

Златко Марковић<sup>1</sup>, Ненад Фриц<sup>2</sup>, Јелена Добрић<sup>3</sup>

## СПЕЦИФИЧНИ ПРОБЛЕМИ КОД ЧЕЛИЧНИХ КОНСТРУКЦИЈА ВЕТРОПАРКОВА

### *Резиме:*

Са расположивих 870 TW, ветар је данас други највећи обновљиви извор енергије иза сунчеве, а испред геотермалних и хидролошких извора енергије. Према подацима из 2008. године за очекивану изградњу ветропаркова капацитета 27 GW потребно је издвојити око 1,35 милиона евра по MW. Конструкција челичног торња представља око 15-20% укупне инвестиције па изградња ветропаркова представља велику могућност за развој грађевинске струке. Циљ овог рада је да се стручна јавност упозна са специфичним проблемима пројектовања челичних торњева за ношење ветрогенератора.

*Кључне речи:* ветропаркови, челичне конструкције, наставци, избочавање, замор

## SPECIFIC PROBLEMS OF WIND TOWER STEEL STRUCTURES

### *Summary:*

Today, wind power is second largest available renewable resource of energy, after sun and before geothermal and hidrologic energy resources. According to data from 2008. for expected bulding of wind farms with capacity 27 GW it is required to pay 1,35 million euro per MW. The construction of steel tower is about 15-20% of total investment so construction of wind farms is great opportunity for development of civil engineering industry. The aim of this paper is to introduce civil engineers with the specific problems of design of steel towers for wind turbines.

*Key words:* wind farms, steel structures, joints, buckling, fatigue

---

<sup>1</sup> Др, ванредни професор, Грађевински факултет, Београд

<sup>2</sup> Дипл. инж. грађ., асистент студент докторских студија, Грађевински факултет, Београд

<sup>3</sup> Мр, асистент, Грађевински факултет, Београд

## 1 УВОД

Ветар представља неисцрпан еколошки извор енергије чији глобални потенцијал вишеструко превазилази светске потребе за електричном енергијом. Примена енергије ветра у производњи електричне енергије почела је тридесетих година прошлог века изградњом првих ветрогенератора – постројења за електромеханичку конверзију кинетичке енергије ветра. Међутим, развојем великих хидроелектрана и термоелектрана ветроелектране су брзо пале у заборав. Велика енергетска криза седамдесетих година прошлог века, а касније и све озбиљнији глобални еколошки проблеми довели су до ренесансе ветропаркова. Данас, ветроенергетика представља грану енергетике која се најбрже развија, како у погледу технологије, тако и у погледу пораста инсталираних ветроелектрана у свету.

Према годишњем извештају Европске асоцијације за енергију ветра (EWEA) у току 2011. године у Европи (без Русије) су изграђени ветрогенератори капацитета 10281 MW, а од тога 9616 MW у Европској унији (слично као и 2010. године када је инсталирано 9648 MW). У току 2011. године укупно је инвестирано 12,6 милијарди евра у ветропаркове у Европској унији. Од 2000. године, 28,2% од ново изграђених енергетских капацитета користи енергију ветра, 47,8% обновљиве изворе енергије, а чак 90,8% обновљиве изворе енергије и гас. У погледу изграђених капацитета на годишњем нивоу, Немачка је лидер са 2100 MW ново изграђених ветропаркова у 2011. години. Одмах иза Немачке налазе се Уједињено Краљевство (око 1300 MW), Шпанија (1050 MW), а следе Италија (950 MW), Француска (830 MW), Шведска (763 MW) и Румунија (520 MW). Јасна је тенденција Европске уније да се њен енергетски сектор удаљи од употребе мазута, угља и нуклеарне енергије, уз повећање примене гаса, соларне енергије и енергије ветра.

У нашој земљи, потенцијални локалитети за развој ветроенергетике су планински венци источне Србије, Војводина, планинске заравни у централној Србији и долине Дунава, Саве и Мораве. Ова подручја су идеално место за изградњу ветро паркова, јер просечна брзина ветра прелази 6 m/s, што је према искуствима земаља (Холандија, Немачка, Шпанија, Португал, итд.) која се баве већ дуже од 20 година овом облашћу, граница исплативости.

Модерне ветрењаче имају генераторе са хоризонталном осовином код којих је ротирајући систем у хоризонталној равни. 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 m до 115 m. Ветрогенератор се поставља на врх вертикалне носеће конструкције (стуба) која, у зависности од пречника ротора турбине, може бити висока и преко 100 m.

Данас се за израду носећих конструкција ветрогенератора користе сви конвенционални материјали (слика 1). У том смислу, издвајају се:

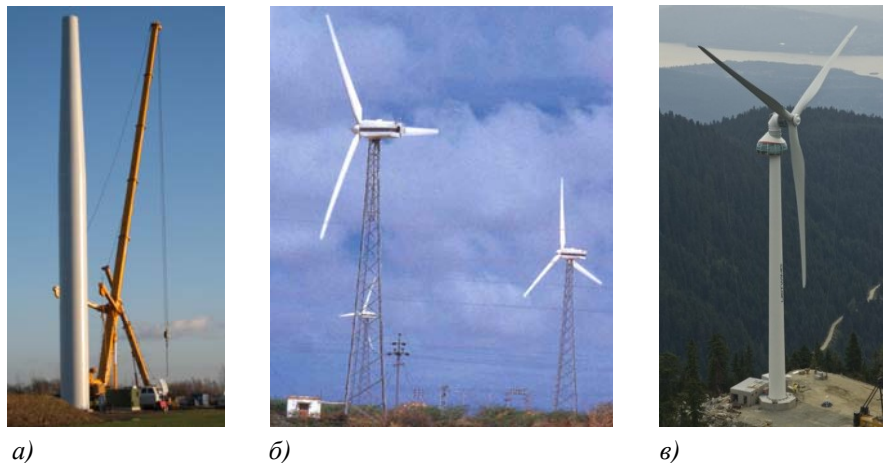
- бетонске конструкције (*Inneo Torres*),
- челичне решеткасте конструкције (*Ruukki*),
- челичне цилиндричне конструкције (*Vestas, GE, Hitachi*),
- хибридне конструкције (комбинација челичног и бетонског цилиндричног стуба).

То су по правилу високе и витке конструкције, најчешће конзолног статичког система, мада постоје и решења са применом затезних ужади (јарболи).

За пројектовање конструкција овог типа се, поред уобичајених стандарда за прорачун конструкција (Еврокод) користе и посебни стандарди и препоруке:

- Уредба за сертификацију система конверзије енергије ветра (1988, Међународна комисија за електротехнику),
- IEC 61400-1: Ветрогенератори - Део 1: Захтеви за пројектовање (1999, Међународни стандард) [1],
- NEN 6096 (1988, Холандски национални стандард),
- DS 472 (1992, Дански национални стандард).

Међународни стандард за ветрогенераторе, IEC 61400-1 [1], за чак 17 различитих граничних случајева оптерећења и 5 случајева оптерећења услед замора, налаже контролу носивости и стабилности носеће конструкције, контролу електричне опреме и инсталација, у фази монтаже, пуштања у рад, као и у фази експлоатације.



*Слика 1 – Различити типови стубова ветрогенератора: а) бетонски, б) челични решеткасти, в) челични цилиндрични*

*Figure 1 – Different types of wind towers: a) concrete, b) steel lattice, v) steel cylindrical*

У овом раду је дат кратак осврт на специфичности пројектовања челичних цилиндричних носећих конструкција стубова ветрогенератора које се најчешће примењују. Анализирани су феномени карактеристични за овакав тип конструкција као што су: избочавање цилиндричних љуски, прорачун монтажних наставака и доказ замора материјала.

## **2 ОПТЕРЕЋЕЊА**

Обзиром на променљивост и динамички карактер дејства ветра, као и низ феномена који су последица његове интеракције са радом турбине и са конструкцијом која је, у општем случају, флексибилна, анализа оптерећења код оваквог типа објекта је веома

комплексна. Сва оптерећења која делују на конструкцију ветрогенератора могу се поделити у четири основне групе:

- аеродинамичка оптерећења (статичка и динамичка оптерећења који настају услед струјања ваздуха и његове интеракције са стационарним и покретним деловима ветрогенератора),
- гравитациона оптерећења,
- инерцијална оптерећења (центрифугалне инерцијалне силе изазване осциловањем или ротацијом конструкције, сеизмичке силе),
- оптерећења изазвана радом генератора (проузрокована контролисаним системом кочења или прекида рада генератора).

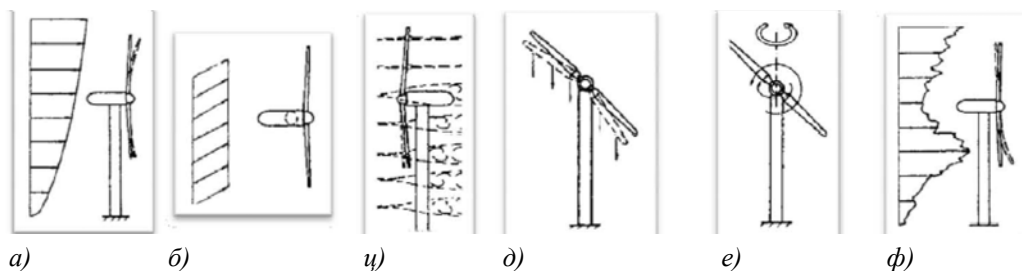
Ова оптерећења према функцији промене у току времена могу да се сврстају у две групе:

- стабилна оптерећења (константна током времена) и
- нестабилна оптерећења (променљива током времена),

У групу стабилних оптерећења спадају сопствена тежина торња, аеродинамичка оптерећења која су резултат дејства ветра константне брзине и центрифугалних сила које се јављају када ротор ради константном брзином. Дејство центрифугалних сила се смањује добро избалансираним масама крака елисе ветрогенератора. Нестабилна оптерећења ветра могу да се поделе на три основна облика (слика 2, [9]):

- циклична оптерећења која потичу од протока ваздуха који је константан, али просторно неуниформан око крака елисе и као такав изазива цикличне промене оптерећења на ротору који се обрће: а) неуниформна расподела оптерећења са порастом висине стуба; б) оптерећење делује под углом у односу на раван ротора; ц) аеродинамичка нестабилност изазвана осциловањем стуба (утицај динамичких карактеристика и сопствене фреквенције стуба),
- циклична оптерећења која расту или имају алтернативну вредност сваки пут када се ротор окрене: д) неуравнотежена маса лопатица ротора који се креће константном брзином; е) индукција торзионих утицаја у стуб,
- нециклична оптерећења: ф) стохастично, непериодично оптерећење изазвано турбулентним дејством ветра.

