



3D MODEL SEIZMIČKOG ODGOVORA PODVODNIH KONSTRUKCIJA

prof. dr. sc. **Jure Radnić**, dipl.ing.građ.
Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu
doc. dr. sc. **Alen Harapin**, dipl.ing.građ.
Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu
mr. sc. **Goran Šunjić**, dipl.ing.građ.
Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru

Sažetak:

U radu je sažeto opisan 3D numerički model seizmičkog odgovora podvodnih konstrukcija, koji simulira interakciju konstrukcije i vode u seizmičkim uvjetima. Modelirani su najvažniji nelinearni efekti sustava voda konstrukcija. Za ilustraciju primjene modela, analizirano je seizmičko ponašanje podvodnog spremnika za naftu tipa "Khazzan".

Ključne riječi: numerički model, dinamička interakcija fluid-konstrukcija, podvodne konstrukcije

3D MODEL OF SEISMIC RESPONSE OF UNDERWATER STRUCTURES

Abstract: The paper briefly describes the 3D numerical model of seismic response of underwater structures, which simulates interaction between structure and water in seismic conditions. The most important non-linear effects of the water-structure system were modeled. To illustrate application of the model, seismic behavior of a Khazzan-type underwater oil tank was analyzed.

Key words: numerical model, dynamic fluid-structure interaction, underwater structures

¹Rad objavljen:
Simpozij Računalstvo u graditeljstvu Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu 4. - 6. prosinca 2003



1. OPĆENITO

Podvodne građevine (uronjeni tuneli, uronjeni ili plutajući spremnici goriva, off-shore konstrukcije, plutajući mostovi i sl.), pored ostalog, potrebno je proračunati i na očekivana seizmička djelovanja. Kako su one potpuno ili djelomično uronjene u vodu, u uvjetima potresa, javlja se složeno interaktivno djelovanje konstrukcije i okolnog volumena vode. Zato je nužna primjena takvih numeričkih modela koji će opisati najvažnije nelinearne efekte ponašanja sustava voda-konstrukcija u seizmičkim uvjetima.

U ovom radu najprije je sažeto opisan jedan 3D numerički model simulacije dinamičke interakcije sustava voda-konstrukcija. Potom je, za ilustraciju primjene modela, analizirano seizmičko ponašanje podvodnog spremnika za naftu tipa "Khazzan".

2. NUMERIČKI MODEL SIMULACIJE DINAMIČKE INTERAKCIJE SUSTAVA VODA-KONSTRUKCIJA

Ovdje će se samo ukratko opisati osnove 3D numeričkog modela dinamičke interakcije vode i konstrukcije u seizmičkim uvjetima, a detaljniji prikaz istog može se naći u [1]. Model je izvorno izložen u [2] za primjenu kod ravninskih problema, potom u [3] proširen za primjenu kod 3D modela, te daljnje unaprijeđen u [1]. Model obuhvaća najvažnije nelinearne efekte ponašanja sustava voda-konstrukcija u dinamičkim uvjetima, kao što su:

- međudjelovanje na kontaktnoj plohi,
- materijalna nelinearnost konstrukcije s modelom armiranog betona koji simulira:
 - tečenje betona u tlaku,
 - pojavu i razvoj pukotina u betonu u vlaku,
 - otvaranje i zatvaranje pukotina,
 - vlačnu i posmičnu krutost ispućalog betona,
 - popuštanje armature u tlaku i vlaku,
 - utjecaj brzine dinamičke pobude na mehaničke karakteristike betona i čelika,
- utjecaj hidrodinamičkih tlakova vode u pukotinama konstrukcije;
 - materijalna nelinearnost vode:
 - kavitacija,
 - utjecaj suspenzija u vodi;
 - geometrijska nelinearnost konstrukcije (veliki pomaci).

Rješenje problema dinamičke interakcije sustava voda-konstrukcija provodi se metodom zasebnih rješenja [2]. Kod toga se koristi inkrementalno-iterativni postupak u kojem se na početku analizira sama konstrukcija. Potom se izračunavaju sile interakcije konstrukcije na vodu i analizira polje vode. Sljedeći korak je izračunavanje hidrodinamičkih sila vode na konstrukciju, te ponovna analiza same konstrukcije. Iteracijski postupak se nastavlja sve do zadovoljenja zahtijevanog kriterija konvergencije (preko neuravnoteženih pomaka konstrukcije i neuravnoteženih hidrodinamičkih tlakova vode).

