

ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ЧЕЛИЧНОГ СФЕРНОГ РЕЗЕРВОАРА ВИСИНЕ $H=44\text{m}$ ПРЕМА ЕВРОКОДУ

Мирослав Т. Бешевић¹

Смиља Живковић²

Мартина Војнић Пурчар³

УДК: 624.953 : 693.814

DOI: 10.14415/zbornikGFS30.05

Резиме: У овом раду се приказује прорачун челичног водоторња са сферним резервоаром за воду висине $H=44\text{m}$. Сферни резервоар се налази на врху челичног цевастог стуба пречика $\Phi=128\text{cm}$. Конструкција водоторња моделирана је помоћу програмског пакета ABAQUS, чиме је добијена реална слика напонских и деформацијских стања у свим тачкама плашта резервоара и цевастог стуба. Анализа оптерећења конструкције извршена је на основу Европских стандарда, при чему је посебна пажња посвећена утицају земљотреса на сферни резервоар.

Кључне речи: Еврокод, челични сферни резервоар, сеизмичко оптерећење

1. УВОД

Основна намена резервоара је складиштење течности и плиндова, али се њихова примена дефинише у односу на место и врсту материјала који се складишти. Резервоари се најчешће изграђују у облику сфере, цилиндра или правоугаоног облика, при чему највећу примену имају сферни резервоари због минималне количине челика потребне за њихову конструкцију [1]. Конструкције већих резервоара, посебно сферних облика, претежно су иностраног порекла, те се домаћи стручни кругови најчешће задовољавају проглашавањем оваквих објеката опремом која не подлеже грађевинској техничкој регулативи или израдом неке врсте нострификације иностране документације, што не би смело прихватити као погодан начин решавања питања везаних за ову или друге области металних конструкција [2]. Из тог разлога, у оквиру овог рада посебна пажња посветиће се челичним резервоарима, сферних облика, као и начину димензионисања истих применом Европских стандарда [3], [4], [5].

Поред уобичајених дејстава од сталног и временог оптерећења (сопствена тежина конструкције, складишни материјал), приликом прорачуна сферних резервоара треба узети у обзир и утицај хоризонталних сила ветра, а посебно земљотреса,

¹ Проф. др Мирослав Т. Бешевић, дипл. инж. грађ., Универзитет у Новом Саду, Грађевински факултет Суботица, Козарачка 2а, Суботица, Србија, тел: 024 554 300, е – mail: miroslav.besevic@gmail.com

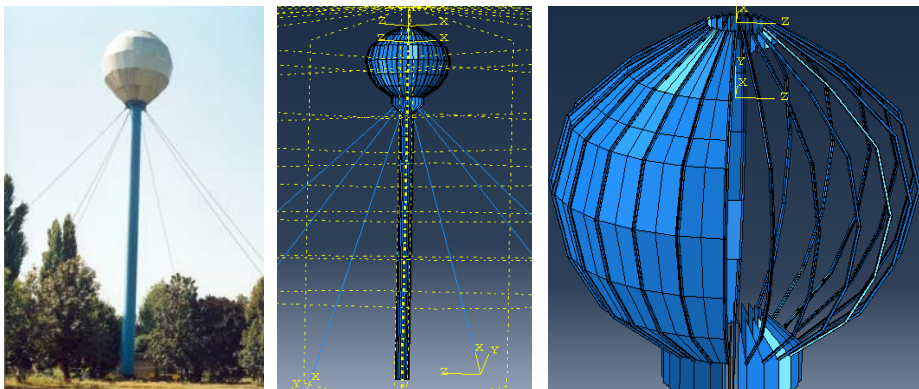
² Асистент Смиља Живковић, мастер. инж. грађ., Универзитет у Новом Саду, Грађевински факултет Суботица, Козарачка 2а, Суботица, Србија, тел: 024 554 300, е – mail: zivkovicsmilja@gmail.com

³ Доцент др Мартина Војнић Пурчар, мастер. инж. грађ., Универзитет у Новом Саду, Грађевински факултет Суботица, Козарачка 2а, Суботица, Србија, тел: 024 554 300, е – mail: vojnicmartina@gmail.com

нарочито уколико складиштени материјал спада у категорију опасних материја која доноси потенцијалну опасност по јавну безбедност. Утицај сеизмичких сила на сферне резервоаре је приказана за већину значајнијих земљотреса, где су предложене традиционалне мере у виду повећања дебљине зидова резервоара и чврстоће челика. У новије време чешће се примењују разне методе изолације приликом изградње резервоара с циљем повећања сеизмичког пригушења, односно смањења сеизмичког одговора конструкције [6].

