

ПРОРАЧУН ФУНДИРАЊА ТЕМЕЉА ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

Јовица Шијаковић¹
Мирослав Бурзановић²

УДК: 621.548.4:624.151

DOI: 10.14415/konferencijaGFS2014.136

Резиме: У последње време све више Инвеститора се одлучује да у Србији гради ветропаркове (Пландиште, Али Бунар, Мали Бунар, Чибук 1, Чибук 2, Ковачица, итд. Како су у питању капитални објекти, посебне специфичности (велики темељи, високи стубови) који досада код нас у Србији нису били предмет истраживања и пројектовања, то смо сматрали интересантним приказати један пример фундаирања таквог објекта.

Кључне речи: Истраживања, геотехника, модели, прорачуни, слегање

1. УВОД

Према Пројектном задатку предвиђени су генератори снаге до 3,2MW са Лопатицама максималне дужине до 60м и максималном укупном висином до 190м. За конструкцију стубова биће примењени челични стубови максималне висине до 120м. Ветротурбина мора да задовољава „класу ветра“ (Wind Class) IEC IIIА према стандарду IEC 61400. За сва стубна места усвојена је анализирана осмоугаона темељна плоча са пречником описане кружнице од $D=20,0m$

2. РЕШЕЊЕ ТЕМЕЉЕЊА ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

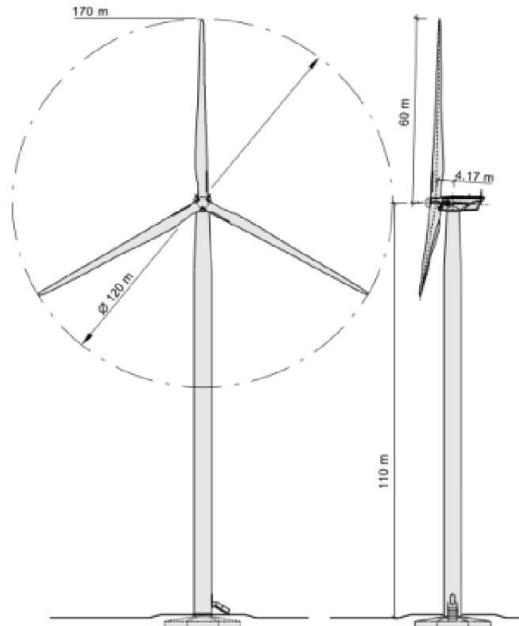
Прорачун и анализа спроведена у Идејном пројекту показала је неопходност дубоког фундаирања. На основу анализе предложене темељне конструкције у условима плитког фундаирања на предметним стубним местима закључује се да она не задовољава услове у погледу стабилности коју дефинише наш Правилник. Уз то, у погледу потребне крутости према обртању темељна конструкција или не задовољава или једва да задовољава услов произвођача о минималној крутости.

Да би се задовољили сви услови изнети у претходним разматрањима, темељна конструкција за случај плитког фундаирања требало би да има знатне димензије. Наиме, тек за пречник темељне плоче од 38,4m постиже се задовољење услова које захтева Правилник у смислу максимално допуштеног ексцентрицитета резултанте

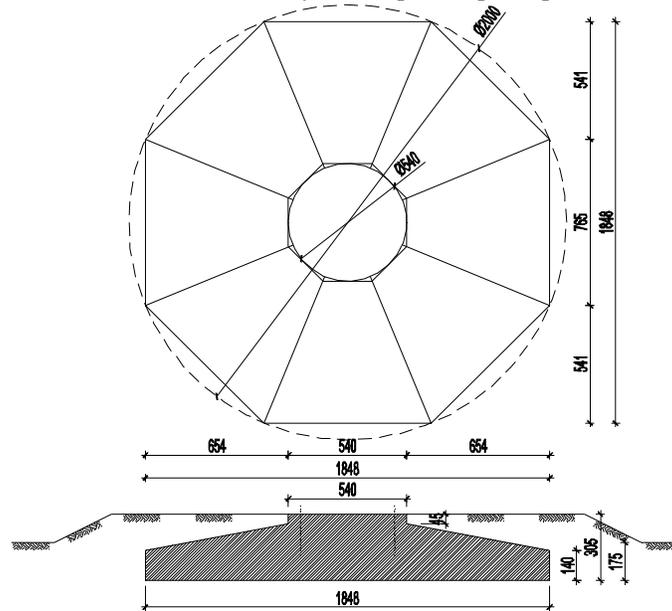
¹ Јовица Шијаковић дипл.инж.геол.Геопут доо Београд

² Мирослав Бурзановић дипл.инж.грађ. Геопут доо Београд

сила. При томе, у односу на анализирану темељну конструкцију потребне количине бетона се увећавају са 711 на 2025m³, односно ископ тла са 1075 на 3187m³.Из свега овога закључује се да плитко фундарање није адекватно решење за темељење конструкције стубова ветрогенератора на предметним стубним местима.