Koristi se formulacija pomaka za konstrukciju, te formulacija tlakova (linearni model) ili formulacija potencijala pomaka (nelinearni model) za vodu.

Prostorna diskretizacija tekućine vrši se 27-čvornim 3D ("brick") elementima, a konstrukcije 9-čvornim elementima degenerirane zakrivljene ljuske koja je oslobođena membranskog i



posmičnog "lockinga". Koristi se uslojeni model po visini ljuske, pri čemu se za svaki sloj pretpostavlja stanje ravninskog naprezanja.

Vremenska integracija jednadžbi gibanja vrši se eksplicitnim, implicitnim ili eksplicitno-implicitnim algoritmima. Za rješenje nelinearnih jednadžbi koristi se modificirana metoda Newton-Raphson.

Model materijala konstrukcije prvenstveno je namijenjen za simulaciju ponašanja armiranog betona. Međutim, podešavanjem odgovarajućih parametara moguće ga je uspješno koristiti i za simulaciju ponašanja čelika i drva, te nekih metala.

Za ponašanje betona u tlaku koristi se teorija plastičnosti, dok se u područjima vlak-vlak i vlak-tlak pretpostavlja elasto-krto ponašanje. Modelirana je pojava i razvoj pukotina u betonu u vlaku, te njihovo zatvaranje u tlaku i ponovno otvaranje pod vlačnim naprežanjem. Koristi se model distribuiranih fiksnih pukotina. Vlačna krutost ispucalog betona simulira se odgovarajućim σ - ϵ dijagramom u vlaku, a posmična krutost redukcijom modula posmika u ovisnosti o širini pukotine. Armatura se modelira kao posebna lamela ekvivalentne debljine, s krutošću samo u pravcu pružanja šipki. Koristi se bilinearni σ - ϵ dijagram čelika, s lineranim ponašanjem pri rasterećenju. Mehaničke karakteristike betona i čelika su u funkciji brzine deformacije [2]. Pretpostavlja se puna kompatibilnost pomaka betona i armature, bez mogućnosti proklizavanja spoja.

Za vodu je moguće koristiti linearni model, ili nelinearni model koji simulira pojavu kavitacije. Naime, pod kavitacijom se ovdje podrazumijeva pojava kada ukupni tlak u vodi (atmosferski+hidrostatički+hidrodinamički) padne ispod tlaka vodenih para. Koristi se bilinearna veza potencijal pomaka – dilatacija mase za simuliranje ovog fenomena.

Utjecaj tlaka vode u pukotinama konstrukcije simulira se ekvivalentnim rezultatnim silama u čvorovima elemenata konstrukcije. Pri tome se prate elementi (pukotine) u koje je moguć dotok vode, te rezultatni tlakovi vode u promatranim integracijskim točkama ovih elemenata. Moguća je simulacija radijacijskog i konstrukcijskog prigušenja konstrukcije, te radijacijskog prigušenja vode.

Utjecaj suspenzija u vodi simulira se dvojako:

- preko odgovarajuće (povećane) gustoće vode,
- preko zamjenjujućeg viskoznog prigušenja vode.

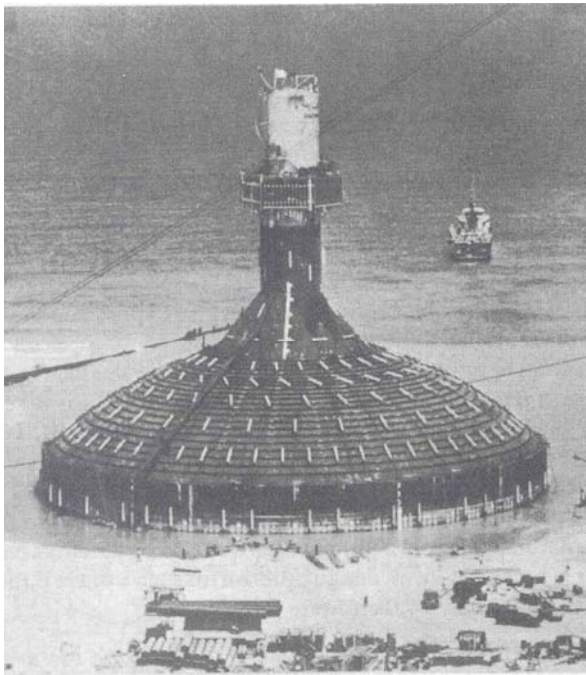
Zamjenjujuće viskozno prigušenje vode simulira se na isti način kao i Rayleigh-ovo viskozno prigušenje za konstrukciju [1].