2. ОПИС КОНСТРУКЦИЈЕ И АНАЛИЗА ОПТЕРЕЋЕЊА

Анализа је спроведена за челични водоторањ обрађен у ранијем раду [7], чија је запремина $V=200\text{м}^3$ и укупна висина 44 м. Конструкцију водоторња сачињавају: стуб, резервоар за воду и сајле за стабилизацију, Слика 1. Стуб је вертикална кружна челична цев пречника $D=1280\text{мм}$, зглобно ослоњен на бетонски темељ. Резервоар је приближно сферног облика висине $h=8191\text{мм}$ и ширине $b=7733\text{мм}$ на половини висине резервоара. Подељен је на 24 уздужна и 6 попречних сегмената са дебљином од 5мм на врху и постепеним повећањем до 8мм на дну резервоара. Укрупњење резервоара је извршено са 24 ребра попречног пресека у облику 2L 60x40x5. За стабилизацију је искориштено 6 сајли са површинама попречних пресека од $A=3.923\text{цм}^2$.



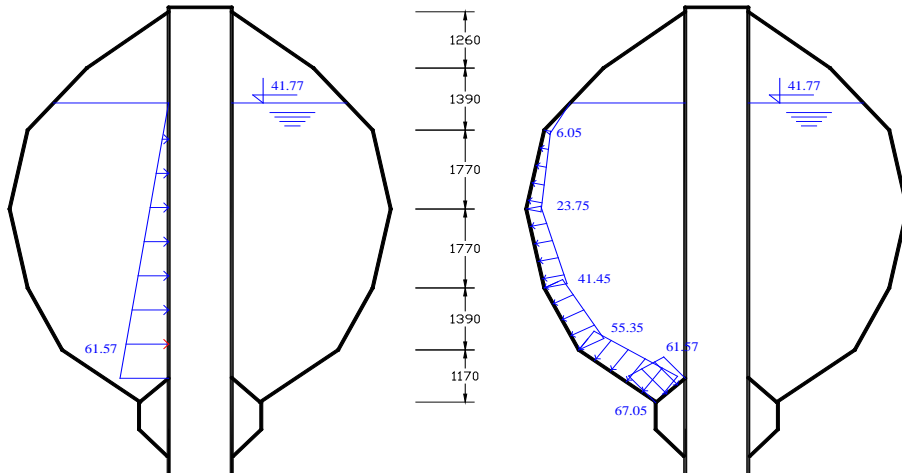
Слика 1. Изглед и 3Д модел челичног водоторња

Конструкција водоторња моделирана је просторним прорачунским моделом ABAQUS, са стварном расподелом оптерећења по површинама челичних лимова, чиме је добијена реална слика напонских стања у свим тачкама. Материјал је моделиран као еластичан и изотропан за све конструктивне елементе, са Јанговим модулом еластичности $E=210\text{МПа}$ и Поасоновим коефицијентом $\nu=0,3$ осим за ужад чији је $E=130\text{МПа}$.

Анализирана су следећа оптерећења:

- Стално оптерећење:
 - Сопствена тежина објекта – унето прорачунским моделом,

- Тежина облоге и термоизолације резервоара 0.2kN/m^2 (вертикално оптерећење),
- Силе затезања у сајлама услед преднапрезања 9.96 kN по сајли;
- Хидростатички притисак воде у резервоару, сл. 2 (вредности дате у kN/m^2)



Слика 2. Хидростатички притисак по обиму цеви и на плашту резервоара

- Оптерећење ветром [8] за локацију Бечеј са основном брзином ветра $v_b=23\text{m/s}$ и усвојеном II категоријом терена.
- дејства хоризонталне компоненте земљотреса Northridge из 1994. године са магнитудом од 6.7 и највећим убрзањем тла у хоризонталном правцу 4.44 m/s^2 .