Проток ваздуха зависи од просечне брзине ветра и турбуленција у зони рада ротора, ротационе брзине ротора, густине ваздуха као и аеродинамичких облика конструктивних елемената ветрогенератора.



Слика 2 – Различити облици дејства ветра  
Figure 2 – Different types of wind actions

Због релативно мале вредности густине ваздуха, за ангажовање енергије ветра неопходно је обезбедити одговарајућу висину као и површину, како би се добио адекватан утицај ветра. Због тога је од посебне важности да су димензије ротора и висина на коју се турбина поставља што веће. Табела 1 приказује вредности максималног капацитета ветрогенератора у функцији пречника елисе.

Већина ветрогенератора максималну производњу електричне енергије остварује при брзини ветра од 15 m/s, а престаје са радом при брзини ветра од 20-25 m/s.

**Табела 1 – Величина елисе и максимални капацитет ветрогенератора**  
**Table 1 – Rotor size and maximum power output**

Пречник елисе [m]	Капацитет ветрогенератора [kW]
10	25
17	100
27	225
33	300
40	500
44	600
48	750
54	1000
64	1500
72	2000
80	2500

При пројектовању конструкције ветрогенератора, први корак је анализа свих релевантних прорачунских ситуација. Прорачунске ситуације представљају комбинацију оптерећења изазваних режимом рада генератора или других оперативних ситуација са спољашњим метеоролошким утицајима у фази монтаже, експлоатације и одржавања. Сви релевантни случајеви оптерећења узмају се са одговарајућим коефицијентима сигурности којима се обухвата степен вероватноће њихове истовремене појаве. Тако се при контроли граничних стања носивости истовремено разматрају дејства:

- нормалног оптерећења од ветра и нормалног режима рада ветрогенератора,
- нормалног оптерећења од ветра и оптерећења услед квара ветрогенератора и
- екстремног дејства ветра и нормалног режима рада ветрогенератора.

Потребно је напоменути да је оптерећење ветром на конструкцију различито, за различите контроле носивости. На слици 3 су приказани стварни облик дијаграма ветра (а), где на наветреној страни влада притисак, а на заветреној и бочним странама сисање, као и поједностављени рачунски модели за прорачун глобалних утицаја (б) и контролу избочавања (в).

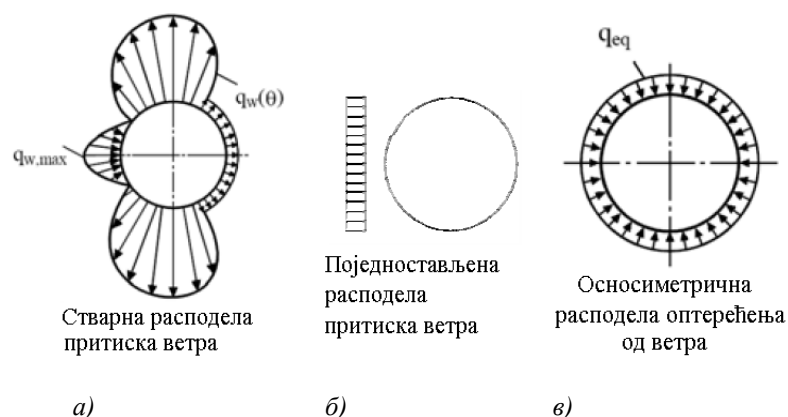
У табели 2 су приказане све прорачунске ситуације и одговарајуће комбинације оптерећења, према међународном стандарду ИЕС 61400-1 [1], које се примењују за контроле граничних стања носивости.

Табела 2 – Прорачунски случајеви оптерећења

Table 2 – Design load cases

Прорачунска ситуација	PCO	Услови ветра	Остали услови	Тип анализе	Парцијални коефицијент сигурности
1) Производња енергије	1.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	A1	U	N
	1.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	*
	1.3	ETM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		U	N
	1.4	ECD $V_{hub} = V_r + 2m/s, V_r, V_r - 2m/s$		U	N
	1.5	NWS $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		U	N
2) Производња енергије плус појава квара	2.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	A2	U	N
	2.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	A3	U	A
	2.3	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ i $V_{out}$	A4	U	A
	2.4	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	A5	F	*
3) Покретање	3.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	*
	3.2	EOG $V_{hub} = V_{in}, V_r \pm 2m/s$ i $V_{out}$		U	N
	3.3	EDC $V_{hub} = V_{in}, V_r \pm 2m/s$ i $V_{out}$		U	N
4) Нормално заустављање	4.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	*
	4.2	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ i $V_{out}$		U	N
5) Ванредно заустављање	5.1	NTM $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ i $V_{out}$		U	N
6) Заустављен (мирно стајање или празан ход)	6.1	EWM повратни период 50 година		U	N
	6.2	EWM повратни период 50 година	A6	U	A
	6.3	EWM повратни период 1 година	A7	U	N
	6.4	NTM $V_{hub} < 0,7V_{ref}$		F	*
7) Заустављен плус појава квара	7.1	EWM повратни период 1 година		U	A
8) Превоз, монтажа, одржавање и поправка	8.1	NTM $V_{maint}$ дефинише произвођач		U	T
	8.2	EWM повратни период 1 година		U	A

