

Primljen / Received: 8.10.2014.

Ispravljen / Corrected: 30.1.2015.

Prihvaćen / Accepted: 31.3.2015.

Dostupno online / Available online: 1.8.2015.

Problem zapljuskivanja u spremnicima srednjeg kapaciteta pri potresnom opterećenju

Autori:



Doc.dr.sc. **Ersan Güray**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Muğla Sıtkı Koçman
Odjel za građevinarstvo
ers.guray@gmail.com



Doc.dr.sc. **Gökhan Yazıcı**, dipl.ing.građ.
Sveučilište İstanbul Kültür
Odjel za građevinarstvo
gyazici@gmail.com

Prethodno priopćenje

Ersan Güray, Gökhan Yazıcı

Problem zapljuskivanja u spremnicima srednjeg kapaciteta pri potresnom opterećenju

Ovaj rad prikazuje rezultate numeričkog ispitivanja utjecaja zapljuskivanja (eng. *sloshing*) u pravokutnim spremnicima srednjeg kapaciteta uslijed seizmičke pobude dugog perioda. Primijenjena je metoda hidrodinamike izgladenih čestica (eng. *Smoothed Particle Hydrodynamics - SPH*) te su analizirani valni pomaci i tlak. Intenzitet utjecaja zapljuskivanja ne ovisi samo o vršnom ubrzanju tla nego i o dominantnoj frekvenciji podrhtavanja tla. Prekomjerni pomaci i tlak uslijed zapljuskivanja rastu kada se prirodni period tekućine u spremniku približava dominantnom periodu podrhtavanja tla.

Ključne riječi:

zapluskivanje, hidrodinamika izgladenih čestica, SPH metoda, strujanje sa slobodnom površinom

Preliminary report

Ersan Güray, Gökhan Yazıcı

Sloshing in medium sized tanks under earthquake load

This paper presents results obtained by numerical study of sloshing effects in medium sized rectangular tanks subjected to a long-period seismic excitation. The Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method is used, and the wave displacement and pressure are analysed. The intensity of sloshing effects depends not only on the peak ground acceleration but also on the dominant frequency of ground motion. Excessive sloshing displacements and pressures increase when the natural period of the contained liquid approaches the dominant period of ground excitation.

Key words:

sloshing, smoothed particle hydrodynamics, SPH method, free surface flow

Vorherige Mitteilung

Ersan Güray, Gökhan Yazıcı

Flüssigkeitsbewegung in mittelgroßen Tanks unter Erdbebenbelastung

Diese Arbeit stellt Resultate numerischer Untersuchungen zum Einfluss von Flüssigkeitsbewegungen (eng. *sloshing*) in rechteckigen mittelgroßen Tanks unter Erdbebenbelastung langer Schwingungsdauer dar. Die Methode der geglätteten Teilchen-Hydrodynamik (eng. *Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH*) wurde angewandt, um Wellenverschiebungen und Druckeinflüsse zu analysieren. Die Intensität der Einflüsse hängt nicht nur von der maximalen Bodenbeschleunigung ab, sondern auch von der dominanten Schwingungsfrequenz der Bodenbewegung. Übermäßige Verschiebungen und Druckeinflüsse aufgrund von Flüssigkeitsbewegungen wachsen an, wenn die Eigenperiode der gelagerten Flüssigkeit sich der dominanten Periode der Bodenbewegung nähert.

Schlüsselwörter:

Flüssigkeitsbewegung, geglättete Teilchen-Hydrodynamik, SPH Methode, Strömung mit freier Oberfläche

