

# ПРОРАЧУН И ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ НОСЕЋЕ ЧЕЛИЧНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ СТУБА ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

Мирослав Бешевић<sup>1</sup>  
Анико Тешановић<sup>2</sup>  
Данијел Кукарас<sup>3</sup>  
Александар Ландовић<sup>4</sup>

УДК: 624.042.41/.046

DOI:10.14415/zbornikGFS26.11

**Резиме:** Ветар представља усмерено кретање и настаје као последица разлика у атмосферским притисцима, које су узроковане неједнаким загревањем ваздушних маса. Разликују се глобални и локални ветрови. Глобални ветрови су висински и они се не могу користити за погон ветрогенератора, али их треба познавати јер утичу на локалне ветрове у нижим слојевима атмосфере.

Модерни ветрогенератори се изводе са хоризонталном осовином која има систем за закретање осовине у хоризонталној равни за праћење промене смера ветра. Могу имати различит број лопатица, али се за веће снаге најчешће користе три лопатице јер дају највећи степен искоришћења. Пречник ротора ових турбина зависи од снаге и креће се од 30 т за снагу од 300 kW до 115 т за снагу од 5 MW. Ветрогенератор се поставља на вертикални челични стуб који у зависности од пречника ротора турбине, може бити висок и преко 100 м. Стуб се најчешће гради као челични конусни, а ређе као челично-решеткасти. Овим радом обухваћен је прорачун и димензионисање челичне конструкције стуба ветрогенератора произвођача VESTAS тип V112 3MW НН 119, (снаге по 3.2 MW) за потребе изградње Ветропарка "Ковачица".

**Кључне речи:** Ветрогенератор, оптерећења, дејства ветра, прорачун, димензионисање, стандарди.

## 1. УВОД

До индустријске револуције ветар је уз дрво био највећи извор енергије. Користио се за покретање бродова, млинова и пумпи за воду. Производња електричне енергије из ветра почела се развијати тридесетих година прошлог века. Тада је почела изградња првих ветроагрегата за конверзију енергије ветра у електричну. Развојем великих хидро, термо и нуклеарних

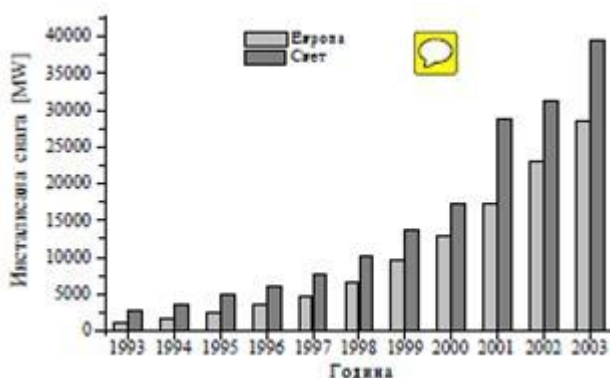
<sup>1</sup> Проф. др. Мирослав Бешевић, дипл.инж.грађ., Грађевински факултет Суботица, Козарачка 2а, е-маил: [miroslav.besevic@gmail.com](mailto:miroslav.besevic@gmail.com)

<sup>2</sup> Мр Анико Тешановић, дипл.инг.грађ., е-маил: [misan.dag@gmail.com](mailto:misan.dag@gmail.com)

<sup>3</sup> В.проф. др Данијел Кукарас, дипл.инг.грађ., е-маил: [danijel.kukaras@gmail.com](mailto:danijel.kukaras@gmail.com)

<sup>4</sup> Мр Александар Ландовић, дипл.инг.грађ., е-маил: [landovic1@yahoo.com](mailto:landovic1@yahoo.com)

електрана ветроагрегати, економски и технички неконкурентни, су пали у заборав. Међутим, исцрпивост резерви фосилних горива и еколошки проблеми изазвани њиховом експлоатацијом, довели су почетком деведесетих година прошлог века до васкрса ветроагрегата. Ветроенергетика је млада грана енергетике која се интензивно развија у погледу еколошког развоја ветроагрегата, али и у погледу њихове изграђене инсталисане снаге. Сл. 1. даје пораст инсталисаних капацитета ветроагрегата у Европи и свету у последњих 10 година. Према подацима о материјалним штетама узрокованим природним катастрофама, чак 80 до 85% је изазвано екстремним дејством ветра.



Слика 1. Пораст инсталисаних капацитета ветроагрегата у Европи и свету од 1993. до 2003. године

Око 80% свих светских ветроагрегата инсталирано је у земљама Европске Уније (ЕУ). ЕУ из инсталираних 28440 MW (децембар 2003.) подмирује око 2,5% укупних потреба за електричном енергијом. Предвиђа се да ће ветроагрегати у будућности битно повећати учешће у производњи укупне електричне енергије. Оваква предвиђања се базирају на чињеници да је ветар обновљиви еколошки извор и да су његови технички искористиви ресурси вишеструко већи од укупне тренутне потрошње електричне енергије. Међутим, ветар као примарни енергент има и низ недостатака, па се о перспективи ветроагрегата још увек не може поуздано говорити. Циљ овог дела рада је да изложи основне принципе и проблеме везане за ветроагрегате, при чему је пажња посвећена ветроагрегатима који се везују на дистрибутивну мрежу, те су саставни део електроенергетског система (ЕЕС).

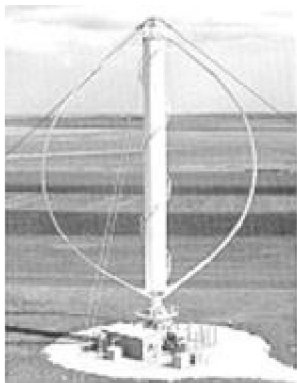
## 2. ВЕТРОТУРБИНА

Постоје различите конструкције ветротурбина. Циљ је да се постигне што већи степен искоришћења и стабилан рад у што ширем опсегу брзина ветра. Развој ветротурбина је још увек интензиван, а оне се деле на ветротурбине са:

- вертикалном осовином, и са
- хоризонталном осовином.

Код ветротурбина са вертикалном осовином ветар струји нормално на осу ротације, па се оне не морају усмеравати према смеру дувања ветра. Код њих се генератор поставља у подножје турбине, те нису потребни јаки торњевеви. Вертикално вратило има Дарриус-ова турбина, (слика 2). Име је добила по инжењеру Георге Дарриус-у (патент из 1931. год). Дарриус-ова турбина се обично гради са два или три лука. Ветротурбине са вертикалном осовином генерално имају низак степен искоришћења, па се из тог разлога данас практично не користе за ветроагрегате већих снага. Ветротурбине са хоризонталном осовином могу бити постављене уз и низ ветар. Ветротурбине постављене низ ветар се саме прилагођавају смеру ветра. Недостатак им је што лопатице при ротацији пролазе кроз заветрину стуба, чиме се стварају механичке вибрације и бука. Осим тога стуб ствара и турбуленције што смањује ефикасност ветротурбине, па се овај концепт не користи за веће снаге.

Модерне ветротурбине се граде са хоризонталном осовином која има систем за закретање осовине у хоризонталној равни за праћење промене смера ветра. Могу имати различит број лопатица, али се за веће снаге најчешће користе три лопатице јер дају највећи степен искоришћења (слика 3) Пречник ротора (радног кола или елисе) ових турбина зависи од снаге и креће се од 30m за снагу од 300 kW до 115m за снагу од 5 MW. Ветротурбина се поставља на вертикални стуб који, у зависности од пречника ротора турбине, може бити висок и преко 100 m. Стуб се најчешће гради као челични конусни, а ређе као челично-решеткисти.



