). Upravo zbog te prednosti da se mogu koristiti u privatne svrhe uz manje troškove vertikalna izvedba vjetroelektrana danas predstavlja izazov za svakog novog ulagača u proizvodnji el. energije putem vjetra.

Na svjetskom tržištu ima već nekoliko manjih inovacijskih tvrtki, većinom u SAD-u i Kini koje su već započele službenu prodaju vertikalnih vjetroatregata [Tablica 7].



Helix Wind vjetroturbina



Tesnic vjetroturbina



HiVAWT-DS-3000



MARS vjetroturbina

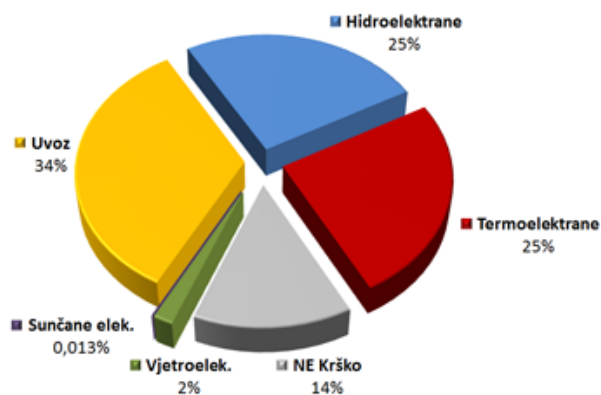
Slika 31. Novi oblici uređaja za generiranje el. energije

Tablica 7. Tvrtke vertikalnih vjetroagregata

TVRTKA	DRŽAVA	PROIZVOD	
HiVAWT	Kina	DS-3000	
Tangarie	SAD	Gale T1-R15	
SAWT	Kina	P-300	
Windside	Finska	WS-4	

4.2. Domaće tržište

Stanje na domaćem tržištu proizvodnje električne energije poprilično prati stanje na svjetskom, a pogotovo europskom tržištu uz iznimku da se 34% el. energije uvozi [Slika 32]. Na slici 32. može se vidjeti da se najveći dio el. energije proizvodi putem hidroelektrana i termoelektrana (50%) dok se putem vjetroelektrana proizvodi oko 2% ukupno proizvedene el. energije, ali sa tendencijom rasta u budućnosti.



Slika 32. Proizvodnja električne energije u Hrvatskoj

4.2.1. Tržište vjetroelektrana u Hrvatskoj

Trenutno je u Hrvatskoj 8 vjetroelektrana koje su u normalnom radu te isporučuju el. energiju u elektroenergetski sustav Hrvatske [Tablica 8]. Instalirana snaga svih vjetroelektrana je 130 MW, u radu je 79 vjetroatregata koji isporučuju godišnje oko 383 GWh električne energije. Za usporedbu Termoelektrana Plomin ima snagu 330 MW i isporučuje godišnje oko 2173 GWh električne energije.

Tablica 8. Vjetroelektrane u Hrvatskoj

Vjetroelektrana	Instalirana snaga(MW)	Županija	Godišnja proizvodnja(GWh)
VE Vrataruša	42,0	Ličko-senjska	125
VE Bruška	36,8	Zadarska	122
VE Trte-Krtolin	11,2	Šibensko-kninska	28
VE Crno Brdo	10,0	Šibensko-kninska	27
VE Orlice	9,6	Šibensko-kninska	25
VE Velika Popina	9,2	Zadarska	26
VE Ravne 1	6,0	Zadarska	15
VE Pometeno Brdo	6,0	Splitsko-dalmatinska	15
Ukupno	130,80		383

Vjetroatregati i modeli	Puštena u rad
13 × Vestas V90 - 3 MW	2011.
15 × Siemens SWT-93 - 2,3 MW	2012.
13 × Enercon E-48 - 0,8 MW	2006.
7 × Leitwind LTW77 – 1,5 MW	2011.
11 × Enercon (3 x E-48 – 0,8 MW + 8 x E-44 – 0,9 MW)	2009.
3 × Siemens SWT 93 – 2,3 MW	2011.
6 × Vestas V52 – 0,85 MW	2004.
5 × Končar KO-VA 57/1 – 1 MW	2012.

Prema istraživanjima Hrvatska ima dosta dobar vjetropotencijal, pogotovo uz Jadransku obalu (Zadarska, Šibensko-kninska, Splitsko-dalmatinska, Dubrovačko-neretvanska županija) te su na tim područjima postavljene sve operativne vjetroelektrane sa velikom tendencijom širenja u budućnosti. Prvi vjetroatregat u Hrvatskoj postavljen je 1988. godine u brodogradilištu Uljanik od tvrtke Končar koja je 2012. postavila na Pometenom Brdu, kraj Dugopolja svoj prvi službeni prototip KO-VA 57/1 snage 1MW (15 vjetroatregata) i dva nova vjetroatregata sa snagama 2 i 5 MW.

5. RAZVOJ PROIZVODA – MALA VERTIKALNA VJETROTURBINA

Nakon dane analize tržišta u poglavlju 3. može se vidjeti kako i dalje na tržištu prevladavaju horizontalne vjetroturbine zbog mogućnosti velikih izlaznih snaga i mogućnosti da se izvede kao „parkovi vjetroelektrana“. Pošto je taj segment tržišta poprilično razvijen u ovom se radu okrećemo k razvoju male vertikalne vjetroturbine koja bi olakšala troškove „običnog čovjeka“ tako što bi se pomoću nje napajao samo jedan dio potrošača u kućanstvima (rasvjeta, pojedini kućanski aparati i sl.).

5.1. Potrošnja el. energije u stubištima zgrada

Kako je namjena izrade vertikalne vjetroturbine proizvodnja el. energije dovoljnu za rasvjetu stubišta napravljena je analiza prosječne potrošnje el. energije u jednoj zgradi u Zagrebu koja ima 5 katova i prizemlje te na svakom katu jednu žarulju snage 60W i u predvorju zgrade žarulju snage 100W. Kada se uzme u obzir prosječan rad žarulja u stubištu dobijemo da je vrijeme upaljenosti svih žarulja oko 4 sata dnevno tj. potrošnja 1,84 kWh. Kada se to preračuna na tjednu vrijednost dobijemo potrošnju 12,88 kWh, na mjesečnoj bazi potrošnju 55,2 kWh, a na godišnjoj bazi potrošnju 662.4 kWh [Tablica 9], [Tablica 10].

Tablica 9. Broj rasvjetnih uređaja za analizu potrošnje el. energije u stubištu jedne zgrade

Potrošač	Količina	Izlazna snaga (W)	Vrijeme rada (h)
žarulja u predvorju	1	100	4
žarulja po katovima	6	60	4

Tablica 10. Analiza potrošnje i ukupne izlazne snage u vremenskim periodima za rasvjetu jedne zgrade

	Dnevno	Tjedno	Mjesečno	Godišnje
Ukupna potrošnja (kWh)	1,84	12,88	55,2	662,4

Nakon ove analize potrošnje el. energije za rasvjetu jedne prosječne zgrade u Zagrebu može se zaključiti da bi godišnja potrošnja bila oko 1000 kWh.

5.2. Definicija cilja za razvoj proizvoda

Za detaljniji razvoj ovog proizvoda potrebna je jasna definicija cilja samog proizvoda kako bi se ograničila moguća rješenja i same izvedbe te kako bi se ispitala isplativost i upotrebljivost samog proizvoda [Tablica 11].

Tablica 11. Definicija cilja za razvoj proizvoda

DEFINICIJA CILJA ZA RAZVOJ PROIZVODA	NAZIV PROJEKTA: Mala vertikalna vjetroelektrana
Opis proizvoda :	
Mala vertikalna vjetroturbina za upotrebu na stambenim objektima	
Primarno tržište :	
Rasvjeta stubišta stambenih i poslovnih objekata u gradovima, eventualna instalacija na dalekovode(ako je moguće pričvršćenje)	
Sekundarno tržište :	
Rasvjeta seoskog imanja, napajanje pojedinih većih kućanskih potrošača	
Ciljana grupa korisnika :	
Fizičke i pravne osobe koje su vlasnici nekretnina, ovlaštene osobe za postavljanje ovakvih uređaja na stambene ili poslovne prostore prilikom izgradnje	
Bitne karakteristike:	
Proizvodnja el. energije zadovoljavajuće kvalitete. Mogućnost spajanja na električnu mrežu. Životni vijek od 15 do 20 godina. Relativno jednostavna upotreba i održavanje.	
Pravci kreativnog razvoja:	
Oblik i izvedba rotora vjetroturbine. Oblik i odnos između pojedinih dijelova na uređaju. Odabir generatora te materijala. Kompaktnost uređaja. Estetski bitne značajke.	
Ograničenja projekta:	
Vertikalna izvedba vjetroturbine. Ograničena veličina uređaja radi lakšeg postavljanja. Proizvodnja el. energije mora biti dovoljna za namjenu (rasvjeta stubišta zgrada). Koristiti što više postojećih sklopova i dijelova proizvoda.	

Nakon definiranih glavnih ciljeva i usmjerenja za razvoj proizvoda izrađuje se morfološka matrica u kojoj se mogu vidjeti konstrukcijska rješenja za pojedine funkcije vertikalne vjetroturbine. Na temelju definiranih funkcija i morfološke matrice generirati će se nekoliko

konceptata koji zadovoljavaju potrebe korisnika i same konstrukcije. Potrebe korisnika definirane su anketiranjem 30 ljudi različitih zanimanja [Tablica 12].

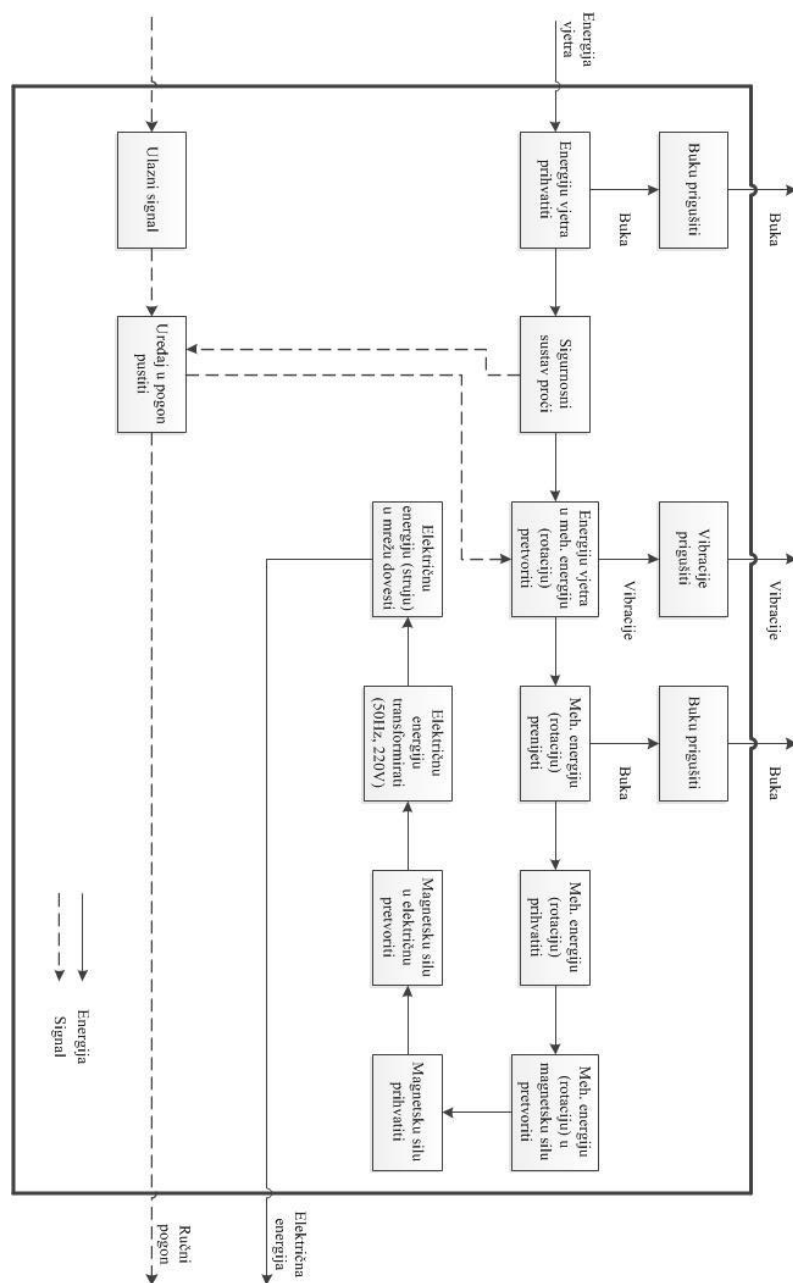
Tablica 12. Glavne potrebe korisnika

Glavne potrebe korisnika	Ocjena važnosti
Dovoljna količina proizvedene el. energije	10
Investicijski troškovi	9
Konstantnost u radu tj. pouzdanost	8
Cijena održavanja i servisiranja	7
Životni vijek	6
Generiranje buke i utjecaj na okolinu	5
Estetika	4
Veličina same vjetroelektrane	3
Mogućnost dobivanja naknade od HEP-a	2
Sigurnost za ptice	1

Nakon definiranih glavnih potreba korisnika može se vidjeti da je najvažnija stavka da vertikalna vjetroturbina bude adekvatna tj. da proizvodi dovoljno el. energije za rasvjetu stubišta u zgradama. Također može se vidjeti da je jako bitna i cijena investicijskih troškova kao i cijena održavanja i servisiranja što se u današnje vrijeme moglo i očekivati. Veliku ulogu ima i sama pouzdanost vjetroturbine odnosno mogućnost da konstantno proizvodi el. energiju (neovisno o utjecajima okoline, jačini vjetra, temperaturi i sl.). Bitan faktor je i generiranje buke jer se ipak radi o većem stroju koji ima dosta pokretnih dijelova koji bi mogli generirati buku. Popriličan broj ispitanika zahtijevao je da izgled same vjetroturbine ne nagrđuje izgled zgrade (pogotovo kod poslovnih objekata) pa tako i estetika ima utjecaj.

Korisnici su izrazili nešto manju zainteresiranost od očekivane oko veličine vjetroturbine jer je pretpostavka da se ona postavlja na krov objekata, kao i za mogućnost dobivanja naknade od HEP-a jer nije moguće generirati dovoljno el. energije da to bude isplativo. Sigurnost za ptice također je jedan od faktora na koji treba obratiti pozornost, iako malo manje bitan jer što je veća brzina vrtnje lopatica vjetroturbine veća je i opasnost za ptice.

Nakon definiranih potreba korisnika izrađuje se funkcijska struktura koja nam prikazuje glavne funkcije uređaja i tok energije, materijala i informacija među njima [Slika 33].

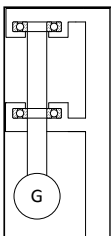
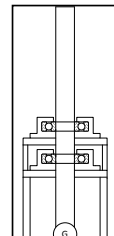
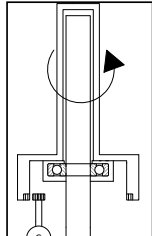


Slika 33. Funkcijska struktura

Iz funkcijske strukture može se vidjeti da su nam glavne funkcije :

- Energiju vjetra prihvatiti
- Energiju vjetra u mehaničku energiju (rotaciju) pretvoriti
- Generiranu el. energiju (struju) u mrežu dovesti

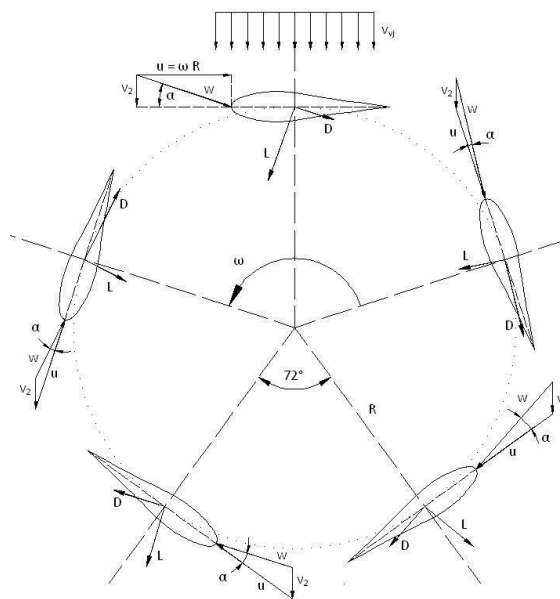
Nakon definirane funkcijske strukture izrađuje se morfološka matrica koja nam daje moguća rješenja za pojedine funkcije naše vertikalne vjetroturbine [Slika 34].

MORFOLOŠKA MATRICA					
Uređaj na krov objekata postaviti	Ručno 		Dizalica 		
Uređaj pričvrstiti	Spoj vijcima 		Spoj zakovicama 		
Energiju vjetra prihvatiti					
Sigurnosni sustav proći	Analogno mjerenje brzine vjetra		Digitalno mjerenje brzine vjetra		
Energiju vjetra u meh. energiju (rotaciju) pretvoriti	Lopaticice i vratilo iz jednog dijela	Lopaticice vezane za vratilo oblikom	Lopaticice vezane za vratilo vijcima	Lopaticice vezane za vratilo zavarom	
Meh. energiju (rotaciju) prenijeti					
Meh. energiju (rotaciju) prihvatiti	Direktan spoj vratila s generatorom		Spojka		
Meh. energiju u električnu pretvoriti	Generator 				
Buku prigušiti	Izolirano kućište (generator)				
Vibracije prigušiti	Prigušivač (guma)	Spoj vijcima 		Spoj zakovicama 	
Ulazni signal	Ručica	Pritisak na gumb		Dodirni ekran	

Slika 34. Morfološka matrica

Nakon definirane morfološke matrice generirati će se tri koncepta koja bi mogla ostvariti sve potrebne funkcije i zadovoljiti definirane potrebe korisnika.

Koncept 1



Slika 35. Koncept 1 – H-tip Darrieusove vjetroturbine

Zahvaćanje energije vjetra:

- Aerodinamične lopatice (3, 4, 5) na jednakim razmacima
- Lopatice zavarene na vratilo
- Uležištenje samo s donje strane
- Vertikalan položaj vratila

Sigurnosni sustav:

- Digitalni mjerač brzine
- Kočnica (mehanička i elektronička)

Prednosti:

- Velika učinkovitost zbog aerodinamičkog profila lopatica i same izvedbe kao H-tip Darrieusove vjetroturbine
- Učinkovitost neovisna o smjeru vjetra
- Samopokretanje

- Mogućnost hvatanja turbulentnih strujanja iznad krovova
- Poprilično tih rad (buka manja od 45 dB pri brzini vjetra 8 m/s)

Nedostaci:

- Popriličan broj dijelova
- Aerodinamični profil lopatica – puno veća cijena
- Veći broj lopatica (izvedba sa 5 ili više lopatica) može stvarati zavjetrinu jedna drugoj
- Uređaj nema mogućnost zakretanja lopatica

Koncept 2



Slika 36. Vjetroturbina sa zakrivljenim lopaticama

Zahvaćanje energije vjetra:

- 3 prostorno zakrivljene aerodinamične lopatice
- Lopatice zavarene na vratilo
- Uležištenje samo s donje strane
- Vertikalni položaj vratila

Sigurnosni sustav:

- Digitalni mjerač brzine

- Kočnica

Prednosti:

- Relativno mali broj dijelova
- Mala masa uređaja
- Ujednačen moment tijekom cijelog okreta, smanjene vibracije
- Manje opterećenje ležajeva zbog ujednačenog momenta
- Mogućnost hvatanja turbulentnih strujanja iznad krovova
- Ovakav oblik lopatica smanjuje otpor rotaciji
- Samopokretanje
- Učinkovitost neovisna o smjeru vjetra

Nedostaci:

- Aerodinamični profil lopatica
- Lopatice prostorno zakrenute – otežana izvedba
- Poprilično velike brzine vrtnje
- Veliki investicijski troškovi

Koncept 3

Slika 37. Savoniusov tip vjetroturbine

Zahvaćanje energije vjetra:

- Cilindrične lopatice (2, 3, 4)

- Lopatice zavarene na vratilo, u nekim izvedbama vijčano spojene s nosačem na vratilu
- Uležištenje sa gornje i donje strane
- Vertikalan položaj vrtila

Sigurnosni sustav:

- Kočnica
- Regulator brzine

Prednosti:

- Cilindričan oblik lopatica omogućuje tih rad
- Nije potreban aerodinamični profil lopatica što poprilično smanjuje cijenu uređaja
- Manji troškovi održavanja zbog jednostavne izvedbe
- Samopokretanje omogućeno pri vrlo malim brzinama vjetra što ih čini idealne za instalaciju na područja manjeg vjetropotencijala
- Brzina vrtnje nije jako velika (kao kod prethodnih koncepata)
- Učinkovitost neovisna o smjeru vjetra
- Mogućnost hvatanja turbulentnih strujanja iznad krovova
- Estetski velik potencijal tj. Mogućnost izvedbe lopatica u širokom spektru oblika
- Prihvatljiviji odnosno sigurniji oblik za ptice

Nedostaci:

- Učinkovitost smanjena zbog neaerodinamičnog profila lopatica

Usporedba i ocjenjivanje koncepata s obzirom na potrebe korisnika [Tablica 13]:

Tablica 13. Ocjenjivanje i usporedba koncepata

Glavne potrebe korisnika	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3
Dovoljna količina proizvedene el. energije	10	10	8
Investicijski troškovi	2	1	10
Konstantnost u radu tj. pouzdanost	8	9	7
Cijena održavanja i servisiranja	3	3	9
Životni vijek	10	9	9
Generiranje buke i utjecaj na okolinu	5	5	5
Estetika	4	7	8
Veličina same vjetroelektrane	6	5	6
Mogućnost dobivanja naknade od HEP-a	9	9	6
Sigurnost za ptice	4	4	7

Ukupna ocjena koncepata dobije se umnoškom ocjene važnosti sa ocjenom koncepta prema definiranim potrebama korisnika prema kojoj slijedi:

Koncept 1 – 344

Koncept 2 – 346

Koncept 3 – 437

Na temelju potreba korisnika i generiranja koncepata odabire se Koncept 3 kao najbolji. Glavna prednost ovoga koncepta je niska cijena dijelova, pogotovo lopatica koje ne moraju imati aerodinamični profil te niska cijena i jednostavnost održavanja. Također velika prednost je i mogućnost samopokretanja pri niskim brzinama vjetra (oko 3 m/s) što čini ovakve vjetroturbine iznimno pogodne za područja niskog vjetropotencijala (gradovi). Prednost ovog koncepta može se vidjeti i u velikom estetskom potencijalu tj. može se poprilično varirati sa samim oblikom lopatica što čini ovakve vjetroturbine atraktivne za moderne arhitekte. Ovakav oblik vjetroturbina prihvatljiviji je i za ptice jer nema uskih i oštih rubova te se ovakve vjetroturbine ne vrte velikom brzinom. Relativni nedostatak ovog koncepta odnosno ovakve Savoniusove vjetroturbine leži u manjoj generiranoj snazi odnosno manjoj iskoristivosti. Kako nama nije potrebno generiranje većih količina el. energije (rasvjeta stubišta zgrada) ovakva vjetroturbina u potpunosti je adekvatna te ako pridodamo niske

investicijske troškove i jednostavnost održavanja zaključujem da je ovaj koncept najprihvatljiviji i u nastavku će slijediti njegova detaljna razrada.