1. Uvod

Spremnici za tekućinu primjenjuju se za pohranu različitih vrsta tekućina poput industrijskih kemikalija, goriva i pitke vode, koje su nužne za potrebe društva i industrije. Oštećenja spremnika tijekom potresa mogu imati značajan negativan utjecaj na okoliš, ali i izazvati velike financijske gubitke i prekid isporuke korisnicima. Krov spremnika pitke vode urušio se u Christchurchu u Novom Zelandu 2010. tijekom potresa Darfield magnitude 7,1, uslijed sila podizanja uzrokovanih zapljuskivanjem, što se odnosi na pomake tekućine u obliku valova koji nastaju tijekom potresa [1]. Prekomjerno zapljuskivanje zbog podrhtavanja tla uzrokovalo je i djelomično urušavanje armiranobetonskih krovova dvaju spremnika na crpilištu Feng Yuen u Tajvanu 1999. tijekom potresa Chi-Chi magnitude 7,4 [2]. S obzirom na te primjere, izvješća istraživanja provedenih u naftnoj i plinskoj industriji [3-8] također navode da su spremnici za tekućine osjetljivi na potrese.

Temelji i zidovi spremnika trebaju izdržati posmičnu silu u razini temelja, momente prevrtanja i hidrodinamički tlak koji nastaje zbog potresnog i hidrostatičkog opterećenja. Poželjno je da spremnici nisu napunjeni do vrha, kako bi se izbjeglo izlijevanje sadržaja i oštećenja na gornjoj stijenci uslijed udarnih opterećenja uzrokovanih prekomjernim zapljuskivanjem. Od 1960-ih pa sve do danas razvijane su različite metode analize kako bi se zadovoljili konstrukcijski zahtjevi za projektiranje spremnika tekućina.

Housnerov mehanički analogni model [9] jedan je od najranijih i najprimjenjivijih alata koji objašnjava osnove dinamike zapljuskivanja u pravokutnim i cilindričnim spremnicima izloženim horizontalnim pomacima tla. U Housnerovom modelu masa tekućine podijeljena je na dvije komponente, krutu masu (impulsni dio) koja se giba zajedno sa zidovima spremnika i konvektivne mase koje se mogu predočiti pomoću opruga pričvršćenih za stijenku zida spremnika.

Impulsni dio tekućine značajno utječe na hidrodinamički tlak koji djeluje na zidove i temelj spremnika, dok konvektivni dio utječe na pomake uslijed zapljuskivanja. Zahvaljujući napretku računalne tehnologije, razvijene su numeričke metode za rješavanje jednadžbi gibanja tekućine u spremnicima složenog oblika te za višeslojne i viskozne tekućine. Frandsen [10] je primijenio metodu konačnih diferencija (eng. *Finite Differences Method* - FDM) za simulacije zapljuskivanja u dvodimenzionalnim pravokutnim spremnicima. Nakayama i Wachitzsu primijenili su metodu konačnih elemenata (FEM) za nelinearno zapljuskivanje [11]. Ipak, primjena tih metoda u modeliranju strujanja sa slobodnom površinom zahtijeva primjenu još jednog od numeričkih postupaka, primjerice metode nivoa skupova (eng. *Level Set*) ili metode volumena tekućine (eng. *Volume of Fluid*) kako bi se pratila slobodna površina u svakom vremenskom koraku [12]. Tradicionalne numeričke metode zahtijevaju ažuriranje Eulerove mreže u svakom vremenskom

koraku, zbog čega je proračun zahtjevan i dugotrajan. Metoda hidrodinamike izgladenih čestica (eng. *Smoothed Particle Hydrodynamics* - SPH) računalno je učinkovita bezmrežna metoda, inicijalno razvijena za rješavanje astrofizičkih problema [13, 14]. Kasnije se njena primjena proširila, osobito u području modeliranja interakcije fluid-konstrukcija, podzemskih eksplozija i mehanike brodova. U ovom radu, SPH metoda primijenjena je za ispitivanje pomaka slobodne površine uslijed zapljuskivanja i hidrodinamičkog tlaka na dvodimenzionalnim pravokutnim spremnicima tekućine izloženima seizmičkoj pobudi dugog perioda. Matematička osnova SPH modela opisana je u poglavlju "metode i analize", a u poglavlju o numeričkim ispitivanjima prikazani su rezultati analize pomaka uslijed zapljuskivanja i hidrodinamičkog tlaka na ispitivanom spremniku koji je izložen djelovanju šest različitih zabilježenih potresnih zapisa ubrzanja tla za sedam različitih razina punjenja.