Слика 2. Дарриус-ова турбина



Слика 3. Трокрака ветротурбина 3 MW

## 2.1 Управљање ветротурбином

Није економично пројектовати ветротурбину која би при свим брзинама ветра имала максималан степен искоришћења, јер се ветрови великих брзина (изнад 14m/s) ретко јављају, па би ветротурбина за најчешће ветрове била предимензионисана. При великим брзинама ветра (изнад 25 m/s) ветротурбина се из сигурносних разлога зауставља. Пројектовати ветротурбину за рад при великим брзинама ветра је технички могуће али је неекономично. Ветротурбина има и минималну радну брзину, јер при малим брзинама ветра њен рад постаје неефикасан и нестабилан. Дакле, ветроагрегат нормално ради у одређеном опсегу

брзине ветра. Тај опсег је дефинисан са три карактеристичне брзине ветра за сваки ветрогенератор:

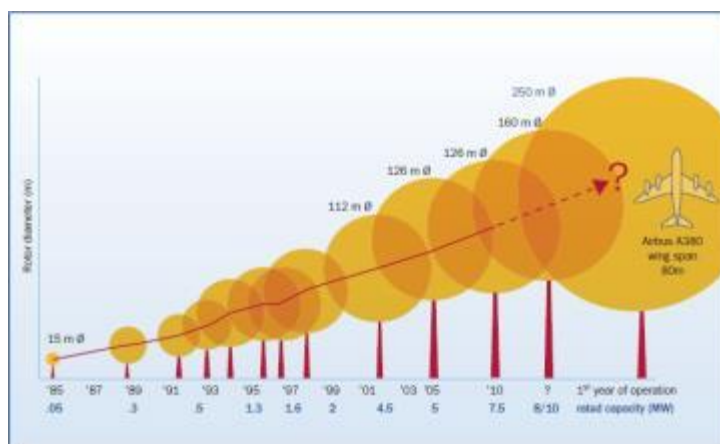
- минимална радна брзина ветра  $v_{min}$  (*cut-in wind speed*) је брзина ветра при којој ветрогенератор почиње производњу електричне енергије. За брзине ветра  $v < v_{min}$  ветротурбина је укочена. Типична вредност брзине укључења код трокраких ветротурбина је  $v_{min} = (2,5 \div 3,5)$  m/s;
- Номинална радна брзина ветра  $v_n$  (*nominal wind speed*) је минимална брзина ветра при којој ветроагрегат достиже своју номиналну снагу. Номинална брзина код ветроагрегата за мање ветровите локације је  $v_n = (10 \div 13)$  m/s, а за ветровите локације је  $v_n = (14 \div 17)$  m/s;
- максимална радна брзина ветра  $v_{max}$  (*cut-out wind speed*) је брзина ветра при којој се ветротурбина зауставља. Брзина искључења је обично  $v_{max} = 25$  m/s, мада постоје ветроагрегати са  $v_{max} > 30$  m/s. Ветротурбина је механички пројектована да у укоченом стању издржи и екстремно велике брзине ветра (*survival wind speed*) од  $(60 \div 70)$  m/s.

При брзинама ветра већим од максималне радне ветрогенератор се из сигурносних разлога зауставља и одржава у закоченом стању помоћу хидрауличне диск кочнице која је смештена на високобрзинској (генераторској) осовини. Избор локације за постављање ветроагрегата је најважнија фаза при планирању изградње ветроелектране. Најбитнији параметар при анализи погодности локације за постављање ветрогенератора је брзина ветра. На основу тих података, односно средњих годишњих брзина ветра, потребно је издвојити регионе у којима постоје потенцијално погодне микролокације за постављање ветрогенератора. Од интереса су локације у којима је средња годишња брзина ветра мерена на 10m изнад тла (стандардна висина на коју се постављају анемометри у хидрометеоролошким станицама)  $v_{sr} \geq 5$  m/s. На основу конфигурације терена, прелиминарних мерења и консултација са метеоролозима треба одабрати микролокације на којима се **морају** извршити наменска мерења параметара ветра. На основу ових мерења, са одговарајућом опремом, једино се могу поуздано проценити енергетски ресурси ветра. Број анемометара и мерача правца ветра зависи од висине мерног стуба, минималан број је 2. Њихова калибрација и монтирање на мерни стуб је дефинисано ИЕС стандардом 61400-12. Мерење се мора спроводити континуално најмање једну годину. Уз мерни систем користи се софтвер за обраду мерених величина. На основу измерених величина за сваку висину анемометра даје се за посматрани интервал времена графички приказ правца, брзине и снаге ветра у виду тзв. **руже ветрова**. Ружа ветрова се најчешће црта у поларном координатном систему.

## 2.2 Повећање инсталисане снаге генератора

Европска унија је светски лидер у домену развоја и употребе обновљивих извора енергије с преко 350.000 радних места и више од 30 милијарди евра промета у овом сектору. План је да се достигне удео од 20% обновљиве енергије до 2020 године. Док државе Европске уније (особито Данска и Немачка) воде пут, Сједињене Америчке Државе у задње време такође почињу напредовати према томе да повећају удео енергије ветра у укупној количини енергије која се троши у САД-у. У Србији постоје погодне локације за изградњу ветрогенератора, на којима

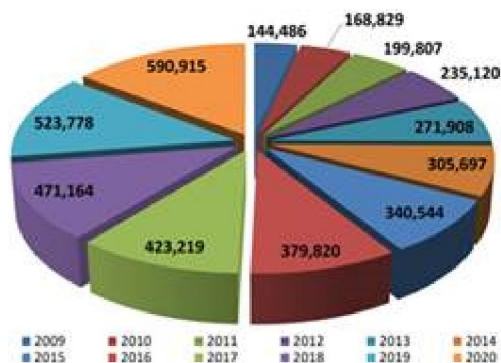
би се у перспективи могло инсталирати око 1,300 MW ветрогенераторских производних капацитета и годишње произвести око 2,300 GWh електричне енергије. Ветрогенератори су почели као мале генераторске јединице од неколико десетина kW и са симболичном улогом у електроенергетском систему. Међутим, веома брзо су се развијали и у претходној деценији, јединице од неколико MW су постале уобичајене. Тренутно се на тржишту јављају ветрогенератори снаге 6 - 8 MW, с тим да се планира развој јединица снаге 10MW са визијом повећања до чак 20 MW. На слици 4 приказана је зависност пречника ротора од инсталисане снаге ветрогенератора. Види се да они постају колосални грађевински објекти висина већих од 100m са пречником роторских крилца већим од највећег путничког авиона данашњице Airbus-а A380 (распон крила 80m).



Слика 4. Зависност пречника ротора од инсталисане снаге

Енергија ветра је најзаступљенији вид коришћења обновљивих извора енергије у свету. Предности њеног конвертовања у електричну енергију је неисцрпној количини, као и економској оправданости процеса. Ограничен капацитет и висока цена фосилних горива отвара широк простор за коришћење ветрогенератора, чија производња бележи велики раст и према многим предвиђањима очекује се даљи интензиван раст инсталисаних капацитета. До краја 2001. године у свету је инсталирано 56000 ветрогенератора капацитета од 25 GW а на слици бр.5 је приказана планирана инсталисана снага ветрогенератора до 2020 године.

Енергетски дефицит и неминовност употребе чистих извора енергије су довољни разлози да и Србија почне да развија експлоатацију енергије ветра. Економска оправданост изградње ветрогенератора је при најмањој годишњој брзини ветра од 4,9-5,8 m/s. Услед трења између струје ваздуха и тла, као и унутрашњег вискозног трења брзина ветра расте са повећањем висине изнад тла. Јасно је да на брзину ветра утиче храпаост терена, присуство природних и вештачких препрека као и други топографски елементи. Најчешће примењивани модерни ветрогенератори су капацитета од 500 kW до 3 MW мада се граде и већи.



Слика 5. Предвиђена укупна инсталирана снага ветрогенератора у свету у MW

### 2.3 Енергетске потребе Србије

И поред предузетих мера у погледу повећања енергетске ефикасности и ревитализације производних и преносних капацитета у ЕПС-у се од 1997. године перманентно јавља дефицит у електричној енергији. Тај дефицит је у 2002. години износио око 5,5 TWh што чини преко 10% укупне националне потрошње, која је у 2002. износила скоро 40 TWh. Дебаланс у производњи и потрошњи електричне енергије је у протеклом периоду решаван увозом електричне енергије и рестриктивним мерама у испоруци електричне енергије. Превасилажење електроенергетске кризе могло би се решити куповином и монтажом 2000 до 3000 ветрогенераторских јединица просечне снаге 1 MW, уз услов да је наш технички искористив ветропотенцијал већи од 3 GW. Ако се узме у обзир и раст потреба за електричном енергијом сразмеран претпостављеном привредном расту, долази се до императивног захтева за активирањем ветро потенцијала. У Србији постоје потенцијално погодне локације за изградњу ветрогенератора, а на слици бр.6 се приказује карта ветрова накојима се могу изградити ветрогенератори.