5.3. Detaljna razrada odabranog koncepta

Nakon odabira koncepta 3 kao najprihvatljivijeg za definirane potrebe korisnika kreće se u detaljnu razradu tj. u osmišljavanje konstrukcije koja bi zadovoljila sve funkcijske zahtjeve. Dodatni zahtjev koji se indirektno postavlja jer vjetroturbina mora biti lako dostupna jest jednostavnost pričvršćenja na objekt. Imajući u vidu sve ove zahtjeve definirati će se neki ulazni tehnički podaci karakteristični za područje gdje bi vjetroelektrana bila postavljena.

TEHNIČKI PODACI :

Nazivna brzina vjetra	$v_{naz} = 13 \text{ m/s}$
Koeficijent brzohodnosti (približno)	$\lambda = 2$
Aerodinamički koeficijent pretvorbe	$C_p = 0,2$
Promjer rotora	$D = 1,32 \text{ m}$
Visina lopatice	$H = 1 \text{ m}$
Gustoća zraka	$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$

5.3.1. Određivanje snage vjetroturbine

Za određivanje nazivne snage vjetroturbine koristimo izraz:

$$P_{naz} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{naz}^3 \cdot A_l \cdot C_p, \text{ prema [1]} \quad (20)$$

Gdje je:

ρ - gustoća zraka, prema [2]

v_{naz} - nazivna brzina vjetra, prema [Tablica 1]

A_l - površina lopatica

C_p - aerodinamični koeficijent pretvorbe, prema [1]

U izraz (20) uvrštavamo sljedeće brojne vrijednosti:

$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$, prema [2]

$v_{naz} = 13 \text{ m/s}$, prema [Tablica 1]

$A_l = 0,8 \text{ m}^2$

$C_p = 0,2$, prema [1]

pri čemu se dobiva:

$$P_{naz} = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 13^3 \cdot 0,8 \cdot 0,2 = 210,912 \text{ W} \approx 211 \text{ W}$$

Ovako smo odredili „stvarnu snagu“ turbine jer je uzet u obzir i aerodinamički koeficijent pretvorbe, C_p koji uključuje gubitke ovakvog tipa vjetroturbine (Savonius).

5.3.2. Određivanje momenta vrtnje na rotoru

Za određivanje momenta vrtnje na rotoru koristimo izraz:

$$T = \frac{P_{naz}}{\omega}, \text{ prema [3]} \quad (21)$$

Gdje je:

ω - obodna brzina lopatica

P_{naz} - nazivna snaga vjetroturbine

Obodna brzina lopatica računa se prema izrazu:

$$\omega = \frac{\lambda \cdot v_{naz}}{R}, \text{ prema [3]} \quad (22)$$

Gdje je:

λ - koeficijent brzohodnosti, prema [1]

v_{naz} - nazivna brzina vjetra, prema [Tablica 1]

R - polumjer rotora (tetiva lopatice)

U izraz (21) uvrštavamo sljedeće brojne vrijednosti:

$$\lambda = 0,8, \text{ prema [1]}$$

$$v_{naz} = 13 \text{ m/s}, \text{ prema [Tablica 1]}$$

$$R = 0,66 \text{ m}$$

pri čemu se dobiva:

$$\omega = \frac{0,8 \cdot 13}{0,66} = 15,76 \text{ rad/s}$$

U izraz (22) uvrštavamo sljedeće brojne vrijednosti:

$$\omega = 15,76 \text{ rad/s}$$

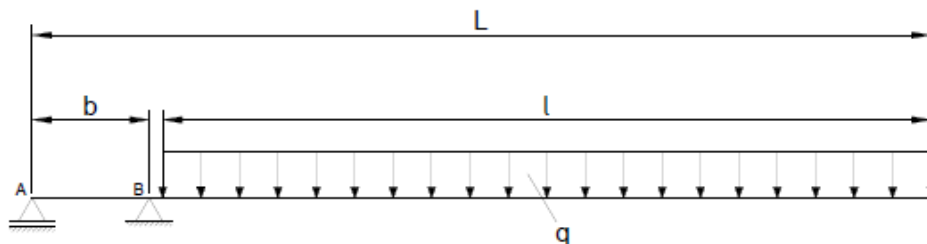
$$P_{naz} = 211 \text{ W}$$

pri čemu se dobiva:

$$T = \frac{211}{15,76} = 13,38 \text{ Nm}$$

5.3.3. Dimenzioniranje vratila

Za dimenzioniranje vratila, sila vjetra koja djeluje na lopatice rotora vjetroturbine promatrati će se kao kontinuirano opterećenje na vratilu u horizontalnoj ravnini.



Slika 38. Opterećenje vratila

Kontinuirano opterećenje na vratilu definirano je izrazom:

$$q = \frac{F_s}{l}, \text{ prema [3]} \quad (23)$$

Gdje je :

F_s - Sila vjetra na srednjem promjeru lopatica, prema [Slika]

l - duljina na vratilu na kojoj djeluje kontinuirano opterećenje, prema [Slika 38]

Sila vjetra na srednjem promjeru lopatica računa se preko dobivenog momenta vrtnje na rotoru prema izrazu:

$$F_s = \frac{T}{r}, \text{ prema [3]} \quad (24)$$

Gdje je :

T - Moment vrtnje rotora, prema [3]

r - srednji polumjer lopatice, prema

U izraz (24) uvrštavamo sljedeće brojne vrijednosti:

$$T = 13,38 \text{ Nm}$$

$$r = 0,33 \text{ m}, \text{ prema}$$

pri čemu se dobiva:

$$F_s = \frac{13,38}{0,33} = 40,55 \text{ N}$$

U izraz (23) uvrštavamo sljedeće brojne vrijednosti:

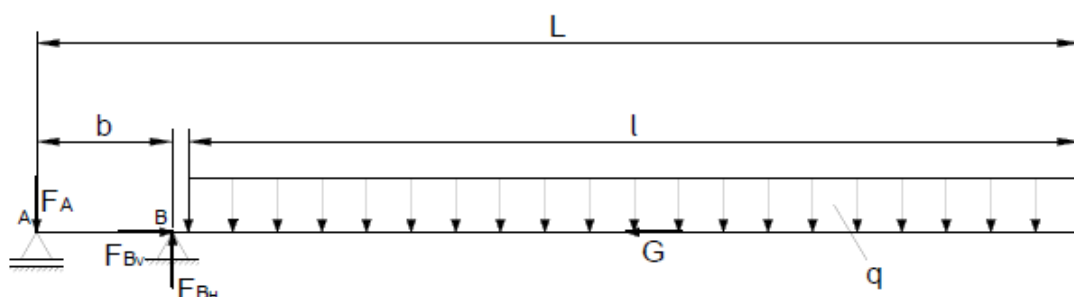
$$F_s = 40,55 \text{ N}$$

$$l = 1 \text{ m}, \text{ prema [Slika 38]}$$

pri čemu se dobiva:

$$q = \frac{40,55}{1} = 40,55 \text{ N/m}$$

5.3.3.1. Određivanje reakcija u osloncima



Slika 39. Reakcije u osloncima

Za određivanje horizontalnih komponenti sila koriste se izrazi:

$$\Sigma M_B = -q \cdot l \cdot \left(L - \frac{l}{2} - b \right) + F_A \cdot b = 0 \quad (25)$$

$$\Sigma F_H = F_A - F_{BH} + q \cdot l = 0 \quad (26)$$

$$\Sigma F_V = G_{lop} - F_{BV} = 0 \quad (27)$$

Iz kojih se izводе izrazi za reakcije u osloncima A i B:

$$F_A = \frac{q \cdot l \cdot \left(L - \frac{l}{2} - b \right)}{b} = 0 \quad (28)$$

$$F_{BH} = F_A + q \cdot l = 0 \quad (29)$$

$$F_{BV} = G_{lop} \quad (30)$$

Gdje je:

q - kontinuirano opterećenje, prema [Slika 39]

F_A - sila u osloncu A, prema [Slika 39]

F_{BH} - horizontalna sila u osloncu B, prema [Slika 39]

F_{BV} - vertikalna sila u osloncu B, prema [Slika 39]

G_{lop} - težina lopatica,

U izraze (28), (29) i (30) uvrštavamo sljedeće brojčane vrijednosti:

$$q = 40,55 \text{ N/m}$$

$$l = 1 \text{ m , prema [Slika 39]}$$

$$L = 1,170 \text{ m , prema [Slika 39]}$$

$$b = 0,150 \text{ m , prema [Slika 39]}$$

$$G_{lop} = 200 \text{ N , prema [Slika 39]}$$

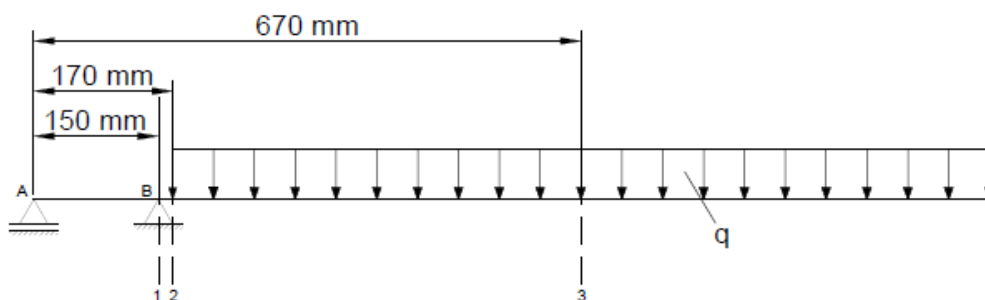
pri čemu se dobiva:

$$F_A = \frac{40,55 \cdot 1 \cdot \left(1,170 - \frac{1}{2} - 0,150\right)}{0,150} = 140,57 \text{ N} \approx 141 \text{ N}$$

$$F_{BH} = 141 + 40,55 \cdot 1 = 181,55 \text{ N} \approx 182 \text{ N}$$

$$F_{BV} = 200 \text{ N}$$

5.3.3.2. Proračun idealnog oblika vratila



Slika 40. Presjeci idealnog oblika vratila

Za materijal vratila odabran je čelik S355JR (Č.0561) čija su svojstva prema [2]:

$$\sigma_{fDN \text{ dop}} = 50 \text{ N/mm}^2 - \text{dopušteno savojno naprezanje}$$

$$\tau_{\text{dop}} = 40 \text{ N/mm}^2 - \text{dopušteno torzijsko naprezanje}$$

$$\sigma_{fDN} = 240 \text{ N/mm}^2 - \text{trajna dinamička čvrstoća na savijanje pri naizmjeničnom opterećenju}$$

$$\tau_{tDI} = 190 \text{ N/mm}^2 - \text{trajna dinamička čvrstoća na uvijanje pri istosmjernom opterećenju}$$

Promjeri vratila u presjecima koji su istovremeno opterećeni na savijanje i uvijanje određuju se prema izrazu:

$$d = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_{red}}{\sigma_{fDNdop}}} \quad (32)$$

Gdje je:

d - promjer vratila na određenom presjeku, prema [3]

M_{red} - reducirani moment, prema [3]

σ_{fDNdop} - dopušteno savojno naprezanje, prema [3]

Reducirani moment određuje se prema izrazu:

$$M_{red} = \sqrt{M^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T)^2} \quad (33)$$

Gdje je:

M - moment savijanja promatranog presjeka, prema [3]

T - moment uvijanja koji opterećuje promatrani presjek

α_0 - faktor čvrstoće materijala vratila obzirom na način njegova opterećenja, prema [3]

Faktor čvrstoće materijala vratila određuje se prema izrazu:

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_{fDN}}{1,73 \cdot \tau_{tDI}} \quad (34)$$

U izraz (34) uvrstimo brojčane vrijednosti prema [], čime se dobiva:

$$\alpha_0 = \frac{240}{1,73 \cdot 190} = 0,73$$

Moment savijanja na promatranom presjeku određuje se prema izrazu:

$$M_x = F \cdot x \quad (35)$$

Gdje je:

F - Sila koja opterećuje promatrani presjek, prema [3]

x - krak sile na promatranom presjeku

Svi presjeci (1..3) napregnuti su istovremeno savojno i torzijski

Presjek 1

U izraze (32), (33) i (35) uvrštavamo sljedeće brojne vrijednosti:

$$x_1 = 0,150 \text{ m}$$

$$F = F_A = 136 \text{ N}$$

$$T = 13,38 \text{ Nm}$$

pri čemu se dobiva:

$$M_1 = 141 \cdot 0,150 = 21,15 \text{ Nm} = 21500 \text{ Nmm}$$

$$M_{red1} = \sqrt{21500^2 + 0,75 \cdot (0,73 \cdot 13380)^2} = 23104 \text{ Nmm}$$

$$d_1 = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 23104}{50}} = 16,66 \text{ mm}$$

Presjek 2

U izraze (33) i (35) uvrštavamo sljedeće brojevnne vrijednosti:

$$x_2 = 0,170 \text{ m}$$

$$F_A = 141 \text{ N}$$

$$F_{BH} = 182 \text{ N}$$

$$T = 13,38 \text{ Nm}$$

pri čemu se dobiva:

$$M_2 = 141 \cdot 0,170 - 182 \cdot 0,020 = 20,33 \text{ Nm} = 20330 \text{ Nmm}$$

$$M_{red2} = \sqrt{20330^2 + 0,75 \cdot (0,73 \cdot 13380)^2} = 22020 \text{ Nmm}$$

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 22020}{50}} = 16,39 \text{ mm}$$

Presjek 3

U izraze (33) i (35) uvrštavamo sljedeće brojevnne vrijednosti:

$$x_3 = 0,670 \text{ m}$$

$$F_A = 141 \text{ N}$$

$$F_{BH} = 182 \text{ N}$$

$$q = 40,55 \text{ N/m}$$

$$T = 13,38 \text{ Nm}$$

pri čemu se dobiva:

$$M_2 = 141 \cdot 0,670 - 182 \cdot 0,520 + 40,55 \cdot 0,5 \cdot 0,25 = 4,899 \text{ Nm} = 4899 \text{ Nmm}$$

$$M_{red2} = \sqrt{4899^2 + 0,75 \cdot (0,73 \cdot 13380)^2} = 9775 \text{ Nmm}$$

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot 9775}{50}} = 12,51 \text{ mm}$$

Iz konstrukcijskih i tehnoloških razloga odabrani su sljedeći promjeri vratila

$$d_1 = 30 \text{ mm}$$

$$d_2 = 35 \text{ mm}$$

$$d_3 = 25 \text{ mm}$$

5.3.3.3. Odabir ležajeva

Ležaj oslonca A:

Oslonac A opterećen je radijalnom silom F_r

$$F_r = F_A = 141 \text{ N}$$

Odabran ležaj s kućištem:

Ležaj YAR 206-2RF 30x62x38,1

Kućište FYK 506L

$$C_1 \leq C = 19500 \text{ N}$$

$$C_1 = 141 \text{ N} \leq 19500 \text{ N}$$

Ležaj zadovoljava

Ležaj oslonca B:

Oslonac B opterećen je radijalnom silom F_r i aksijalnom silom usred težine rotora

$$F_r = F_{BH} = 182 \text{ N}$$

$$F_a = F_{BV} = 200 \text{ N}$$

Odabran ležaj :

Ležaj 32006 X/Q 30x55x17 mm

Kućište potrebno izraditi

Dinamička nosivost ležaja iznosi prema [4] :

$$C = 35800 \text{ N}$$

Ekvivalentno opterećenje ležaja određuje se izrazom :

$$P = F_r + y \cdot F_a \tag{36}$$

Gdje je:

F_r - radijalna sila , prema [4]

F_a – aksijalna sila

y – aksijalni faktor ležaja, prema [4]

U izraz (36) uvrštavaju se sljedeće brojevnje vrijednosti:

$$F_r = 182 \text{ N}$$

$$F_a = 200 \text{ N}$$

$$y = 1,4, \text{ prema [4]}$$

pri čemu se dobiva:

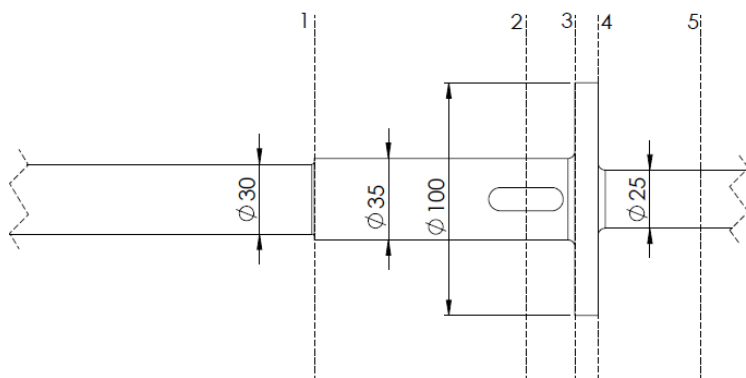
$$P = 325 + 1,4 \cdot 200 = 605 \text{ N}$$

$$C_1 \leq C = 19500 \text{ N}$$

$$C_1 = 605 \text{ N} \leq 19500 \text{ N}$$

Ležaj zadovoljava

5.3.3.4. Kontrolni proračun dinamičke sigurnosti vratila



Slika 41. Stupnjevano vratilo vjetroturbine

Opterećenje vratila momentima u pojedinim presjecima računa se prema izrazu:

$$M_{red} = \sqrt{(M \cdot \beta_{kf})^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T \cdot \beta_{kt})^2} \quad (37)$$

Gdje je:

M - moment savijanja promatranog presjeka, prema [3]

T - moment uvijanja koji opterećuje promatrani presjek, prema [3]

α_0 - faktor čvrstoće materijala vratila obzirom na način njegova opterećenja, prema [3]

β_{kf} - faktor zareznog djelovanja kod savijanja, prema [3]

β_{kt} - faktor zareznog djelovanja kod uvijanja, prema [3]

Moment savijanja za pojedini presjek određen je izrazom (35)

Postojeća sigurnost u svakom presjeku određena je izrazom prema [3]:

$$S_{post} = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{fDN}}{\varphi \cdot \sigma_{red}} \geq S_{potr} \quad (38)$$

Gdje je:

b_1 - faktor veličine, prema [3]

b_2 - faktor kvalitete površine, prema [3]

σ_{fDN} - trajna dinamička čvrstoća na savijanje pri naizmjeničnom opterećenju, prema [2]

φ - faktor udara, prema [3]

σ_{red} - reducirano naprezanje na presjeku, prema [3]

S_{potr} - potrebna sigurnost, $f(TP\%, h_{bmax}\%)$, prema [3]

Reducirano naprezanje na presjeku određeno je izrazom prema [3]:

$$\sigma_{red} = \frac{M_{red}}{W} \quad (39)$$

Gdje je:

M_{red} – reducirani moment, prema [3]

W – moment otpora presjeka, prema [3]

Moment otpora presjeka određen je izrazom prema [3]:

$$W = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad (40)$$

Gdje je:

d – promjer presjeka vratila

Presjek 1

U izraz (35) uvrštavamo slijedeće brojne vrijednosti:

$$x_1 = 0,170 \text{ mm}$$

$$F = F_A = 141 \text{ N}$$

pri čemu se dobiva:

$$M_1 = 141 \cdot 0,170 = 23,97 \text{ Nm} = 23970 \text{ Nmm}$$

Na presjeku 1 zarezno djelovanje uzrokovano je promjenom veličine presjeka:

β_{kf} određen je izrazom prema [5]:

$$\beta_{kf} = 1 + c_1 \cdot (\beta_{kf2} - 1) \quad (41)$$

U izraz (41) uvrštavaju se sljedeće brojne vrijednosti:

$$c_1 = 0,38, \text{ prema [5] } (D/d = 1,1667)$$

$$\beta_{k_{f2}} = 1,5, \text{ prema [5] } (\rho/d = 0,1 \text{ i } Rm = 500 \text{ N/mm}^2 - \text{S355 JR})$$

pri čemu se dobiva:

$$\beta_{k_f} = 1 + 0,38 \cdot (1,5 - 1) = 1,19$$

β_{k_t} određen je izrazom prema[5]:

$$\beta_{k_t} = 1 + c_2 \cdot (\beta_{k_{t1,4}} - 1) \quad (42)$$

U izraz (42) uvrštavaju se sljedeće brojevnje vrijednosti:

$$c_2 = 0,72, \text{ prema [5] } (D/d = 1,1667)$$

$$\beta_{k_{t1,4}} = 1,2, \text{ prema [5] } (\rho/d = 0,1 \text{ i } Rm = 500 \text{ N/mm}^2 - \text{S355 JR})$$

pri čemu se dobiva:

$$\beta_{k_t} = 1 + 0,72 \cdot (1,2 - 1) = 1,14$$

U izraz (37) uvrštavamo sljedeće brojevnje vrijednosti:

$$M_1 = 42600 \text{ Nmm}$$

$$\alpha_0 = 0,73$$

$$T = 13,38 \text{ Nm} = 13380 \text{ Nmm}$$

$$\beta_{k_f} = 1,19$$

$$\beta_{k_t} = 1,14$$

pri čemu se dobiva:

$$M_{red1} = \sqrt{(23970 \cdot 1,19)^2 + 0,75 \cdot (0,73 \cdot 13380 \cdot 1,14)^2} = 30110 \text{ Nmm}$$

U izraz (40) uvrštavaju se sljedeće brojevnje vrijednosti:

$$d_1 = 30 \text{ mm}$$

pri čemu se dobiva:

$$W = \frac{\pi \cdot 30^3}{32} = 2650,72 \text{ mm}^3$$

U izraz (39) uvrštavaju se sljedeće brojevnje vrijednosti:

$$M_{red1} = 26953 \text{ Nmm}$$

$$W = 2650,72 \text{ mm}^3$$

pri čemu se dobiva:

$$\sigma_{red1} = \frac{30110}{2650,72} = 11,36 \text{ N/mm}^2$$

U izraz (38) uvrštavaju se sljedeće brojevnje vrijednosti:

$$b_1 = 0,9, \text{ prema [5]}$$

$$b_2 = 0,92, \text{ prema [5]}$$

$$\sigma_{fDN} = 240 \text{ N/mm}^2$$

$$\varphi = 1$$

$$\sigma_{red1} = 11,36 \text{ N/mm}^2$$

$$S_{pot} = 2, \text{ prema [3]}$$

pri čemu se dobiva:

$$S_{post} = \frac{0,9 \cdot 0,92 \cdot 240}{1 \cdot 11,36} = 17,49 \geq 2$$

Presjek 2

U izraz (35) uvrštavamo sljedeće brojne vrijednosti:

$$x_2 = 0,226 \text{ m}$$

$$F_A = 141 \text{ N}$$

$$F_{BH} = 182 \text{ N}$$

pri čemu se dobiva:

$$M_2 = 141 \cdot 0,226 - 182 \cdot 0,056 = 21,674 \text{ Nm} = 21674 \text{ Nmm}$$

Na presjeku 2 zarezno djelovanje uzrokovano je postojanjem utora za pero:

U izraz (37) uvrštavamo sljedeće brojne vrijednosti:

$$M_2 = 21674 \text{ Nmm}$$

$$\alpha_0 = 0,73$$

$$T = 13,38 \text{ Nm}$$

$$\beta_{kf} = 1,8$$

$$\beta_{kt} = 1,9$$

pri čemu se dobiva:

$$M_{red2} = \sqrt{(21674 \cdot 1,8)^2 + 0,75 \cdot (0,73 \cdot 13380 \cdot 1,9)^2} = 42194 \text{ Nmm}$$

U izraz (40) uvrštavaju se sljedeće brojne vrijednosti:

$$d_2 = 35 \text{ mm}$$

pri čemu se dobiva:

$$W = \frac{\pi \cdot 35^3}{32} = 4209,24 \text{ mm}^3$$

U izraz (39) uvrštavaju se sljedeće brojne vrijednosti:

$$M_{red2} = 42194 \text{ Nmm}$$

$$W = 4209,24 \text{ mm}^3$$

pri čemu se dobiva:

$$\sigma_{red2} = \frac{42194}{4209,24} = 10,024 \text{ N/mm}^2$$

U izraz (38) uvrštavaju se sljedeće brojevnosti:

$$b_1 = 0,87, \text{ prema [5]}$$

$$b_2 = 0,85, \text{ prema [5]}$$

$$\sigma_{fDN} = 240 \text{ N/mm}^2$$

$$\varphi = 1$$

$$\sigma_{red2} = 10,024 \text{ N/mm}^2$$

$$S_{pot} = 2, \text{ prema [3]}$$

pri čemu se dobiva:

$$S_{post} = \frac{0,87 \cdot 0,85 \cdot 240}{1 \cdot 10,024} = 17,7 \geq 2$$

Presjek 3

U izraz (35) uvrštavamo sljedeće brojevnosti:

$$x_3 = 0,282 \text{ m}$$

$$F_A = 141 \text{ N}$$

$$F_{BH} = 182 \text{ N}$$

$$q = 40,55 \text{ N/m}$$

pri čemu se dobiva:

$$M_3 = 141 \cdot 0,282 - 182 \cdot 0,132 + 40,55 \cdot 0,056 \cdot 0,028 = 15,802 \text{ Nm} = 15802 \text{ Nmm}$$

Na presjeku 1 zarezno djelovanje uzrokovano je promjenom veličine presjeka:

β_{kf} određen je izrazom (41) :

$$\beta_{kf} = 1 + c_1 \cdot (\beta_{kf2} - 1)$$

U izraz (41) uvrštavaju se sljedeće brojevnosti:

$$c_1 = 1, \text{ prema [5] } (D/d = 2,86)$$

$$\beta_{kf2} = 1,6, \text{ prema [5] } (\rho/d = 0,086 \text{ i } Rm = 500 \text{ N/mm}^2 - \text{S355 JR})$$

pri čemu se dobiva:

$$\beta_{kf} = 1 + 1 \cdot (1,6 - 1) = 1,6$$

β_{kt} određen je izrazom (42) :

$$\beta_{k_t} = 1 + c_2 \cdot (\beta_{k_{t1,4}} - 1)$$

U izraz (42) uvrštavaju se sljedeće brojne vrijednosti:

$$c_2 = 1, \text{ prema [5] } (D/d = 2,86)$$

$$\beta_{k_{t1,4}} = 1,23, \text{ prema [5] } (\rho/d = 0,086 \text{ i } R_m = 500 \text{ N/mm}^2 - \text{S355 JR})$$

pri čemu se dobiva:

$$\beta_{k_t} = 1 + 1 \cdot (1,23 - 1) = 1,23$$

U izraz (37) uvrštavamo sljedeće brojne vrijednosti:

$$M_3 = 15802 \text{ Nmm}$$

$$\alpha_0 = 0,73$$

$$T = 13,38 \text{ Nm} = 13380 \text{ Nmm}$$

$$\beta_{k_f} = 1,6$$

$$\beta_{k_t} = 1,23$$

pri čemu se dobiva:

$$M_{red3} = \sqrt{(15802 \cdot 1,6)^2 + 0,75 \cdot (0,73 \cdot 13380 \cdot 1,23)^2} = 27340 \text{ Nmm}$$

U izraz (40) uvrštavaju se sljedeće brojne vrijednosti:

$$d_3 = 35 \text{ mm}$$

pri čemu se dobiva:

$$W = \frac{\pi \cdot 35^3}{32} = 4209,24 \text{ mm}^3$$

U izraz (39) uvrštavaju se sljedeće brojne vrijednosti:

$$M_{red3} = 27340 \text{ Nmm}$$

$$W = 4209,24 \text{ mm}^3$$

pri čemu se dobiva:

$$\sigma_{red3} = \frac{27340}{4209,24} = 6,50 \text{ N/mm}^2$$

U izraz (38) uvrštavaju se sljedeće brojne vrijednosti:

$$b_1 = 0,87, \text{ prema [5]}$$

$$b_2 = 0,85, \text{ prema [5]}$$

$$\sigma_{f_{DN}} = 240 \text{ N/mm}^2$$

$$\varphi = 1$$

$$\sigma_{red3} = 6,50 \text{ N/mm}^2$$

$$S_{pot} = 2, \text{ prema [5]}$$

pri čemu se dobiva:

$$S_{post} = \frac{0,87 \cdot 0,85 \cdot 240}{1 \cdot 6,50} = 27,3 \geq 2$$

Presjek 4

U izraz (35) uvrštavamo sljedeće brojne vrijednosti:

$$x_4 = 0,292 \text{ m}$$

$$F_A = 141 \text{ N}$$

$$F_{BH} = 182 \text{ N}$$

$$q = 40,55 \text{ N/m}$$

pri čemu se dobiva:

$$M_4 = 141 \cdot 0,292 - 182 \cdot 0,142 + 40,55 \cdot 0,066 \cdot 0,033 = 15,416 \text{ Nm} = 15416 \text{ Nmm}$$

Na presjeku 1 zarezno djelovanje uzrokovano je promjenom veličine presjeka:

β_{kf} određen je izrazom (41)

$$\beta_{kf} = 1 + c_1 \cdot (\beta_{kf2} - 1)$$

U izraz (41) uvrštavaju se sljedeće brojne vrijednosti:

$$c_1 = 1, \text{ prema [5] } (D/d = 4)$$

$$\beta_{kf2} = 1,7, \text{ prema [5] } (\rho/d = 0,08 \text{ i } Rm = 500 \text{ N/mm}^2 - \text{S355 JR})$$

pri čemu se dobiva:

$$\beta_{kf} = 1 + 1 \cdot (1,7 - 1) = 1,7$$

β_{kt} određen je izrazom (42):

$$\beta_{kt} = 1 + c_2 \cdot (\beta_{kt1,4} - 1)$$

U izraz (42) uvrštavaju se sljedeće brojne vrijednosti:

$$c_2 = 1, \text{ prema [5] } (D/d = 4)$$

$$\beta_{kt1,4} = 1,25, \text{ prema [5] } (\rho/d = 0,08 \text{ i } Rm = 500 \text{ N/mm}^2 - \text{S355 JR})$$

pri čemu se dobiva:

$$\beta_{kt} = 1 + 1 \cdot (1,25 - 1) = 1,25$$

U izraz (37) uvrštavamo sljedeće brojne vrijednosti:

$$M_4 = 15416 \text{ Nmm}$$

$$\alpha_0 = 0,73$$

$$T = 13,38 \text{ Nm} = 13380 \text{ Nmm}$$

$$\beta_{kf} = 1,7$$

$$\beta_{kt} = 1,25$$

pri čemu se dobiva:

$$M_{red3} = \sqrt{(15416 \cdot 1,7)^2 + 0,75 \cdot (0,73 \cdot 13380 \cdot 1,25)^2} = 28260 \text{ Nmm}$$

U izraz (40) uvrštavaju se sljedeće brojevnosti:

$$d_4 = 25 \text{ mm}$$

pri čemu se dobiva:

$$W = \frac{\pi \cdot 25^3}{32} = 1533,98 \text{ mm}^3$$

U izraz (39) uvrštavaju se sljedeće brojevnosti:

$$M_{red4} = 28260 \text{ Nmm}$$

$$W = 1533,98 \text{ mm}^3$$

pri čemu se dobiva:

$$\sigma_{red4} = \frac{28260}{1533,98} = 18,42 \text{ N/mm}^2$$

U izraz (38) uvrštavaju se sljedeće brojevnosti:

$$b_1 = 0,92, \text{ prema [5]}$$

$$b_2 = 0,85, \text{ prema [5]}$$

$$\sigma_{fDN} = 240 \text{ N/mm}^2$$

$$\varphi = 1$$

$$\sigma_{red4} = 18,42 \text{ N/mm}^2$$

$$S_{pot} = 2, \text{ prema [3]}$$

pri čemu se dobiva:

$$S_{post} = \frac{0,92 \cdot 0,85 \cdot 240}{1 \cdot 18,42} = 10,18 \geq 2$$

Presjek 5

U izraz (35) uvrštavamo sljedeće brojevnosti:

$$x_5 = 0,674 \text{ m}$$

$$F_A = 141 \text{ N}$$

$$F_{BH} = 182 \text{ N}$$

$$q = 40,55 \text{ N/m}$$

pri čemu se dobiva:

$$M_5 = 141 \cdot 0,674 - 182 \cdot 0,524 + 40,55 \cdot 0,494 \cdot 0,247 = 4,614 \text{ Nm} = 4614 \text{ Nmm}$$

U izraz (37) uvrštavamo sljedeće brojevnosti:

$$M_4 = 15416 \text{ Nmm}$$

$$\alpha_0 = 0,73$$

$$T = 13,38 \text{ Nm} = 13380 \text{ Nmm}$$

pri čemu se dobiva:

$$M_{red5} = \sqrt{(4614)^2 + 0,75 \cdot (0,73 \cdot 13380 \cdot)^2} = 9635 \text{ Nmm}$$

U izraz (40) uvrštavaju se sljedeće brojevnosti:

$$d_5 = 25 \text{ mm}$$

pri čemu se dobiva:

$$W = \frac{\pi \cdot 25^3}{32} = 1533,98 \text{ mm}^3$$

U izraz (39) uvrštavaju se sljedeće brojevnosti:

$$M_{red5} = 9635 \text{ Nmm}$$

$$W = 1533,98 \text{ mm}^3$$

pri čemu se dobiva:

$$\sigma_{red5} = \frac{9635}{1533,98} = 6,28 \text{ N/mm}^2$$

U izraz (38) uvrštavaju se sljedeće brojevnosti:

$$b_1 = 0,92, \text{ prema [5]}$$

$$b_2 = 0,85, \text{ prema [5]}$$

$$\sigma_{fDN} = 240 \text{ N/mm}^2$$

$$\varphi = 1$$

$$\sigma_{red5} = 6,28 \text{ N/mm}^2$$

$$S_{pot} = 2, \text{ prema [3]}$$

pri čemu se dobiva:

$$S_{post} = \frac{0,92 \cdot 0,85 \cdot 240}{1 \cdot 6,28} = 29,88 \geq 2$$

Sigurnosti vratila u pojedinim presjecima ispale su poprilično velike, ali to je bilo i za očekivati zbog dimenzija i težine lopatica rotora i potrebne snage vjetroturbine tako da se ove dobivene vrijednosti smatraju valjanima.

Radi jednostavnijeg postavljanja ležaja, još veće aksijalne nosivosti i bolje centracije napravljen je dodatni stupanj vratila te je promjer d_3 povećan sa 35 mm na 40 mm [Slika 42].

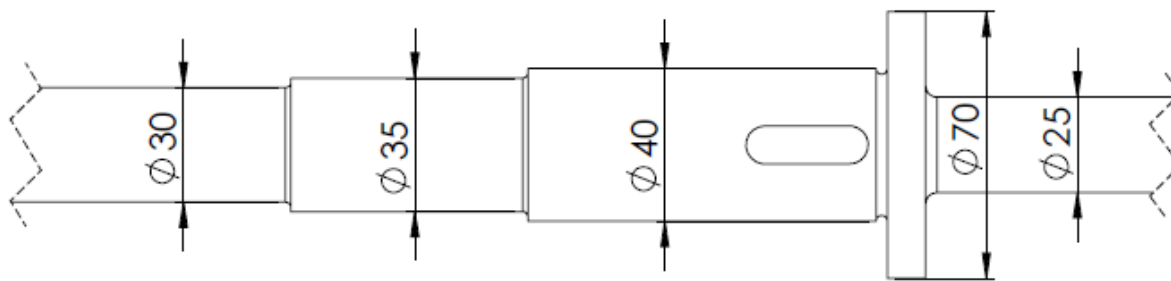
Za konični ležaj odabrano :

32007 X/Q 35x62x18 mm

Nosivost :

$$C = 35800 \text{ N} \geq C_1 = 605 \text{ N}$$

Ležaj zadovoljava



Slika 42. Konačni oblik vratila

5.4. Proračun nosive konstrukcije

Nosiva konstrukcija opterećena je tlačno pod utjecajem težine lopatica i vratila te savojno i smično pod utjecajem sile vjetrova na lopatice.

Nosiva konstrukcija izvedena je pomoću U profila 50x38 mm.

Za materijal nosive konstrukcije (U profil 50x 38) svojstva su:

$$\sigma_{dop} = 110 \text{ N/mm}^2, \text{ prema [2]}$$

$$\tau_{dop} = 55 \text{ N/mm}^2, \text{ prema [2]}$$

Opterećenje na tlak određeno je izrazom prema [3]:

$$\sigma_{tlak} = \frac{F}{A_s} = \frac{G_{opt}}{A_s} \leq \sigma_{dop} \quad (44)$$

Gdje je:

G_{opt} – ukupna težina koja opterećuje nosivu konstrukciju,

A_s – Opterećena površina presjeka odabranog profila, prema [3]

Iz izraza (44) slijedi da je potrebna opterećena površina jednaka:

$$A_{pot} = \frac{F}{\sigma_{dop}} = \frac{G_{opt}}{\sigma_{dop}} \quad (45)$$

U izraz (45) uvrštavaju se sljedeće brojevnosti:

$$G_{opt} = 300 \text{ N}$$

$$\sigma_{dop} = 110 \text{ N/mm}^2$$

pri čemu se dobiva:

$$A_{pot} = \frac{300}{110} = 2,73 \text{ mm}^2$$

Opterećenje na savijanje određeno je izrazom prema [3]:

$$\sigma_{sav} = \frac{M}{W} \leq \sigma_{dop} \quad (46)$$

Gdje je:

M – moment savijanja

W – moment otpora

Iz izraza (46) slijedi da je potreban moment otpora jednak:

$$W_{pot} = \frac{M}{\sigma_{dop}} \quad (47)$$

Moment savijanja određen je izrazom:

$$M = q \cdot l \cdot l_x \quad (48)$$

Gdje je:

q – kontinuirano opterećenje na vratilo

l – duljina na vratilu na kojoj djeluje kontinuirano opterećenje

l_x – udaljenost koncentrirane sile kontinuiranog opterećenja od promatranog presjeka nosive konstrukcije

U izraz (48) uvrštavaju se sljedeće brojevnosti:

$$q = 40,55 \text{ N}$$

$$l = 1 \text{ m}$$

$$l_x = 0,8 \text{ m}$$

pri čemu se dobiva:

$$M = 40,55 \cdot 1 \cdot 0,8 = 32,44 \text{ Nm} = 32440 \text{ Nmm}$$

U izraz (47) uvrštavaju se sljedeće brojevnosti:

$$M = 32440 \text{ Nmm}$$

$$\sigma_{dop} = 110 \text{ N/mm}^2$$

pri čemu se dobiva:

$$W_{pot} = \frac{32440}{110} = 294,91 \text{ mm}^3$$

Opterećenje na smik određeno je izrazom:

$$\tau_{smik} = \frac{F_{rad}}{A_s} = \frac{q \cdot l}{A_s} \leq \tau_{dop} \quad (49)$$

Gdje je :

q – kontinuirano opterećenje na vratilo

l – duljina na vratilu na kojoj djeluje kontinuirano opterećenje

A_s – opterećena površina presjeka

Iz izraza (49) slijedi da je potrebna površina presjeka jednaka:

$$A_{pot} = \frac{q \cdot l}{\tau_{dop}} \quad (50)$$

U izraz (50) uvrštavaju se sljedeće brojne vrijednosti:

$$q = 40,55 \text{ N/m}$$

$$l = 1 \text{ m}$$

$$\tau_{dop} = 55 \text{ N/mm}^2$$

pri čemu se dobiva:

$$A_{pot} = \frac{40,55 \cdot 1}{55} = 0,737 \text{ mm}^2$$

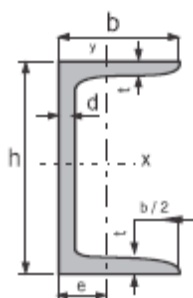
Odabrani profil nosive konstrukcije [Slika 42]:

U 50x38

$$h = 50 \text{ mm}$$

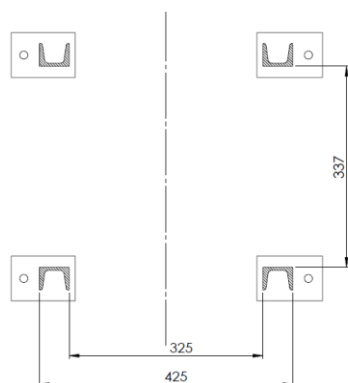
$$b = 38 \text{ mm}$$

$$d = 5 \text{ mm}$$



Slika 43. Profil nosive konstrukcije

Karakteristike presjeka:



Slika 44. Presjek nosive konstrukcije

Potrebna površina presjeka određena je izrazom:

$$A = 4 \cdot A_y \geq A_{pot} \quad (51)$$

U izraz (51) uvrštavamo sljedeće brojne vrijednosti:

$$A_y = 712 \text{ mm}^2$$

pri čemu se dobiva:

$$A = 4 \cdot 712 = 2848 \text{ mm}^2 \geq 0,737 \text{ mm}^2$$

Moment otpora presjeka određen je izrazom prema [2]:

$$W = \frac{I}{e} \geq W_{pot} \quad (52)$$

Gdje je:

I – moment tromosti presjeka

e – udaljenost najudaljenije točke presjeka

Moment inercije presjeka određen je izrazom prema [Slika 43]:

$$I = 4 \cdot (I_y + a^2 \cdot A) \quad (53)$$

Gdje je:

I_y – moment tromosti presjeka profila

a – udaljenost težišta presjeka profila od težišta presjeka nosive konstrukcije

A – površina presjeka profila

U izraz (53) uvrštavaju se sljedeće brojne vrijednosti:

$$I_y = 30 \text{ mm}$$

$$A = 712 \text{ mm}$$

$$a = 185 \text{ mm}$$

pri čemu se dobiva:

$$I = 4 \cdot (168000 + 185^2 \cdot 712) = 98144800 \text{ mm}^4$$

U izraz (52) uvrštavaju se sljedeće brojne vrijednosti:

$$I = 98144800 \text{ mm}^4$$

$$e = 200 \text{ mm}$$

pri čemu se dobiva:

$$W = \frac{98144800}{200} = 490724 \text{ mm}^3 \geq 209,33 \text{ mm}^3$$

Usporedbom rezultata može se vidjeti da odabrani presjek dimenzijski zadovoljava. Stvarna naprezanja za odabrani presjek određena su izrazima (44), (46) i (49) u koje se uvrštavaju sljedeće brojne vrijednosti:

$$G_{opt} = 300 \text{ N}$$

$$A = 2848 \text{ mm}^2$$

$$M = 32440 \text{ Nmm}$$

$$W = 490724 \text{ mm}^3$$

$$q = 40,55 \text{ N/m}$$

$$l = 1 \text{ m}$$

pri čemu se dobiva:

$$\sigma_{tlak} = \frac{300}{2848} = 0,105 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{sav} = \frac{32440}{490724} = 0,066 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{smik} = \frac{40,55 \cdot 1}{2848} = 0,014 \text{ N/mm}^2$$

Ekvivalentno naprezanje određeno je izrazom prema []:

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma_{tlak}^2 + \sigma_{sav}^2 - \sigma_{tlak} \cdot \sigma_{sav} + 3 \cdot \tau_{smik}^2} \leq \sigma_{dop} \quad (54)$$

U izraz (54) uvrštavaju se sljedeće brojne vrijednosti:

$$\sigma_{tlak} = 0,105 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{sav} = 0,066 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{smik} = 0,014 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{dop} = 110 \text{ N/mm}^2$$

pri čemu se dobiva:

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{0,105^2 + 0,066^2 - 0,105 \cdot 0,066 + 3 \cdot 0,014^2} = 0,095 \text{ N/mm}^2 \leq 110 \text{ N/mm}^2$$

Profil presjeka zadovoljava.