2. Metoda i analize

2.1. Metoda hidrodinamike izgladenih čestica

Osnove metode hidrodinamike izgladenih čestica temelje se na jedinstvenoj, glatkoj i kompaktnoj Kernelovoj funkciji $W(x,y)$, tako da je svaka proizvoljna funkcija $\varphi(x,y)$ aproksimirana sljedećim identitetom:

$$\varphi(x) = \int_S \varphi(X')W(X-X')dX' \quad (1)$$

gdje je $X = (x,y)$ varijabla položaja, a S je područje utjecaja, glatko područje Kernelove funkcije. U ovom istraživanju upotrijebljena je literatura Spiky Kernel [15] kako bi se prevladali numerički izazovi, kao što su primjerice grupiranje zbog kolokacijske prirode metode hidrodinamike izgladenih čestica. Za dvodimenzionalnu geometriju vrijedi:

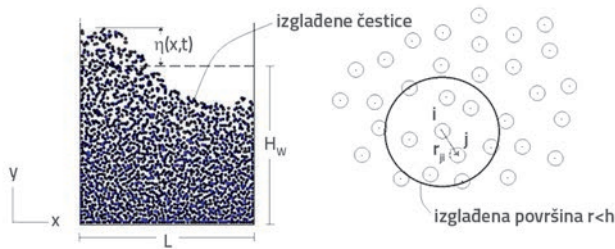
$$W(r,h) = \alpha(h-r)^3; r \leq h \quad (2)$$

gdje je $\alpha = 10/ph^5$, r označava udaljenost među česticama, $h = 4\Delta x$ je razmak. Budući da čestice uz rubove trebaju imati početni razmak $\Delta x/2$ ili $\Delta y/2$ od odgovarajućeg ruba, početni razmak među česticama u smjeru x i y je $\Delta x = L/N_x$ odnosno $\Delta y = H_w/N_y$, gdje je $\Delta x = \Delta y$. Oznaka L je duljina spremnika u x smjeru, H_w je razina tekućine unutar spremnika. N_x i N_y trebaju biti konzistentni kako bi početna raspodjela čestica bila jednolika, pri čemu je ukupan broj čestica $N_x N_y$.

Funkcija φ u određenom području određuje se uvrštavanjem $W(r,h)$ u Kernelovu jednadžbu aproksimacije (1):

$$\varphi_i = \sum_j \varphi_j W_{ij} \frac{m_j}{\rho_j} \quad (3)$$

gdje su $\varphi_i = \varphi(\mathbf{r}_i)$, $\varphi_j = \varphi(\mathbf{r}_j)$, $W_{ij} = W(r_{ij},h)$, $\mathbf{r}_{ji} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i$ vektori položaja, a $r_{ij} = |\mathbf{r}_{ji}|$ je udaljenost od i prema j (slika 1). Izrazi m_j i ρ_j predstavljaju masu i gustoću čestice j .



Slika 1. Geometrija pravokutnog spremnika i čestica, $r_{ji} = r_j - r_i$ je vektor položaja od točke i prema j

Reformulacija očuvanja mase i očuvanja gibanja pomoću Kernelove aproksimacijske rezultira jednačbama (4) i (5):

$$D_{\rho_i} / D_t = \sum m_j (u_i - u_j) \nabla W_{ij} \quad (4)$$

$$D_{u_i} / D_t = -\sum m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \nabla W_{ij} + \sum m_j \frac{\mu_i + \mu_j}{\rho_i \rho_j} \frac{r_{ij} u_{ij}}{r_{ij}^2 + 0.01h^2} \nabla W_{ij} + f_i / \rho \quad (5)$$

gdje je $u_{ij} = u_i - u_j$ vektor brzine, P je tlak, a μ koeficijent dinamičke viskoznosti. Izraz $f = (\rho a_c, \rho g)$ označava vektor sile, a_c je horizontalno potresno ubrzanje tla u x-smjeru, a g je gravitacijsko ubrzanje magnitude $-9,81 \text{ m/s}^2$ u y-smjeru. Položaj vektora čestica određen je kinematičkim principom (6):