3. ПРОРАЧУН КОНСТРУКЦИЈЕ У ПРОГРАМСКОМ ПАКЕТУ „ABAQUS“

3.1. УТИЦАЈИ НА РЕЗЕРВОАРУ УСЛЕД ДЕЈСТВА СТАЛНОГ ОПТЕРЕЋЕЊА

Сопствена тежина конструкције унета је прорачунским моделом, док је тежина облоге и термоизолације на самом резервоару представљена у виду расподељеног вертикалног оптерећења са интензитетом од 0.2 kN/m^2 . Утицаји на резервоару изазвани сталним оптерећењем приказани су на слици 3.

3.2. УТИЦАЈИ НА РЕЗЕРВОАРУ УСЛЕД ДЕЈСТВА ВОДЕ

Према [4] оптерећења услед течности срачунавају се уз узимање у обзир свих врста течности чије се складиштење предвиђа у резервоару, геометрије резервоара и

максималне могуће дубине течности у резервоару. Карактеристичне вредности притиска p је:

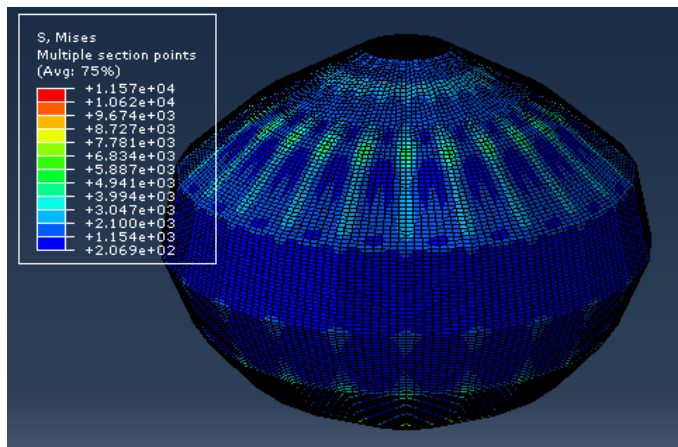
$$p = \gamma \cdot z, \quad (1)$$

γ – запреминска тежина течности,

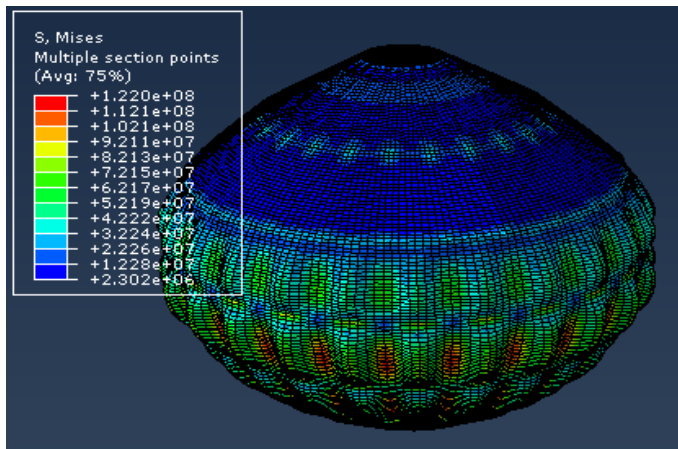
z – дубина течности.

Запреминске тежине течности дате у EN 1991-1-1 [5] кроз Анекс А који садржи табеле нормалних вредности запреминских тежина грађевинских материјала од којих је у овом раду потребна наведена запреминске тежине воде $\gamma=10\text{kN/m}^3$.

Услед овог, доминантног променљивог оптерећења, највећи утицаји изазвани су на средини резервоара и смањују се према вези резервоара и стуба водоторња, слика 4.