Сл.1 Изглед стуба ветрогенератора



Сл.2 Изглед темеља ветрогенератора

За случај дубоког фундаирања извршена је анализа већег броја варијантних решења темељне плоче која је уједно и наглавна плоча шипова.

При томе су варирани како пречници плоче, тако и тип, пречници и број шипова на које се темељна плоча ослања. Разматрани су шипови пречника $\varnothing 600$, $\varnothing 800$ и $\varnothing 1000$ мм различитих дужина.

Након упоредне анализе варијантних решења као прве итерације усвојено је решење за крајњу анализу која се изводи програмом Tower помоћу методе коначних елемената.

За сва стубна места усвојена је анализирана осмоугаона темељна плоча са пречником описане кружнице од $D=20,0$ м која одговара ветротурбини GE 2.5-120 DFIG 110m NN IEC S LM58,7 CW са стубом висине 110м.

Темељ је облика зарубљене пирамиде са средишњим делом висине $X=3050$ мм, док је на крајевима висина $x=1400$ мм.

Пречник средишњег дела у кога се уграђује анкерни блок - кавез износи $d=5400$ мм. Надвишење анкерног блока у односу на горњу ивицу плоче износи $\Delta x=450$ мм.

Прорачун оптерећења од сопствене тежине конструкције се рачуна са запреминском тежином бетона од $\gamma_b=25$ кН/м³.

За запреминску тежину материјала којим се засипа темељна конструкција користи се вредност од $\gamma_{tла}=20$ кН/м³.

Усвојена дубина фундаирања износи $D_f=1,75$ м, а дебљина слоја којим се темељ засипа износи $\Delta t=0,45-1,30$ м.

За варијанту овакве темељне плоче прорачунати су сви релевантни параметри носивости и стабилности.

У односу на број шипова усвојена су три типа темељне конструкције: са 16 (тип 1), 24 (тип 2) и 40 (тип 3) шипова, док се дужина шипова креће од 13,5 до 21м, зависно од локације ветротурбине.

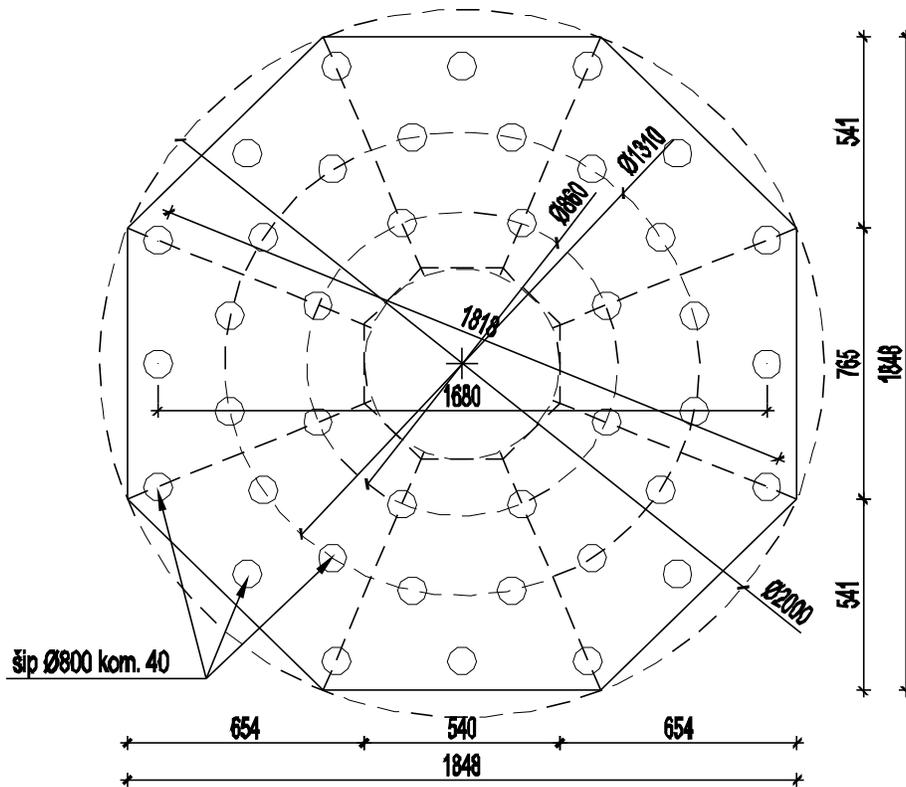
Као прорачунски модел за одређивање статичких утицаја у плочи и шиповима усвојена је серија концентричних осмоугаоних плоча различитих пречника и дебљина којима се симулира линеарна промена дебљине темељне плоче, која се ослања на еластичне замењујуће опруге на местима шипова и еластични површински ослонац (нелинеарни) којим се замењује утицај тла.