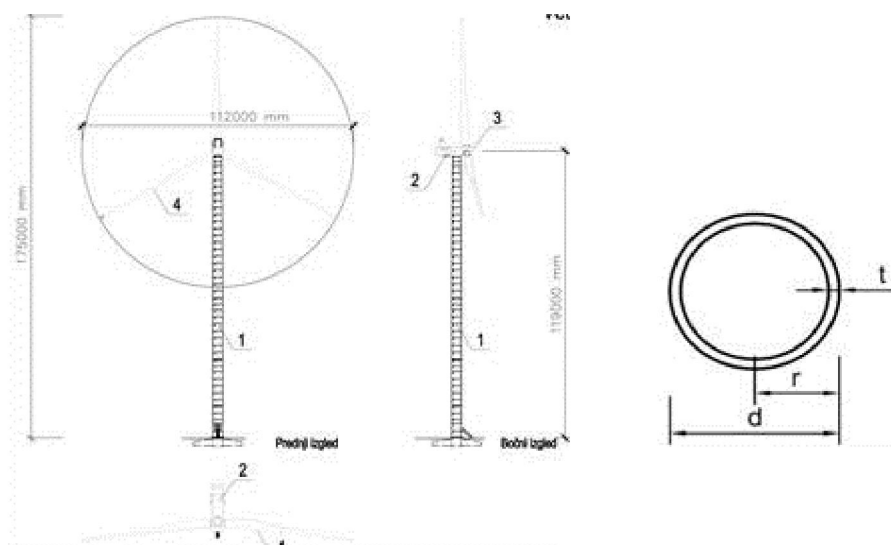


Слика 6. Потенцијал Србије и Црне Горе са локацијама за изградњу ветротурбина

Локацијски, источни делови Србије - Стара Планина, Власина, Озрен, Ртањ, Дели Јован, Црни Врх, итд. У овим регионима постоје локације чија је средња брзина ветра преко 6 m/s. Ова област просторно покрива око 2000 km<sup>2</sup> и у њој би се перспективно могло изградити око 2000 MW инсталисане снаге ветрогенератора. Златибор, Копоник, Дивчибаре су планинске области где би се мерењем могле утврдити погодне микролокације за изградњу ветрогенератора. Панонска низија, северно од Дунава је такође богата ветром. Ова област покрива око 2000 km<sup>2</sup> и погодна је за изградњу ветрогенератора јер је изграђена путна инфраструктура, постоји електрична мрежа, близина великих центара потрошње електричне енергије и слично. У перспективи би се у овој области могло инсталирати око 1500 до 2000 MW ветрогенераторских производних капацитета.

### 3. ПРОРАЧУН ЧЕЛИЧНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ СТУБА ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

Главна носећа конструкција ветрогенератора је челични стуб кружног попречног пресека, променљивог по висини. Стуб је конзолног система, укљештен у кружни армирано-бетонски темељ изведен на шиповима или на масивним темељима. Носећа челична конструкција стуба састоји се из пет монтажних комада, различитих димензија (Таб.1). Висина главе ротора је 119,0 m (осовински), а висина стуба на који се она ослања је 116,8 m. Полупречник елисе ротора је 56,0m, тако да је максимална укупна висина објекта (врха елисе) 175,0 m (слика бр. 7).



Слика 7. Диспозиција ветрогенератора и геометријске карактеристике стуба

Табела 1. Геометријске карактеристике попречног пресека

Елемент конструкције	d	r	t	L	d/t	Класа поп.	A	I <sub>y</sub> , I <sub>z</sub>	I <sub>T</sub>
	[мм]	[мм]	[мм]	[м]	[/]	пресека	[мм <sup>2</sup> ]	[мм <sup>4</sup> ]	[мм <sup>4</sup> ]
Анкер плоча	3900	1950	300	130	-	-	-	-	-
Сегмент 1	3900	1950	60	2580	65	Класа 4	735133	1.398E+12	2.796E+12
Сегмент 2	3900	1950	60	2930	65	Класа 4	735133	1.398E+12	2.796E+12
Сегмент 3	3900	1950	60	1750	65	Класа 4	735133	1.398E+12	2.796E+12
Сегмент 4	3900	1950	39	2665	100	Класа 4	477836	9.086E+11	1.817E+12
Сегмент 5	3900	1950	39	2665	100	Класа 4	477836	9.086E+11	1.817E+12
Мон. наставак 1	3900	1950	257	290	-	-	-	6.013E+12	1.203E+13
Сегмент 6	3900	1950	39	2578	100	Класа 4	477836	9.086E+11	1.817E+12
Сегмент 7	3900	1950	36	2799	108	Класа 4	441080	8.387E+11	1.677E+12
Сегмент 8	3900	1950	35	2881	111	Класа 4	428827	8.154E+11	1.631E+12
Сегмент 9	3900	1950	34	2930	115	Класа 4	416575	7.921E+11	1.584E+12
Сегмент 10	3900	1950	33	2930	118	Класа 4	404323	7.688E+11	1.538E+12
Сегмент 11	3900	1950	32	2352	122	Класа 4	392071	7.455E+11	1.491E+12
Сегмент 12	3900	1950	31	2500	126	Класа 4	379819	7.222E+11	1.444E+12
Мон. наставак 2	3900	1950	218	230	18	-	-	5.094E+12	1.019E+13
Сегмент 13	3900	1950	30	2939	130	Класа 4	367566	6.989E+11	1.398E+12
Сегмент 14	3900	1950	30	2930	130	Класа 4	367566	6.989E+11	1.398E+12
Сегмент 15	3900	1950	29	2930	134	Класа 4	355314	6.756E+11	1.351E+12
Сегмент 16	3900	1950	28	2930	139	Класа 4	343062	6.523E+11	1.305E+12
Сегмент 17	3900	1950	29	2930	134	Класа 4	355314	6.756E+11	1.351E+12
Сегмент 18	3900	1950	26	2930	150	Класа 4	318557	6.057E+11	1.211E+12
Сегмент 19	3900	1950	25	2930	156	Класа 4	306305	5.824E+11	1.165E+12
Сегмент 20	3900	1950	25	2195	156	Класа 4	306305	5.824E+11	1.165E+12
Сегмент 21	3900	1950	24	2530	163	Класа 4	294053	5.591E+11	1.118E+12
Мон. наставак 3	3900	1950	172	170	-	-	-	4.014E+12	8.029E+12
Сегмент 22	3900	1950	23	2888	170	Класа 4	281801	5.358E+11	1.072E+12
Сегмент 23	3875	1937.5	23	2888	168	Класа 4	279994	5.256E+11	1.051E+12
Сегмент 24	3850	1925	22	2889	175	Класа 4	266093	4.930E+11	9.861E+11
Сегмент 25	3824	1912	21	2889	182	Класа 4	252282	4.612E+11	9.223E+11
Сегмент 26	3799	1899.5	21	2889	181	Класа 4	250633	4.522E+11	9.043E+11
Сегмент 27	3774	1887	20	2890	189	Класа 4	237127	4.222E+11	8.444E+11
Сегмент 28	3749	1874.5	19	2890	197	Класа 4	223779	3.932E+11	7.863E+11
Сегмент 29	3723	1861.5	18	2890	207	Класа 4	210531	3.648E+11	7.295E+11
Сегмент 30	3698	1849	18	2890	205	Класа 4	209117	3.575E+11	7.149E+11
Сегмент 31	3673	1836.5	17	2622	216	Класа 4	196164	3.308E+11	6.616E+11
Мон. наставак 4	3650	1825	170	140	-	-	-	3.253E+12	6.507E+12
Сегмент 32	3650	1825	16	2868	228	Класа 4	183469	3.055E+11	6.111E+11
Сегмент 33	3610	1805	16	2869	226	Класа 4	181458	2.956E+11	5.912E+11
Сегмент 34	3570	1785	15	2869	238	Класа 4	168232	2.680E+11	5.36E+11
Сегмент 35	3530	1765	14	2870	252	Класа 4	155258	2.418E+11	4.837E+11
Сегмент 36	3490	1745	14	2871	249	Класа 4	153498	2.337E+11	4.674E+11
Сегмент 37	3450	1725	15	2871	230	Класа 4	162577	2.419E+11	4.838E+11
Сегмент 38	3410	1705	14	2872	244	Класа 4	149980	2.180E+11	4.36E+11
Сегмент 39	3370	1685	13	2873	259	Класа 4	137633	1.954E+11	3.908E+11
Сегмент 40	3330	1665	13	2873	256	Класа 4	136000	1.885E+11	3.77E+11
Сегмент 41	3290	1645	16	1877	206	Класа 4	165373	2.238E+11	4.475E+11
Сегмент 42	3264	1632	20	1877	163	Класа 4	205083	2.731E+11	5.462E+11
Горња плоча	3238	1619	124	200	-	-	-	1.656E+12	3.311E+12