Stabilnost nosive konstrukcije protiv prevrtanja

Uvjet stabilnosti nosive konstrukcije protiv prevrtanja određen je izrazom:

$$G \cdot x_t \geq q \cdot l \cdot l_x \quad (55)$$

Gdje je:

q – kontinuirano opterećenje na vratilo

l – duljina na vratilu na kojoj djeluje kontinuirano opterećenje

l_x – udaljenost koncentrirane sile kontinuiranog opterećenja od promatranog presjeka nosive konstrukcije

G – ukupna težina vjetroturbine

x_t – udaljenost težišta presjeka nosive konstrukcije

Iz izraza (55) izvodi se izraz za potrebnu udaljenost težišta presjeka tj. potrebnu duljinu presjeka nosive konstrukcije:

$$x_t \geq \frac{q \cdot l \cdot l_x}{G} \quad (56)$$

U izraz (56) uvrštavaju se sljedeće brojevne vrijednosti:

$$G = 650 \text{ N}$$

$$q = 40,55 \text{ N}$$

$$l = 1 \text{ m}$$

$$l_x = 1,076 \text{ m}$$

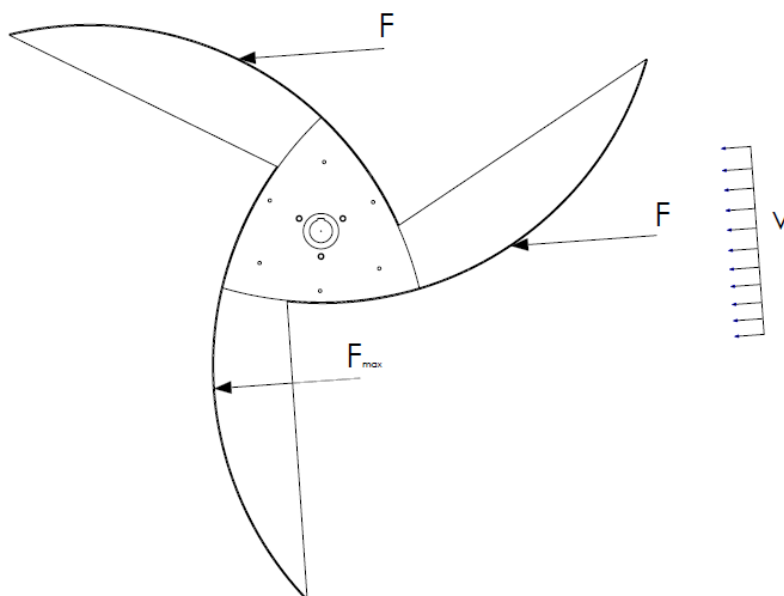
pri čemu se dobiva:

$$x_t \geq \frac{40,55 \cdot 1 \cdot 1,076}{650} = 0,0671 \text{ m} = 67,1 \text{ mm}$$

Za duljinu presjeka nosive konstrukcije odabrano:

$$x_t = 200 \text{ mm}$$

5.4.1. Proračun zavaru ukruta na lopaticama



Slika 45. Najveća sila na lopaticu

Zavar ukruta na lopaticama izveden je kao uzdužni isprekidani zavar koji je opterećen tlačno pod utjecajem sile vjetra. Najveća sila vjetra je u trenutku kada vjetar nastrujava okomito na konkavnu stranu lopatica na tangentu zakrivljenog dijela lopatice koja se nalazi na srednjem promjeru lopatice [Slika 45].

Najveća sila određena je izrazom prema [1]:

$$F_{max} = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot v_{naz}^2 \cdot A_l \quad (57)$$

Gdje je:

ρ - gustoća zraka, prema [2]

v_{naz} - nazivna brzina vjetra, prema [Tablica 1]

A_l - površina lopatica

C_D - koeficijent otpora zraka, prema [1]

U izraz (57) uvrštavaju se sljedeće brojevnje vrijednosti:

$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$, prema [2]

$v_{naz} = 13 \text{ m/s}$, prema [Tablica 1]

$A = 0,8 \text{ m}^2$

$C_D = 1,33$, prema [1]

pri čemu se dobiva:

$$F_{max} = \frac{1}{2} \cdot 1,33 \cdot 1,2 \cdot 13^2 \cdot 0,8 = 107,88 \text{ N} \approx 108 \text{ N}$$

Tlačno opterećenje zavar određeno je izrazom prema [3]:

$$\sigma_{tlak,z} = \frac{F_{max}}{A_{zav}} \leq \sigma_{dop} \quad (58)$$

Gdje je:

F_{max} - najveća sila koja opterećuje zavar

A_{zav} - površina zavora

Površina zavora određuje se prema [Slika 46]:



Slika 46. Zavar na lopaticama

$$A_{zav} = 5 \cdot 150 \cdot 3 + 2 \cdot 77,5 \cdot 3 = 2175 \text{ mm}^2 \quad (59)$$

U izraz (58) uvrštavaju se sljedeće brojne vrijednosti:

$$F_{max} = 108 \text{ N}$$

$$A_{zav} = 2175 \text{ mm}^2, \text{ prema [Slika 28]}$$

pri čemu se dobiva:

$$\sigma_{tlak,z} = \frac{108}{2175} = 0,05 \text{ N/mm}^2 \leq 155 \text{ N/mm}^2$$

Zavar zadovoljava uvjete čvrstoće.

5.4.2. Odabir vijaka za pričvršćenje lopatica vjetroturbine

Vijci za pričvršćenje glavčine generatora opterećeni su smično prema izrazu:

$$\tau_{smik,v} = \frac{F_{max}}{A_j} = \frac{F_{max}}{\frac{d_v^2 \cdot \pi}{4}} \leq \tau_{dop,v} \quad (60)$$

Gdje je:

F_{max} – najveća sila na lopatici

d_v - nazivni promjer vijka

$\tau_{dop,v}$ - dopušteno smično naprezanje

Kvaliteta vijka odabrana je IT 6.8 iz koje slijedi da je granica tečenja jednaka:

$$R_e = 480 \text{ N/mm}^2$$

Iz čega sledi da je dopušteno smično naprezanje prema [3]:

$$\tau_{dop} = 90 \text{ N/mm}^2$$

Iz izraza (60) izvodi se izraz za potreban promjer vijka:

$$d_v \geq \sqrt{\frac{4 \cdot F_{max}}{\tau_{dop} \cdot \pi}} \quad (61)$$

U izraz (61) uvrštavaju se sljedeće brojne vrijednosti:

$$F_{max} = 108 \text{ N}$$

$$\tau_{dop,v} = 90 \text{ N/mm}^2$$

pri čemu se dobiva:

$$d_v \geq \sqrt{\frac{4 \cdot 108}{90 \cdot \pi}} = 1,236 \text{ mm}$$

Odabran vijak M6 IT 6.8

Potreban broj vijaka određuje se prema izrazu:

$$n \geq \frac{F_{max}}{\tau_{dop,v} \cdot A_j} \quad (62)$$

Gdje je:

F_{max} – najveća sila na lopatici

A_j - površina presjeka jezgre vijka

$\tau_{dop,v}$ - dopušteno smično naprezanje

U izraz (62) uvrštavaju se sljedeće brojne vrijednosti:

$$F_{max} = 108 \text{ N}$$

$$\tau_{dop} = 90 \text{ N/mm}^2, \text{ prema [3]}$$

$$A_j = 4,48 \text{ mm}^2, \text{ prema [3]}$$

pri čemu se dobiva:

$$n_v \geq \frac{108}{90 \cdot 4,48} = 0,268$$

Iz konstrukcijskih razloga, radi lakšeg rukovanja odabrano $n = 3$ odnosno odabrana 3 vijka M3 IT 6.8

5.4.3. Odabir generatora

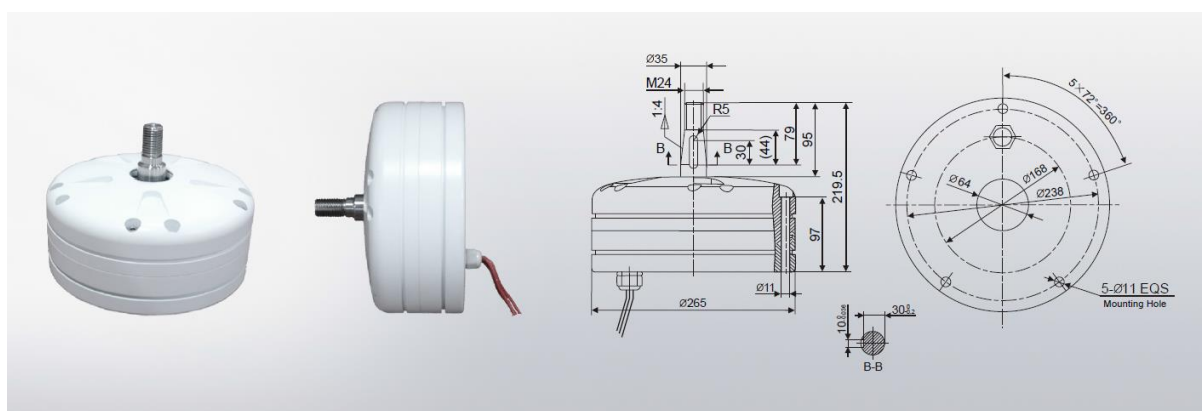
Za ovakvu vjetroturbinu nije potrebno izraditi poseban generator već se prema potrebnoj snazi i broju okretaja odabire postojeći generator.

Ulazni podaci za odabir generatora za ovu vjetroturbinu su:

$$P_{naz} = 211 \text{ W}$$

$$n = 151 \text{ o/min}$$

Prema ovim ulaznim podacima odabran je generator GL-PMG-1800A [Slika 47] proizvođača GINLONG koji se bavi izradom generatora za manje vjetroturbine. Osnovne karakteristike odabranog generatora su prikazane u Tablici 14.



Slika 47. Generator GL-PMG-1800A

Tablica 14. Osnovne karakteristike generatora GL-PMG-1800A

GL-PMG-1800	
Nazivna snaga (W)	1800
Nazivni broj okretaja (o/min)	480
Masa (kg)	19
Pokretni moment (Nm)	<0,9
Materijal osovine	S355 JR
Materijal kućišta	aluminij
Magneti	NdFeB
Vijek trajanja	>20 god

5.4.4. Odabir vijaka za pričvršćenje glavčine generatora

Vijci za pričvršćenje glavčine generatora opterećeni su smično prema izrazu:

$$\tau_{smik,v} = \frac{q \cdot l}{A_j} = \frac{q \cdot l}{\frac{d_v^2 \cdot \pi}{4}} \leq \tau_{dop,v} \quad (63)$$

Gdje je:

q – kontinuirano opterećenje na vratilo

l – duljina na vratilu na kojoj djeluje kontinuirano opterećenje

d_v - nazivni promjer vijka

τ_{dop} - dopušteno smično naprezanje

Kvaliteta vijka odabrana je IT 6.8 iz koje slijedi da je granica tečenja jednaka:

$$R_e = 480 \text{ N/mm}^2$$

Iz čega slijedi da je dopušteno smično naprezanje prema [3]:

$$\tau_{dop,v} = 90 \text{ N/mm}^2$$

Iz izraza (63) izvodi se izraz za potreban promjer vijka:

$$d_v \geq \sqrt{\frac{4 \cdot q \cdot l}{\tau_{dop,v} \cdot \pi}} \quad (64)$$

U izraz (64) uvrštavaju se sljedeće brojne vrijednosti:

$$q = 40,55 \text{ N/m} = 0,04055 \text{ N/mm}$$

$$l = 1 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$$

$$\tau_{dop,v} = 90 \text{ N/mm}^2$$

pri čemu se dobiva:

$$d_v \geq \sqrt{\frac{4 \cdot 0,04055 \cdot 1000}{90 \cdot \pi}} = 0,76 \text{ mm}$$

Odabran vijak M3 IT 6.8

Potreban broj vijaka određuje se prema izrazu:

$$n_v \geq \frac{q \cdot l}{\tau_{dop,v} \cdot A_j} \quad (65)$$

Gdje je:

q – kontinuirano opterećenje na vratilo

l – duljina na vratilu na kojoj djeluje kontinuirano opterećenje

A_j - površina presjeka jezgre vijka

$\tau_{dop,v}$ - dopušteno smično naprezanje

U izraz (65) uvrštavaju se sljedeće brojne vrijednosti:

$$q = 40,55 \text{ N/m} = 0,04055 \text{ N/mm}$$

$$l = 1 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$$

$$\tau_{dop,v} = 90 \text{ N/mm}^2$$

$$A_j = 4,48 \text{ mm}^2$$

pri čemu se dobiva:

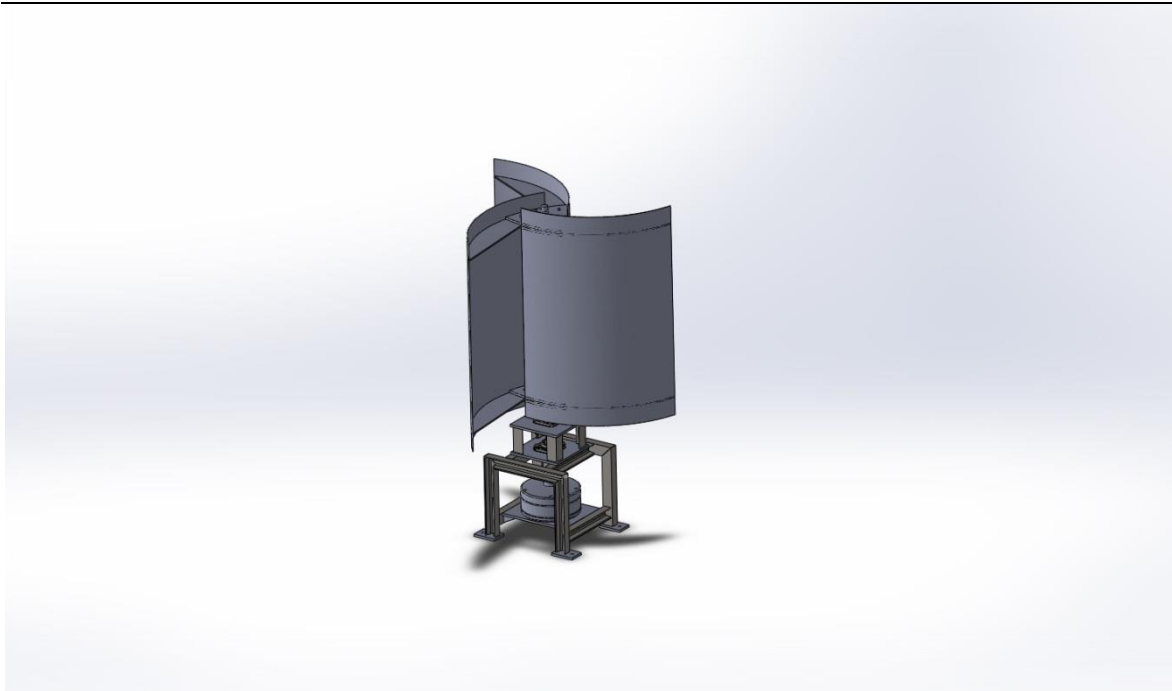
$$n_v \geq \frac{0,04055 \cdot 1000}{90 \cdot 4,48} = 0,1$$

Iz konstrukcijskih razloga, radi lakšeg rukovanja odabrano $n = 3$ odnosno odabrana 3 vijka M3 IT 6.8

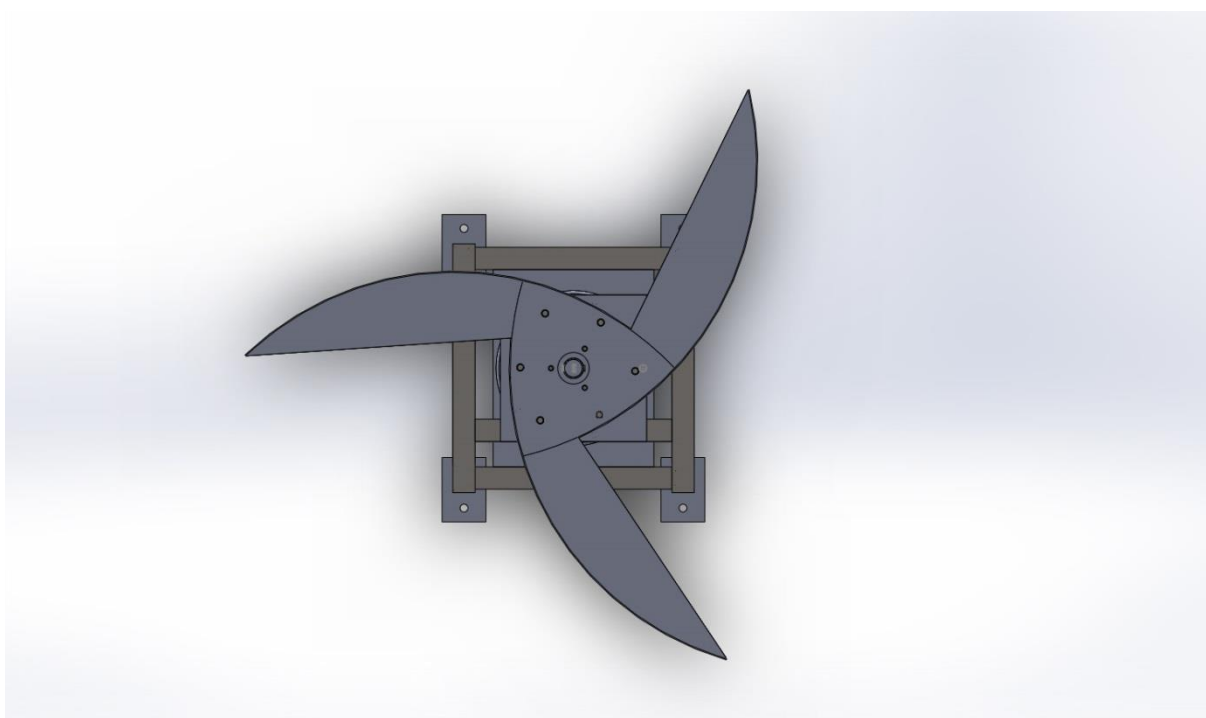
5.4.5. Izrada 3D modela odabranog koncepta

Za izradu 3D modela odabranog koncepta korišten je programski paket SolidWorks 2012. Na 3D modelu detaljno su prikazani svi dijelovi konstrukcije osim generatora čiji je model prikazan (modeliran) pojednostavljeno samo zbog vanjskih dimenzija potrebnih za modeliranje nosive konstrukcije.

Na slici 48. vidi se izrađeni 3D model vjetroturbine. Postolje vjetroturbine pričvršćuje se vijcima na krov zgrada ili poslovnih objekata. Vjetroturbina je pričvršćena na postolje preko generatora koji je vijcima pričvršćen za nosivu konstrukciju. Vratilo vjetroturbine preko glavčine iz dva dijela je povezano sa vratilom generatora i uležišteno sa dva ležaja sa kućištem pričvršćenih na nosivu konstrukciju. Tri zakrivljene lopatice preko zavarenih ukruta pričvršćeni su vijcima za trokutaste nosače te glavčinu koja je perom pričvršćena na vratilo [Slika 49].



