

frames and plates with semi-rigid connections from the view of the second order theory and stability analysis” and TR36028 for project cycle 2011-2014, “Development and improvement of methods for analyses of soil-structure interaction based on theoretical and experimental research” of the research organization The faculty of civil engineering and architecture of University of Nis.

REFERENCES

- [1] Farkas J, Jármai K.: *Analysis and optimum design of metal structures*. Balkema, Rotterdam, **1997**.
- [2] Anđelić N, Milošević-Mitić V.: An approach to the optimization of thin-walled cantilever open section beams. *Theor Appl Mech*, **2007.**, vol. 34, № 4, p.p. 323–340.
- [3] Pavlović, G., Savković, M., Zdravković, N.: Optimizacija kutijastog poprečnog preseka glavnog nosača mosne dizalice prema kriterijumu bočne stabilnosti, *IMK-14 - Istraživanje i razvoj*, **2011.**, vol. 17, №. 4, p.p. 1-8.
- [4] Pavlović, G., Gašić, M., Savković, M. & Zdravković, N. Komparativna analiza lokalne i bočne stabilnosti kao funkcije ograničenja pri optimizaciji kutijastog preseka glavnog nosača mosne dizalice, *IMK-14 - Istraživanje i razvoj*, **2012.**, vol. 18, № 1, p.p. 11-18.
- [5] Anđelić, N.M., Tankozidi otvoreni poprečni preseki izloženi ograničenoj torziji, *FME Transactions*, **2012.**, vol. 40, № 2, p.p. 93-98.
- [6] Buđevac, D.: *Metalne konstrukcije*, Građevinska knjiga, Beograd, 1997. p.p. 498.
- [7] Anđelić, N., Milošević-Mitić, V.: Jedan pristup optimizaciji tankozidnih konzolnih nosača otvorenih poprečnih preseka, *Theoretical and Applied Mechanics*, **2007.**, vol. 34, № 4, p.p. 323-340.
- [8] Anđelić, N.: Jedan pristup optimizaciji tankozidnih otvorenih poprečnih preseka izloženih ograničenoj torziji, *FME Transactions*, **2007.**, vol. 35, № 1, p.p. 23-28.
- [9] Anđelić, N.: Složeno opterećeni tankozidi nosač I-profila - optimizacija pri naponskom ograničenju, *FME Transactions*, **2003.**, vol. 31, № 2, p.p. 55-60.
- [10] Mijajlović, R., Marinković, Z.: *Dinamika i optimizacija dizalice*, monografija katedre za transportnu tehniku i logistiku, Niš, **2002.**, p.p. 1-13.
- [11] SRPS U.E7.101:1991

ПОВЕЋАЊЕ РАСПОНА ПОРТАЛНОГ КРАНА ПРЕДУЗЕЋА ПУТ ИНЖЕЊЕРИНГ НИШ

Резиме: Променом намене порталног крана рударско-грађевинског предузећа Књажевац из Књажевца и његовом употребом у предузећу Пут Инжењеринг Ниш јавила се потреба за повећањем распона главних носача. У раду се разматра утицај повећања распона главних двогредних I носача на стабилност, носивост и деформабилност порталног крана. Приказани су добијени резултати за првобитно и новопројектовано стање конструкције као и предложене мере ојачања.

Кључне речи: Портални кран, бочна торзиона стабилност, ојачање.

ПРОЈЕКТОВАЊЕ ТЕМЕЉА ВЕТРОТУРБИНА - ОПШТА РАЗМАТРАЊА И КРИТЕРИЈУМИ

Мирјана Вукићевић¹

УДК: 621.548.4:624.151

DOI: 10.14415/konferencijaGFS2014.127

Резиме: Ветрогенератори спадају у специфичне динамички оптерећене грађевинске објекте. Темељи ветротурбина морају поред уобичајених пројектних захтева да задовоље и специфичне услове везане за трајност (замор), деформације као и динамичку стабилност. У Србији не постоји техничка регулатива која се односи на овај тип конструкције, зашта постоји потреба јер се последње две године интензивно раде пројекти ветропаркова. Рад има за циљ, позивајући се на светску техничку регулативу и искуства, да упозна стручну јавност са принципима и критеријумима пројектовања темеља ветротурбина.