#### 4. АНАЛИЗА УТИЦАЈА НА ЧЕЛИЧНУ КОНСТРЕКЦИЈУ СТУБА ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

Грађевинским пројектом су обухваћени носећи челични стубови ветрогенератора произвођача VESTAS тип V112 3MW НН 119, или слично (снаге по 3.2 MW) за потребе изградње Ветропарка „Ковачица“. Ветропарк се налази у општини Ковачица, у близини насеља Падина, Црепаја и Дебељача. Ветропарк се граничи на северо-западу са насељем Ковачица, на северо-истоку са насељем Падина, на западу са насељем Дебељача и на југо-западу са насељем Црепаја. Укупна површина целог ветропарка обухвата 3711 ha. На простору предвиђеном за ветропарк биће размештено 39 челичних стубова у првој фази, при чему је потребно водити рачуна да стубови не буду један другом у заветрини и да буду на довољном сигурносном размаку како међусобно, тако и према постојећој и новоизграђеној инфраструктури. Висина главе ротора је 119,0 m (осовински), а висина стуба на који се она ослања је 116,8 m. Пошто за овакву врсту објеката не постоје одговарајући домаћи прописи и стандарди, Пројекат је урађен према следећим Европским стандардима:

- IEC 61400-1: Ветрогенератори, Део 1: Прорачунски захтеви;
- ЕН 1991-1-4: Дејства на конструкције; Део 1-4: Дејства ветра;
- ЕН 1993-1-1: Прорачун челичних конструкција, Део 1-1: Општа правила и правила за зграде;
- ЕН 1993-1-6: Прорачун челичних конструкција: Део 1-6: Носивост и стабилност љуски;
- ЕН 1993-1-8: Прорачун челичних конструкција: Део 1-1: Прорачун веза;
- ЕН 1993-1-9: Прорачун челичних конструкција, Део 1-9: Замор;
- ЕН 1998-1: Прорачун сеизмички отпорних конструкција, Део 1: Општа правила, сеизмичка дејства и правила за зграде;

При прорачуну дејства ветра на челичну конструкцију стуба коришћена је основна брзина ветра која одговара прорачунској комбинацији оптерећења:

- NLC - *Normal load cases* / ALC - *Abnormal load cases*:  $V_{hub}=28.75$  m/s.
- NO - *Normal operation*:  $V_{hub}=27.21$  m/s,
- NP - *Normal production* / ES *Emergency stop - equivalent*  $V_b = 23.13$  m/s

Утицаји услед ветра на ветрогенератор – гондолу и ротор (V112 3.0 MW НН119 m), који делујуна врху стуба добијени су од стране произвођача (*Vestas*).

Према IEC 61400-1 ветрогенератор спада у категорију IIIА, за брзине ветра до 37,5 m/s. Радна брзина за производњу електричне енергије је у опсегу од 3-25 m/s. Замор материјала је контролисан за ниво напона услед еквивалентног оптерећења на врху стуба. Утицаји услед овог оптерећења у својству напонских разлика за  $10 \times 10^6$  циклуса дају исти ниво оштећења као и процењен ниво оштећења током животног века за брзине ветра од  $v_{min}$  до  $v_{max}$  при одговарајућим вероватноћама појаве (фреквенцијама). Прорачунске ситуације, односно комбинације оптерећења и парцијални коефицијент сигурности за дејство ветра на врх стуба (гондолу и ротор) су у свему према IEC 61400-1:

- NLC - *Normal load cases*:  $\gamma_F=1,35$
- ALC - *Abnormal load cases*:  $\gamma_F=1,10$
- NO - *Normal operation*:  $\gamma_F=1,35$
- NP - *Normal production* / ES *Emergency stop*:  $\gamma_F=1,35$  ( $\gamma_F=1,00$  за сеизмику)

Прорачунско убрзања тла за дату локацију је према подацима добијеним од инвеститора:  $a_v=0,105g$ . Основно оптерећење снегом је:  $s_k=1,0 \text{ kN/m}^2$  (оптерећење снега је занемарљиво)

#### 4.1 Носећа челична конструкција стуба ветрогенератора

Главна носећа конструкција ветрогенератора је челични стуб кружног попречног пресека, променљиво по висини. Стуб је конзолног система, укљештен у кружни армирано-бетонски темељ изведен на шиповима. Носећа челична конструкција стуба састоји се из пет монтажних комада, различитих димензија (Таб.2).

Табела 2. Димензије монтажних комада

Монтажни комади	Висине $h_i$	Пречници $\varnothing_u$	Дебљине лима $t_u$	Број сегмената
	mm	mm	mm	-
Први монтажни комад - МК1	12.960	3.900	39-60	5
Други монтажни комад - МК2	19.320	3.900	31-39	7
Трећи монтажни комад - МК3	25.480	3.900	24-30	9
Четврти монтажни комад - МК4	28.840	3.900-3.650	17-23	10
Пети монтажни комад - МК5	30.000	3.650-3.238	13-20	11

Монтажни наставци стуба се остварују помоћу прирубница и преднапрегнутих високовредних завртњева класе чврстоће 10.9, видети табелу 3. Прирубнице су ексцентричне у односу на цилиндричну љуску стуба и налазе се са унутрашње стране. Прирубнице су прстенастог облика, димензија приказаних у оквиру табеле, а добијене су машинском обрадом из лимова почетне дебљине  $t_0$ . На овај начин се омогућава веза прирубница са цилиндричним плаштом стуба помоћу сучеоних шавова који су измакнути од зоне дебелих лимова прирубнице, што је важно са становишта избегавања појаве хладних прелина и повећања отпорности детаља на замор материјала. Детаљи свих монтажних наставка са назначеним нивоом машинске обраде су приказани на цртежима који су саставни део Идејног пројекта.

Табела 3: Монтажни наставци

Монтажни наставак	Положај	Завртњевци	Сила преднапрезања	Момент притезања	Прирубница $m(m_0) \times b \dots \varnothing$
			kN	Nm	mm
МН1	МК1-МК2	92 M64x385...10.9	1680	15.000	145(190)x257...3939
МН2	МК2-МК3	104 M56x305...10.9	1280	10.000	115(160)x218...3931
МН3	МК3-МК4	132 M42x240...10.9	710	4.500	85(115)x175...3925
МН4	МК4-МК5	100 M36x195...10.9	510	2.800	70(100)x170...3667

## 5. ПРОРАЧУН КОНСТРУКЦИЈЕ

### 5.1 Анализа оптерећења

#### 5.2 Стално оптерећење

-сопствена тежина.....узима се аутоматски кроз програм,  
-тежина опреме изнад стуба..... 150kg/m' = 1,53 kN/m',  
-опрема на врху стуба:  
-машинска кућа.....62.000 kg = 632.00 kN  
-машинска опрема..... 68.000 kg = 693,17 kN  
-маса лопатице ротора..... 3 x 12.300 = 36.900 kg = 376.18 kN  
-глава ротора.....34.500 kg = 351,68 kN  
укупна опрема: 2.053,00 kN

#### 5.3 Снег

-оптерећење снегом..... $S_k=1,0$  kN/m<sup>2</sup> основе

Прорачунска вредност оптерећења снегом

$$S = \mu_i \cdot C_t \cdot C_a \cdot S_k = 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,0 = 0,8 \text{ kN/m}^2 \text{ основе}$$

Површина машинске куће 51,2 m<sup>2</sup> →  $Q_c = 51,2 \cdot 0,8 = 40,96$  kN → у односу на остала оптерећења, оптерећење снегом се може занемарити.