$$D_x / D_t = u_i \quad (6)$$

Pojam viskoznosti obuhvaća derivaciju drugog reda Kernelove funkcije koja zahtijeva prilično opširan numerički izvod. U ovom istraživanju, u jednačbi 5, Kernelova funkcija aproksimirana je derivacijom prvog reda, prikazanoj u [16]. Tlak je aproksimiran Batchelorovom formulom [17] koja se primjenjuje za nestišljivi tok:

$$P_i = B \left(\left(\frac{\rho_i}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right) \quad (7)$$

gdje je $B = 200 \cdot \rho_0 g H_w / \gamma$ i $\gamma = 7$ uz očuvanje fluktuacije gustoće od 1% [18].

U metodi hidrodinamike izgladenih čestica (SPH) nije potrebno posebno definirati rubne uvjete slobodne površine, ako se u spremniku ne nalaze drugi slojevi fluida. Pretpostavljena svojstva krutog zida spremnika su glatkoća i nepropusnost. Brojni uvjeti, poput sila koje djeluju na rubovima (odbojne sile), rubnih čestica ili imaginarnih čestica, mogu se upotrijebiti kako bi se postavili rubni uvjeti za zidove spremnika [19]. U ovom su istraživanju imaginarne čestice raspodijeljene izvan zidova na udaljenosti h, a obnavljaju se u svakom koraku. Imaginarne čestice simetrične su s unutarnjim česticama, a sva su im svojstva jednaka, osim normalne komponente brzine.

Budući da je zid nepropustan, normalna brzina se pretpostavlja u suprotnom smjeru. Primjena imaginarnih

čestica nije u potpunosti prikladna za prikaz nepropusnosti zida, stoga se proračunom obuhvaća i sudar čestica i rubova. Tangencijalna komponenta brzine ostaje ista, ali normalna komponenta se smanjuje ovisno o vrsti sudara. U ovom istraživanju pretpostavljeno je da je sudar plastičan, stoga vrijedi:

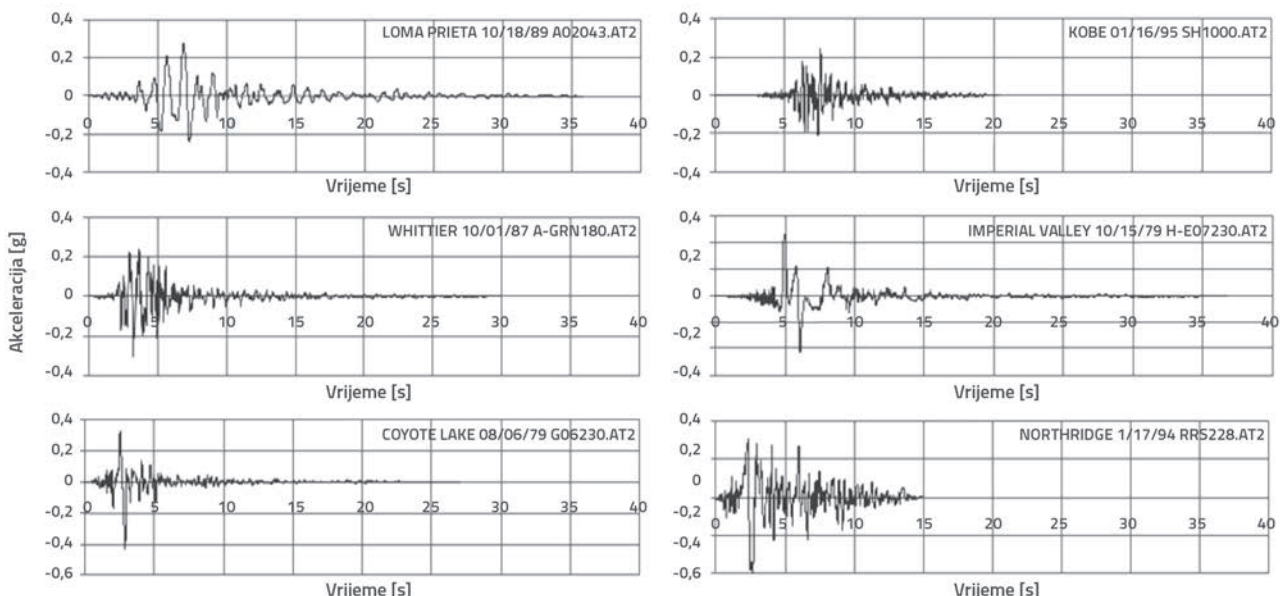
$$u^n = 0 \text{ za } \Delta \leq 0,25h \quad (8)$$