Geometrijska nelinearnost konstrukcije uključena je preko modela velikih pomaka. Za to se koriste ažurirane (tekuće) koordinate čvorova konstrukcije. Utjecaj velikih pomaka vode nije uključen.

Moguće je rješenje svojstvene zadaće pojedinačnih polja, te vezanog sustava voda-konstrukcija.

3. PRIMJER

U svijetu je izgrađen značajni broj velikih spremnika za naftu s otvorenim dnom, tipa "Khazzan", položenih na morsko dno (Slika 1). Takva tri spremnika, svaki kapaciteta 500.000 barela (80.000 m³), nalaze se 95 km od obale Dubaia (Ujedinjeni Arapski Emirati). Treba napomenuti da ovakvi spremnici imaju ugrađeni sustav cijevi koji osiguravaju stalnu ravnotežu unutrašnjih i vanjskih tlakova na stjenke spremnika pri dolijevanju i pražnjenju nafte (uz istiskivanje ili utiskivanje vode), čime se postiže racionalna debljina stjenki.



(i) – Izgradnja na obali [4]



(ii) – Prijevoz tegljačima [5]

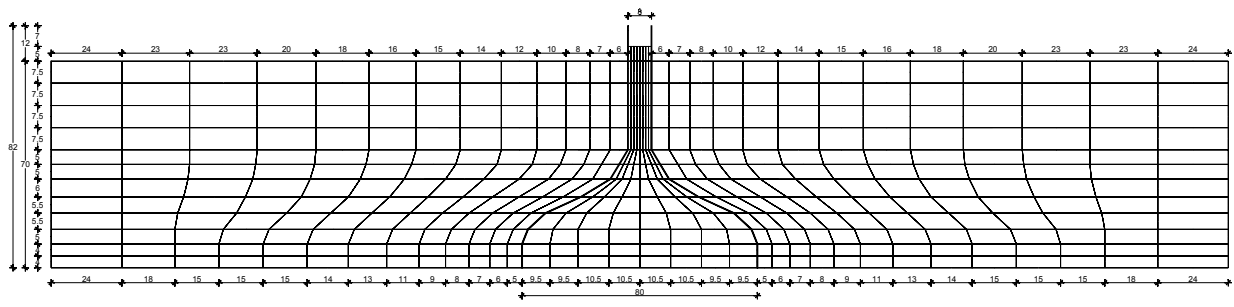
Slika 1. Spremnik tipa “Khazzan”

Geometrijske karakteristike modela preuzete su iz [4]. Na Slici 2 prikazan je vertikalni presjek spremnika s razmatranim dijelom okolnog mora. Morsko dno je na dubini od 70 m. Spremnik je složenog zakrivljenog oblika, promjera 80 m na dnu i 8 m na vrhu. Ukupna visina spremnika iznosi 82 m, pri čemu mu je vrh 12 m iznad razine mora.