#### 5.4 Оптерећење ветром

категорија терена I (табела 4.1. ЕН1991-1-4)

параметри терена:  
 $z_0 = 0,01$  м  
 $z_{min} = 1$  м  
 $z_{max} = 200$  м  
 $z_{0,II} = 0,55$  м

коэффициент терена:  $k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left(\frac{0,01}{0,55}\right)^{0,07} = 0,144$

коэффициент топографије:  $C_{0(3)} = 1,0$

коэффициент турбуленције:  $k_1 = 1,0$

висина средине ротора:  $h = 119$  м

на којој је произвођач задао  $V_{hub}$  [m/s] за различите случајеве оптерећења висина горњег краја стуба на којој се преносе реакције од ротора и опреме задате од произвођача  $Z_{cr} = 116,8$  м

густина ваздуха

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

коэффициент правца

$$C_{dir} = 1,0$$

коэффициент сезонског деловања

$$C_{season} = 1,0$$

#### 5.4.1 Дејство ветра на стуб NLC - $V_{hub} = 27,21$ m/s за max $M_{res}$

основна брзина ветра (модификована фундаментална основна брзина ветра  $V_{6,0}$  десетоминутног ветра на висину 10 m од терена)

$$V_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot V_{b,0} \rightarrow V_b = V_{b,0}$$

$$V_b = \frac{27,21}{0,144 \cdot 1_n \cdot \left(\frac{119}{0,01}\right)^{0,07} \cdot 1,0} = 20,14 \text{ m/s}$$

коэффициент храпавости:  $C_{r(z)} = k_r \cdot I_n \cdot \left(\frac{z}{z_0}\right)$

интензитет турбуленције:  $I_{v(z)} = \frac{k_1}{C_{0(z)} \cdot I_n \cdot \left(\frac{z}{z_0}\right)}$

ударни притисак ветра:  $q_{p(z)} = (1 + 7 \cdot I_{v(z)}) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{m(z)}^2 \cdot 10^{-3}$

Табела 4. Ударни притисак ветра на челичну конструкцију ветротурбине

Висина изнад терена Z [м]	коэффициент храпавости $C_{p(z)}$ за $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$	средња брзина ветра $v_{m(z)} = C_{p(z)} \cdot C_{0(z)} \cdot V_b$ [m/s]	интензитет турбуленције $I_{v(z)}$	ударни притисак ветра $q_{p(z)}$ [kN/m <sup>2</sup> ]
1.00	0.663	13.356	0.217	0.281
10.00	0.995	20.034	0.145	0.505
20.00	1.095	22.044	0.132	0.583
30.00	1.153	23.220	0.125	0.632
40.00	1.194	24.054	0.121	0.667
50.00	1.226	24.701	0.117	0.695
60.00	1.253	25.230	0.115	0.718
70.00	1.275	25.677	0.113	0.738
80.00	1.294	26.064	0.111	0.755
90.00	1.311	26.406	0.110	0.771
100.00	1.326	26.711	0.109	0.785
110.00	1.340	26.988	0.107	0.798
116.80	1.349	27.162	0.107	0.806
119.00	1.351	27.216	0.107	0.808

Одређивање сила ветра које делују на конструкцију:

Притисак ветра на површине:  $f_w = C_s \cdot C_d \cdot C_r \cdot q_{p(z)}$  [kN/m<sup>2</sup>]  
на висини z

АНЕКС Б коэффициент конструкције:  $C_s \cdot C_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_{v(z_s)} \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_{v(z_s)}}$

референтна висина  $h = z_1 = 119$  m

$z_s = 0,6 \cdot h \geq z_{\min}$  (слика 6.1.) стандарда

$z_s = 0,6 \cdot 119 = 71,4$  m

$I_{v(z_s)} = 0,113$

ширина конструкције:  $b = 3,96$  m

висина конструкције:  $h = 119$  m

$z_r = 200$  m

$L_r = 300$  m

$\alpha = 0,67 + 0,05 \cdot \ln(z_0) = 0,67 + 0,05 \cdot \ln 0,01 = 0,44$

мера турбулентне дужине  $L_{(z_s)} = L_r \cdot \left(\frac{z_s}{z_r}\right)^\alpha = 300 \cdot \left(\frac{71,4}{200}\right)^{0,44} = 190,68$  m

$v_{m(z_s)} = 25,73$  m/s

коэффициент изворног дејства:

$$B^2 = \frac{1}{1+0,9 \cdot \left(\frac{b+h}{L_{(zs)}}\right)^{0,63}} = \frac{1}{1+0,9 \cdot \left(\frac{119+3,96}{190,68}\right)^{0,63}} = \frac{1}{1+0,9 \cdot 0,7585} = 0,594$$

коэффициент резонантног одговора:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_{L(z_s, n_1, X)} \cdot R_{h(\eta h)} \cdot R_{b(\eta b)}$$

Логаритамски декремент пригушења конструкције (анекс Ф.С.)  $\delta = \delta_c + \delta_a + \delta_d$

$m_c = \int_0^1 m(s) \cdot \Phi_{1(s)}^2 ds / \int_0^1 \Phi_{1(s)}^2 ds = 10680 \text{ kg / m'}$  (еквивалентна маса по јединици дужине за

први тон осцилација)

$\delta_c = 0,012$  (Табела Ф.2 - необложени челични димњаци без спољашње-термичке изолације)

$$\delta_a = C_f \cdot \rho \cdot b \cdot \frac{V_{m(zs)}}{2 \cdot n_1 \cdot m_c} = 0,544 \cdot 1,25 \cdot 3,96 \cdot \frac{25,734}{2 \cdot 0,17 \cdot 10680} = 0,019$$

коэффициент силе  $C_f = C_{f,0} \cdot \Psi_\lambda = 0,6972 \cdot 0,78 = 0,544$

еквивалентна површинска храпавост  $k = 0,05 \text{ mm}$  (табела 7.13) стандарда

коэффициент за цилиндар  $\frac{k}{b} = \frac{0,05}{3960} = 1,3 \cdot 10^{-5}$

Рејнолдсов број

$$R_e = \frac{b \cdot V_{(ze)}}{v} = \frac{3,96 \cdot 35,98}{15 \cdot 10^{-6}} = 9,5 \cdot 10^6$$

$v = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  - кинематичка вискозност ваздуха

$V_{(ze)}$  - ударна брзина ветра на висини  $z_c$

$$V_{(ze)} = \sqrt{\frac{2 \cdot q_{p(ze)}}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,809}{1,25 \cdot 10^{-3}}} = 35,98 \text{ m/s}$$

$$q_{p(ze)} = 0,809 \text{ kN/m}^2$$

$\rightarrow C_{f,0}$  из сл. 7.28 тј.

$$C_{f,0} = 1,2 + \frac{0,18 \cdot \log(10 \cdot k / b)}{1 + 0,4 \cdot \log(R_e / 10^6)}$$

коэффициент силе за цилиндар без струјања ветра на слободном крају  $C_{f,0} = 0,6972$  (сл. 7.28) стандарда, ефективна виткост за  $l \geq 50m$

$$\lambda = 0,7 \cdot \frac{1}{b} = 0,7 \cdot \frac{119}{3,96} = 21,05 \text{ (tab. 7.16)}$$

коэффициент испуњености  $\varphi = 1,0$  (за пуне конструкције)

коэффициент утицаја краја  $\Psi_\lambda = 0,78$  (сл. 7.36)

$\delta_d = 0$  (нема специјалних уређаја за пригушење)

$$\delta = \delta_c + \delta_a + \delta_d = 0,012 + 0,019 + 0 = 0,031$$

-бездимензионална функција густине спектралне енергије  $S_L$

$$S_{L(z,n)} = \frac{6,8 \cdot f_{L(z,n)}}{(1+10,2 \cdot f_{L(z,n)})^{5/3}} = \frac{6,8 \cdot 1,26}{(1+10,2 \cdot 1,26)^{5/3}} = \frac{8,568}{79,895} = 0,107$$

$$f_{L(z,n)} = \frac{n_1 \cdot L_{(zs)}}{V_{m(zs)}} = \frac{0,17 \cdot 190,68}{25,734} = 1,26$$

-функције аеродинамичког приступа за основни облик тона осцилације

$$R_h = \frac{1}{\eta_k} - \frac{1}{2 \cdot \eta_k^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot \eta_k}) = \frac{1}{3,617} - \frac{1}{2 \cdot 3,617^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot 3,617}) = 0,238$$

$$\eta_h = \frac{4,6 \cdot h}{L_{(zs)}} \cdot f_{L(zs, n_1, x)} = \frac{4,6 \cdot 119}{190,68} \cdot 1,26 = 3,617$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot \eta_b}) = \frac{1}{0,105} - \frac{1}{2 \cdot 0,105^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot 0,105}) = 0,934$$

$$\eta_b = \frac{4,6 \cdot b}{L_{(zs)}} \cdot f_{L(zs, n_1, x)} = \frac{4,6 \cdot 3,96}{190,68} \cdot 1,26 = 0,105$$

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot 0,031} \cdot 0,107 \cdot 0,238 \cdot 0,934 = 3,786$$

### ударни коефицијент

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}} \geq 3$$

период осциловања  $T=10 \text{ min}=600 \text{ s}$

учесталост прекорачења

$$v = n_1 \cdot \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} = 0,17 \cdot \sqrt{\frac{3,786}{0,594 + 3,786}} = 0,158$$