gdje eksponent n označava smjer okomit na rub. Položaj čestica nakon sudara također se ažurira, a normalna udaljenost čestice od zida je $0,25h$. Jednačbe (4) i (5) diskretizirane su u vremenskoj domeni Adams-Bashfordovom metodom četvrtog reda (AB4). Položaj svake čestice, definirano izrazom (6) ažuriran je Heunovom metodom.

2.2. Numerička analiza

Ispitivani spremnik je dvodimenzionalan, širine stranice baze 3 m i visine 3 m. Djelomično je ispunjen vodom do visine od: $H = 1 \text{ m}, 1,5 \text{ m}, 2 \text{ m}, 2,25 \text{ m}, 2,55 \text{ m}, 2,7 \text{ m}$ i $2,85 \text{ m}$, odnosno u postocima: 33 %, 50 %, 67 %, 75 %, 85 %, 90 % i 95 %. Svaka čestica izložena je djelovanju konstantne gravitacije $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ u y-smjeru i translacijskom ubrzanju tla a_c prema vrijednostima zabilježenima u potresima Loma Prieta, Whittier, Coyote Lake, Kobe, Imperial Valley i Northridge [20] u x-smjeru, prema koordinatnom sustavu koji je prikazan na slici 1. Dijagram ubrzanja svakog potresa prikazan je na slici 2. Gustoća vode određena je kao $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$, a dinamička viskoznost je $\mu = 0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

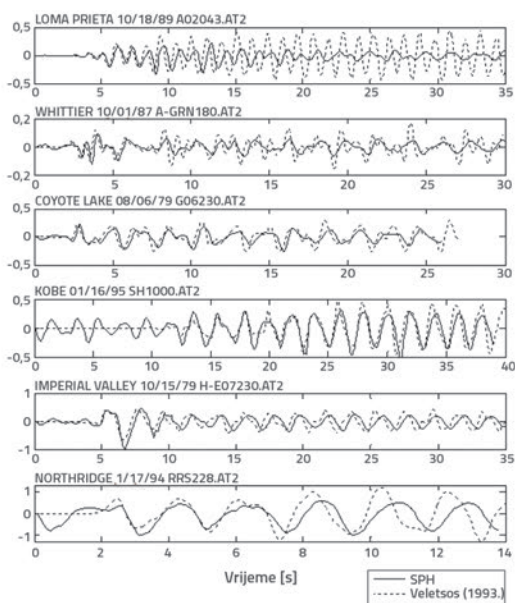
Voda je simulirana česticama ($N_x \times N_y$), s jednakom i konstantnom masom gdje je $N_x = 60$ za sve razine punjenja, a $N_y = 20, 30, 40, 45, 48, 51, 54$ i 57 , za prije navedene razine punjenja. Čestice su jednoliko raspoređene na početku svakog ispitivanja, na međusobnoj udaljenosti Δx . Vremenski korak iznosi $\Delta t = 1,25 \cdot 10^{-4}$ kako bi se izbjegla vremenska nestabilnost. Položaj razine slobodne površine proračunan je u određenom broju jednoliko raspoređenih točaka po x od nul točaka $\nabla^2 \rho$. Zapravo, potpuno nestaje iznad razine površine, tako da se površinska linija određuje pomoću gornje granice, s tim da su za $\nabla^2 \rho < 350$ ostvareni dovoljno dobri rezultati za ovo istraživanje. Problem zapljuskivanja najbolje je promatrati s obzirom na varijacije u pomacima uslijed zapljuskivanja na zidovima u vremenu. Vremenska promjena pomaka uslijed zapljuskivanja, promatrana na lijevom zidu spremnika prikazana je na slici 3., pri razini punjenja od 67 %. Slučajevi su slični, a oscilatorno ponašanje pojavljuje se zbog nesimetričnog gibanja stojnog vala. Intenzitet prosječnog ubrzanja pri snažnom podrhtavanju tla glavni je uzrok prekomjernih pomaka slobodne površine uslijed zapljuskivanja. Rezultati dobiveni za model SPH vrlo su slični rezultatima dobivenima Veletsovom modelom za pravokutne spremnike [21].