Slika 48. 3D Model vertikalne vjetroelektrane



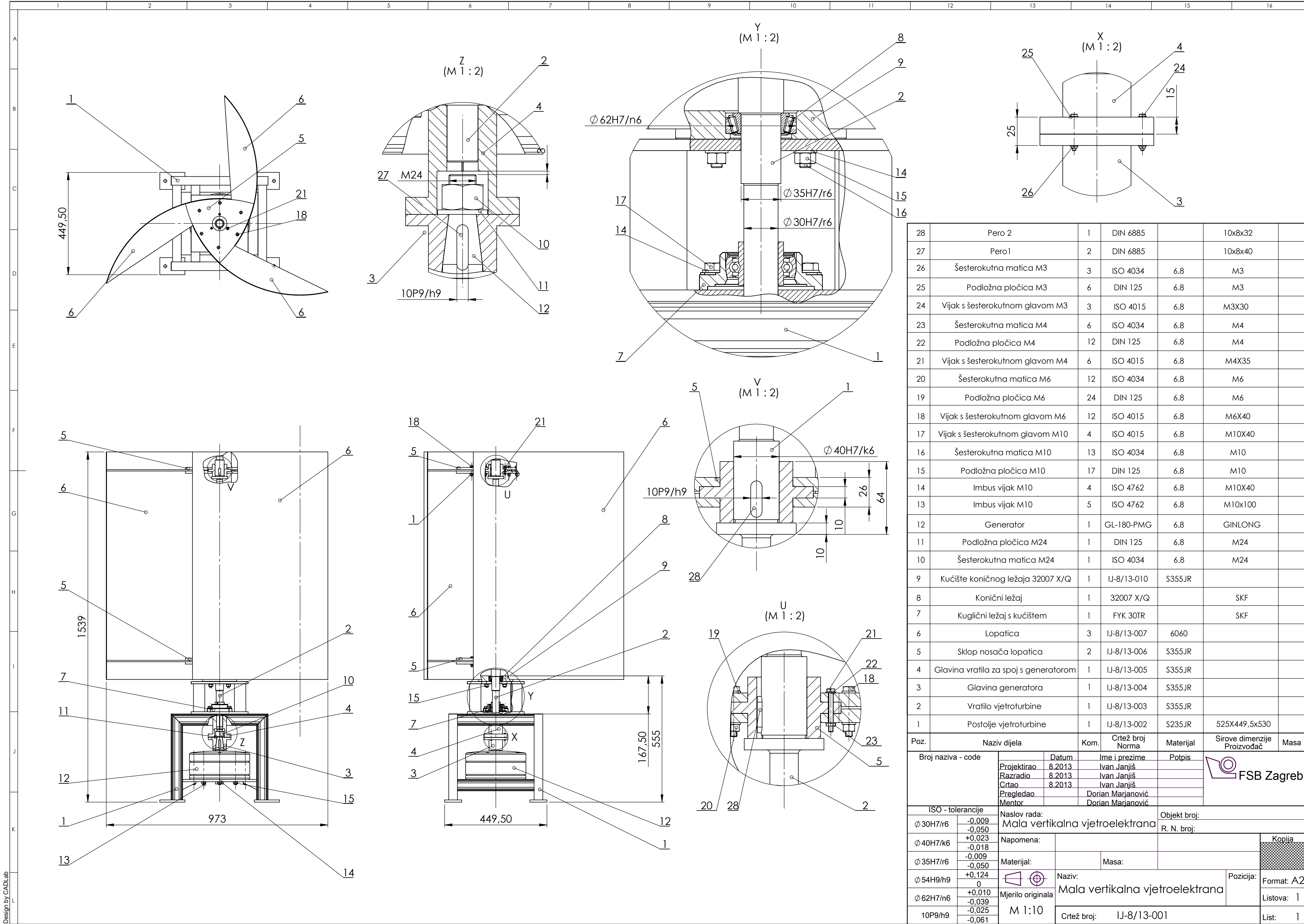
Slika 49. Prikaz lopatica i trokutastog nosača lopatica vjetroturbine

6. ZAKLJUČAK

Dobivanje el. energije iz energije vjetra trend je koji danas prati cijelo tržište. Još uvijek glavni dio tako dobivene el. energije koristi se za veća postrojenja (parkovi vjetroelektrana) dok je manji naglasak na upotrebi vjetroelektrana u „privatne svrhe“. Glavni razlog tome su visoki troškovi ulaganja te glomaznost samih vjetroturbina. U ovom radu razrađena je i projektirana jedna takva manja vertikalna vjetroturbina čija je namjena generiranje el. energije dovoljne za napajanje rasvjete stubišta jedne prosječne zgrade u Zagrebu (5 katova) ili pojedinih, manje zahtjevnih uređaja. Glavna prednost ove vertikalne vjetroturbine je mogućnost iskorištavanja energije vjetra u bilo kojem smjeru te pokretanje pri jako malim brzinama ($<0,9$ m/s) što je izuzetno važno jer su glavna tržišta poslovni objekti u gradovima i okolici gdje je vjetropotencijal manji. Kako je bitna stavka u potrebama korisnika bila i izgled same vjetroturbine ona je izvedena sa tri zakrivljene lopatice pričvršćene za trokutasti nosač [Slika 49]. Sama vjetroturbina i postolje ne predstavljaju veliki investicijski trošak, no glavni nedostatak ovih vjetroelektrana je visoka cijena skladištenja dobivene el. energije koja bi se vršila preko akumulatora ili velikih Li-ionskih baterija koje su vrlo skupe, a ni vjetar ni naša potrošnja nisu predvidivi. Ovaj se problem može riješiti direktnim priključivanjem na mrežu, ali priključivanje na mrežu stvara novi problem jer nije jednostavno, a ukoliko bi se na mrežu spojilo mnoštvo ovakvih potrošača – proizvođača mreža bi postala nestabilna. Rješenje ovih problema zapravo ne ovisi o samom proizvodu već o sekundarnim čimbenicima pa je vrlo vjerojatno da će ovakav način proizvodnje energije morati pričekati dok se ne riješe problemi pohranjivanja energije. Što se tiče samoodrživih objekata koji nemaju mogućnost spajanja na mrežu ovakav izvor električne energije predstavlja dobar izbor. U kombinaciji sa solarnim kolektorima i agregatom koji se pogoni bio-dieselom moguće je dobiti i znatno veći količinu el. energije. Konstrukcijska izvedba ovakvog proizvoda nije upitna pa se tako na tržištu pojavljuje sve više proizvođača koji u svojem asortimanu nude ovakve uređaje iako ne ovako malih dimenzija. Konstrukcija proizvoda izrađena u ovom radu cijenom bi mogla biti vrlo konkurentna no potrebno je testiranje i optimiranje kojim bi se odredila točna snaga i eventualna upotreba drugih materijala (karbonska vlakna, pvc i sl.) . Nakon testiranja bilo bi moguće odrediti da li je ova vertikalna vjetroturbina isplativa.

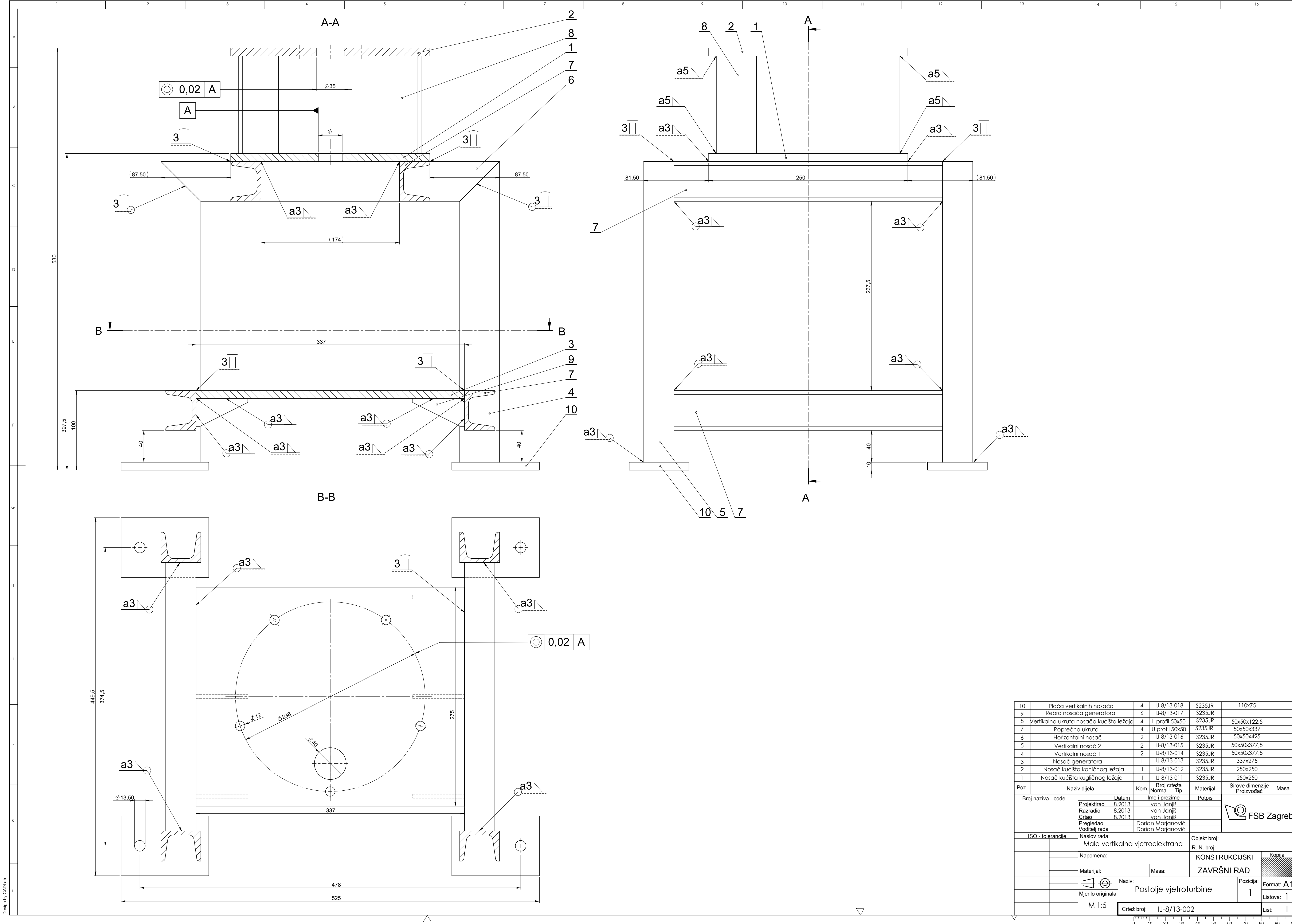
7. LITERATURA

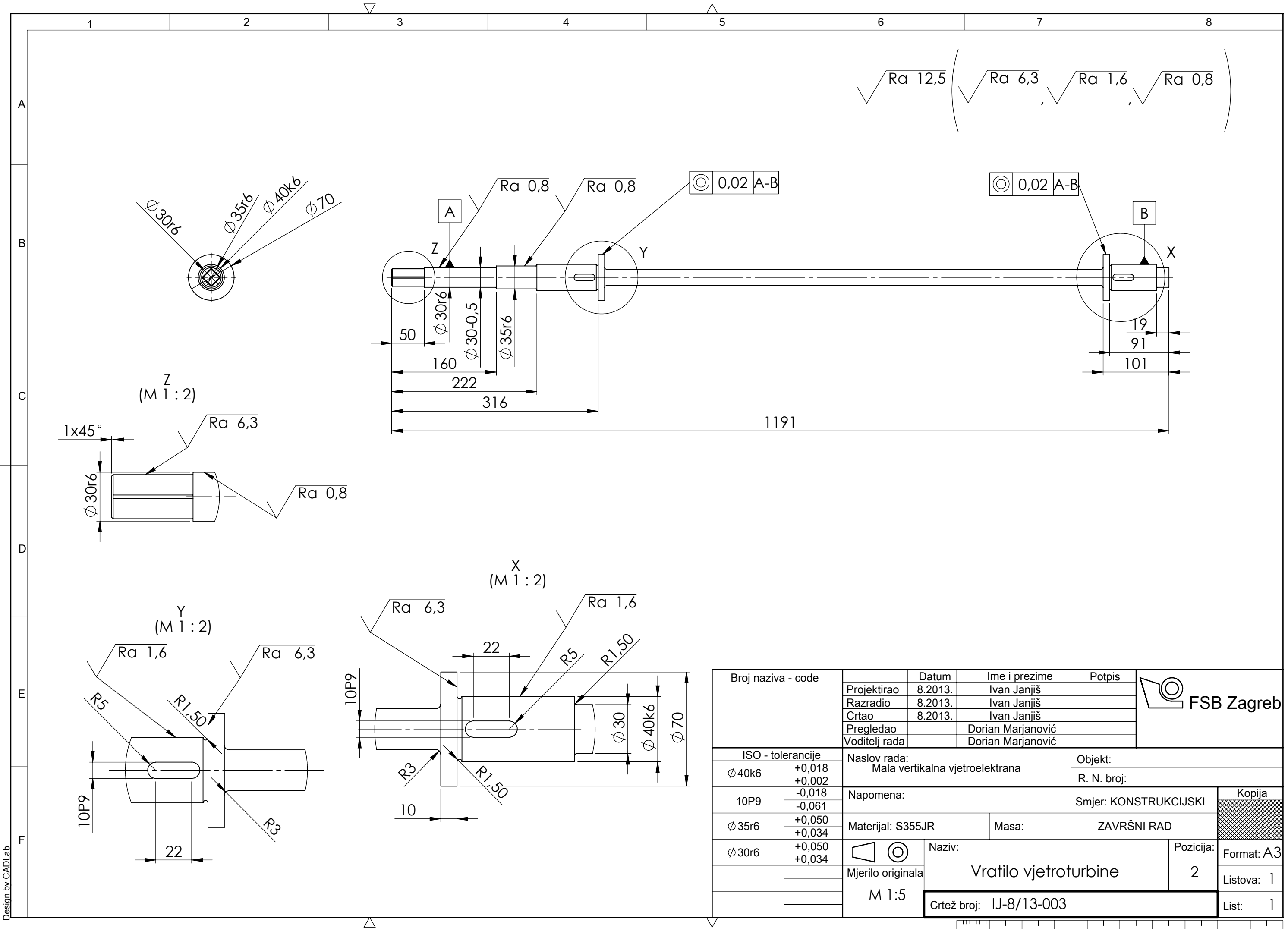
- [1] J. F. Manwell, Wind Energy Explained: Theory, Design and Application
- [2] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Sajema d.o.o., Zagreb, 2009
- [3] Decker, K-H.,: Elementi strojeva, Tehnička knjiga, Zagreb, 1975
- [4] <http://www.skf.com/>
zadnji posjet: kolovoz 2013.
- [5] Horvat, Z.,: Vratilo (proračun), Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [6] <http://www.windspireenergy.com/>
zadnji posjet: srpanj 2013.
- [7] <http://www.adriawindpower.hr/>
zadnji posjet: srpanj 2013.
- [8] <http://www.quietrevolution.com/>
zadnji posjet: lipanj 2013.
- [9] <http://www.ginlong.com/>
zadnji posjet: kolovoz 2013.
- [10] Strojopromet d.o.o. , katalog 2013.
- [11] <http://www.windsourcing.com/>
zadnji posjet: kolovoz 2013.
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power



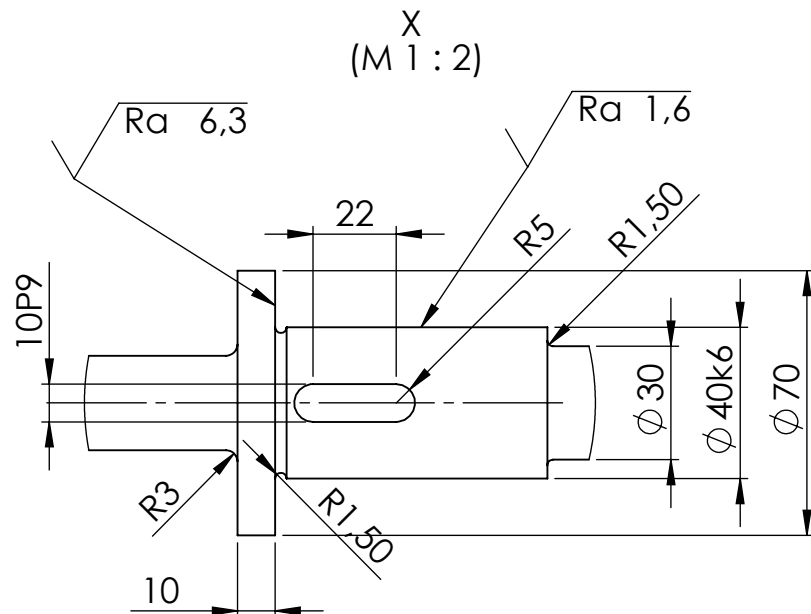
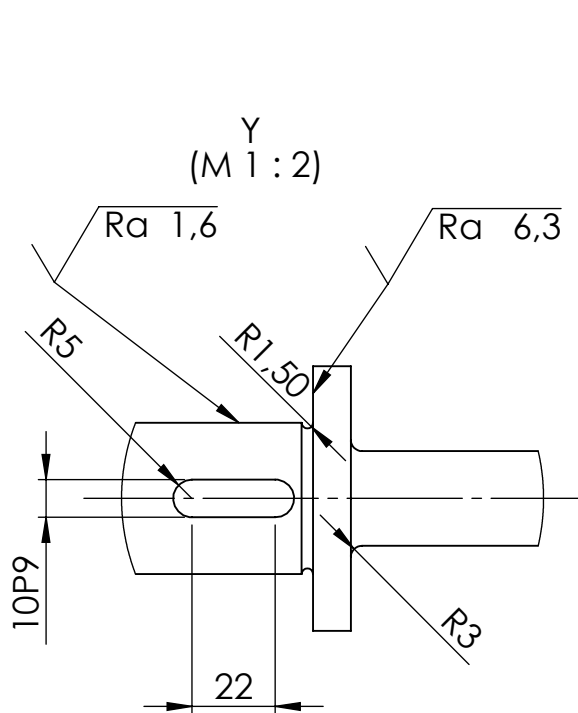
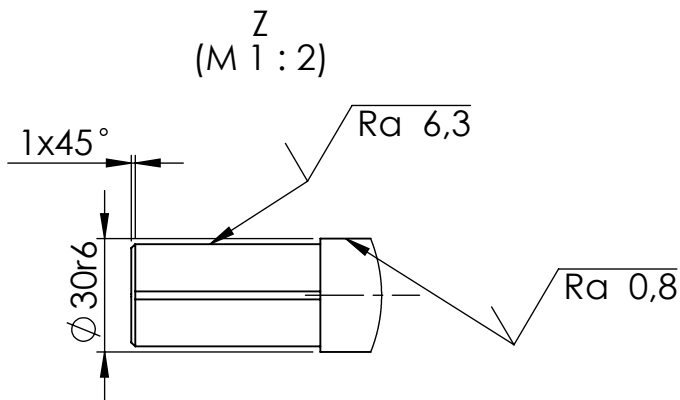
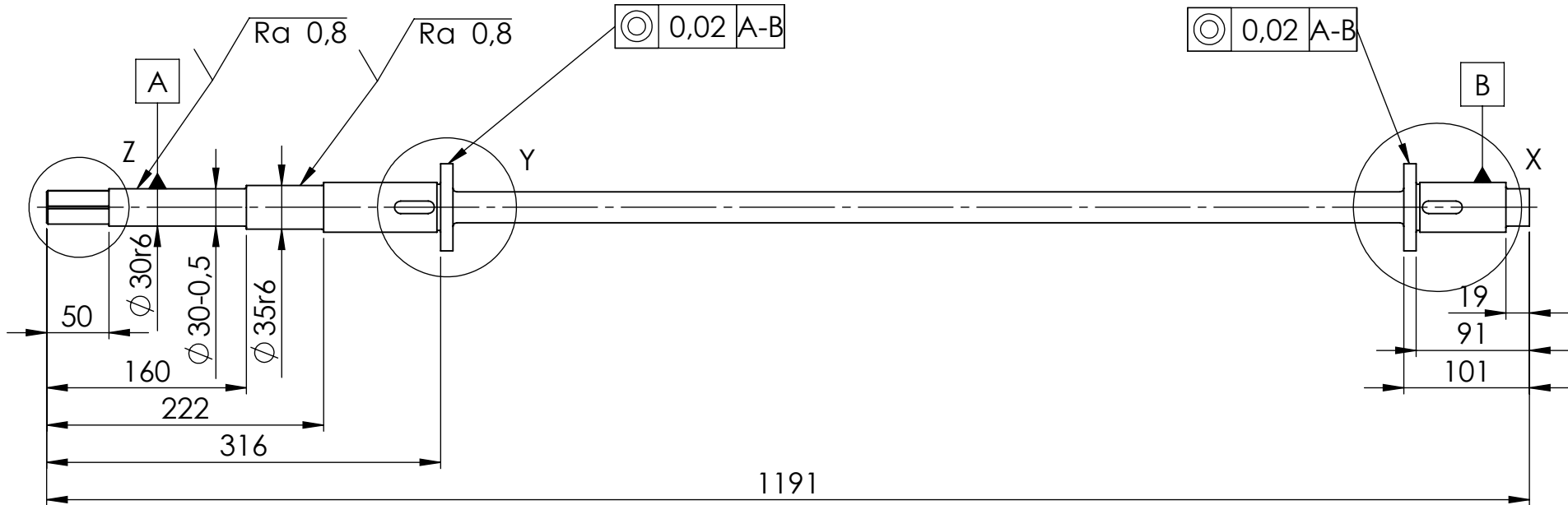
28	Pero 2	1	DIN 6885		10x8x32	
27	Pero1	2	DIN 6885		10x8x40	
26	Šesterokutna matica M3	3	ISO 4034	6.8	M3	
25	Podložna pločica M3	6	DIN 125	6.8	M3	
24	Vijak s šesterokutnom glavom M3	3	ISO 4015	6.8	M3X30	
23	Šesterokutna matica M4	6	ISO 4034	6.8	M4	
22	Podložna pločica M4	12	DIN 125	6.8	M4	
21	Vijak s šesterokutnom glavom M4	6	ISO 4015	6.8	M4X35	
20	Šesterokutna matica M6	12	ISO 4034	6.8	M6	
19	Podložna pločica M6	24	DIN 125	6.8	M6	
18	Vijak s šesterokutnom glavom M6	12	ISO 4015	6.8	M6X40	
17	Vijak s šesterokutnom glavom M10	4	ISO 4015	6.8	M10X40	
16	Šesterokutna matica M10	13	ISO 4034	6.8	M10	
15	Podložna pločica M10	17	DIN 125	6.8	M10	
14	Imbus vijak M10	4	ISO 4762	6.8	M10X40	
13	Imbus vijak M10	5	ISO 4762	6.8	M10x100	
12	Generator	1	GL-180-PMG	6.8	GINLONG	
11	Podložna pločica M24	1	DIN 125	6.8	M24	
10	Šesterokutna matica M24	1	ISO 4034	6.8	M24	
9	Kućšte koničnog ležaja 32007 X/Q	1	IJ-8/13-010	S355JR		
8	Konični ležaj	1	32007 X/Q		SKF	
7	Kuglični ležaj s kućištem	1	FYK 30TR		SKF	
6	Lopatica	3	IJ-8/13-007	6060		
5	Sklop nosača lopatica	2	IJ-8/13-006	S355JR		
4	Glavina vratila za spoj s generatorom	1	IJ-8/13-005	S355JR		
3	Glavina generatora	1	IJ-8/13-004	S355JR		
2	Vratilo vjetroturbine	1	IJ-8/13-003	S355JR		
1	Postolje vjetroturbine	1	IJ-8/13-002	S235JR	525X449,5x530	