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(0,158 \cdot 600)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(0,158 \cdot 600)}} = 3,216$$

коефицијент конструкције  $C_s \cdot C_d = \frac{1 + 2 \cdot 3,216 \cdot 0,113 \cdot \sqrt{0,594 + 3,786}}{1 + 7 \cdot 0,113} = 1,408$

Оптерећење ветром које делује на стуб, помножено са парц.коэф.  $PLF=1,35$   
-реакције оптерећења од ветра на опрему на врху стуба су задате од стране произвођача на висини врха стуба (редуковано на  $h=116,8 \text{ m}$ ),

- оптерећење на стуб ће се дати:

а.) по  $m'$  стуба за прорачун глобалних пресечних сила и утврђивање носивости и стабилности стуба (као сведено линијско оптерећење)

$$f_w = C_s \cdot C_d \cdot C_f \cdot q_{p(z)} \cdot b_{\text{pros}} \text{ [N/m']}$$

б.) по  $m^2$  површине пресека стуба са расподелом по обиму пресека према 7.9.1 стандарда за прорачун избочавања плашта стуба

$$f_w = C_s \cdot C_d \cdot C_{pe} \cdot q_{p(z)} \text{ [kN/m']}$$

$$\Psi_{\lambda\alpha} = 1$$

$$\text{за } 0^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$$

$$\Psi_{\lambda\alpha} = \Psi_\lambda + (1 - \Psi_\lambda) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_{\min}}{\alpha_\lambda - \alpha_{\min}}\right)\right)$$

$$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_\lambda$$

$$\Psi_{\lambda\alpha} = \Psi_\lambda = 0,78$$

$$\text{за } 105^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$$

Табела 5. Површинско оптерећење по обиму челичног стуба

Visina stuba od - do [m]	C <sub>s1</sub> , C <sub>s2</sub>	C <sub>f</sub>	q <sub>повр</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	D <sub>фронт</sub> [m]	Ln. opt. 1,35·f <sub>w</sub> [kN/m]	Форм. опте. по обиму стуба 1,35·f <sub>w</sub> ·C <sub>s1</sub> ·C <sub>s2</sub> ·C <sub>f</sub> ·k <sub>фронт</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]													
						0°	15°	30°	32°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	175°	180°
10-50	1,40E	0,56E	0,26E	2,960	107E	0,49E	0,24E	0,03	0	-	-	-0,747	-0,60E	-0,31E	-0,31E	-0,31E	-0,31E	-0,31E	-0,31E
50-100	1,40E	0,56E	0,26E	2,960	2,16E	0,99E	0,497	0,059	0	-	-	-1,39E	-1,49E	-1,21E	-0,62E	-0,62E	-0,62E	-0,62E	-0,62E
100-150	1,40E	0,56E	0,26E	2,929	2,26E	1,05E	0,72E	0,053	0	-	-	-1,26E	-1,52E	-1,28E	-0,65E	-0,65E	-0,65E	-0,65E	-0,65E
150-200	1,40E	0,56E	0,26E	2,927	2,32E	1,1E	0,77E	0,056	0	-	-	-1,22E	-1,66E	-1,25E	-0,69E	-0,69E	-0,69E	-0,69E	-0,69E
200-250	1,40E	0,56E	0,60E	2,926	2,477	1,2E	0,81E	0,05E	0	-	-	-1,28E	-1,78E	-1,60E	-0,72E	-0,72E	-0,72E	-0,72E	-0,72E
250-300	1,40E	0,56E	0,62E	2,922	2,570	1,2E	0,84E	0,060	0	-	-	-0,79E	-1,64E	-1,20E	-1,68E	-0,7E	-0,7E	-0,7E	-0,7E
300-350	1,40E	0,56E	0,65E	2,921	2,642	1,23E	0,86E	0,062	0	-	-	-1,68E	-1,85E	-1,50E	-0,77E	-0,77E	-0,77E	-0,77E	-0,77E
350-400	1,40E	0,56E	0,66E	2,920	2,7E	1,270	0,88E	0,063	0	-	-	-1,52E	-1,90E	-1,56E	-0,79E	-0,79E	-0,79E	-0,79E	-0,79E
400-450	1,40E	0,56E	0,68E	2,919	2,767	1,29E	0,90E	0,06E	0	-	-	-0,84E	-1,55E	-1,94E	-1,57E	-0,80E	-0,80E	-0,80E	-0,80E
450-500	1,40E	0,56E	0,69E	2,91E	2,8E	1,37	0,92E	0,06E	0	-	-	-1,58E	-1,97E	-1,60E	-0,82E	-0,82E	-0,82E	-0,82E	-0,82E
500-550	1,40E	0,56E	0,70E	2,92E	2,84E	1,34E	0,92E	0,067	0	-	-	-1,61	-2,01E	-1,62E	-0,82E	-0,82E	-0,82E	-0,82E	-0,82E
550-600	1,40E	0,56E	0,71E	2,92E	2,9E	1,36E	0,93E	0,06E	0	-	-	-1,62E	-2,04E	-1,66E	-0,82E	-0,82E	-0,82E	-0,82E	-0,82E
600-650	1,40E	0,56E	0,72E	2,92E	2,92E	1,38E	0,96E	0,06E	0	-	-	-1,66E	-2,07E	-1,68E	-0,86E	-0,86E	-0,86E	-0,86E	-0,86E
650-700	1,40E	0,56E	0,73E	2,920	2,9E	1,40E	0,98E	0,07	0	-	-	-0,92E	-1,68E	-2,10E	-1,70E	-0,87E	-0,87E	-0,87E	-0,87E
700-750	1,40E	0,56E	0,74E	2,92E	2,97	1,47	0,99E	0,071	0	-	-	-1,70E	-2,1E	-1,72E	-0,88E	-0,88E	-0,88E	-0,88E	-0,88E
750-800	1,40E	0,56E	0,75E	2,92E	2,97	1,42E	1,00E	0,072	0	-	-	-1,72	-2,1E	-1,74E	-0,89E	-0,89E	-0,89E	-0,89E	-0,89E
800-850	1,40E	0,56E	0,76E	2,92E	2,92E	1,45E	1,0E	0,072	0	-	-	-1,7E	-2,17E	-1,76E	-0,90E	-0,90E	-0,90E	-0,90E	-0,90E
850-900	1,40E	0,56E	0,77E	2,92E	2,98E	1,46E	1,02E	0,073	0	-	-	-1,75E	-2,19E	-1,78E	-0,91E	-0,91E	-0,91E	-0,91E	-0,91E
900-950	1,40E	0,56E	0,77E	2,90E	2,90E	1,48E	1,02E	0,07E	0	-	-	-1,77E	-2,22E	-1,81E	-0,92E	-0,92E	-0,92E	-0,92E	-0,92E
950-1000	1,40E	0,56E	0,78E	2,92E	2,86E	1,49E	1,06E	0,07E	0	-	-	-0,97E	-1,72E	-2,26E	-1,81E	-0,92E	-0,92E	-0,92E	-0,92E
1000-1050	1,40E	0,56E	0,79E	2,84E	2,87	1,50E	1,05E	0,07E	0	-	-	-1,80E	-2,25E	-1,82E	-0,92E	-0,92E	-0,92E	-0,92E	-0,92E
1050-1100	1,40E	0,56E	0,79E	2,86E	2,770	1,5E	1,05E	0,07E	0	-	-	-1,83E	-2,270	-1,84E	-0,94E	-0,94E	-0,94E	-0,94E	-0,94E
1100-116,8	1,40E	0,56E	0,807	2,900	2,75E	1,52E	1,07E	0,077	0	-	-	-1,84E	-2,20E	-1,86E	-0,95E	-0,95E	-0,95E	-0,95E	-0,95E

коэффициенти спољашњег притиска ветра (7.9.1.) сатандарда

за  $0^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$   $C_{pe} = \Psi_{\lambda\alpha} \cdot C_{p0} = 1,0 \cdot C_{p0}$