Slika 2. Ubrzanje tla tijekom potresa u različitim mjestima

Tablica 1. Karakteristike potresa

Potres/Datum	Epicentar	PEER/NGA oznaka	Srednji period [s]	Dominantni period [s]	Prosječno ubrzanje (RMS) [g]	Maksimalno ubrzanje [g]
LOMA PRIETA 10/18/89 00:05	APEEL2 REDWOOD CITY	A02043	1,006	1,060	0,048	0,274
WHITTIER 10/01/87 14:42	USC STATION 90019	A-GRN180	0,505	0,580	0,042	0,304
COYOTE LAKE 08/06/79 17:05	GILROY ARRAY #6	G06230	0,653	0,680	0,043	0,434
KOBE 01/16/95 20:46	SHIN-OSAKA	SHI000	0,744	0,660	0,036	0,243
IMPERIAL VALLEY 10/15/79 23:16	EL CENTRO ARRAY #7	H-E07230	1,299	0,740	0,056	0,463
NORTHRIDGE, 1/17/94 12:31	RINALDI RECEIVING STA	RRS228	0,734	0,720	0,179	0,838



Slika 3. Pomaci slobodne površine na lijevom zidu, razina punjenja 67 %

Prema podacima iz tablice 1. možemo vidjeti da zapis potresa u Loma Prieta ima osnovni period od 1,060 s, a ta vrijednost je vrlo slična drugom valnom periodu u spremniku napunjenom 95 %, koji iznosi 1,132 s. Ovaj modalni oblik blizak rezonantnom modalnom obliku izravno se pribraja zbroju modalnih oblika u Vellersosovom pristupu, te su rezultirajući pomaci znatno veći. Zadnji stupac u tablici 1. prikazuje prvi modalni oblik Fourierovog spektra zapisa valova koji je prikazan na slici 4. Prva četiri slučaja imaju slične vrijednosti pomaka, ali u Northridge potresu zabilježeni su veći pomaci od zapljuskivanja uslijed jakih prisilnih djelovanja, nastalih srednjim ubrzanjem tla, koja su bila tri puta veća nego za druge zapise ubrzanja. Druga značajna činjenica koju treba naglasiti jest povećanje pomaka uslijed zapljuskivanja kada osnovni period potresnog zapisa i prirodni period vibracija sadržaja spremnika imaju vrijednosti koje su bliske. Prirodni period fluida (T_{nat}) u spremniku ($L = 3\text{ m}$, $H = 2\text{ m}$) iznosi približno 2 s [22].

Iako prosječno ubrzanje tla u potresu Imperial Valley ima manje vršno ubrzanje u odnosu na potresnu pobudu tijekom Northridge potresa, vršni pomak slobodne

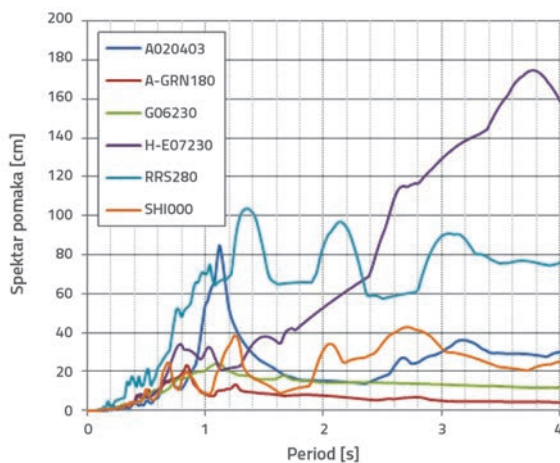
Tablica 2. Amplitude pomaka slobodne površine dominantnog vala (m)