PCO - прорачунски случај оптерећења, ECD – екстремни кохерентни удар са променом правца, EDC – екстремна промена правца, EOG – екстремни оперативни удар, EWM – модел екстремне брзине ветра, EWS – екстремно бочно дејство ветра, NTM – модел нормалне турбуленције, ETM – модел екстремне турбуленције, NWP – модел нормалног профила ветра, F – замор, U – гранична носивост, N – нормалан, A – екстреман (*abnormal*), T – транспорт и монтажа, \* - парцијална сигурност за замор, A1 – за екстраполацију екстремних догађаја, A2 – контролисани квар система или губитак електричне енергије, A3 – заштита система или претходни унутрашњи електрични квар, A4 – спољашњи или унутрашњи електрични квар који укључује губитак електричне енергије, A5 – контрола, заштита или унутрашњи електрични квар који укључује губитак електричне енергије, A6 – губитак електричне енергије, A7 – екстремно скретање са правца



а) *Стварна расподела притиска ветра*  
 б) *Поједностављена расподела притиска ветра*  
 в) *Осносиметрична расподела оптерећења од ветра*

Слика 3 – Оптерећење ветром на цилиндричну љуску: а) стварни притисак; б) апроксимација за прорачун глобалних утицаја; в) еквивалентно оптерећење (радијални притисак) за контролу избочавања цилиндричне љуске

Figure 3 – Wind load on cylindrical shell: a) real wind pressure distribution; b) approximation for determination of global forces; v) equivalent axisymmetric pressure distribution for local buckling analysis

У табели 2 су приказане све прорачунске ситуације и одговарајуће комбинације оптерећења, према међународном стандарду ИЕС 61400-1 [1], које се примењују за контроле граничних стања носивости.

Када је реч о анализи сеизмичких утицаја, она се по правилу спроводи према Еврокоду 8 [4], узимајући у обзир и одредбе стандарда ИЕС 61400-1, део 11.6 и Анекс Ц [1]. Овим стандардима дефинисана су основна правила:

- у случајевима када се дејство земљотреса не може занемарити, пројектанти су дужни да на одговарајући начин узму у обзир све референтне услове предметне локације,
- убрзање тла одређује се за повратни период од 475 година,
- сеизмичка оптерећења комбинују се са погонским (оперативним) оптерећењима услед ванредног заустављања,
- парцијални коефицијент сигурности једнак је 1,0 за све компоненте оптерећења,
- користе се основни тонови осциловања за 85% укупне модалне масе конструкције,
- при процени носивости конструкције може се претпоставити само еластичан одговор,
- у случајевима када се сматра да сеизмичке силе неће изазвати значајније утицаје, може се користити конзервативан и поједностављен приступ прорачуну (Анекс Ц).

У табели 3 дате су вредности парцијалних коефицијената сигурности, према поменутом стандарду, ИЕС 61400-1 [1], за сваку од поменутих прорачунских ситуација.

**Табела 3 – Парцијални коефицијенти сигурности за оптерећења**  
**Table 3 – Partial safety factors for loads**

	Неповољна оптерећења		Повољна оптерећења
	Прорачунска ситуација		Све прорачунске ситуације
	Нормална (N)	Екстремна (abnormal) (A)	
Аеродинамичка	1,35	1,1	0,9
Радна	1,35	1,1	0,9
Гравитациона	1,1	1,1	0,9
Инерцијална	1,25	1,1	0,9

### 3 ПРОРАЧУН ЧЕЛИЧНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ СТУБА

Носећа челична конструкција ветрогенератора је шупљег, кружног попречног пресека, са малом дебелином зида у односу на пречник, па се у статичком погледу третира и анализира као кружна цилиндрична љуска са мембранским стањем напона. Основу прорачуна овог типа конструкције чини европски стандард EN 1993-1-6 [2]. Према овом стандарду, у поступку пројектовања, потребно је спровести следеће контроле:

- гранично стање пластичности LS1,
- гранично стање избочавања LS3,
- гранично стање замора материјала LS4.

При доказу граничних стања носивости челичне конструкције могу да се користе следећи приступи:

- контрола напона: главних (LS1), секундарних (LS3) и локалних напона (LS4),
- директна примена прорачунских израза која репрезентују одговарајућа гранична стања, а која су изведена применом линеарно еластичне теорије (Анекс Ц), мембранске теорије (Анекс А) или теорије пластичности (Анекс Б);
- примена глобалне нумеричке анализе.

Анализирају се напони који делују у средњој равни љуске: аксијални  $\sigma_x$ , тангенцијални  $\sigma_\theta$ , смичући  $\tau_{x\theta}$ , као и напони смицања који делују у равни управној на средњу раван  $\tau_{xn}$  и  $\tau_{\theta n}$  (слика 4). Напони  $\tau_{xn}$  и  $\tau_{\theta n}$  уобичајено имају мале вредности, па се врло често занемарују у прорачуну. Сви дисконтинуитети у геометрији љуске, који последично доводе до концентрације напона, морају се узети у обзир при анализи. Овде се пре свега мисли на појаву отвора за врата у омотачу плашта и промену дебелине зида.