На основу карактеристика тла (резултати ЦПТ и СПТ опита) одређени су параметри динамичке крутости шипа и темељног тла у вертикалном односно хоризонталном правцу.

Вертикалне динамичке крутости шипова (замењујућих еластичних опруга) срачунате су према Рандолпх & Вротх-у засебно за сваку локацију ветротурбине. Прорачун бочне крутости урађен је према једначини проф. Весића.

Прорачуном овако дефинисаног модела темељне конструкције добијају се неопходни рачунски утицаји, померања и напони на основу којих су процењени услови стабилности и контролисане хоризонталне и ротационе динамичке крутости темељне конструкције.

Добијени су следећи резултати, на примеру ветротурбине бр.6 (тип 3 са 40 шипова).сл.3

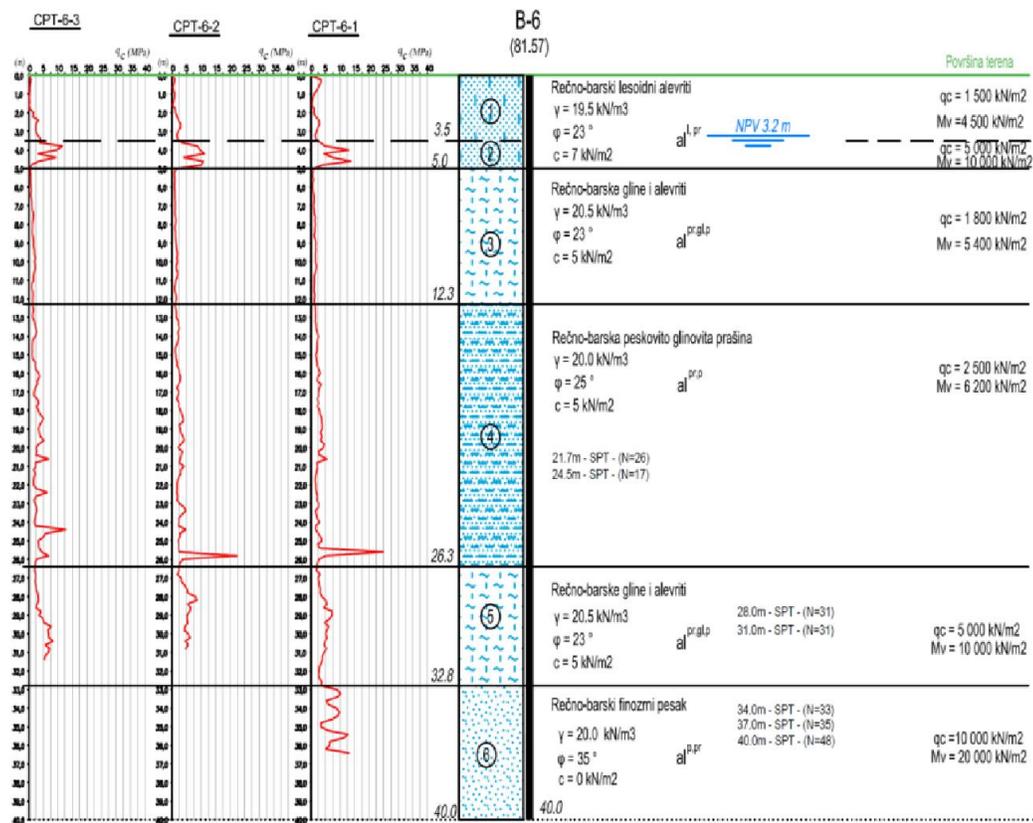


Сл.3 Положај шипова код темеља ветрогенератора ТИП-3 са 40 шипова

У наставку текста због ограниченог простора а боље прегледности, дати су резултати прорачуна карактеристичног стуба ветрогенератора WT-6 у виду табела, дијаграма и модела.