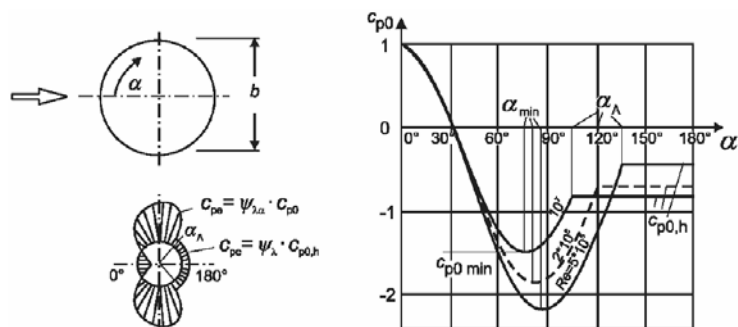
Слика 3. Напони на резервоару услед дејства сопствене тежине



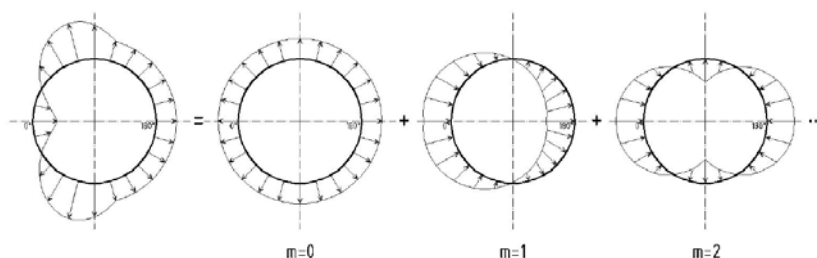
Слика 4. Напони на резервоару услед дејства воде

3.3. УТИЦАЈИ НА РЕЗЕРВОАРУ УСЛЕД ДЕЈСТВА ВЕТРА

Коефицијент силе у правцу ветра, $C_{f,x}$, за сфере треба да се одреди као функција Рејнолдсовог броја, Re , који је исти као и за кружне цилиндре, слика 5.



Слика 5. Расподела притисака од ветра за сфере, за различита подручја Рејнолдсовог броја [8]



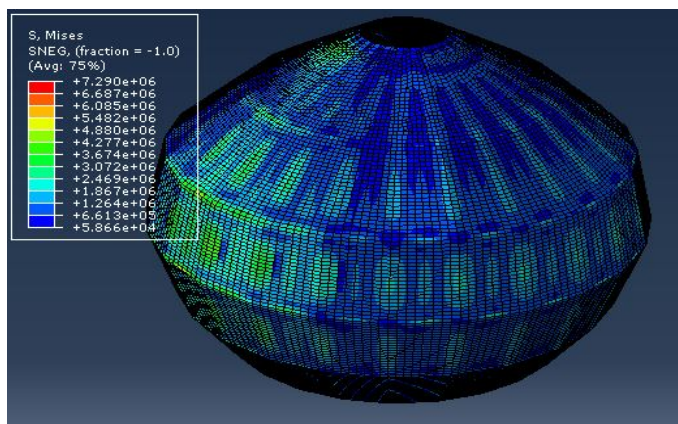
Слика 6. Расподела оптерећења ветра по плашту [9]

Оптерећење ветром симулирано је као расподељени притисак по ободу плашта, при чему притисак варира дуж висине носча, табела 1.

Табела 1. Расподељени ударни притисак ветра по висини конструкције

Висина изнад терена $z[m]$	Коефицијент хрпавости $C_{r(z)}$	Средња брзина ветра $v_{m(z)}$ [m/s]	Ударни притисак ветра $q_{p(z)}$ [Pa]
0-10	0.85	19.58	544.83
10-15	0.92	21.08	605.86
15-20	0.96	22.14	650.83
20-25	0.99	22.96	686.66
25-30	1.03	23.63	716.56
30-35	1.05	24.20	742.27
35-44	1.09	25.04	780.48