Гранично стање пластичности LS1 дефинише граничну носивост конструкције у случајевима када губитак стабилности није доминантан. Карактеришу га два основна облика лома: лом затезањем или пластификација материјала конструкције услед притиска по читавој дебелини пресека (колапс конструкције формирањем механизма пластичних зглобова). У општем случају, због ефеката ојачања материјала услед деформације као и стабилизујућих и дестабилизујућих ефеката у конструкцији услед промене геометрије, ово гранично стање не представља реалну опасност. За доказ носивости конструкције користи се мембранска анализа напона. Потребно је испунити следећи услов:

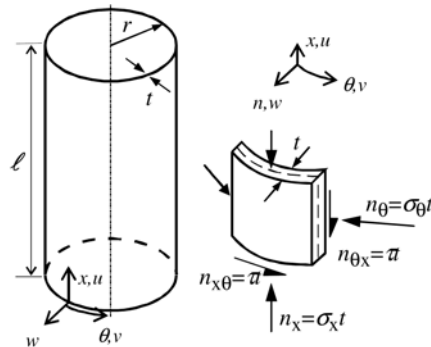
$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed}\sigma_{\theta,Ed} + 3\tau_{x\theta}^2} \leq f_{eq,Rd} = f_{yk} / \gamma_{M0} \quad (1)$$



где су:

$\sigma_{eq,Ed}$  прорачунска вредност упоредног (еквивалентног) напона,

$f_{eq,Rd}$  прорачунска вредност границе развлачења основног челичног материјала.



Слика 4 – Геометрија сегмента љуске, компонентални и резултујући напони  
Figure 4 – Cylinder geometry, membrane stresses and stress resultants

Гранично стање избочавања LS3 се односи на локалну нестабилност челичног плашта услед мембранских аксијалних напона притиска и смицања, као и мале дебљине зида у односу на пречник цилиндра. Губитак локалне стабилности цилиндричног плашта, по правилу доводи до нестабилности и рушења конструкције као целине (слика 5).



Слика 5 – Губитак стабилности стуба ветрогенератора  
Figure 5 – Wind tower loss of stability

У зависности од дужине сегмента који се анализира, граничних услова на крајевима сегмента, радијуса средње површи љуске, дебљине зида и карактеристичне вредности амплитуде имперфекције, применом Анекса Д [2], могу да се одреде вредности критичних напона избочавања: нормалних, тангенцијалних и смичућих напона. Прорачунске носивости на избочавање се према EN 1993-1-6 одређује на основу израза:

$$\sigma_{x,Rd} = \chi_x f_{yk} / \gamma_{M1} \quad (2.1)$$

$$\sigma_{\theta,Rd} = \chi_{\theta} f_{yk} \gamma_{M1} \quad (2.2)$$

$$\tau_{x\theta,Rd} = \chi_{\tau} f_{yk} / \sqrt{3} / \gamma_{M1} \quad (2.3)$$

где су:  $\chi_{\gamma}$ ,  $\chi_{\theta}$ ,  $\chi_{\tau}$  одговарајући редукциони коефицијент избочавања.

Ефекти услед попречног савијања, могу да се занемаре када настају услед граничних услова ослањања. Напони савијања који су последица дејства локалног оптерећења или температурних промена, морају да се узму у обзир. За сваки сегмент цилиндричног стуба (између монтажних наставака) неопходно је да буду задовољени следећи услови:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd} \quad (3.1)$$

$$\sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd} \quad (3.2)$$

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd} \quad (3.3)$$

$$\left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} + \left( \frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right)^{k_{\theta}} - k_i \left( \frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right) \left( \frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right) + \left( \frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}} \right)^{k_{\tau}} \leq 1,0 \quad (3.4)$$

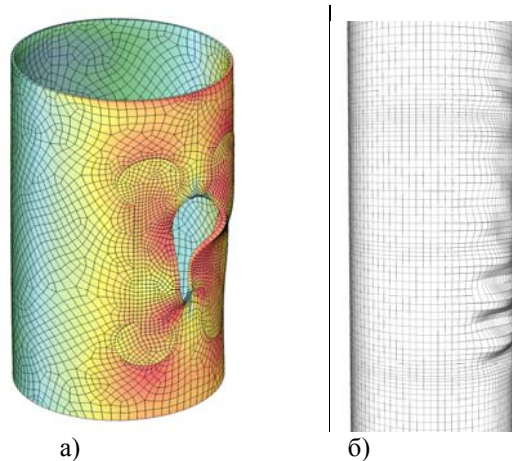
где су:  $k_{\gamma}$ ,  $k_{\theta}$ ,  $k_{\tau}$  интеракциони коефицијент избочавања.

Осим директне примене прорачунских једначина датих у Еврокоду 3, напонско деформацијско стање у челичној носећој конструкцији може да се анализира и нумеричким методама које се заснивају на методи коначних елемената (МКЕ). За коначне елементе се углавном користе:

- “*homogeneous shell*” елементи који имају крутост на савијање и који се дефинишу дебљином, материјалом и Поасоновим коефицијентом,
- “*membranes*” површински елементи који имају крутост у равни али не поседују крутост на савијање и који се дефинишу дебљином елемента, материјалом и Поасоновим коефицијентом.