$\alpha=0^\circ$   $C_{pe} = 1,0 \cdot 1,0 = +1,0$

$\alpha=15^\circ$   $C_{pe} = 1,0 \cdot 0,7 = +0,7$

$\alpha=30^\circ$   $C_{pe} = 1,0 \cdot 0,05 = +0,05$

$\alpha=32^\circ$   $C_{pe} = 1,0 \cdot 0 = 0$

$\alpha=45^\circ$   $C_{pe} = -1,0 \cdot 0,65 = -0,65$

$\alpha=60^\circ$   $C_{pe} = -1,0 \cdot 1,2 = -1,2$

$\alpha=75^\circ$   $C_{pe} = -1,0 \cdot 1,5 = -1,5$

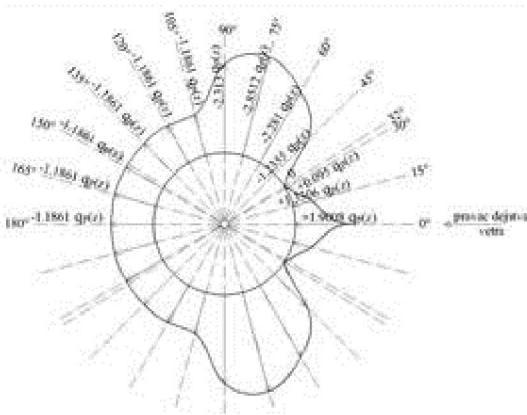
за  $75^\circ \leq \alpha \leq 105^\circ$   $C_{pe} = \Psi_{\lambda\alpha} \cdot C_{p0}$

$\alpha=90^\circ$   $\Psi_{\lambda\alpha} = 0,78 + (1 - 0,78) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{90^\circ - 75^\circ}{105^\circ - 75^\circ}\right)\right) = 0,936, C_{pe} = -0,936 \cdot 1,3 = -1,217$

за  $105^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$   $C_{pe} = \Psi_{\lambda\alpha} \cdot C_{p0,h}$

$\alpha=105^\circ, 120^\circ, 135^\circ, 150^\circ, 175^\circ, 180^\circ$   $C_{pe} = -0,78 \cdot 0,8 = -0,624$

На слици бр. 8 приказан је дијаграм расподеле оптерећења ветром по обиму стуба  $1,35 \cdot f_w$



Слика 8. Распоред оптерећења од ветра по обиму стуба



Слика 9. Оптерећење по плашту стуба са утицајима од гондоле

**Напомена:** Пошто стуб није отворен са горње стране, само при дну има ревизиони отвор, а унутрашњи нивои су раздвојени платформама, коефицијент унутрашњег притиска је  $C_{pi}=0$

**Напомена:** Поред дејства ветра на сам стуб, и за варијанте линијског оптерећења -за варијанте површинског оптерећења по плашту стуба на коти +116,8 m делују реакције приказане на скици (у њих је урачунат парцијални коефицијент).

Још истовремено са овим услед дејства одвајања вртлога, оптерећење  $F_w$  које делује управно на правац деловања ветра

$$F_{w(s)} = m_{(s)} \cdot (2\pi \cdot n_{iy})^2 \cdot \varphi_{iy(s)} \cdot y_{Fmax} \cdot 10^{-3} = 4456,22 \cdot (2\pi \cdot 0,17)^2 \cdot 1 \cdot 5,52 \cdot 10^{-5} = 0,289 \text{ kN/m}^2$$

$$y_{Fmax} = b \cdot \left( \frac{1}{s_t^2} \cdot \frac{1}{s_c} \cdot K \cdot K_w \cdot c_{lat} \right) = 3,96 \cdot \left( \frac{1}{0,18^2} \cdot \frac{1}{51,78} \cdot 0,13 \cdot 0,6 \cdot 0,3 \right) = 5,52 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$s_t = 0,18$$

$$s_c = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{1,c}}{\rho \cdot b^2} = \frac{2 \cdot 0,012 \cdot 10680}{1,25 \cdot 3,96^2} = 51,78$$

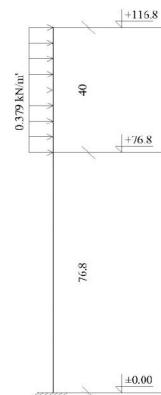
$$K=0,13 \text{ const.}$$

$$L_j/b=h/3=119/3 \approx 40 \text{ m} \quad \lambda=l/b=30,05$$

$$K_w = 3 \cdot \frac{L_j/b}{\lambda} \cdot \left[ 1 - \frac{L_j/b}{\lambda} + \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{L_j/b}{\lambda} \right)^2 \right] \leq 0,6$$

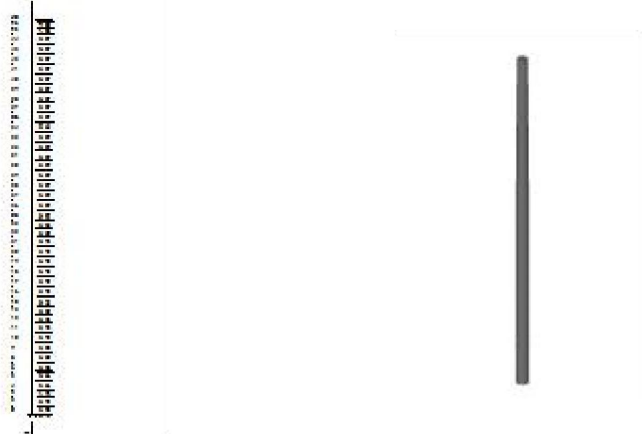
$$K_w = 3 \cdot \frac{40/3,96}{30,05} \cdot \left[ 1 - \frac{40/3,96}{30,05} + \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{40/3,96}{30,05} \right)^2 \right] = 0,707 > 0,6 \rightarrow K_w = 0,6$$

$$C_{lat}=0,3$$



Слика 10. Оптеречење од ветра према стандарду





Слика 11 Прорачунски модел

У доњој табели бр. 6 приказани су напони избочавања услед нормалних напона за монтажни комад 1.

Табела 6. Контрола избочавања од утицаја нормалних напона

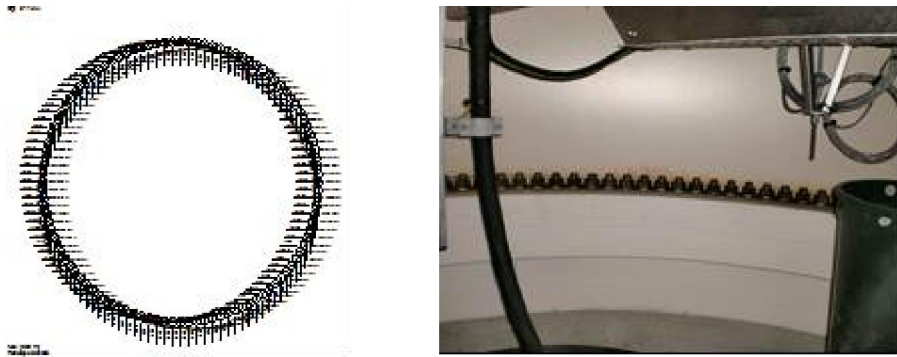
Монтажни комад 1							
Element konstrukcije			Seg.1	Seg.2	Seg.3	Seg.4	Seg.5
Prečnik	d	[mm]	3900	3900	3900	3900	3900
Poluprečnik	r	[mm]	1950	1950	1950	1950	1950
Debljina lima	tj	[mm]	60	60	60	39	39
Dužina segmenta	lj	[mm]	2580	2930	1750	2665	2665
Karakteristike materijala	f <sub>yk</sub>	[MPa]	335	335	335	345	345
<b>Kritičan normalni napon</b>							
Inicijalni napon	σ <sub>inicij</sub>	[MPa]	93	85	82	120	112
Kritičan faktor uvećanja	γ <sub>cr</sub>	[-]	42.87	44.86	44.86	22.29	22.29
	σ <sub>yk,cr</sub> = γ <sub>cr</sub> × σ <sub>inicij</sub>	[MPa]	3987	3813	3679	2675	2496
Nivo izrade	Q =	25	-	-	-	-	-
	Δw <sub>k</sub>	[mm]	13.68	13.68	13.68	11.03	11.03
	α <sub>s</sub> = 0.62 / (1 + 1.91(Δw <sub>k</sub> /t) <sup>1.44</sup> ) =		0.51	0.51	0.51	0.47	0.47
	λ <sub>sp</sub>	0.28	-	-	-	-	-
	β =	0.6	-	-	-	-	-
	η =	1	-	-	-	-	-
	λ <sub>sp</sub> = √(α(1-β)) =		1.12	1.12	1.12	1.09	1.09
	λ <sub>s</sub>		0.29	0.30	0.30	0.36	0.37
	χ <sub>s</sub>		0.99	0.99	0.98	0.94	0.93
	σ <sub>yk,d</sub> = γ <sub>s</sub> f <sub>yk</sub> / 1.1 =	[MPa]	302.41	300.99	299.83	295.20	292.26
	σ <sub>yk,d</sub> - [Compression]	[MPa]	119.95	119.77	117.14	174.78	172.04
	σ <sub>yk,d</sub> / σ <sub>yk,cr</sub> < 1.0		0.397	0.398	0.391	0.592	0.589
			OK	OK	OK	OK	OK