Кључне речи: Ветрогенератори, финансирање, технички услови

1. УВОД

Кратак опис рада ветро турбина

Концепт ветротурбина или ветрогенератора је ефикасно претварање кинетичке енергије ветра у електричну енергију.

Модерне турбине се могу класификовати као турбине са пропелером од две или три лопатице и хоризонталном осом.

Све у мрежи повезане турбине су данас пројектоване као ротори типа пропелера монтиране на хоризонталну осу на врху вертикалне куле (стуба). Углавном се раде „up wind“ ротори окренути према ветру и захтевају скретни механизам који држи осу ротора у правцу ветра.

Турбине су пројектоване да произведу што је могуће јефтинију електричну енергију. У складу с тим турбине су пројектоване тако да се добија максимална снага за ветар брзине око 15m/sec [1]. Постизање максималне снаге за веће брзине није рационалан приступ јер су такви ветрови ретки.

Међутим, у случају јачих ветрова неопходно је изгубити део прекомерне енергије да би се избегло оштећење на турбини.

Због тога је потребна нека врста контроле снаге: оптимизација снаге за мале брзине и ограничење снаге за велике брзине.

Снага као и висина савремених ветротурбина се вишеструко повећала у последњих 25 година: од 30kW и висине 30м до 10MW и висине преко 100м [2].

¹ Доц. др Мирјана Вукићевић, дипл.инж. грађ., Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 011 3218 569, е – mail: mirav@grf.bg.ac.rs

2. ТЕХНИЧКА РЕГУЛАТИВА - ПРОПИСИ И СТАНДАРДИ

Пројектовање ветротурбина као специфичних објеката је регулисано сетом интернационалних стандарда комисије IEC 88 (Internationale Electrotechnical commission) са ознаком IEC 6400 (од IEC 6400-1 до IEC 6400-27) који дефинишу техничке захтеве и услове. Поред ових стандарда за пројектовање се користи и упуство DNV/RISØ: *Guidelines for design of wind turbines* у издању *National Laboratory for Sustainable Energy, Denmark*. У оквиру IEC стандарда постоје стандарди за мале турбине (IEC 6400-2) и приобалне - "offshore" (IEC 6400-3) које имају своје специфичности и на које се рад не односи.



Слика 1 Ветропарк

3. ТЕМЕЉИ

3.1 Геотехнички услови

За пројектовање темеља турбина је врло битно да поред оптерећења буду добро сагледани и интерпретирани сви аспекти геотехничких утицаја. Важност проистиче из врло битне улоге темеља и тла у обезбеђењу носивости и стабилности објекта, што се истиче и у упуству за пројектовање ветротурбина, где се посебна пажња посвећује геотехничким условима [1]. У њему се врло децидно наводе све неопходне врсте теренских и лабораторијских испитивања тла као и информације које се добијају интерпретацијом резултата (носивост, стабилност, слегање, крутост темеља, могућност дренажа, ниво подземне воде). Такође се дају препоруке за минимални обим геотехничких испитивања.

3.2 Оптерећења

Случајеви оптерећења

Ветротурбине су динамички оптерећени објекти где главно динамичко оптерећење настаје услед дејства ветра. Цео динамички систем ротор - генератор - кула -

темељ треба да у току експлоатације обезбеди носивост и стабилност. За димензионисање елемената конструкције турбине анализирају се одређен број релевантних случајева оптерећења [1]. Случајеви оптерећења су комбинација могућих пројектних ситуација и различитих спољашњих услова. Пројектна ситуација углавном садржи услове при различитих операцијама у току изградње и експлоатације турбине.