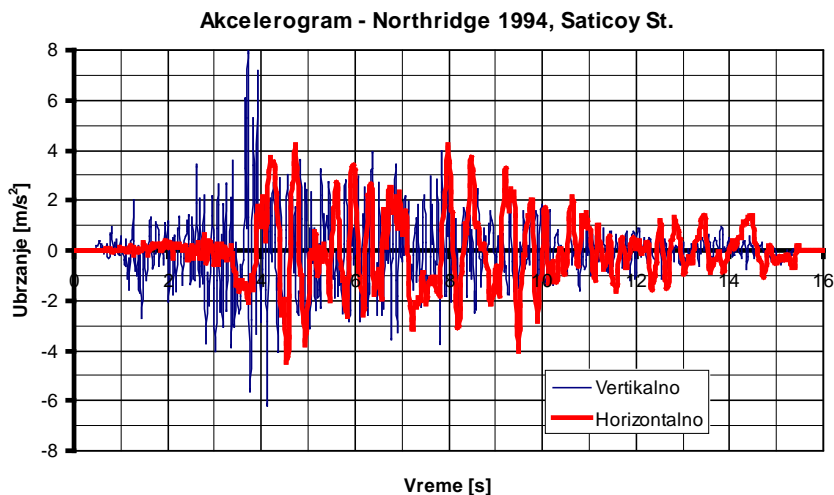
Утицаји на резервоару услед дејства ветра су приказани на слици 7, са максималним напоном од 7.29 МПа.



Слика 7. Напони на резервоару услед дејства ветра

3.4. УТИЦАЈИ НА РЕЗЕРВОАРУ УСЛЕД ДЕЈСТВА ЗЕМЉОТРЕСА

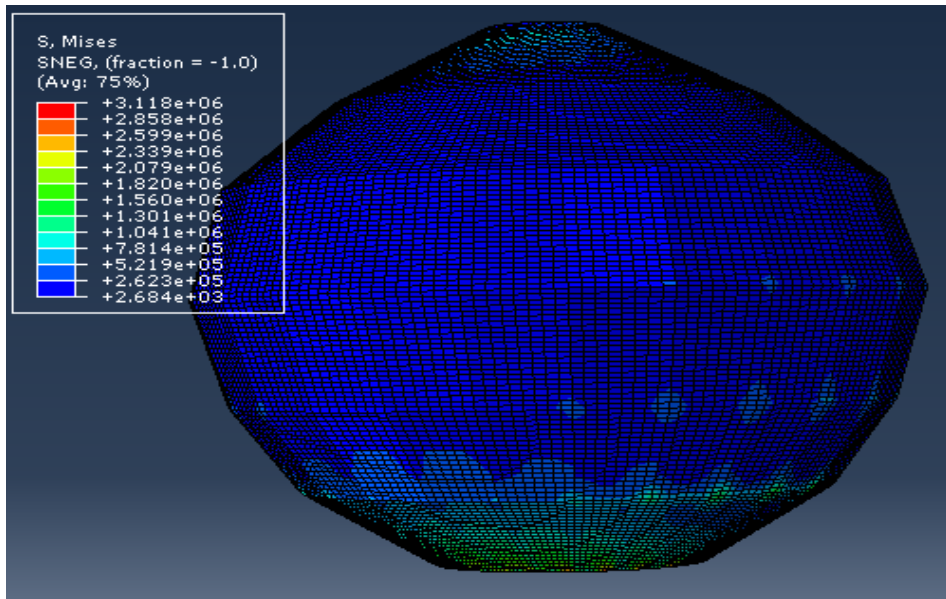
Према Правилнику о техничким нормативима за пројектовање и прорачун инжењерских објеката у сеизмичким подручјима, објекат спада у I категорију (водоторањ капацитета $Q_v < 2000\text{m}^3$), те је за повратни период од 50 година локација Бечеј у сеизмичкој зони VI и за тај случај не треба рачунати сеизмичко оптерећење. Међутим, како се овакви објекти најчешће изводе на основу типског пројекта у коме се анализа оптерећења рачуна за уопштене услове, у оквиру овог рада циљ је био анализирати и утицај од сеизмичког оптерећења.



Слика 8. Akcelorogram, Northridge 1994, Saticoy St. - хоризонтална (S00E) и вертикална (UP) убрзања [10]

Линеарна динамичка анализа у времену је вршена за случај дејства хоризонталне компоненте земљотреса Northridge из 1994. године на основу записа регистрованог на 2.31 km од епицентра на локацији Saticoy, Слика 8. Магнитуда овог земљотреса је 6.7 према (“Cosmos Virtual Data Center”, California, [http:// db.cosmos-eq.org/](http://db.cosmos-eq.org/)) са највећим убрзањем тла у хоризонталном правцу 4.44 m/s².