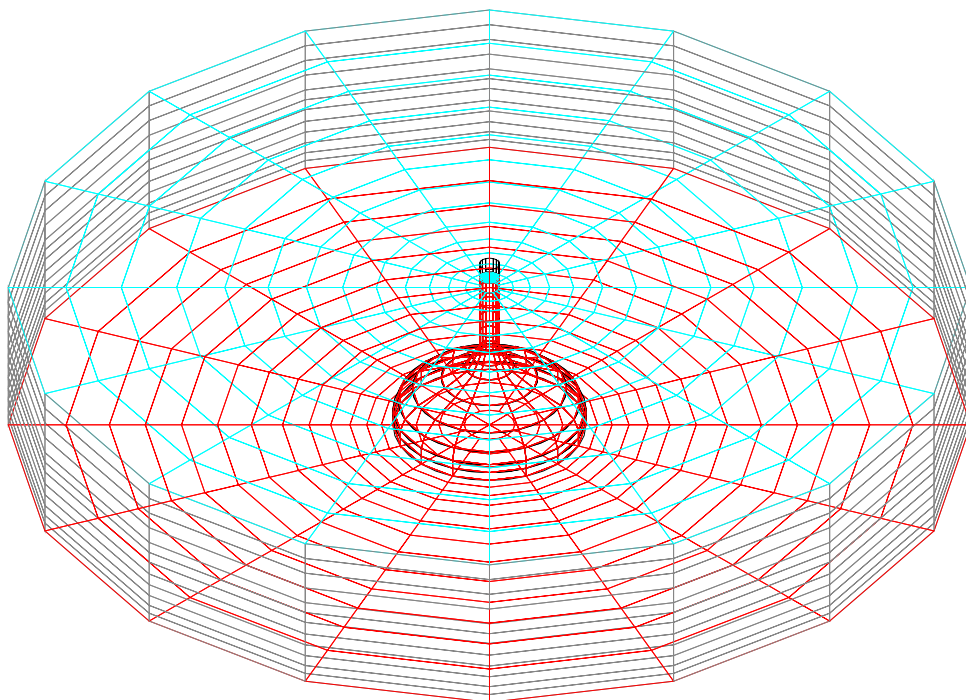
Tablica 1. Osnovne materijalne karakteristike sustava

ČELIK SPREMNIKA	Modul elastičnosti	Poissonov v koeficijent	Gustoća	Modul očvršćavanja	Granica tečenja	Granica kidanja
	E (GN/m ²)	ν	ρ_a (KN/m ³)	H_s' (GN/m ²)	σ_y (MN/m ²)	σ_u (MN/m ²)
	210.0	0.3	78.5	0.0	240.0	360.0
TEKUĆINA	- VODA -			- NAFTA -		
	Brzina zvuka		Gustoća	Brzina zvuka		Gustoća
	c (m/s)		ρ_w (KN/m ³)	c (m/s)		ρ_n (KN/m ³)
	1430.0		10.0	1300.0		9.0

Sustav more-nafta-spremnik modeliran je prostornim modelom prikazanim na Slikama 3 i 4. Usvojeno je harmonijsko ubrzanje podloge, perioda 0.207 s (odgovara prvom periodu sustava more-nafta-rezervoar), s amplitudama 0.3 g za horizontalnu i 0.2 g za vertikalnu komponentu ubrzanja tla. Usvojene karakteristike materijala prikazane su u Tablici 1. Korištena je implicitna vremenska integracija ($\Delta t=0.002$ s) i dijagonalna matrica masa. Neki rezultati proračuna prikazani su na slikama 5-10, a ostali se mogu naći u [1].