Razina punjenja u spremniku [%]	T_{nat} [s]	Northridge (RRS280)	Imperial Valley (H-E07230)	Kobe (SHI000)	Coyote Lake (G06230)	Loma Prieta (A020403)	Whittier (A-GRN180)
33	2,22	0,36	0,31	0,07	0,09	0,15	0,03
50	2,05	0,56	0,29	0,06	0,11	0,15	0,03
67	1,99	0,49	0,28	0,17	0,08	0,15	0,03
75	1,98	0,39	0,16	0,07	0,12	0,16	0,02
85	1,97	0,21	0,11	0,06	0,12	0,15	0,02
90	1,97	0,10	0,13	0,07	0,12	0,15	0,02
95	1,97	0,09	0,07	0,08	0,07	0,06	0,02

Tablica 3. Maksimalne sile na vrhu spremnika (kN)

Razina punjenja [%]	Northridge (RRS280)	Imperial Valley (H-E07230)	Kobe (SHI000)	Coyote Lake (G06230)	Loma Prieta (A020403)	Whittier (A-GRN180)
33	0	0	0	0	0	0
50	4,47	0	0	0	0	0
67	8,27	4,70	0	0	0	0
75	10,63	5,36	0	0	0	0
85	16,93	13,63	0,65	0	0,02	0
90	27,04	11,54	3,52	0,78	1,42	0
95	96,37	38,43	7,92	13,34	16,15	0,61

površine uslijed zapljuskivanja je prilično velik jer je vrijednost srednjeg perioda najbliža vrijednosti prirodnog perioda spremnika.