Највећи утицаји приликом дејства земљотреса јављају се на стубу водоторња, док се утицаји на резервоар преносе преко његове везе са стубом. Самим тим, максимални утицаји на резервоару јесу на врху и дну резервоара и постепено се смањују према средини висине резервоара, слика 9.



Слика 9. Напони на резервоару услед дејства земљотреса

3.5. КОНРОЛНИ НАПОН ПЛАШТА РЕЗЕРВОАРА У ПОЉУ

За потребе анализе и поређење добијених резултата, са приказаних дијаграма напона издвојене су вредности за означене тачке у пољу резервоара (између два ребра), слика10, табела 2. На основу овако добијених утицаја израчунате су комбинације дејства на конструкцију резервоара према EN 1990:

- За сталне и пролазне ситуације

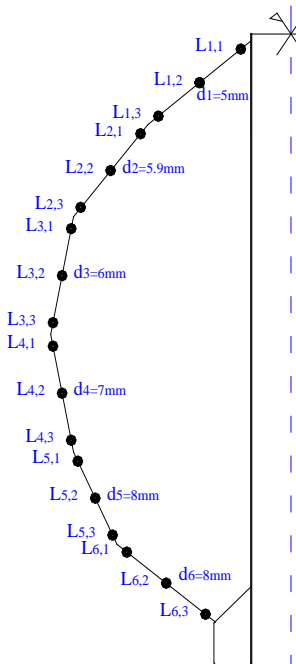
$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2)$$

- За сеизмичке прорачунске ситуације

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + A_{ed} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (3)$$

Где је:

- $G_{k,j}$ - карактеристична вредност сталног дејства j
- $Q_{k,1}$ - карактеристична вредност доминантног променљивог дејства 1
- $Q_{k,i}$ - карактеристичне вредности пратећих променљивих дејстава i
- A_{ed} - прорачунска вредност сеизмичког дејства
- $\gamma_{G,j}$ - парцијални коефицијент за стално дејство j , $\gamma_{G,j} = 1.1$
- $\gamma_{Q,i}$ - парцијални коефицијент за променљиво дејство i , $\gamma_{Q,i} = 1.5$
- $\psi_{0,i}$ - коефицијент за вредност променљивог дејства за комбинације, за оптерећење од течности $\psi_0 = 1$, а за дејство ветра $\psi_0 = 0.6$
- $\psi_{2,i}$ - коефицијент за квазисталну вредност променљивог дејства за оптерећење од течности $\psi_2 = 0.8$, а за дејство ветра $\psi_2 = 0$



Слика 10. Положај анализираних тачака у пољу резервоара

	Напони у означеним тачкама [МПа]			
	Стално дејство	Вода	Ветар	Земљотрес
L1.1	0,002	13,947	2,043	0,908
L1.2	0,002	12,354	2,059	0,768
L1.3	0,003	14,078	1,305	0,317
L2.1	0,002	12,507	0,970	0,230
L2.2	0,002	3,457	2,523	0,138
L2.3	0,002	17,655	1,101	0,156
L3.1	0,001	21,521	1,095	0,190
L3.2	0,001	66,581	3,432	0,250
L3.3	0,001	37,341	1,299	0,249
L4.1	0,001	38,638	0,851	0,236
L4.2	0,001	111,74	2,716	0,281
L4.3	0,002	58,406	1,131	0,396
L5.1	0,002	55,499	0,573	0,376
L5.2	0,001	102,20	1,817	0,383
L5.3	0,004	70,033	1,383	0,821
L6.1	0,005	65,769	1,350	1,009
L6.2	0,002	82,205	2,267	1,490
L6.3	0,002	33,728	4,579	3,238

Табела 2. Вредности напона за означене тачке у пољу резервоара

Табела 3. Вредности напона за дате комбинације оптерећења

	Напони у означеним тачкама [МПа]	
	Сталне ситуације (2)	Сеизмичке ситуације (3)
L _{1,1}	22.761	12.068
L _{1,2}	20.387	10.653
L _{1,3}	22.295	11.582
L _{2,1}	19.636	10.238
L _{2,2}	7.460	2.906
L _{2,3}	27.476	14.282
L _{3,1}	33.268	17.408
L _{3,2}	102.962	53.516
L _{3,3}	57.181	30.123
L _{4,1}	58.724	31.147
L _{4,2}	170.060	89.677
L _{4,3}	88.628	47.122
L _{5,1}	83.767	44.777
L _{5,2}	154.935	82.144
L _{5,3}	106.298	56.851
L _{6,1}	99.873	53.629
L _{6,2}	125.350	67.257
L _{6,3}	54.715	30.222