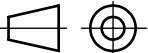
Poz.	Naziv dijela		Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
Broj naziva - code			Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
		Projektirao	8.2013	Ivan Janjiš			
		Razradio	8.2013	Ivan Janjiš			
		Crtao	8.2013	Ivan Janjiš			
		Pregledao		Dorian Marjanović			
		Mentor		Dorian Marjanović			
ISO - tolerancije		Naslov rada:			Objekt broj:		
Ø 30H7/r6	-0.009 -0.050	Mala vertikalna vjetroelektrana			R. N. broj:		
Ø 40H7/k6	+0.023 -0.018	Napomena:					Kopija
Ø 35H7/r6	-0.009 -0.050	Materijal:		Masa:			
Ø 54H9/h9	+0.124 0		Naziv:		Pozicija:		Format: A2
Ø 62H7/n6	+0.010 -0.039		Mala vertikalna vjetroelektrana				Listova: 1
10P9/h9	-0.025 -0.061	M 1:10	Crtež broj:		IJ-8/13-001		List: 1





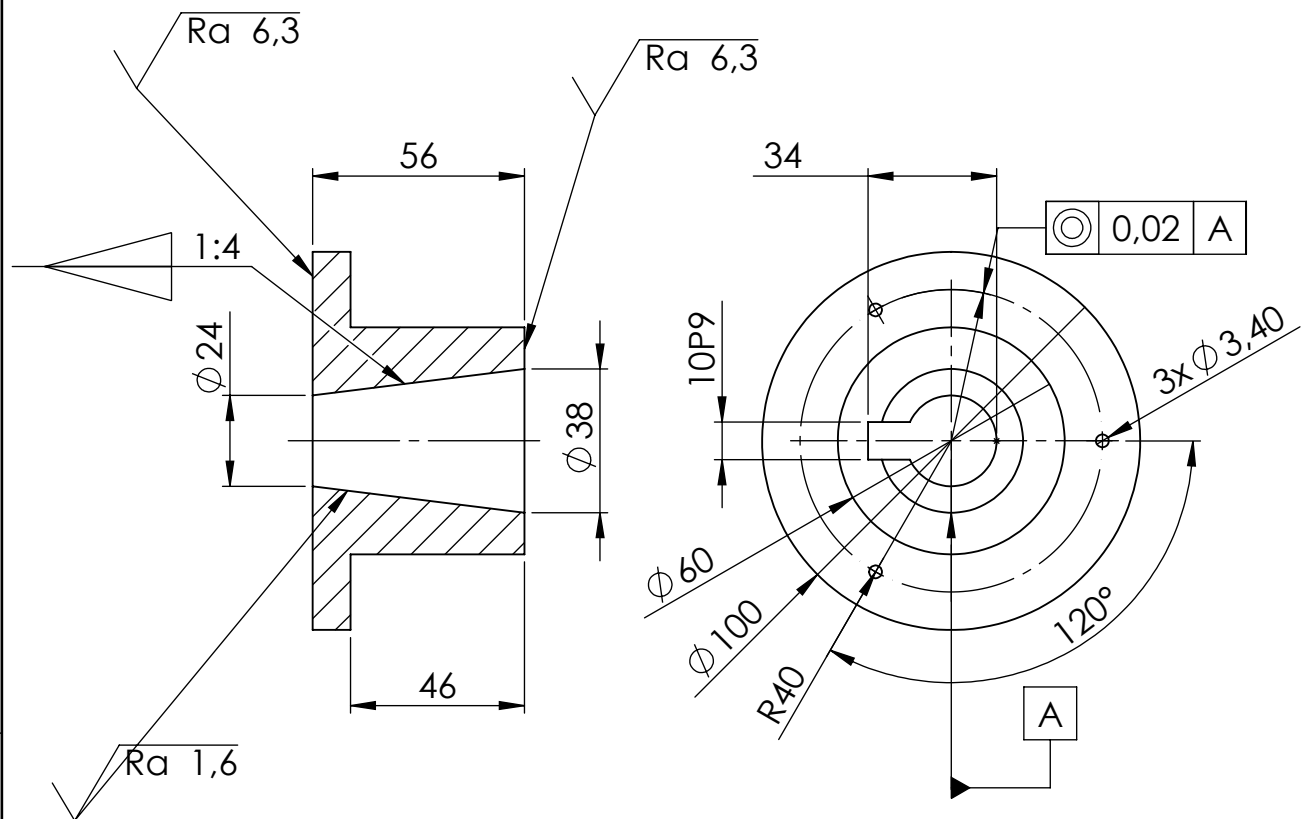
$$\sqrt{Ra\ 12,5} \left(\sqrt{Ra\ 6,3}, \sqrt{Ra\ 1,6}, \sqrt{Ra\ 0,8} \right)$$

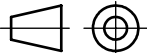


Broj naziva - code			Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb		
		Projektirao	8.2013.	Ivan Janjiš				
		Razradio	8.2013.	Ivan Janjiš				
		Crtao	8.2013.	Ivan Janjiš				
		Pregledao		Dorian Marjanović				
		Voditelj rada		Dorian Marjanović				
ISO - tolerancije		Naslov rada: Mala vertikalna vjetroelektrana				Objekt:		
Ø 40k6	+0,018 +0,002					R. N. broj:		
10P9	-0,018 -0,061	Napomena:				Smjer: KONSTRUKCIJSKI	Kopija	
	Ø 35r6						+0,050 +0,034	Materijal: S355JR
Ø 30r6	+0,050 +0,034		Naziv: Vratilo vjetroturbine				Pozicija: 2	Format: A3
								Mjerilo originala
		M 1:5	Crtež broj: IJ-8/13-003				List: 1	

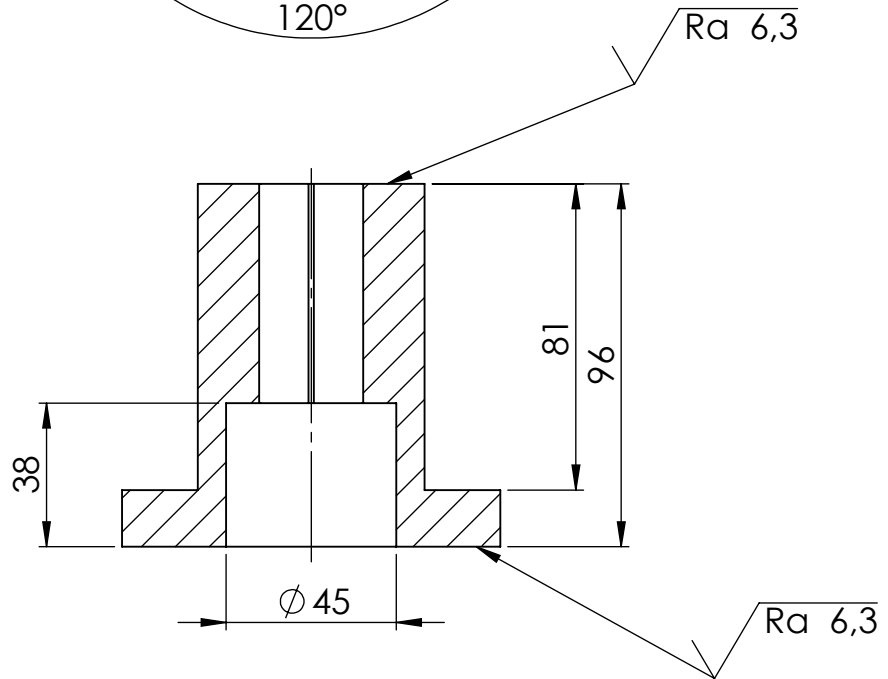
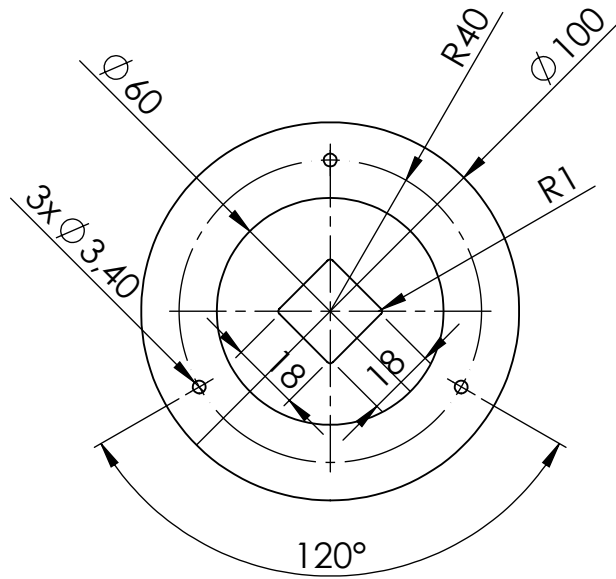
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

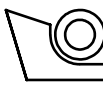
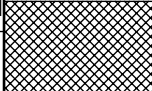
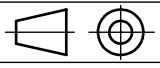
$\sqrt{Ra\ 12,5}$ $\left(\sqrt{Ra\ 6,3}, \sqrt{Ra\ 1,6} \right)$

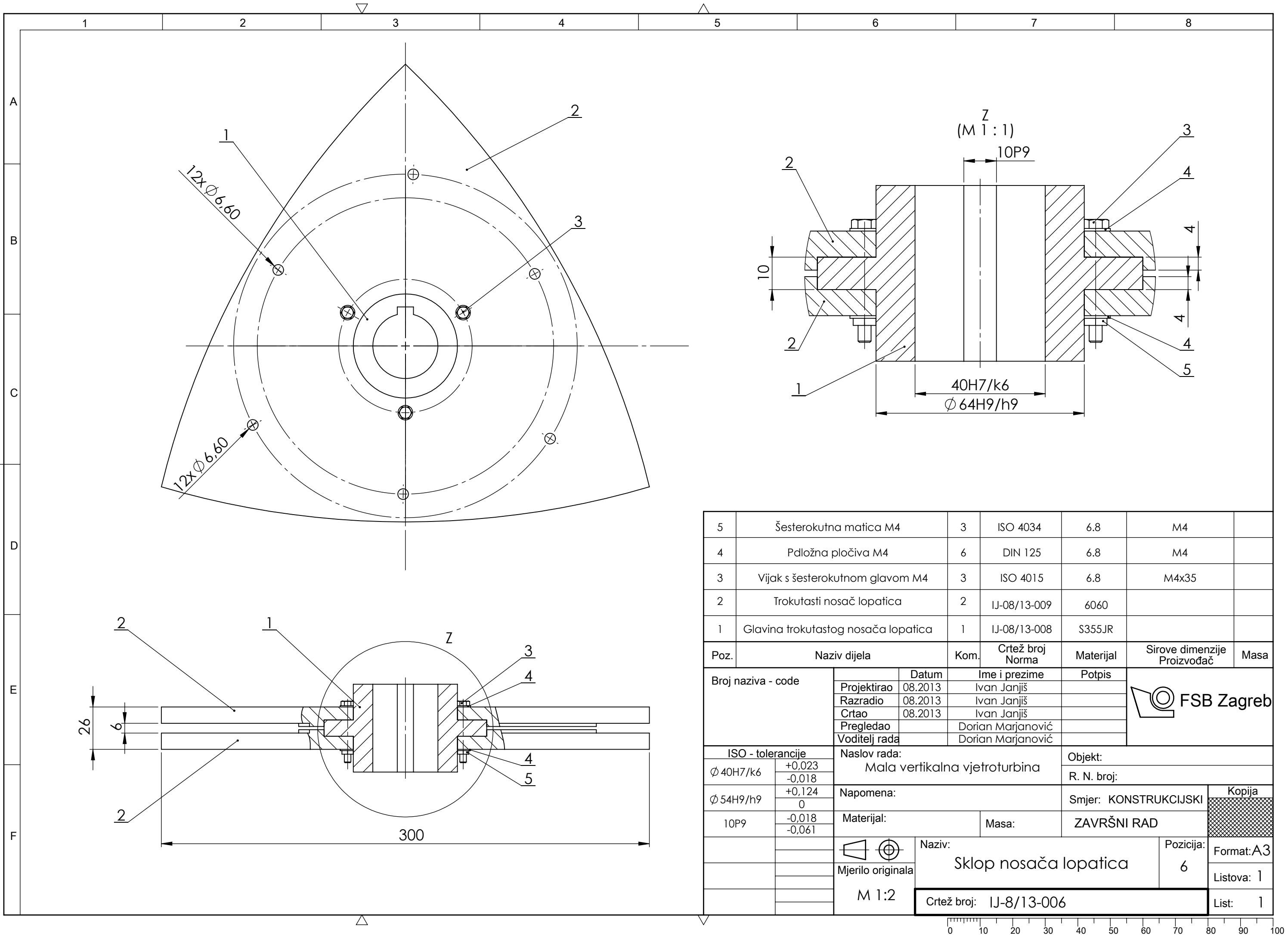


Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb		
		Projektirao	08.2013.	Ivan Janjiš			
		Razradio	08.2013.	Ivan Janjiš			
		Crtao	08.2013.	Ivan Janjiš			
		Pregledao	08.2013.	Dorijan Marjanović			
		Voditelj rada	08.2013.	Dorijan Marjanović			
ISO - tolerancije		Naziv rada: Mala vertikalna vjetroelektrana			Objekt:		
10P9	-0,018 -0,061				R. N. broj:		
		Napomena:			Smjer: KONSTRUKCIJSKI	Kopija	
		Materijal: S355JR	Masa:	ZAVRŠNI RAD			
			Naziv: Glavina generatora			Pozicija:	Format: A4
		Mjerilo originala				3	Listova: 1
		M 1:2	Crtež broj: IJ-8/13-004			List: 1	

$\sqrt{Ra\ 12,5}$
 $\left(\sqrt{Ra\ 6,3} \right)$



Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
	Razradio	8.2013	Ivan Janjiš		
	Crtao	8.2013	Ivan Janjiš		
	Pregledao		Dorian Marjanović		
	Voditelj rada		Dorian Marjanović		
ISO - tolerancije	Naziv rada:			Objekt:	
	Mala vertikalna vjetroelektrana			R. N. broj:	
	Napomena:			Smjer: KONSTRUKCIJSKI	Kopija
	Materijal: S355JR	Masa:	ZAVRŠNI RAD		
		Naziv:		Pozicija:	
	Mjerilo originala	Glavina vratila za spoj s generatorom		4	
	M 1:2	Crtež broj: IJ-8/13-005		List: 1	



(M 1 : 1)