Табела параметара тла у зони ветрогенератора бр.6

Stub br.6	Oznaka sredine	Kota (mnv)	Dubina (m)	Debljina sloja (m)	NPV (hw /dat)	γ (kN/m ³)	φ (°)	c (kN/m ²)	Mv (kN/m ²)	q_c (kN/m ²)
			81.57	0.0	///	3.2 / 10.2012	///	///	///	///
al ^{L,pr}	1	78.07	3.5	3.50	19.5		23.0	7.0	4500	1500
	2	76.57	5.0	1.50					10000	5000
al ^{pr,gl,p}	3	69.27	12.3	7.30	20.5		23.0	5.0	5400	1800
al ^{pr,p}	4	55.27	26.3	14.00	20.0		25.0	5.0	6200	2500
al ^{pr,gl,p}	5	48.77	32.80	6.50	20.5		23.0	5.0	10000	5000
al ^{p,pr}	6	41.57	40.00	>7.2	20.0	35.0	0.0	20000	10000	



Сл.4 Геотехнички модел терена у зони ветрогенератора бр.6

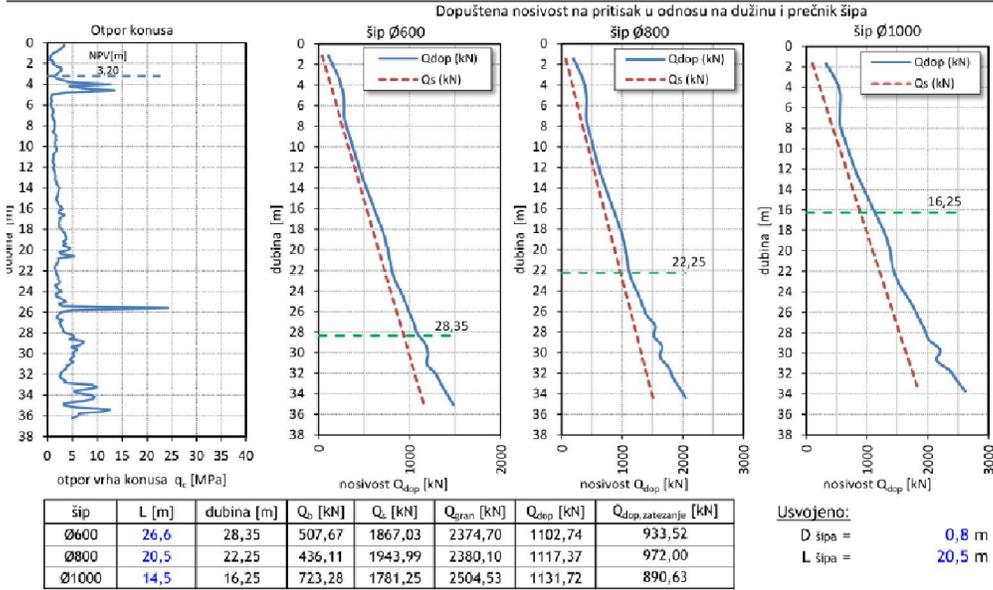
Vetrogenerator WT 06 Nosivost šipa na aksijalni pritisak

žušotina br.6 kota terena: 81,57 mmm NPV [m]= 3,2 D_i [m]= 1,75

Tip šipa: bušeni Metod proračuna nosivosti šipa: LCPC CPT metod (Bustamante & Gianselli, 1982)

tip omotača: Grupa IA FS za bazu: 3,0

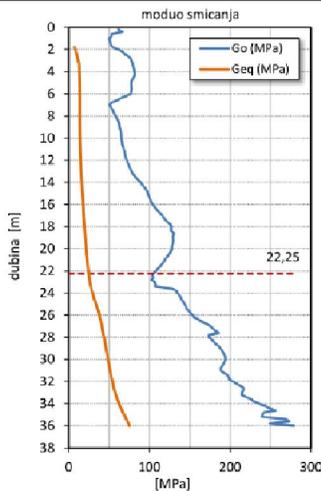
tip baze: Grupa I FS po omotaču: 2,0



Vetrogenerator WT 06 Procena vertikalne krutosti šipa

Metod proračuna: Randolph & Wroth, 1979

L _{šipa} = 20,5 m	r ₀ = 0,40 m	G ₀ = 24,8 MPa	γ = 0,5 % deformacija smicanja
D _{šipa} = 0,8 m	r _b = 0,40 m	G ₁ = 24,8 MPa	I _p = 15 % indeks plastičnosti
D _{baze} = 0,8 m	r _m = 24,95 m	G _{L/2} = 17,3 MPa	
E _s = 31,5 GPa	ζ = 4,133	ρ = 0,696	
ν = 0,3	λ = 1269,578	η = 1	
	μL = 1,001	ξ = 1	



dubina [m]	G ₀ [MPa]	f(γ ₀) = G/G ₀	G _{eq} [MPa]
1,75	54,4	0,14	7,4
3,2	79,1	0,16	12,8
3,5	79,9	0,16	13,1
5,5	77,9	0,18	13,7
12,3	73,7	0,21	15,1
22,25	104,7	0,24	24,8
26,3	157,8	0,25	39,1
32,8	216,3	0,26	57,0
36	278,6	0,27	75,4