У зависности од граничних услова, физичко механичких карактеристика материјала, те деформацијских услова саме конструкције, могуће је применити низ различитих метода анализе: линеарно еластична анализа (LA), линеарно еластична бирфукациона анализа (LBA), геометријско нелинеарна еластична анализа (GNA), материјална нелинеарна анализа (MNA), геометријска и материјална нелинеарна анализа (GMNA), геометријска нелинеарна еластична анализа са укљученим имперфекцијама (GNIA), геометријска и материјална нелинеарна анализа са укљученим имперфекцијама (GMNIA).

На слици 6 су приказани примери прорачуна цилиндричног стуба применом МКЕ за напонско-деформацијску анализу на месту дисконтинуитета у зони отвора (слика 7а), као и једна карактеристична форма избочавања услед момената савијања која се добија при одређивању критичног напона избочавања.



Слика 6 – Стање напона и деформација у сегменту цилиндра добијено FEM анализом: а) концентрација напона на месту отвора б) локално избочавање цилиндричне љуске  
 Figure 6 – Stress distribution and deformed shape of cylinder segment by FEM analysis: a) stress concentration around opening b) linear local buckling of cylinder shell

Доказ носивости материјала конструкције на замор спроводи се према стандарду EN 1993-1-9 [6]. Најчешће се примењује метода напонских разлика која може да се формулише на следећи начин:

$$\gamma_{FF} \Delta \sigma_w \leq \Delta \sigma_c / \gamma_{MF} \quad (4)$$

где су:

$\Delta \sigma_w$  прорачунска вредност напонске разлике услед дејства ветра,

$\Delta \sigma_c$  прорачунска носивост на замор за одговарајућу категорију детаља и пројектовани број циклуса оптерећења,

$\gamma_{FF}$  парцијални коефицијент сигурности за дејства,

$\gamma_{MF}$  парцијални коефицијент сигурности за материјал.

Генерално, на исти начин је потребно да се изврши и контрола смичућих напона, али су они по правлиу занемарљивог интензитета, тако да отпада потреба за њиховом контролом, као и за контролом упоредног напона.

Прорачунске вредности напонских разлика услед дејства ветра одређују се на основу просечне једногодишње брзине ветра за разматрану локацију. Уобичајено је да се за замор користи категорија детаља су 147В за подужне сучеоне шавове и кружне (попечне) сучеоне шавове (према Упутству за пројектовање стубова ветрогенератора n<sup>0</sup> 990803), односно категорија 80 за прикључке са угаоним шавовима (према EN1993-1-9). Треба нагласити да је заваривање прикључака и бушење рупа у плашту стуба допуштено само у зонама које су категорије 80, односно у дну и на врху стуба.

Као алтернатива може да се примени принцип кумулативног оштећења, услед оштећења за различите напонске разлике, применом Палмгрин-Минеровог (*Palmgren-Miner*) правила, како је дато у Анексу Г (IEC 61400-1).

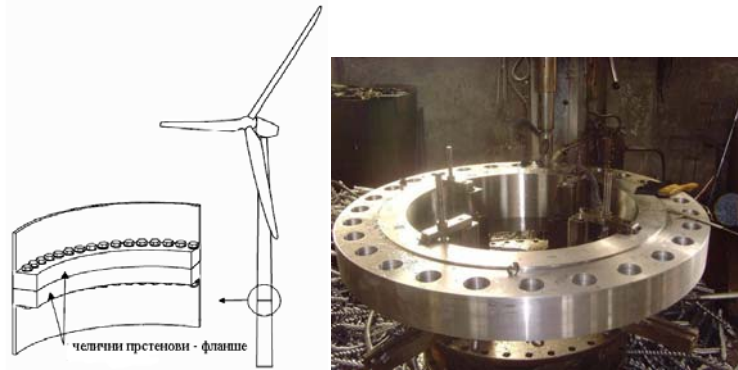
## 4 МОНТАЖНИ НАСТАВЦИ ЧЕЛИЧНИХ СТУБОВА

Како вредност носеће конструкције челичног торња ветрогенератора износи 15-20% укупне вредности инвестиције, оптимизација у процесу пројектовања је неопходна. Један од најинтересантнијих пројектантских и извођачких детаља у конструисању стуба је монтажни наставак који је, обзиром на габаритне димензије конструкције, неизбежан.

Класични монтажни наставци са чеоним плочама и даље имају највећу примену, мада их због високе цене све више потискују монтажни наставци са тарним спојевима.

### 4.1 Монтажни наставци са чеоном плочом

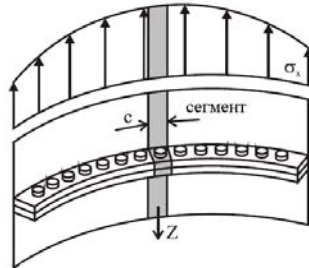
Монтажни наставак са чеоном плочом састоји се из два челична прстена која су заварена за челични плашт стуба (један за доњи, а један за горњи део конструкције) и који су међусобно повезани преднапрегнутим високовредним завртњевима (слика 7).