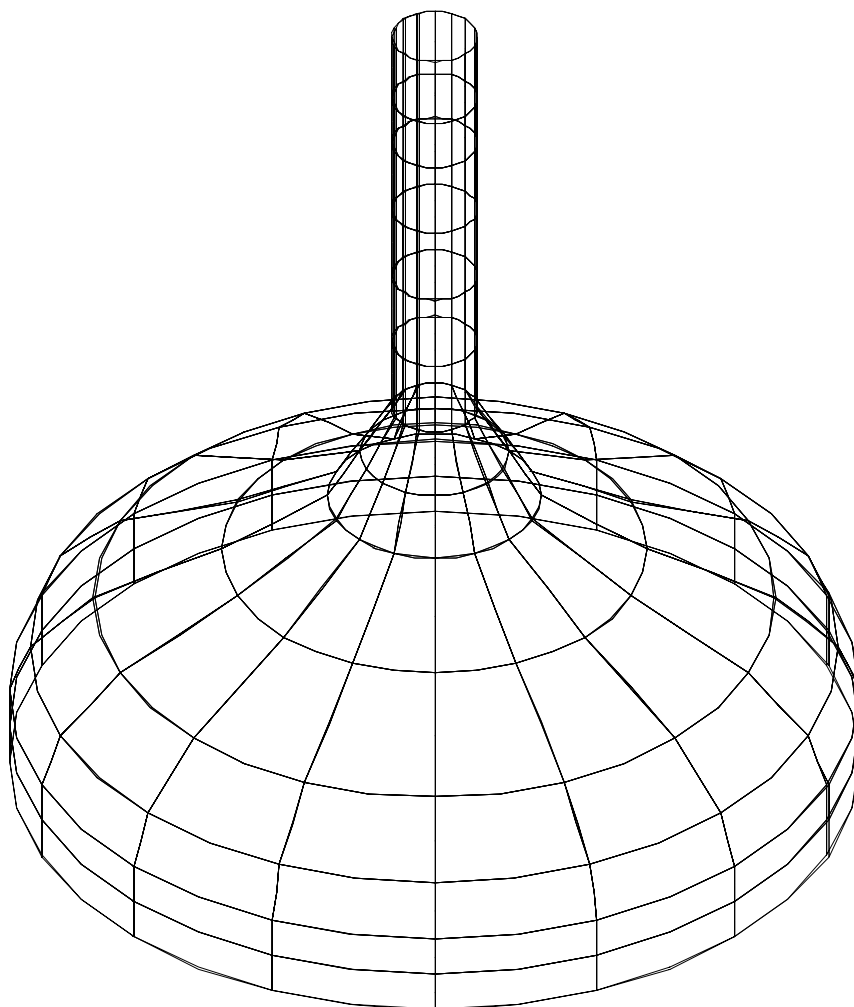


(i) – Uzdužni presjek mreže KE

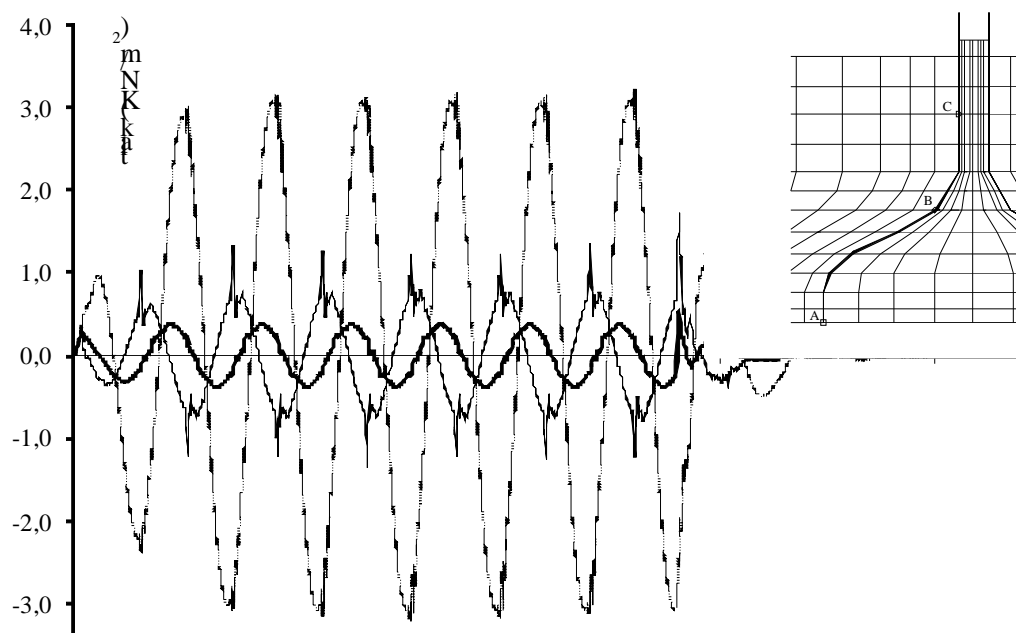