Следеће комбинације одређују минимални број релевантних комбинација:

- нормална операција и нормална спољашња ситуација
- нормална операција и екстремна спољашња ситуација
- квар и одговарајућа спољашња ситуација (може бити укључена и екстремна)

Оптерећење темеља

За меродавне комбинације оптерећења, за прорачун темеља дају се следеће компоненте оптерећења:

- M_{res} - екстремни резултујући момент савијања
- M_t - одговарајући момент торзије
- F_{res} - одговарајућа резултујућа смичућа сила
- F_z - одговарајућа вертикална сила

Комбинација релевантне за прорачун су:

- 1) Резултујуће екстремно оптерећење
 - Карактеристично екстремно оптерећење за нормалне случајева оптерећења
 - Карактеристично екстремно оптерећење за абнормалне случајева оптерећења
- 2) Екстремно оптерећење у току нормалних операција

Поред наведених комбинација темељи се димензионишу и према оптерећењу замора, односно цикличном оптерећењу које изазива кумулативно оштећење материјала. Обично се ово оптерећење дефинише као еквивалентно оптерећење за одређени материјал и еквивалтни број циклуса [1].

Као улазне податке за прорачун темеља, релевантне комбинације и компоненте оптерећења даје испоручилац турбина за одређени тип турбине и локацију ветропарка.

3.3 Типови темеља

Ветроурбине се фундирају на различитим типовима темеља чији избор зависи од геотехничких услова, развијености и доступности различитих технологија извођења као и економских параметара.

Основни типови су плитки темељи и темељи на шиповима, а могу се изводити и други типови.

Због једноставности извођења уобичајена је примена плитких темеља у облику плоче кружне или многоугаоне (најчешће осмоугаоне) основе. У суштини је то гравитациони темељ, довољно масиван и укопан да спречи претурање турбине.



Слика 2. Темељ ветротурбине осмоугаоне основе

Овај тип темеља захтева довољно носиве површинске слојеве тла и низак максимални ниво подземне воде.

Када су носећи слојеви тла на већој дубини примењују се темељи на шиповима а не ретко и плитки темељи на побољшаном тлу.

У случајевима када је стена близу површине терена могу се радити плитки темељи мањих димензија у комбинацији са анкерима.

У раду је стављено тежиште на критеријуме и захтеве за плитко фундарање.

3.4 Критеријуми за пројектовање плитких темеља

Најважнији критеријуми за пројектовање темеља су [1], [3]:

- а) Критеријуми према граничном стању носивости
 - носивост тла
 - стабилност (претурање и клизање)
 - одизање темеља
- б) Критеријуми према граничном стању употребљивости
 - слегање (тотално и диференцијално)
 - динамичка крутост (ротациона и хоризонтална)
 - одизање темеља
 - трајност (замор материјала)

3.4.1 Гранично стање носивости

Носивост тла

За одређивање носивости тла испод темеља треба користити изразе за ексцентрично и косо оптерећење, јер главна оптерећења потичу од ветра. С обзиром да се према

нашим прописима [4] одређује дозвољена носивост коришћењем парцијалних параметара отпости тла φ' и c' , она се упоређује са нефакторисаним резултујућим екстремним пројектним оптерећењем. У случају засићеног ситнозрног тла носивост се одређује за недрениране услове (са параметром чврстоће C_u).

Стабилност

Прорачун стабилности се односи на поређење нефакторисаног момента претурања и хоризонталне силе и отпорног момента и смичуће отпорности. Минимални фактор сигурности износи $F_s=1,5$ [3], а у неким референцама $F_s=2-3$ [5]. Претурање се рачуна у односу на ивицу темеља. Стабилност на клизање је обично задовољена уколико је задовољена за петурање.

Одизање темеља

У већини упуштава произвођача турбина допушта се до 50% непритиснуте површине при нефакторисаном резултујућем екстремном оптерећењу [6].

3.4.2 Гранично стање употребљивости

Слегање

Дозвољено слегање зависи од примењених прописа, а уобичајене су 5cm за тотално слегање и 2,5cm за диференцијално слегање за оптерећења при нормалном раду турбине.