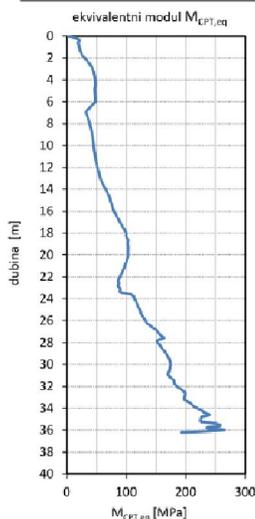
G₀ - početni moduo smicanja
 G_{eq} - ekvivalentni moduo smicanja:
 G_{eq} = f(γ₀) x G₀

krutost k_{v,3} = 441505 kN/m

Vetrogenerator WT 06

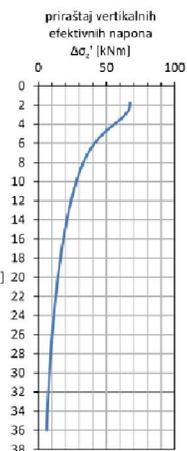
Procena vertikalne krutosti podloge temeljne ploče

B =	16,82 m	$\Delta z =$	0,5 m - debljina računskog sloja
L =	16,82 m	$\Delta\sigma_z/\sigma_{z0} =$	20 % - granica integracije sleganja
$D_f =$	1,75 m - dubina temeljenja	$\gamma_w =$	10 kN/m ³ - zapreminska težina vode
q =	100 kN/m ² - bruto kontaktni napon		
$q_{b0} =$	67,31 kN/m ² - bruto kontaktni napon		



sloj h [m]	dubina [m]	γ [kN/m ³]	$M_{CPT,eq}$ [MPa]
3,5	1,75	18,7	13,5
1,5	3,2	18,9	31,5
7,3	3,5	19,3	44,7
14	5	19,2	47,9
6,5	12,3	18,4	43,6
3,2	26,3	19,1	91,0
	32,8	20,0	165,9
	36	20,4	221,4

$M_{CPT,eq}$ - ekvivalentni modul stižljivosti dobijen na osnovu G_{eq}
 Napomena: računska vrednost $M_{CPT,eq}$ je osrednjena na debljini sloja



krutost $k_{v,ta} = 10304$ kN/m

Vetrogenerator WT 06

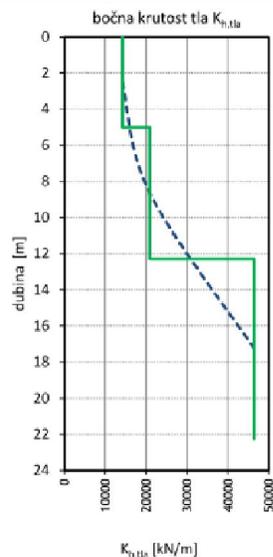
Procena bočne krutosti tla

Metod proračuna: prema prof. Vesiću

$D_{šipa} =$	0,8 m
$E_s =$	31,5 GPa
$I_s =$	0,02011 m ⁴
$\nu =$	0,3

sloj h [m]	dubina [m]	$M_{CPT,eq}$ [kPa]	$E_{ta,eq}$ [kPa]	$K_{v,ta}$ (kN/m ³)	L (m)	K_x (kN/m)
5	5	30504	22660	14230	1	11384
7,3	12,3	43556	32356	20931	1	16745
9,95	22,25	91004	67603	46502	1	37202

$E_{ta,eq}$ - ekvivalentni modul elastičnosti tla
 K_x - krutost zamenjujuće opruge
 L - pripadajuća dužina šipa



ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шијаковић, Ј., Бурзановић, М.: *Геотехничка документација* (Архива Геопута доо Београд) **2013**.

CALCULATION OF FOUNDATION OF WIND TURBINES

Summary: *Lately, more and more investors are choosing to build wind farms in Serbia (Plandište, Ali Bunar, Mali Bunar, Čibuk 1, Čibuk 2, Kovačnica, etc.) As these facilities are very special and capital ones (large foundations, tall columns), which so far here in Serbia were not the subject of research nor design, we considered interesting to show an example of foundation engineering of one such facility.*

Keywords: *Research, model, calculations, subsidence, foundation, pile*