10P9

40H7/k6
Ø 64H9/h9

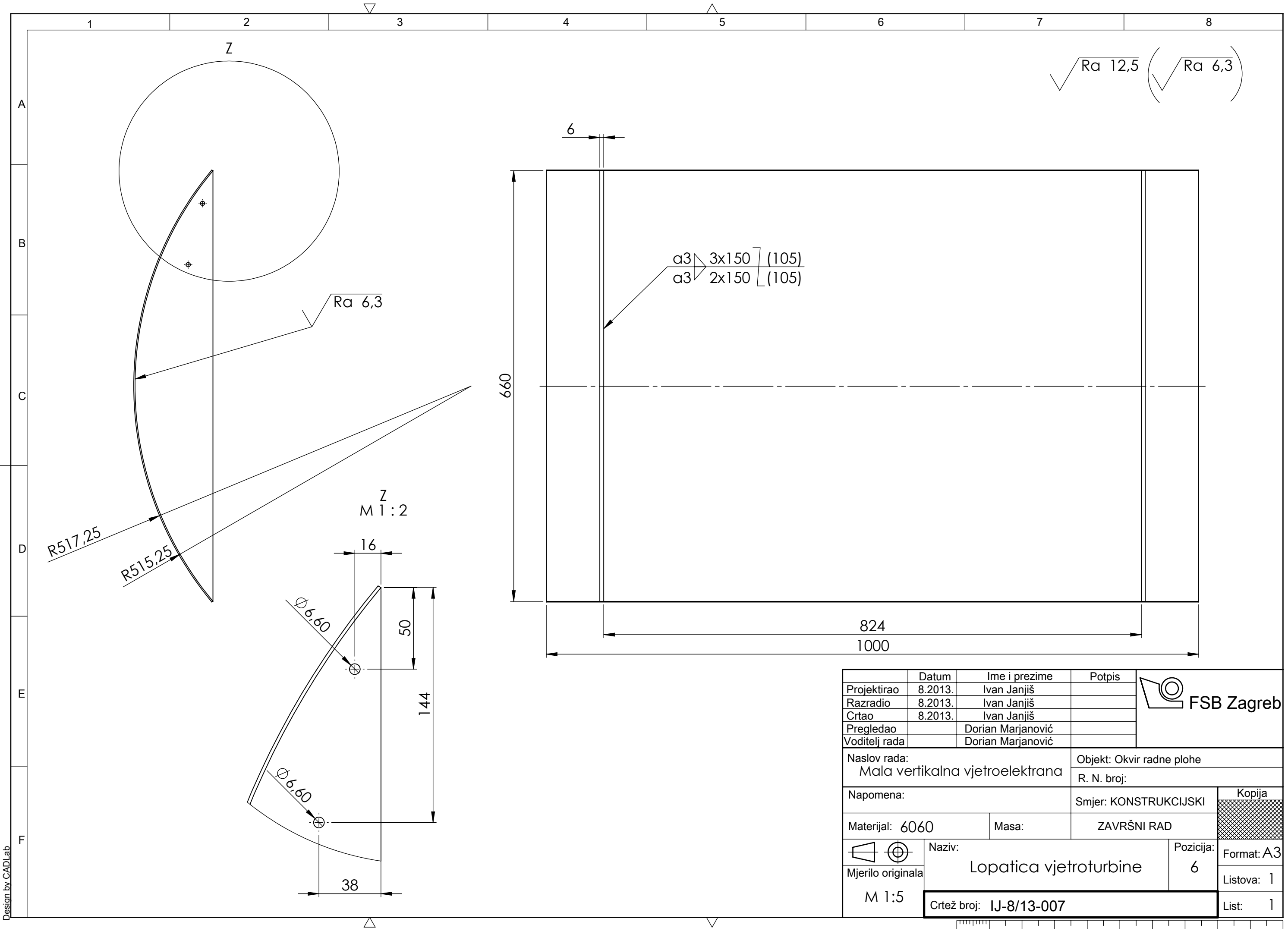
FSB Zagreb

Kopija

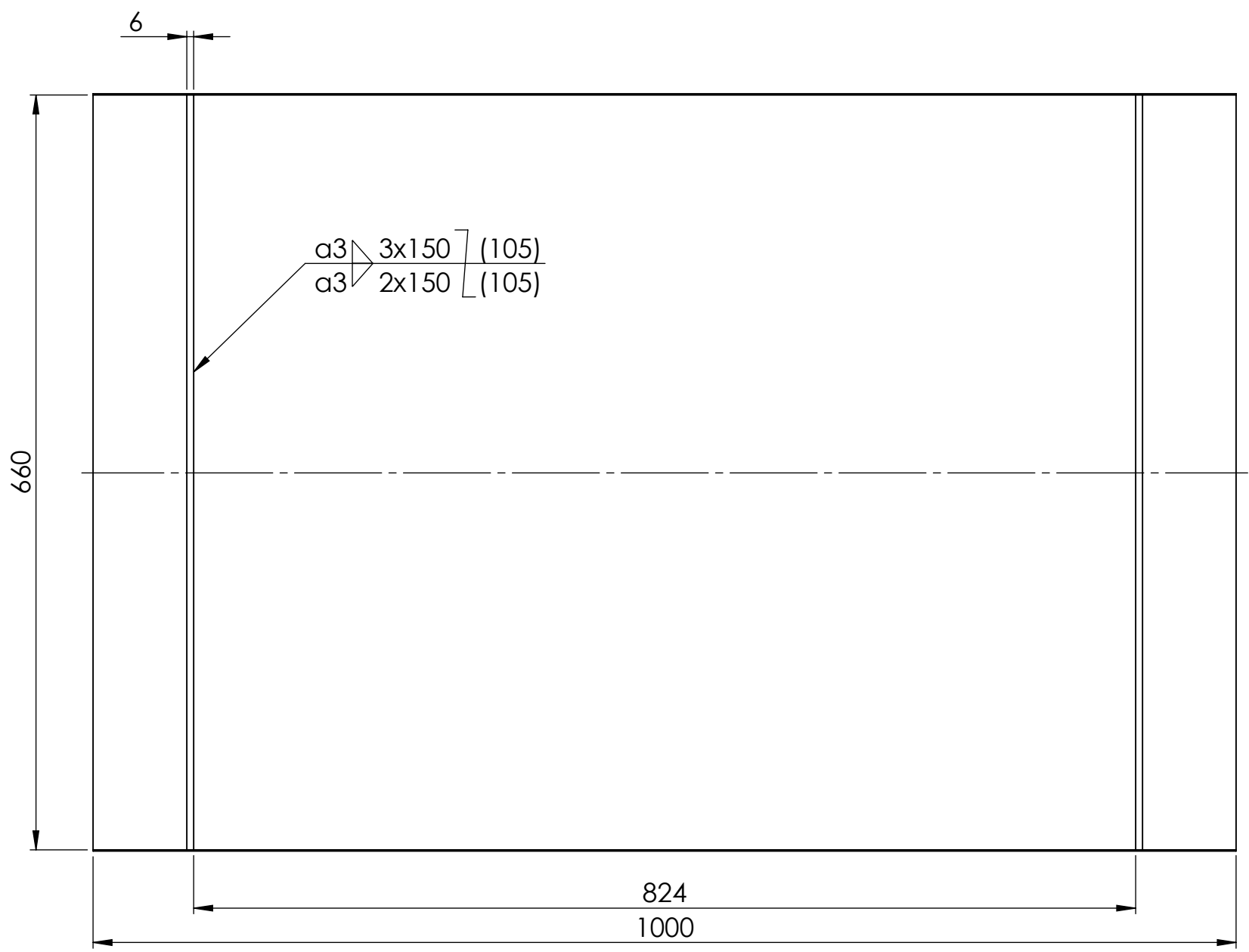
Format: A3

Listova: 1

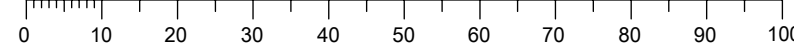
List: 1



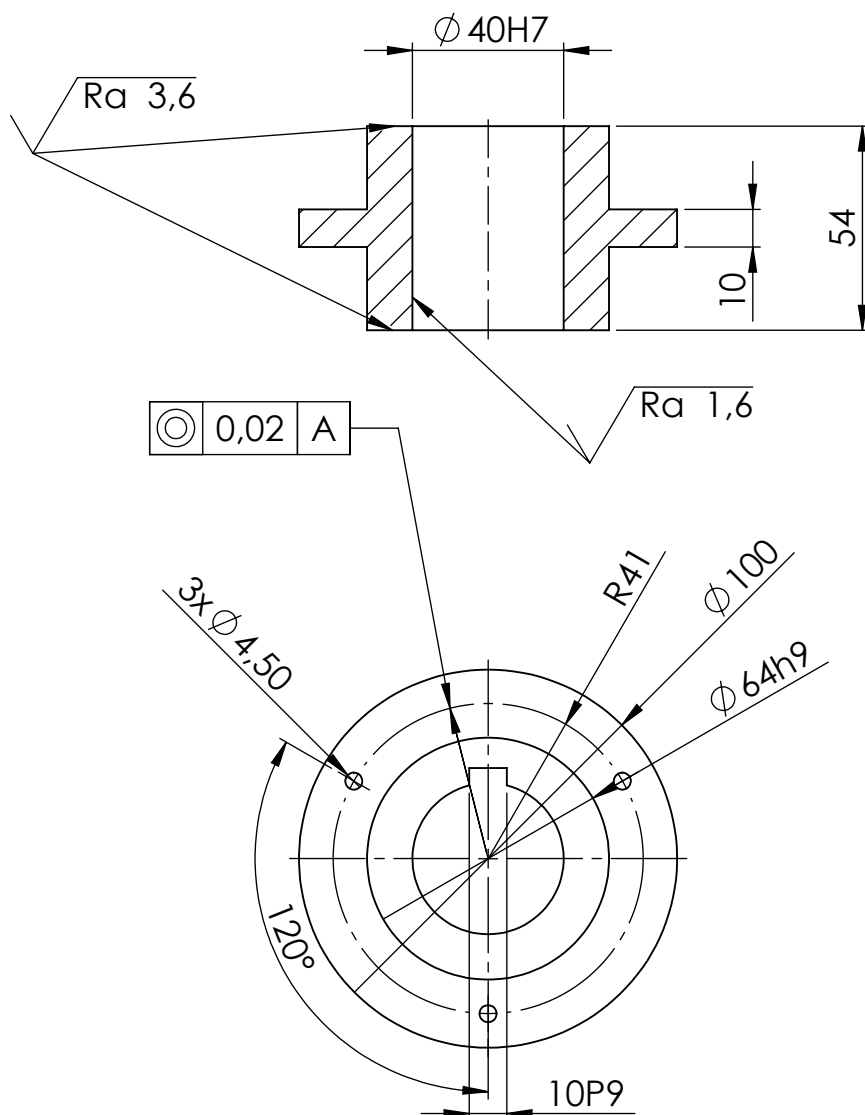
$\sqrt{Ra\ 12,5}$ ($\sqrt{Ra\ 6,3}$)



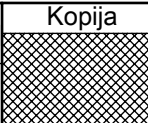
	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	8.2013.	Ivan Janjiš		
Razradio	8.2013.	Ivan Janjiš		
Crtao	8.2013.	Ivan Janjiš		
Pregledao		Dorian Marjanović		
Voditelj rada		Dorian Marjanović		
Naslov rada:			Objekt: Okvir radne plohe	
Mala vertikalna vjetroelektrana			R. N. broj:	
Napomena:			Smjer: KONSTRUKCIJSKI	Kopija
Materijal: 6060		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	Naziv:		Pozicija:	Format: A3
Mjerilo originala	Lopatica vjetroturbine		6	Listova: 1
M 1:5	Crtež broj: IJ-8/13-007			List: 1

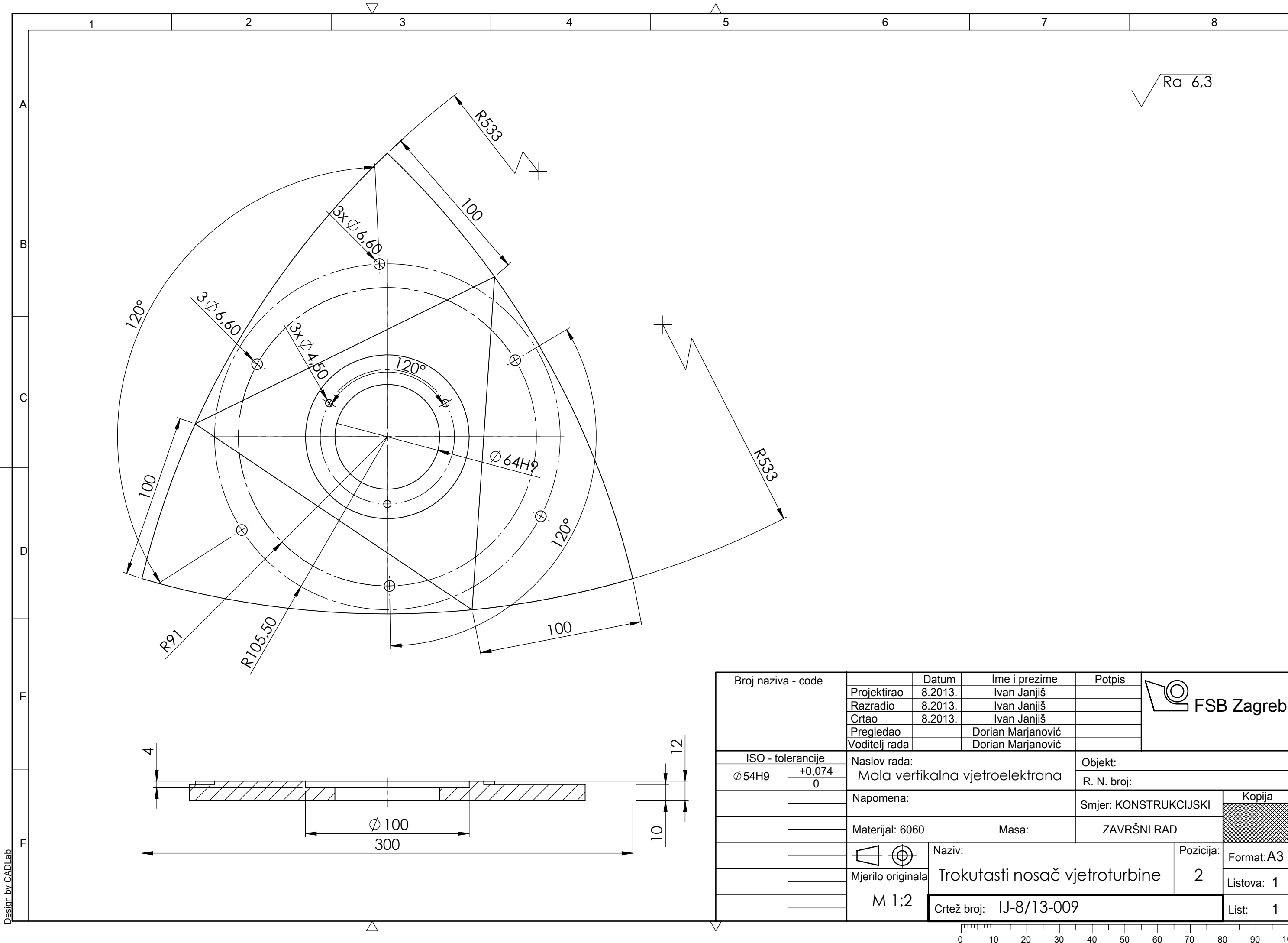


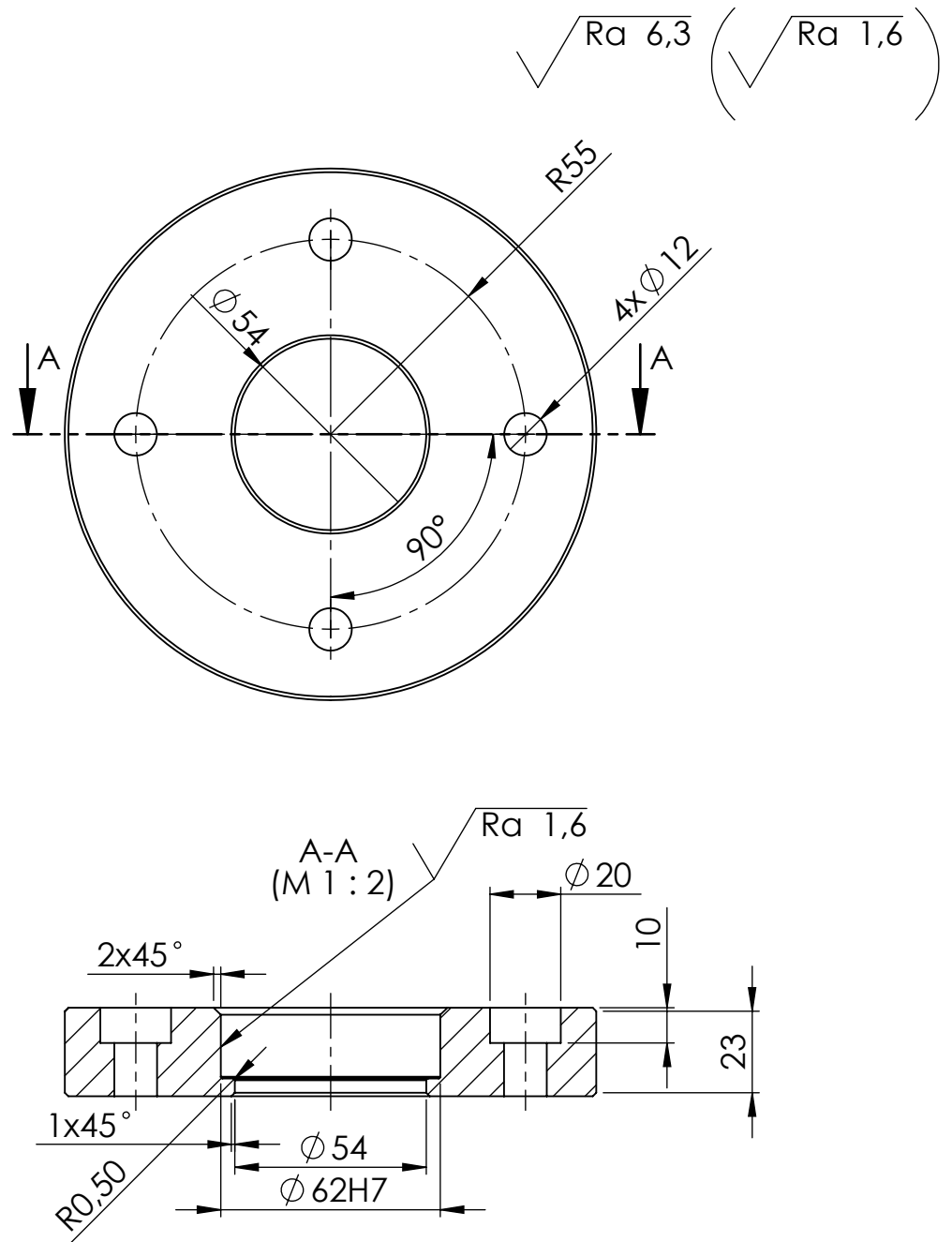
$\sqrt{Ra\ 6,3}$ $\left(\sqrt{Ra\ 3,6}, \sqrt{Ra\ 1,6} \right)$

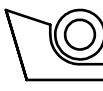


0,02 A

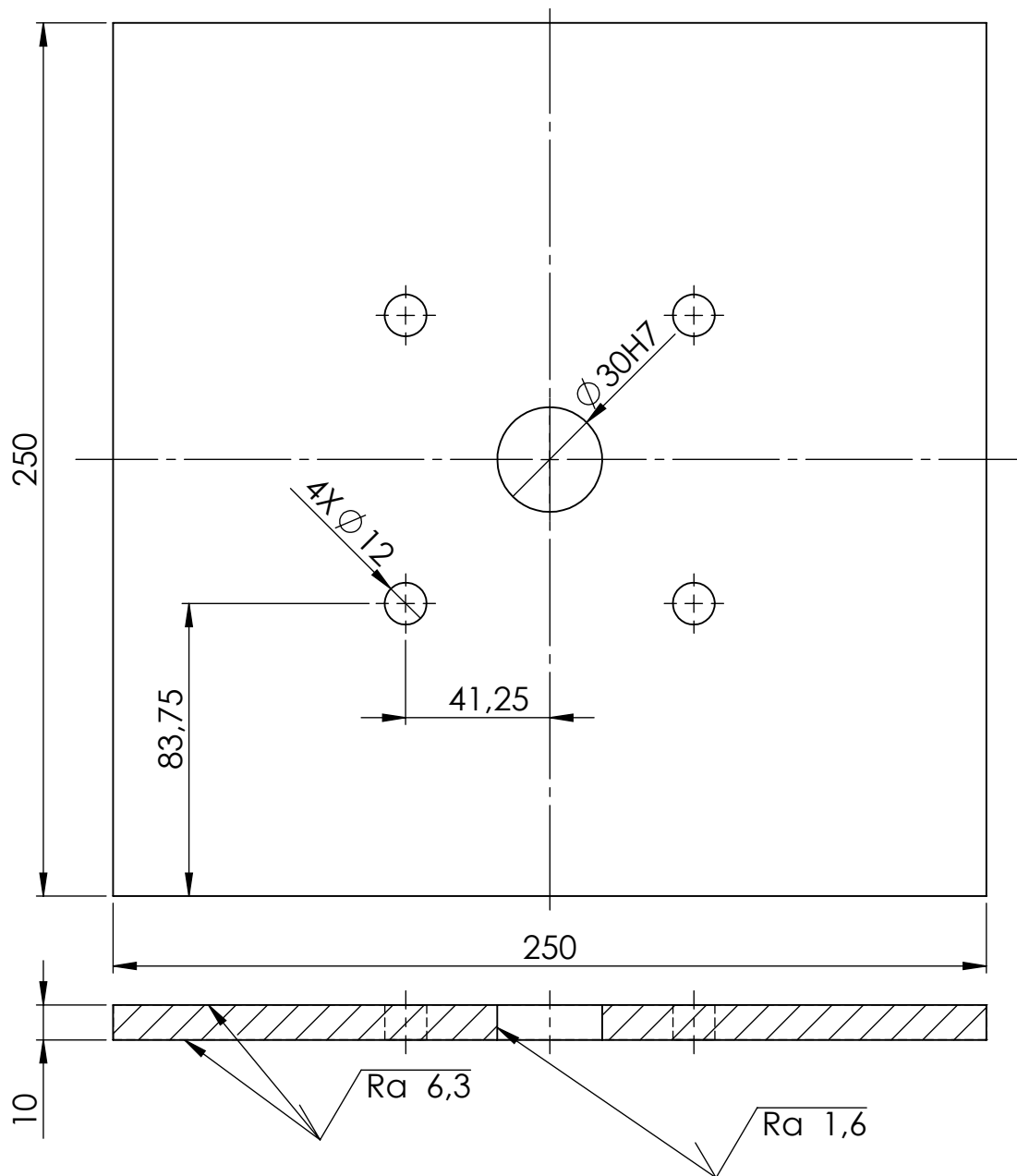
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb			
		Projektirao	8.2013	Ivan Janjiš				
		Razradio	8.2013	Ivan Janjiš				
		Crtao	8.2013	Ivan Janjiš				
		Pregledao		Dorian Marjanović				
		Voditelj rada		Dorian Marjanović				
ISO - tolerancije		Naziv rada: Mala vertikalna vjetroelektrana			Objekt:			
Ø 40H7	+0,025				R. N. broj:			
	0							
10P9	-0,018	Napomena:			Smjer: KONSTRUKCIJSKI	Kopija		
	-0,061							
Ø 54h9	0	Materijal: S355JR	Masa:	ZAVRŠNI RAD				
	-0,074							
		Naziv: Glavina trokutastog nosača lopatica				Pozicija: 1	Format: A4	
							Mjerilo originala	Listova: 1
							M 1:2	Crtež broj: IJ-8/13-008

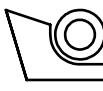


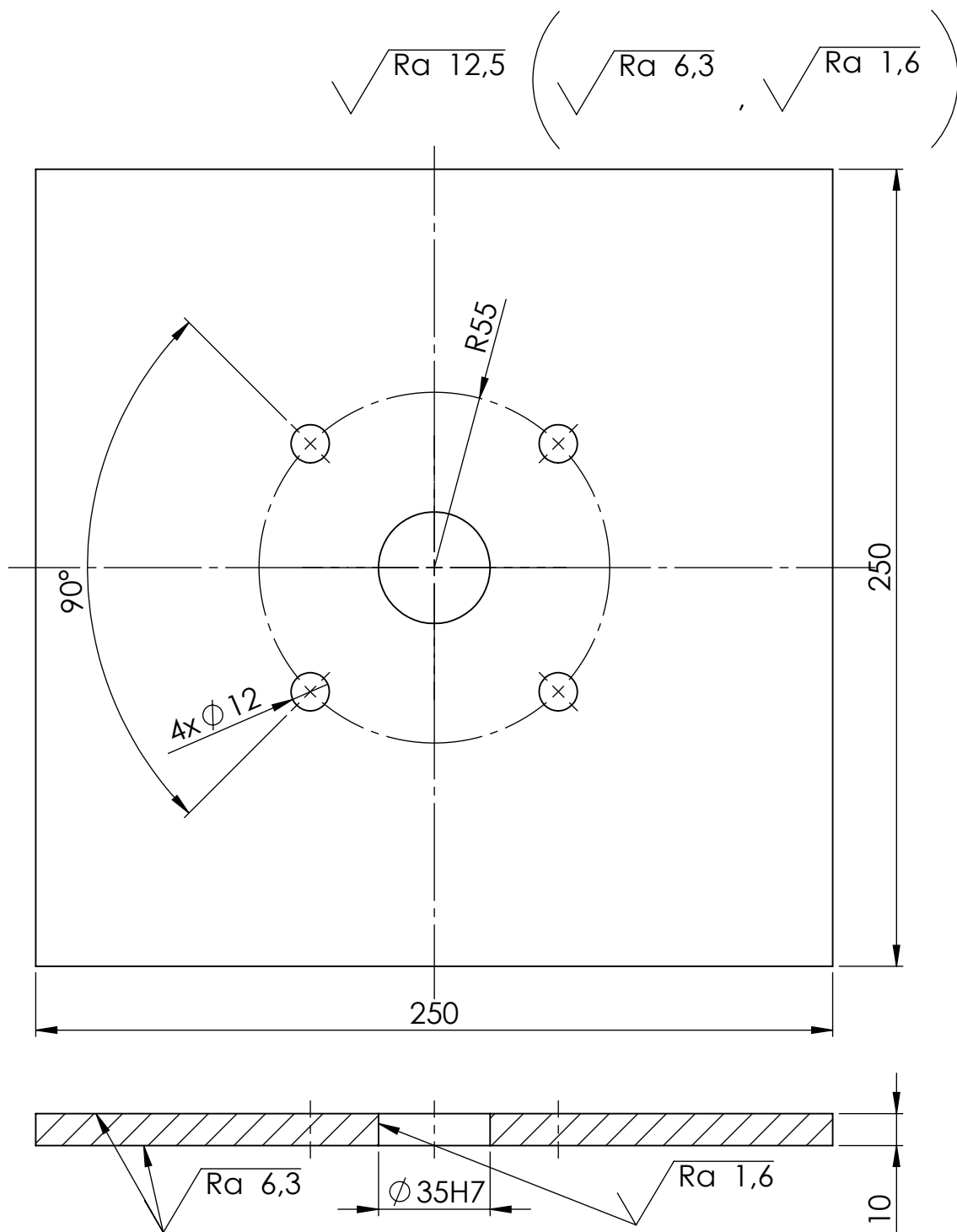


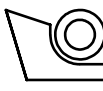
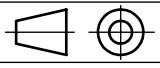
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
		Projektirao	8.2013	Ivan Janjiš		
		Razradio	8.2013	Ivan Janjiš		
		Crtao	8.2013	Ivan Janjiš		
		Pregledao		Dorian Marjanović		
		Voditelj rada		Dorian Marjanović		
ISO - tolerancije		Naziv rada: Mala vertikalna vjetroelektrana			Objekt:	
$\phi 62H7$	+ 0,030 0				R. N. broj:	
		Napomena:			Smjer: KONSTRUKCIJSKI	Kopija
		Materijal:		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
		Naziv:			Pozicija:	Format: A4
		Mjerilo originala			9	Listova: 1
		M 1:2			Crtež broj: IJ-8/13-010	List: 1