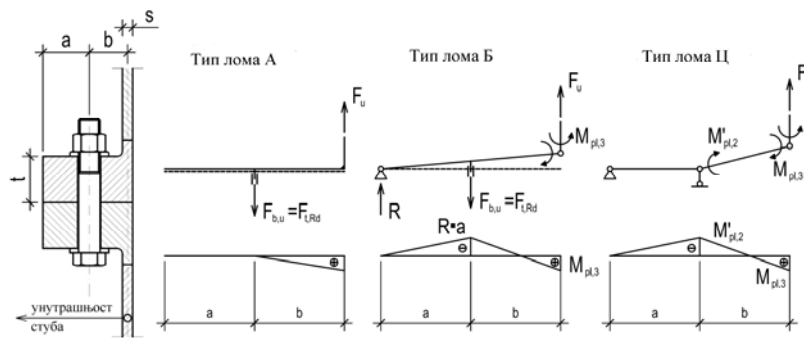
Слика 7 – Монтажни наставак са чеоним плочама  
Figure 7 – Flange ring connection

За потребе прорачуна, уведена је претпоставка да је носивост тродимензионалног монтажног наставка, оптерећеног углавном на савијање, пропорционална носивости сегмента који саржи један завртањ. Ширина сегмента  $s$  једнака је дужини лука између оса две суседне рупе за спојна средства (слика 8).

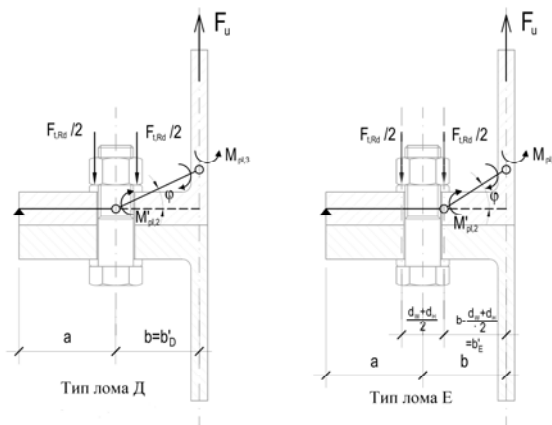
Носивост оваквог монтажног наставка у стању граничне носивости дефинише се или носивошћу завртњева или носивошћу чеоних плоча. Чеона плоча се разматра као линијски конзолни елемент, а облик лома дефинише се појавом пластичних зглобова који се могу јавити на различитим местима (слика 9). На основу првих прелиминарних истраживања, које је спровео Петерсен (*Petersen*), дефинисна су три основна облика лома, лом завртњева затезањем (А), појава пластичног зглоба у плашту челичне конструкције (Б) и појава пластичног зглоба и у плашту и у чеоној плочи (Ц).



Слика 8 – Сегмент монтажнoг наставка са једним завртњем  
 Figure 8 – Segment of flange ring connection with a single bolt



Слика 9 – Модели лома монтажнoг наставка са чеоном плочом према Петерсену  
 Figure 9 – Failure modes of flange ring connections according to Petersen



Слика 10 – Модели лома монтажнoг наставка са чеоном плочом према Сеидел  
 Figure 10 – Failure modes of flange ring connections according to Seidel

Сеидел (Seidel) је срачунао расподелу сила у завртњевима и установио још два облика лома (слика 10). Облик лома (Д) представља појаву пластичног зглоба у чеоној плочи и

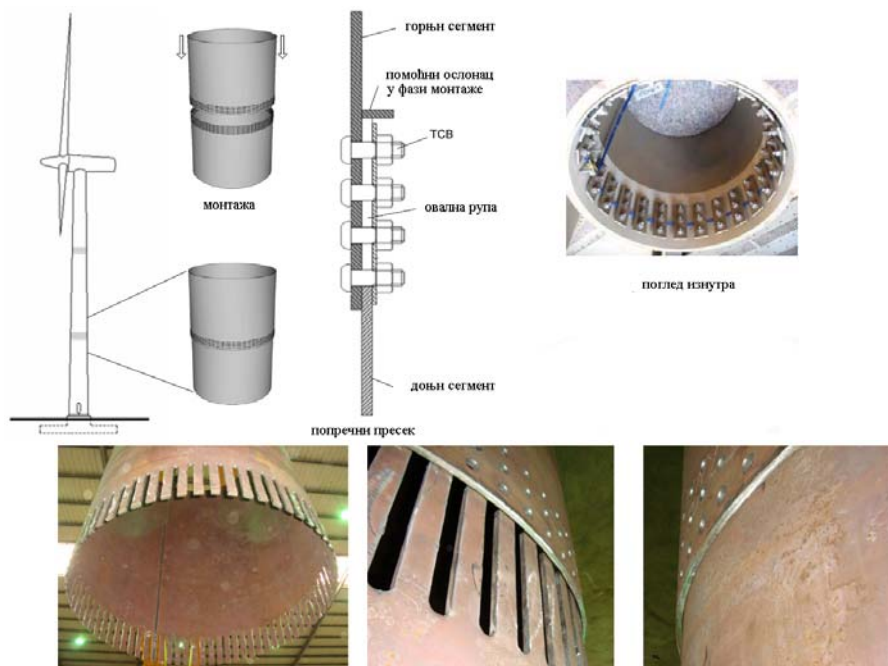
то на месту осе завртња. У овом случају носивост чеоне плоче на савијање умањена је због редуције пресека рупом за спојно средство. Тип лома (Е) карактерише појава пластичног зглоба ван осе завртња, на месту непосредно испод средине належуће површине подлошке. У овом случају, носивост споја се одређује са бруто карактеристикама чеоне плоче.