(ii) – 3D prikaz mreže KE cijelog sustava

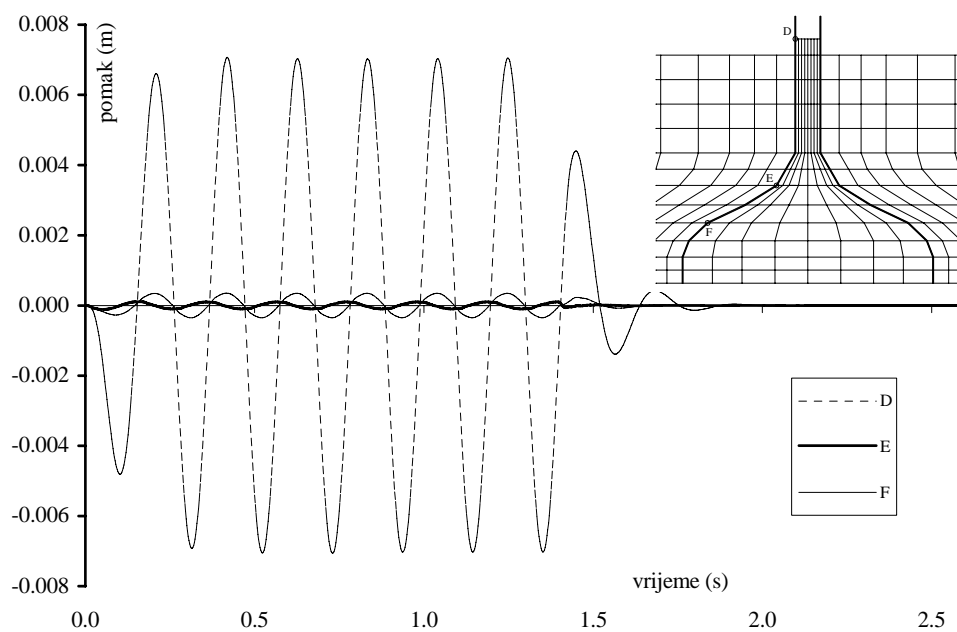
Slika 3 . Prostorna diskretizacija sustava more-nafta-spremnik