Нагињање

Уобичајени услов према упуштвима произвођача [6] је дозвољено максимално нагињање $\delta=0,17^\circ$. Уколико је диференцијално слегање у дозвољеним границама овај услов је испуњен.

Одизање

За глиновита тла и тла подложна деградацији услед цикличног оптерећења се не толерише одизање темеља при нормалном раду ветрогенератора (екстремно оптерећење у току нормалних операција), док се за невезана тла одређено одизање може допустити [6].

Динамичка крутост темеља

Да би се избегла резонанца као и прекомерно померање врха куле, сопствена фреквенција темеља мора бити довољно далеко од сопствене фреквенције куле. За савремене турбине фреквенције се крећу између 0,23-0,52Hz за мање турбине и 0,1-0,3Hz за веће. За сопствену фреквенцију темеља се прописује да буде између 1,1 до 2 пута већа, што се обезбеђује одговарајућом минималном динамичком крутошћу. Произвођачи турбина прописују минималне ротационе и одговарајуће минималне хоризонталне крутости темеља у односу на одређени тип турбине.

Крутости темеља зависе од параметара тла (смичућег модула G), димензија темеља и дебљине деформабилног слоја [1]. Модул смицања G је нелинеарна функција смичућих деформација и опада са порастом смичућих деформација од иницијалног модула G_0 (G_{\max}) који се одређује за ниво деформација од око 10^{-6} . Иницијални модул G_0 се може одредити директно мерењем из теренских и лабораторијских опита и индиректно преко корелација са другим параметрима тла. Модул смицања G за одређивање динамичке крутости темеља се одређује за ниво очекиваних смичућих деформација: од оптерећења ветром 10^{-3} - 10^{-2} и сеизмичког оптерећења 10^{-2} - 10^{-1} [1].

Трајност

Трајност темеља за предвиђени век трајања ветротурбина (20 год, око 10^9 циклуса) се обезбеђује одговарајућом носивошћу на замор бетона и арматуре. Оптерећење замора се дефинише преко средњег оптерећења у комбинацији са еквивалентним оптерећењем или спектром оптерећења замора (преко Markov матрице) [1].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Guidelines for Design of Wind Turbines*, 2nd Edition, Det Norske Veritas, Copenhagen and Wind Energy Department, Risø National Laboratory, **2002**.
- [2] Faber, T., Steck, M.: *Windenergieanlagen zu Wasser und zu Lande: Entwicklung und Bautechnik der Windenergie*, **2005**, Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH, Hanburg
- [3] Morgan, K., Ntambakwa E., *Wind Turbine Foundation Behaviour and Design Considerations*, **2008**, *Proceeding Awea Windpower Conference*, Houston
- [4] *Pravilnik o tehničkim normativima za temeljenje građevinskih objekata*, (Sl. I. SFRJ 015/1990)
- [5] Das, B. M., *Principles of Foundation Engineering*, **2007**, 6th ed. New Delhi: Cengage Learning.
- [6] Ben-Hassine, J. and Griffiths, D.V. *Reliability Based Design of Foundations Subjected to Combined Loading with Applications to Wind Turbine Foundations*, *Proceedings of the 11th International Congress on Numerical Methods in Engineering and Scientific Applications*, **2012**, CIMENICS 2012, (eds E. Davila et al.), Pub. Sociedad Venezuela de Metodos Numericos en Ingenieria, pp. CI 17-23.

WIND TURBINE FOUNDATION DESIGN -GENERAL CONSIDERATIONS AND CRITERIA

Summary: *Wind turbines are not typical dynamical loaded structures. Foundations of the turbines should be satisfy the common design criteria and specific requirements of durability, deformations and dynamic stability. In Serbia there are not technical standards for this type of structures. Aim of the paper is introduce civil engineers with the principles and criteria of the design of wind turbine foundations.*

Keywords: *Wind turbines, foundations, technical requirements*