Анкерисање стуба за АБ темељ се остварује помоћу анкер плоче и анкер завртњева (2x108 М36...10.9). Анкер плоча је симетрично постављена у односу на осу цилиндричног плашта стуба. Њена дебелина је 130mm, а добијена је из лима

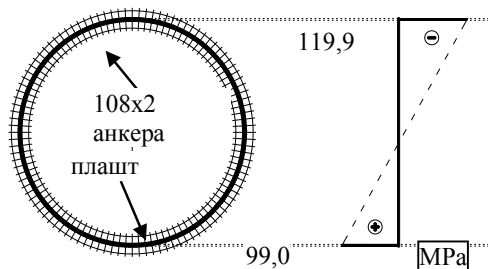
дебљине  $t_0=180\text{mm}$ . Детаљи анкера, са уређајима за подешавање вертикалности стуба, су приказани на слици бр. 12. Након постављања првог монтажног комада у пројектни положај врши се заливање анкер блока подливком високе чврстоће (С100/115). Анкери се притежу силом од 450 kN, али тек кад подливка достигне минималну чврстоћу од  $f_{ck}=65\text{ MPa}$ . Веза стуба са гондолом се остварује помоћу посебно обликоване и машински обрађене прирубнице дебљине 200mm, и преднапрегнутих високовредних завртњева 120xM30...10.9. Припадајућа површина плашта на сваки пар анкера износи:  $A'=A/108=73.5133,00\text{mm}^2/108$ ,  $A'=6.806,78\text{mm}^2$ . Припадајућа максимална сила затезања по једном пару завртњева:  $Z'=A' \times \sigma_{z,\text{max}}=6.806,78\text{ mm}^2 \times 99,0\text{ MPa}$ , а сила  $Z'=673,87\text{kN}$ . Максимална сила затезања у једном анкерном завртњу:  $F_{z,\text{max}}=Z'/2=673,87/2$ ,  $F_{z,\text{max}}=336,94\text{kN}$

Приказане реакције представљају силе које се јављају у пару анкер М36 завртњева. Највећа сила затезања у једном анкер завртњу износи:

$$F_{z,\text{max}}=687,92/2=343,56\text{kN}$$



Слика 12. Детаљи анкера



Слика 13. Максималне силе у анкерима у нивоу доњег сегмента

На првом монтажном комаду је предвиђен отвор за улаз у стуб. Због концентрација напона и промене граничних услова у погледу избочавања цилиндричне лушке, поред повећане дебљине плашта цилиндра (95mm) у овој зони су предвиђена подужна и попречна укружења по ободу отвора, као и ојачања дебљине плашта у зони највећих концентрација напона у угловима отвора. Тачан положај и распоред ојачања у зони отвора је приказан на слици бр. 14.



Слика 14. Контрола стабилности у зони отвора

С обзиром на димензије попречног пресека стуба (однос пречник/дебљина зида плашта) он се мора третирати као цилиндрична љуска. Прорачун утицаја у стубу је спроведен на линијском моделу, али су напони у зони отвора за врата на МК1 одређени применом методе коначних елемената са *shell* елементима. Избочавање плашта у зони отвора контролисано је применом две методе прорачуна: општа нелинеарна метода са критичним факторима - LBA/MNA метода (*materially nonlinear analysis in conjunction with linear buckling analysis*) и метода са задатим имперфекцијама и прорачуном по теорији другог реда - (*geometrically and materially nonlinear analysis with imperfections*). Критичани напони избочавања цилиндричних љуски МК1 до МК5 су осим аналитички одређени и тачније применом коначних елемената - методом LBA (*linear buckling analysis*). Прорачунске вредности дејстава су одређене на основу комбинација које су дефинисане у IEC61400-1. Дејства ветра на конструкцију стуба су одређена на основу прорачунске брзине ветра за одговарајућу комбинацију оптерећења за I категорију терена и коефицијент топографије терена  $c_{sc} = 1,0$ . Будући да се ради о виткој конструкцији коефицијент  $c_{scd}$  је одређен применом динамичке анализе, према Анексу Б ЕН1991-1-4. Сеизмички утицаји су одређени применом методе еквивалентних бочних сила и мулти-модалном анализом за категорију тла Б, еластични спектар Тип 1, пригушење конструкције од  $\xi = 1\%$  и фактор понашања  $q = 1,0$ , у свему према ЕН1998-1 и IEC 61400-1. При даљем прорачуну коришћени су резултати мулти-модалне анализе, јер се показало да постоји значајно учешће виших тонова осциловања. Фреквенција првог тона осциловања је  $0,173\text{Hz}$ , а са првих двадесет тонова обухваћено је око 93% еквивалентне модалне масе. На основу меродавне комбинације утицаја извршена је контрола носивости попречних пресека према ЕН1993-1-1 и контрола стабилности цилиндричне љуске на избочавање, према ЕН1993-1-6. Треба нагласити да је прорачун стабилности на избочавање спроведен са почетним имперфекцијама - класа Б Замор материјала је проверен према ЕН1993-1-9, применом Палмгрин-Минерове методе, у складу са IEC61400-1, Анекс Г. Категорије детаља за замор су 80,90 или 147V за подужне сучеоне шавове и кружне сучеоне шавове (према Упутству за пројектовање стубова ветрогенератора n<sup>o</sup> 990803), односно 80 за прикључке са угаоним шавовима (према ЕН1993-1-9). Контрола замора је извршена за 10 милиона циклуса. Производња и

монтажа челичне конструкције мора да буде у складу са ЕН1090-2 и VAD n<sup>0</sup> 961592. Сви шавови су квалитета Б у складу са ISO 5817. Сви шавови морају да буду испитани у складу са ЕН 12062 и методама у складу са EN ISO 17635.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] М.Бешевић, А.Тешановић, Д. Кукарас, ”Могуће последице од оптерећења услед налета ветра на примеру објекта центра обласне контроле летења у Београду ” Зборник радова грађевинског факултета 22, стр. 129-138 (2013)
- [2] М.Бешевић, А.Тешановић, “Оптимално пројектовање челичних конструкција складишта са аспекта утрошка челика“ Зборник грађевинског факултета 21 (2012).
- [3] М.Бешевић, ” Висеће стаклене фасаде и стаклени носачи као носећа конструкција” Зборник радова грађевинског факултета, 20/2011 стр.101-113.
- [4] М.Бешевић, “Савремене алуминијумске коинструкције - фасаде “ Грађевински календар-2013 (Србија)
- [5] М.Бешевић, Идејни грађевински пројекат челичне конструкције стуба ветрогенератора за ВЕТРОПАРК „КОВАЧИЦА“, 2013 године.
- [6] Несторовић Ж., Трифковић М., Бешевић Т. М., “On the possibilities of geodetic measurements utilization in construction dimensions control“ Building Materials and structures 1-vol 56 (2013) 1(51-62).

## CALCULATION AND DESIGN OF STEEL BEARING STRUCTURE FOR WIND TURBINE

***Summary:** Wind represents directed movement of the air and is caused by differences in atmospheric pressure which are caused by uneven heating of air masses. Global and local winds can be distinguished. Global winds have high altitude, while local winds occur in the ground layer of the atmosphere. Given that the global winds have high altitude they cannot be used as propellant for wind generators, but they should be known for their effects on the winds in the lower atmosphere. Modern wind turbines are made with a horizontal axle that has a system for the swiveling axis in the horizontal plane for tracking wind direction changes. They can have different number of blades, but for larger forces three blades are commonly used because they provide the greatest efficiency. Rotor diameter of these turbines depends on the strength and it ranges from 30 m for the power of 300 kW to 115 m for the power of 5 MW. Wind turbines are mounted on vertical steel tower which can be high even more than 100 m. Depending on the diameter of the turbine rotor, column is usually built as steel conical and less often as a steel-frame. This study includes analysis and design of steel tower for wind generator made by manufacturer Vestas, type V112 3MW HH 119 (power 3.2 MW) for the construction of wind farm “Kovačica”.*

***Keywords:** Wind turbines, loads, wind effects, calculation, design, codes.*