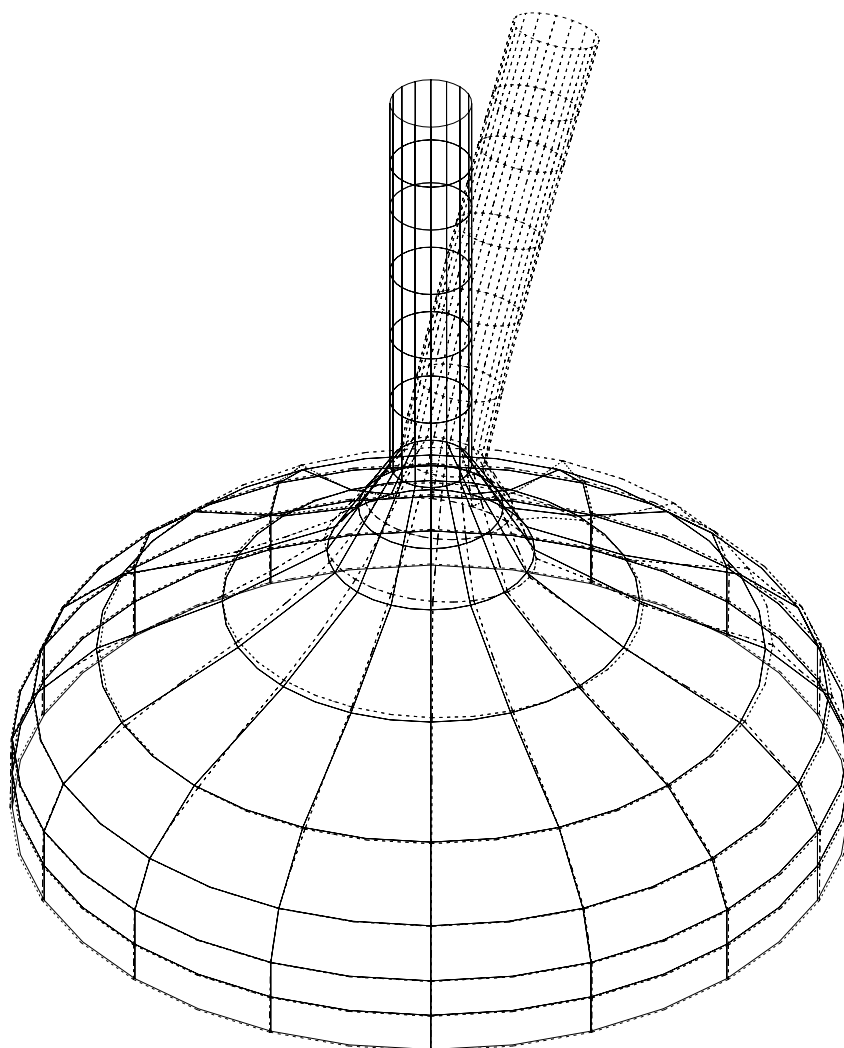
Slika 4. 3D prikaz mreže KE spremnika



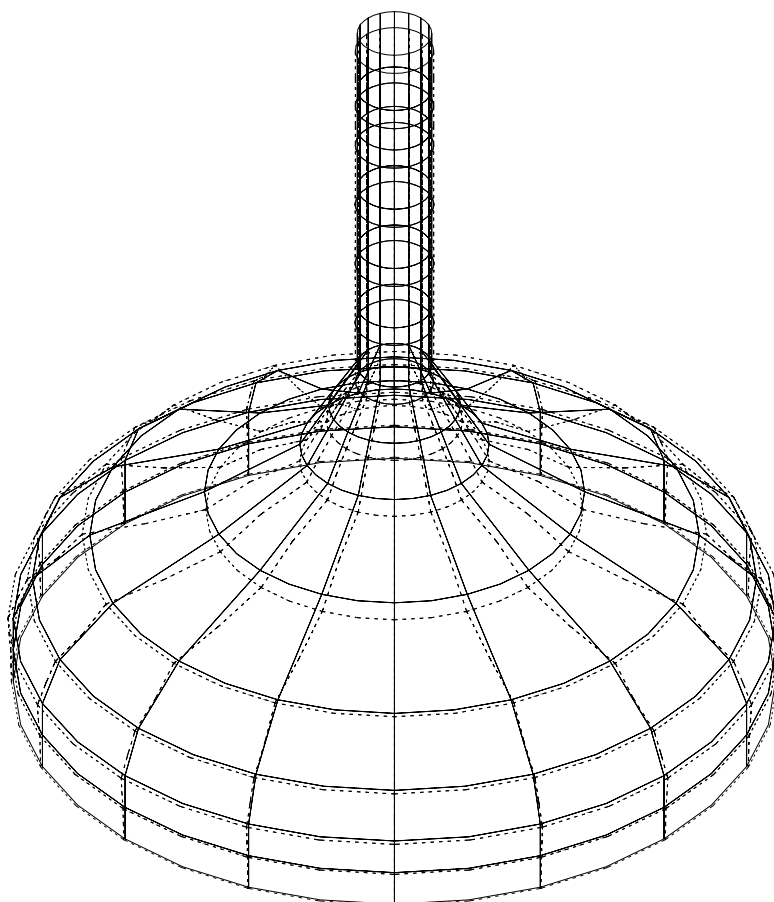
Slika 5. Hidrodinamički tlak mora za horizontalnu pobudu u nekim točkama