#### 4.2 Монтажни наставак са тарним спојем

Монтажни наставак са тарним спојем представља иновативно решење (алтернатива монтажним наставцима са чеоном плочом) за повезивање монтажних комада стуба ветрогенератора у једну целину (слика 11).

Овај концепт карактерише:

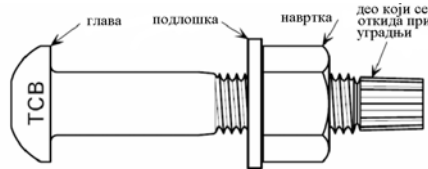
- примена завртњева са контролисаном силом преднапрезања „ТСВ“ (*Tension Control Bolts*) који се притежу увртањем навртке са унутрашње стране стуба,
- завртњеве су претходно уграђени у нормалне рупе на горњем сегменту стуба,
- због једноставног повезивања елемената стуба користе се дуге, отворене овалне рупе на доњем сегменту стуба.



Слика 11 – Монтажни наставак стуба ветрогенератора са тарним спојем – концепт  
Figure 11 – Friction connections - concept

Завртњеве са контролисаном силом преднапрезања (ТСВ), (слика 12) користе се за монтажне наставке ветрогенератора због низа предности које имају у односу на обичне високовредне завртњеве. Њихова примена на нашим просторима је још увек јако мала, углавном на објектима који се увозе као готови производи (резервоари и слично) али је

несумњиво да ће врло брзо наћи ширу примену (за то је неопходно усвајање пратећих стандарда).



Слика 12 – „TCB“ пре уношења силе преднапрезања  
Figure 12 – TCB prior to pretensioning

Ови завртњевци су патентирани у Јапану. Њихове основне предности су:

- релативно једноставна уградња помоћу електричних уређаја за чије руковање није потребна квалификована радна снага,
- уградња са једне стране везе (друга страна не мора да буде приступачна),
- висока класа чврстоће „S10T“, што одговара класи чврстоће 10.9,
- једноставније уношење силе преднапрезања.

Према EN 1993-1-8 [3], овакве везе спадају у категорију спојева „С“ - везе које су отпорне на проклизавање при граничном стању носивости. То значи да мора бити испуњен услов да је прорачунска сила смицања у завртњу мања од његове прорачунске носивости на проклизавање за гранично стања носивости.

За примену оваквих веза код монтажних наставака ветрогенератора прорачун је модификован, па се носивост одређује као најмања од следећих вредности:

- граничне носивости на проклизавање једног реда завртњева (углавном три комада),
- еластичне носивости нето пресека плашта,
- носивости на замор.

Због употребе овалних рупа носивост на притисак по омотачу није потребна. Коефицијент трења у контактаној површини је веома важан за правилно функционисање оваквих веза. Код ветрогенератора се тарне површине најчешће припремају пескарењем и штите цинк-силикатним премазима што обезбеђује коефицијент трења  $\mu=0,40-0,50$ .

## 5 ЗАКЉУЧАК

Потенцијал ветра у нашим крајевима пружа велике могућности за производњу електричне енергије. Имајући у виду савремене тенденције за коришћење еколошких и обновљивих извора енергије питање је дана када ће почети масовна израда ветропаркова и у нашим крајевима. У Србији је већ у току пројектовање првих ветропаркова у околини Вршца, где су примењени челични цилиндрични стубови. Пројектовање челичних конструкција ветрогенератора је релативно нова конструктерска дисциплина у нашим оквирима и свакако захтеван инжењерски посао. У раду су презентоване неке особености које се односе на анализу оптерећења и прорачунске ситуације које се примењују за пројектовање стубова ветрогенератора од било којег материјала, односно челика и бетона. За челичне цилиндричне стубове су обрађени најзначајнији аспекти прорачуна граничних стања, као путоказ за будуће пројектанте.

## 6 ЛИТЕРАТУРА

- [1] *International Standard IEC 61400-1, Wind turbines-Part 1: Design requirements / International Electrotechnical Commission, Brussels, Belgium*
- [2] *EN 1993-1-6 (2007). Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-6: Strength and stability of shell structures / CEN, 2007., Brussels, Belgium*
- [3] *EN 1993-1-8 (2005) Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints / CEN, 2005., Brussels, Belgium*
- [4] *EN 1998-1 (2004) Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance —Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings/ CEN, 2004., Brussels, Belgium*
- [5] *EN 1090-2 (2003) Execution of steel structures and aluminium structures – Part 2: Technical requirements for steel structures / CEN, July 2008., Brussels, Belgium*
- [6] *EN 1993-1-9 (2005). Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue / CEN, 2005., Brussels, Belgium*
- [7] *Wind Towers – Design of flange ring connection / N. Fric, M. Pavlović, Z. Marković, D. Buđevac // 14<sup>th</sup> International Symposium MASE, 2011., Struga, Macedonia, p.259-264*
- [8] *Wind Towers – Design of friction connections for assembling sections of tubular steel towers / N. Fric, B. Gligić, J. Dobrić, Z. Marković // 4. Internacionalni naučno-stručni skup Građevinarstvo-nauka i praksa, 2012., Žabljak, Crna Gora, p.000-000*
- [9] *Training course – Wind towers: Design by FEM and technological futures / 2011., Coimbra, Portugal*
- [10] *Wind in power: 2011 European statistics / EWEA – The European Wind Energy Association, Februar 2012*