4. ЗАКЉУЧАК

Како прорачун резервоарског дела водоторња одговара прорачуну резервоарске конструкције уопште, добијени напони примењујући изразе за сеизмичку прорачунску ситуацију показују изузетно велику разлику у односу на вредности напона добијених за сталне и пролазне ситуације. Та разлика се јавља због коефицијента за квазисталну вредност променљивог дејства који је $\psi_2 = 0.8$ за дејства од течности у резервоару, а $\psi_2 = 0$ за дејство услед ветра. Линеарна динамичка анализа показује да су утицаји од сеизмичких сила максимални на стубу водоторња а релативно мали на самом резервоару, док је дејство од течности доминантно дејство за резервоар и његовим смањењем са коефицијентом $\psi_2 = 0.8$ и занемаривањем утицаја од ветра добијају се вредности мање и до 50% него за уобичајена оптерећења од сталног и променљивог оптерећења. На основу тога може се извести закључак да је приликом прорачуна сферног резервоара водоторња оправдано користити комбинације за стална и пролазна дејства конструкције чак и уколико постоји могућност појаве земљотреса.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] B.Y. Zhang, H.H. Li, W. Wang : „Numerical study of dynamic response and failure analysis of spherical storage tanks under external blast loading“, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 34, March 2015.

- [2] Debeljković M: „Bunker i silosi u čeličnoj konstrukciji“, Časopis „Izgradnja“, Beograd **2008**.
- [3] Evrokod 3 – Projektovanje čeličnih konstrukcija – Deo 4-2: „Rezervoari“, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd, **2012**.
- [4] EC1: Osnove proračuna i dejstva na konstrukcije, deo 4: „Dejstva u silosima i rezervoarima“, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Institut za materijale i konstrukcije, Beograd, **1997**.
- [5] EC1: „Dejstva na konstrukcije“, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, **2009**.
- [6] Zhi-Rong Yang, Bi-Nan Shou, and Liang Sun, Jian-Jun Wang: „Earthquake Response Analysis of Spherical Tanks with Seismic Isolation“, The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Procedia Engineering 14, **2011**.
- [7] Bešević M., Tešanović A., Grković S., Romanić M.: „Sanacija čeličnog vodotornja zapremine $V=200\text{m}^3$, „Pik Bečej poljoprivreda“ u Bečaju“, Zbornik radova 14 Građevinskog fakulteta Subotica, Subotica, **2005**.
- [8] Evrokod 1, Dejstva na konstrukcije-Deo 1-4: „Opšta dejstva- Dejstva vetra“, Beograd, **2012**.
- [9] Bešević M., Prokić A., Svilar M., Đurić N., Lukić D.: „Numerička analiza 3D i linijskog modela vertikalnog cilindričnog čeličnog rezervoara“, Žabljak, **2016**.
- [10] Živković S., Kukaras D., Prokić A., Lađinović Đ.: „Osetljivost armiranobetonskog rama na vertikalne seizmičke sile“. Savetovanje "Zemljotresno inženjerstvo i inženjerska seizmologija", Sremski Karlovci, 28-30.jun **2016**.

DESIGN STEEL SPHERICAL TANK HEIGHT $H = 44\text{m}$ ACCORDING TO EUROCODE

***Summary:** This paper presents the design of the steel water tower with spherical water tank height $H = 44\text{m}$. Spherical tank is located at the top of the steel tubular column, with diameter $F = 128\text{cm}$. The construction of the water tower was modeled using the ABAQUS software package, to give a realistic picture of the stress-strain states in all points of the tank shell and the tubular column. Analysis of the load of construction was carried out based on European standards, with special attention to the influence of the earthquake on the spherical tank.*

***Keywords:** Eurocode, steel spherical tank, seismic load*