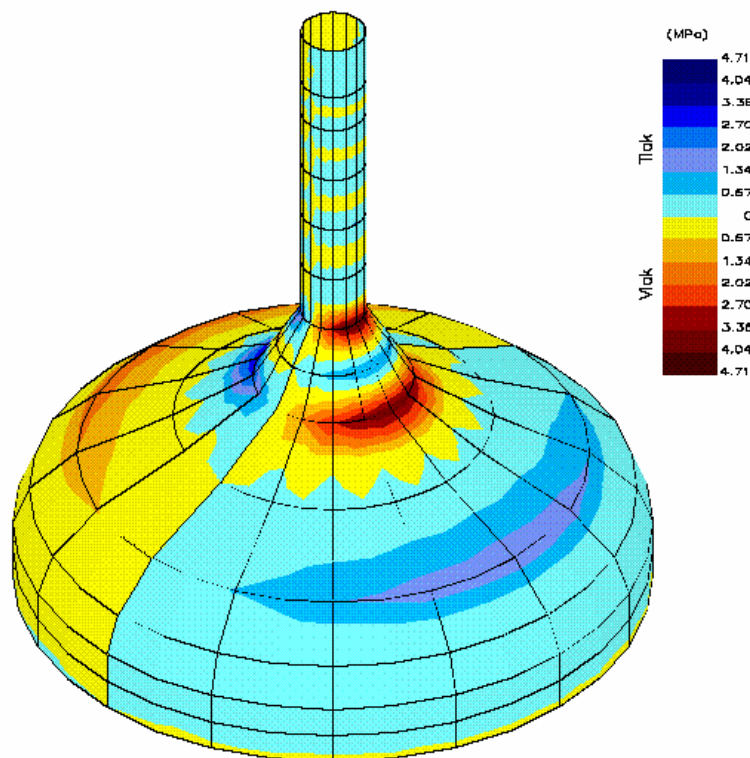
Slika 6 . Horizontalni pomak nekih točaka spremnika za horizontalnu pobudu

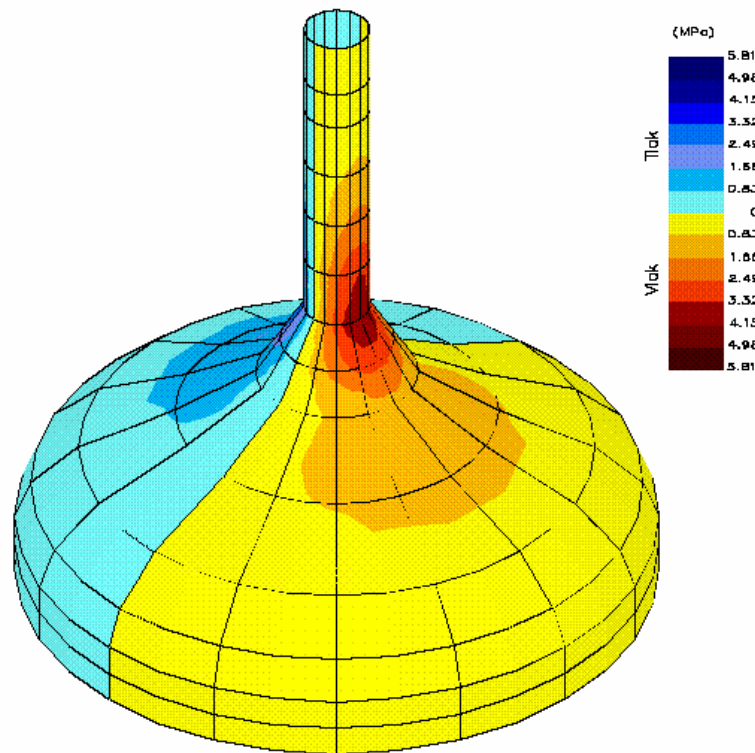


Slika 7. Pomaci spremnika pri maksimalnom pomaku vrha za horizontalnu pobudu



Slika 8. Pomaci spremnika pri maksimalnom pomaku vrha za vertikalnu pobudu

Slika 9. Maksimalna horizontalna (σ_{xx}) naprezanja spremnika ($t = 0.73$ s) za horizontalnu pobudu



Slika 10. Maksimalna vertikalna naprezanja spremnika ($t = 0.73$ s) za horizontalnu pobudu

Može se reći da su naprezanja od primijenjene rezonantne dinamičke pobude relativno mala i da spremnik ima veliku seizmičku otpornost. Za ovakve tipove građevina, veće utjecaje imaju djelovanja valova i morskih struja.

LITERATURA

1. G. Šunjić: "Numerički model seizmičkog odgovora podvodnih konstrukcija", Magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, 2003.
2. J. Radnić: "Interakcija fluid-konstrukcija s uključenjem kavitacije", Građevinar, 7, 269-275 1987.
3. A. Harapin: "Numerička simulacija dinamičkog međudjelovanja tekućine i konstrukcije", Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, 2000.
4. P. Chakrabarti: "Hydrodynamics of Offshore Structures", Computational Mechanics Publications, Springer-Verlag, 1987.
5. <http://www.coastal.udel.edu>