$\sqrt{Ra\ 12,5}$ $\left(\sqrt{Ra\ 6,3}, \sqrt{Ra\ 1,6} \right)$

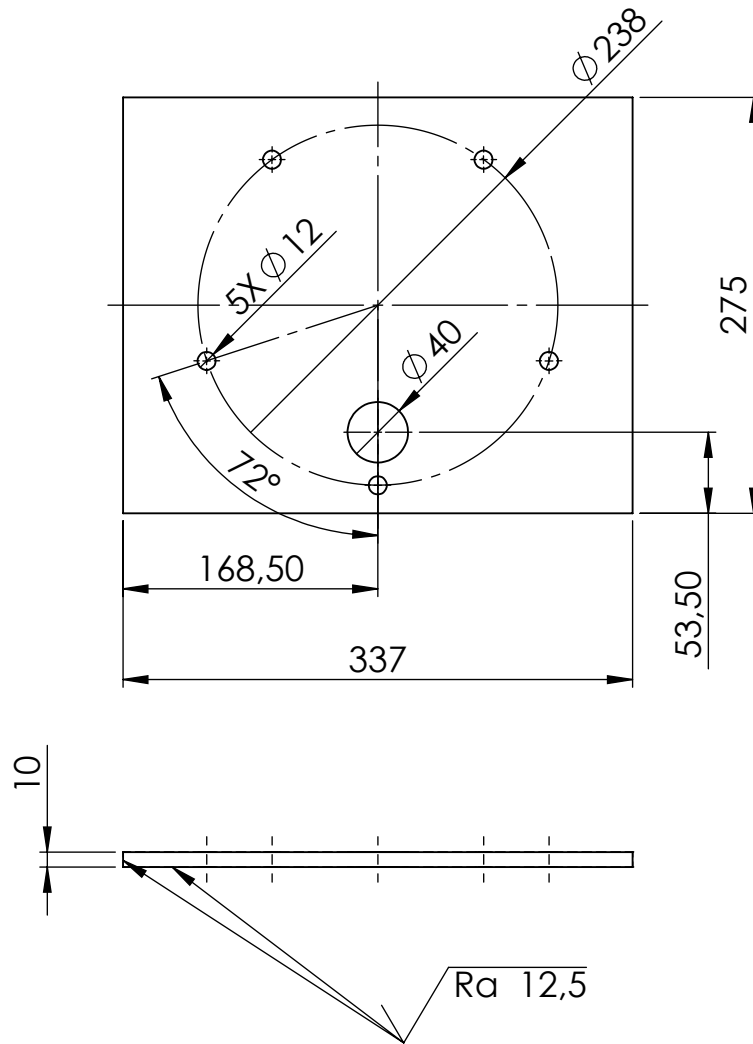


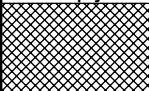
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
		Projektirao	8.2013	Ivan Janjiš		
		Razradio	8.2013	Ivan Janjiš		
		Crtao	8.2013	Ivan Janjiš		
		Pregledao		Dorian Marjanović		
		Voditelj rada		Dorian Marjanović		
ISO - tolerancije		Naziv rada:			Objekt:	
Ø 30H7	+ 0,025 0	Mala vertikalna vjetroelektrana			R. N. broj:	
		Napomena:			Smjer: KONSTRUKCIJSKI	Kopija
		Materijal: S235JR		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
		Naziv:			Pozicija:	Format: A4
		Mjerilo originala			1	Listova: 1
		M 1:2			Crtež broj: IJ-8/13-011	
					List: 1	



Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
		Projektirao	8.2013	Ivan Janjiš		
		Razradio	8.2013	Ivan Janjiš		
		Crtao	8.2013	Ivan Janjiš		
		Pregledao		Dorian Marjanović		
		Voditelj rada	Dorian Marjanović			
ISO - tolerancije		Naziv rada:			Objekt:	
Ø 35H7	+ 0,025 0	Mala vertikalna vjetroelektrana			R. N. broj:	
		Napomena:			Smjer: KONSTRUKCIJSKI	
		Materijal:		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
		 Naziv:			Pozicija:	
		Mjerilo originala			2	
		M 1:2				
		Crtež broj: IJ-8/13-012				
					Kopija	
					Format: A4	
					Listova: 1	
					List: 1	

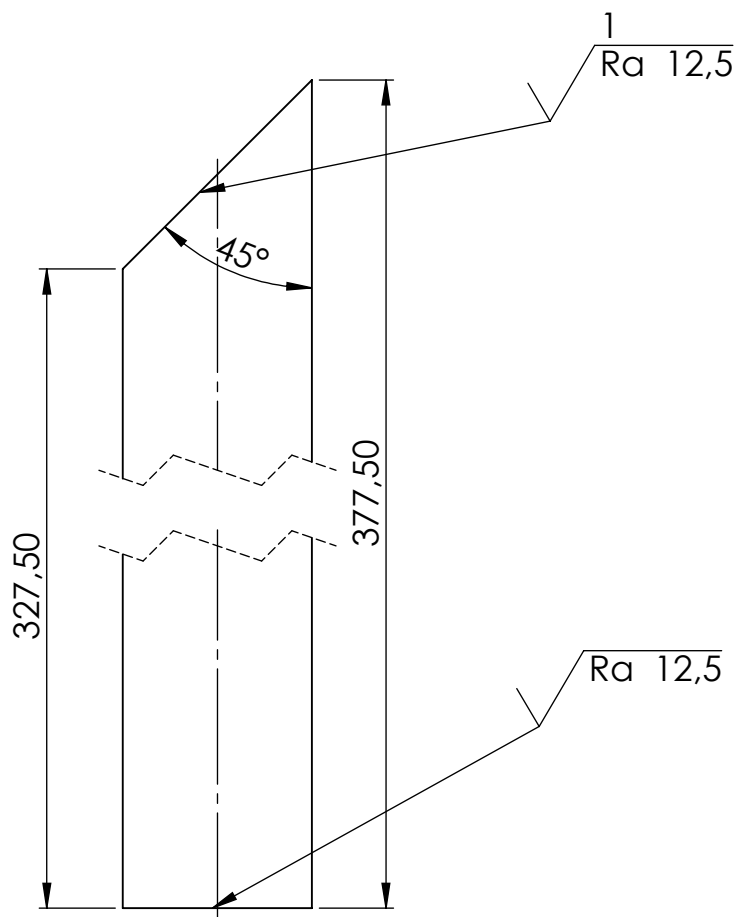
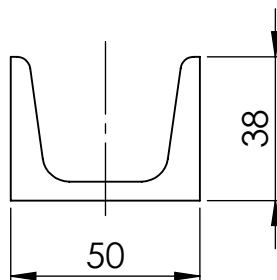
$\sqrt{Ra\ 25}$ ($\sqrt{Ra\ 12,5}$)

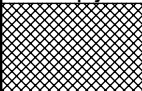
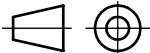


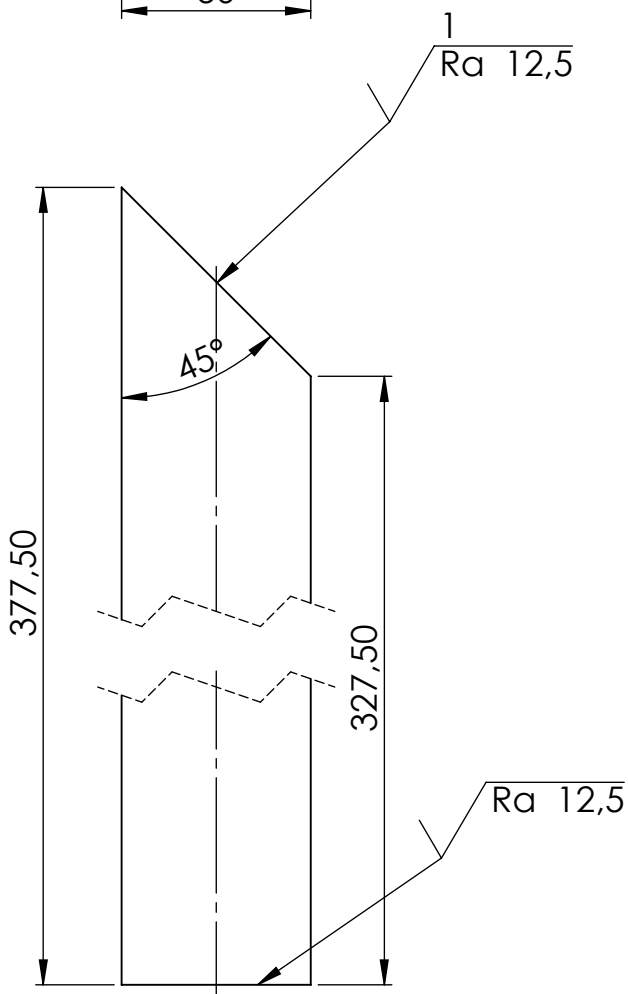
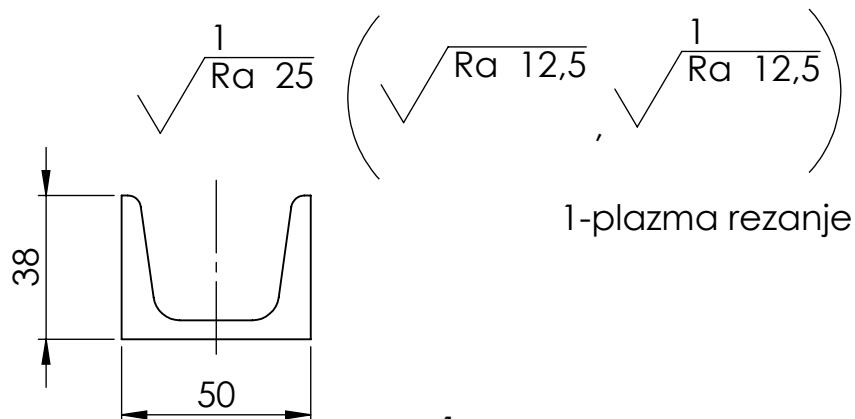
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb		
Projektirao	8.2013.	Ivan Janjiš				
Razradio	8.2013.	Ivan Janjiš				
Crtao	8.2013.	Ivan Janjiš				
Pregledao		Dorian Marjanović				
Voditelj rada		Dorian Marjanović				
Naslov rada: Mala vertikalna vjetroelektrana			Objekt:			
			R. N. broj:			
Napomena:			Smjer: KONSTRUKCISKI	Kopija		
Materijal: S235JR		Masa:	ZAVRŠNI RAD			
	Naziv:		Pozicija:			Format: A4
	Mjerilo originala M 1:5		Nosač generatora 3			Listova: 1
Crtež broj: IJ-8/13-013			List: 1			

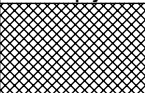
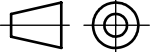
$\sqrt{Ra\ 25}$ ($\sqrt{Ra\ 12,5}$, $\sqrt{Ra\ 12,5}$)

1- plazma rezanje



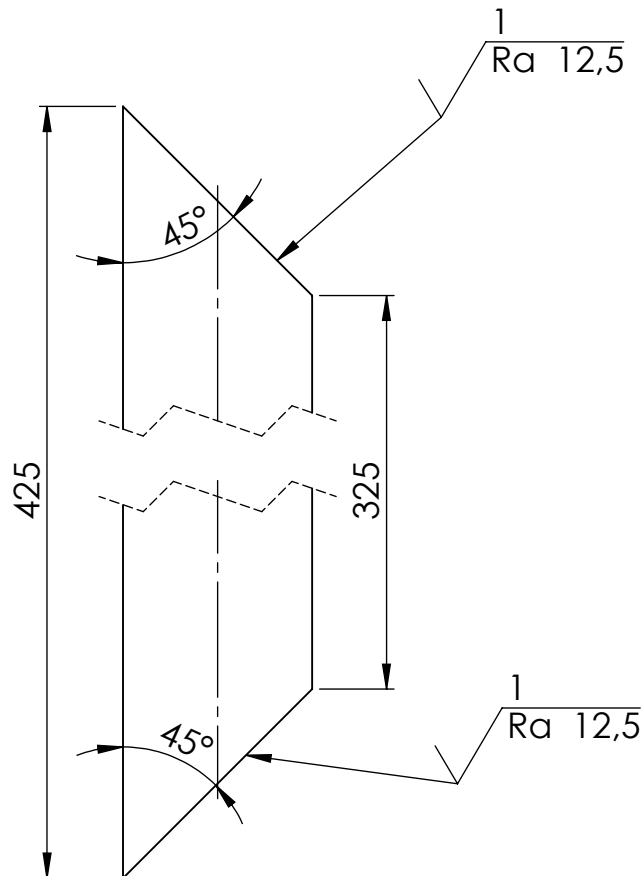
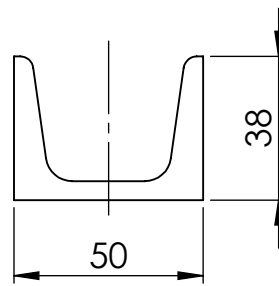
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb		
Projektirao	8.2013.	Ivan Janjiš				
Razradio	8.2013.	Ivan Janjiš				
Crtao	8.2013.	Ivan Janjiš				
Pregledao		Dorian Marjanović				
Voditelj rada		Dorian Marjanović				
Naslov rada: Mala vertikalna vjetroelektrana			Objekt:			
			R. N. broj:			
Napomena: U Profil 50x38			Smjer: KONSTRUKCISKI		Kopija	
Materijal: S235JR		Masa:	ZAVRŠNI RAD			
	Naziv:			Pozicija:		
Mjerilo originala	Vertikalni nosač 1			4		Format: A4
M 1:2				Listova: 1		
Crtež broj: IJ-8/13-014					List: 1	

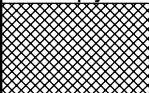
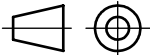


	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	8.2013.	Ivan Janjiš		
Razradio	8.2013.	Ivan Janjiš		
Crtao	8.2013.	Ivan Janjiš		
Pregledao		Dorian Marjanović		
Voditelj rada		Dorian Marjanović		
Naslov rada: Mala vertikalna vjetroelektrana			Objekt:	
			R. N. broj:	
Napomena: U profil 50x38			Smjer: KONSTRUKCISKI	Kopija
Materijal: S235JR		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	Naziv: Vertikalni nosač 2		Pozicija: 5	Format: A4
Mjerilo originala M 1:2				Listova: 1
Crtež broj: IJ-8/13-015				List: 1

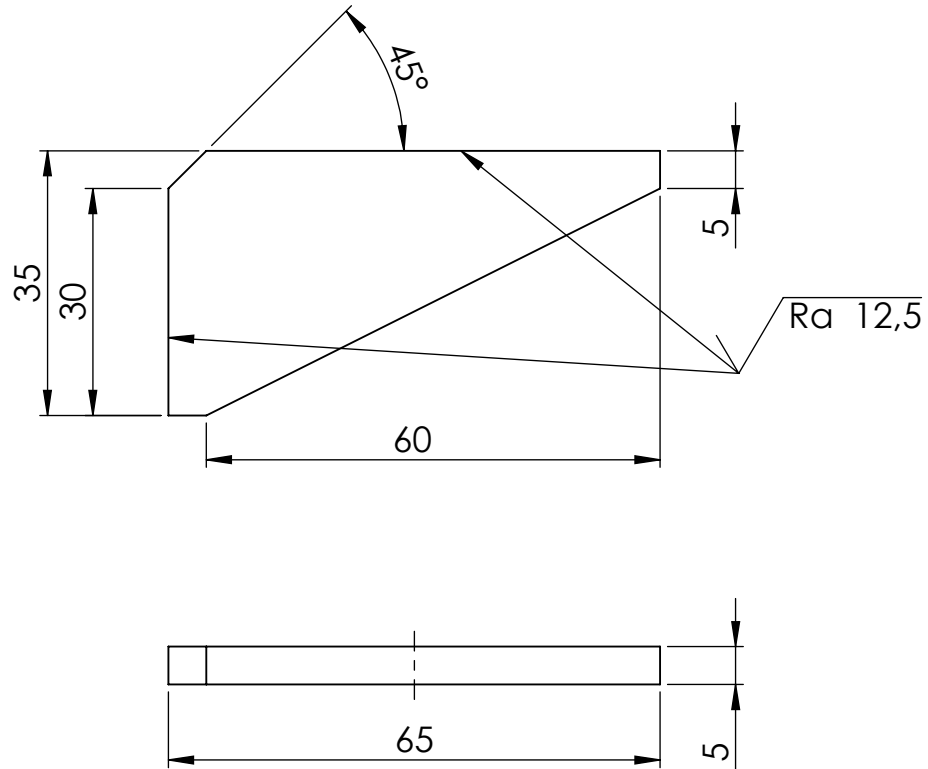
$\sqrt[1]{Ra\ 12,5}$
 $\left(\sqrt[1]{Ra\ 12,5} \right)$

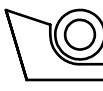
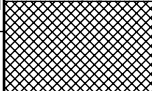
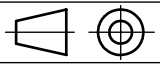
1- plazma rezanje



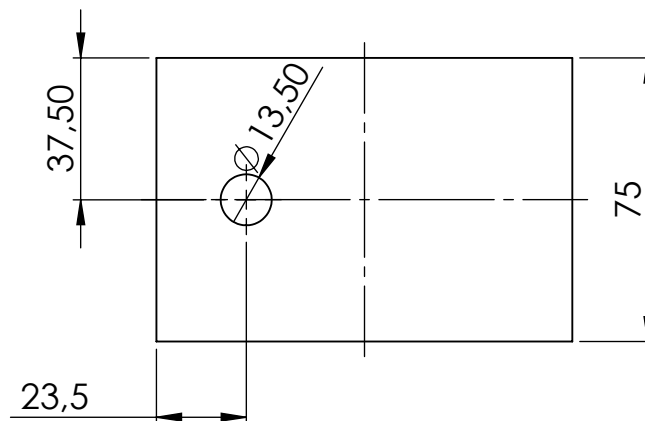
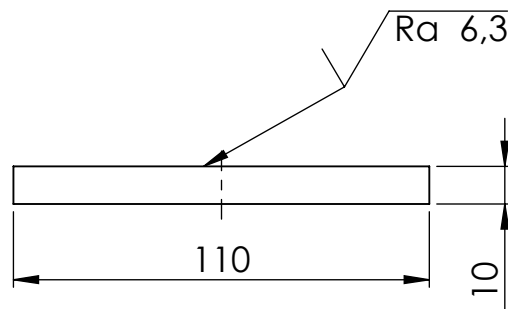
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
Projektirao	8.2013.	Ivan Janjiš			
Razradio	8.2013.	Ivan Janjiš			
Crtao	8.2013.	Ivan Janjiš			
Pregledao		Dorian Marjanović			
Voditelj rada		Dorian Marjanović			
Naslov rada: Mala vertikalna vjetroturbina			Objekt:		
			R. N. broj:		
Napomena: U Profil 50x38			Smjer: KONSTRUKCISKI	Kopija	
Materijal: S235JR		Masa:	ZAVRŠNI RAD		
 Mjerilo originala M 1:2	Naziv: Horizontalni nosač		Pozicija:		Format: A4
			6		Listova: 1
Crtež broj: IJ-8/13-016			List: 1		

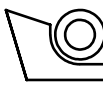
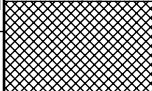
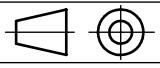
$\sqrt{Ra\ 25}$ $\left(\sqrt{Ra\ 12,5} \right)$



	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	8.2013.	Ivan Janjiš		
Razradio	8.2013.	Ivan Janjiš		
Crtao	8.2013.	Ivan Janjiš		
Pregledao		Dorian Marjanović		
Voditelj rada		Dorian Marjanović		
Naslov rada: Mala vertikalna vjetroelektrana			Objekt:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Smjer: KONSTRUKCISKI	Kopija
Materijal: S235JR		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	Naziv:		Pozicija:	
Rebro nosača generatora		9		
Mjerilo originala M 1:1		Crtež broj: IJ-8/13-017		Format: A4 Listova: 1 List: 1

$\sqrt{Ra\ 25}$ ($\sqrt{Ra\ 6,3}$)



	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	8.2013.	Ivan Janjiš		
Razradio	8.2013.	Ivan Janjiš		
Crtao	8.2013.	Ivan Janjiš		
Pregledao		Dorian Marjanović		
Voditelj rada		Dorian Marjanović		
Naslov rada: Mala vertikalna vjetroelektrana			Objekt:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Smjer: KONSTRUKCISKI	Kopija
Materijal: S235JR		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	Naziv:		Pozicija:	
Mjerilo originala M 1:2	Ploča vertikalnih nosača		10	
Crtež broj: IJ-8/13-018			Format: A4	
			Listova: 1	
			List: 1	