Slika 4. Spektar pomaka uslijed potresa

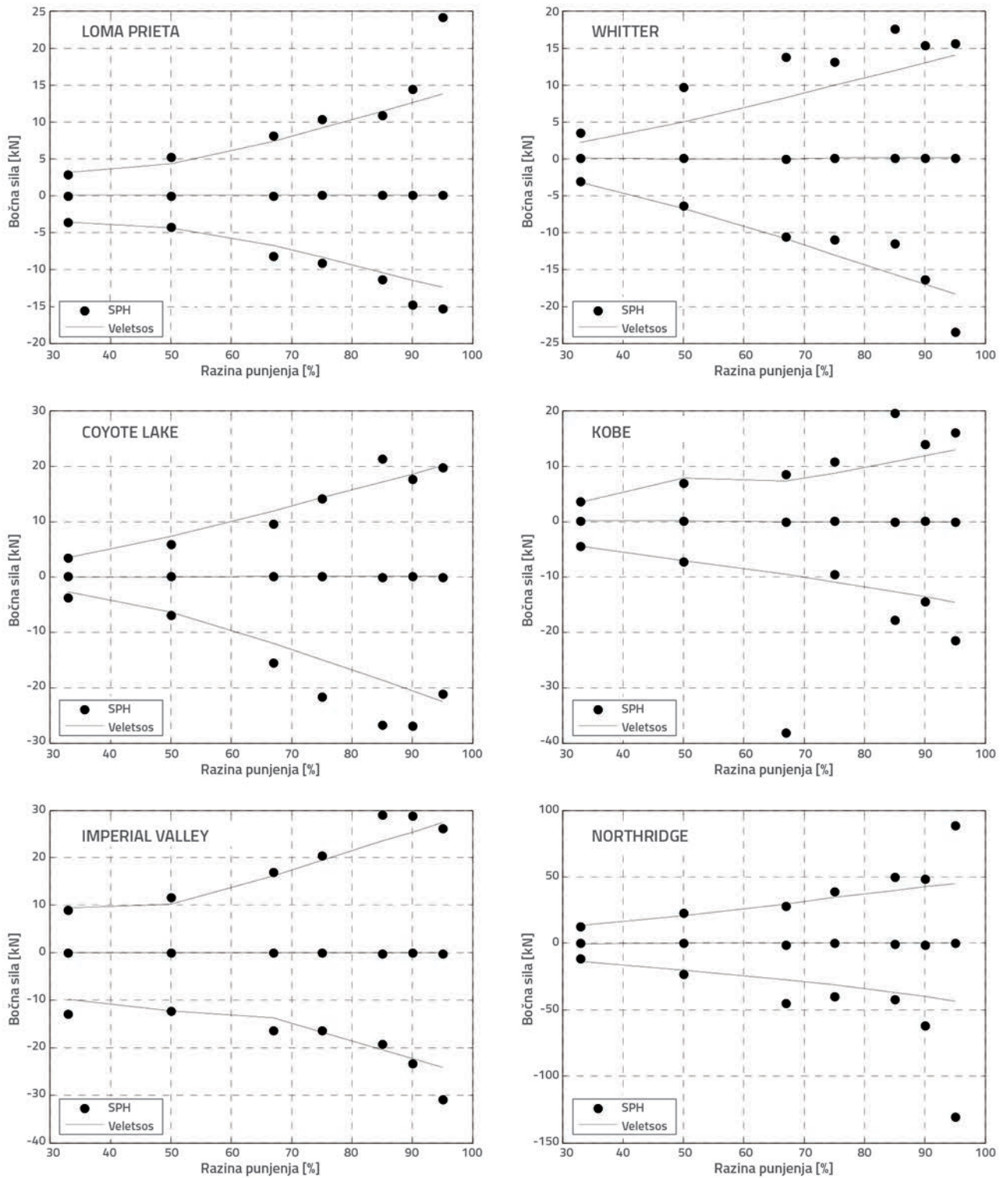
Analiza spektra pomaka koji nastaju zbog snažnog podrhtavanja tla dala je ideju za određivanje intenziteta pomaka uslijed zapljuskivanja u spremnicima tekućine. Slika 4. prikazuje spektar pomaka uz 0,1 % prigušenja za svaki potresni zapis. Pomaci slobodne površine i pomaci odziva slično se ponašaju. Pri oko $T = 2$ s, u slučaju potresa Northridge i Imperial Valley dogodio se

veći pomak u usporedbi s drugim zapisima ubrzanja tla, stoga su svi pomaci slobodne površine uzrokovani valovima na lijevom zidu veći, kao što se može vidjeti u tablici 2. Iako su u slučaju potresa Loma Prieta vrijednosti pomaka spektra odziva relativno male, dominantni period, prikazan u tablici 1. bliži je prirodnim frekvencijama za sve razine punjenja.

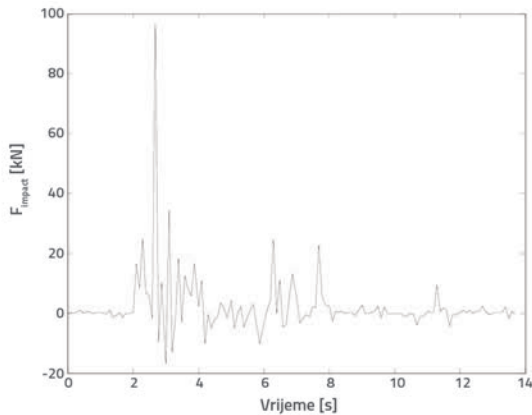
Još jedan značajan doprinos u slučaju otkazivanja spremnika uslijed zapljuskivanja proizlazi iz djelovanja sile na stijenke spremnika. Proračunava se integracijom hidrodinamičkog tlaka po gornjem rubu zida. Tlak se određuje u točkama koje su jednoliko raspoređene po zidu s Kernelovom aproksimacijom:

$$\sum P_j W_{ij} \frac{m_{ij}}{\rho_j} \quad (9)$$

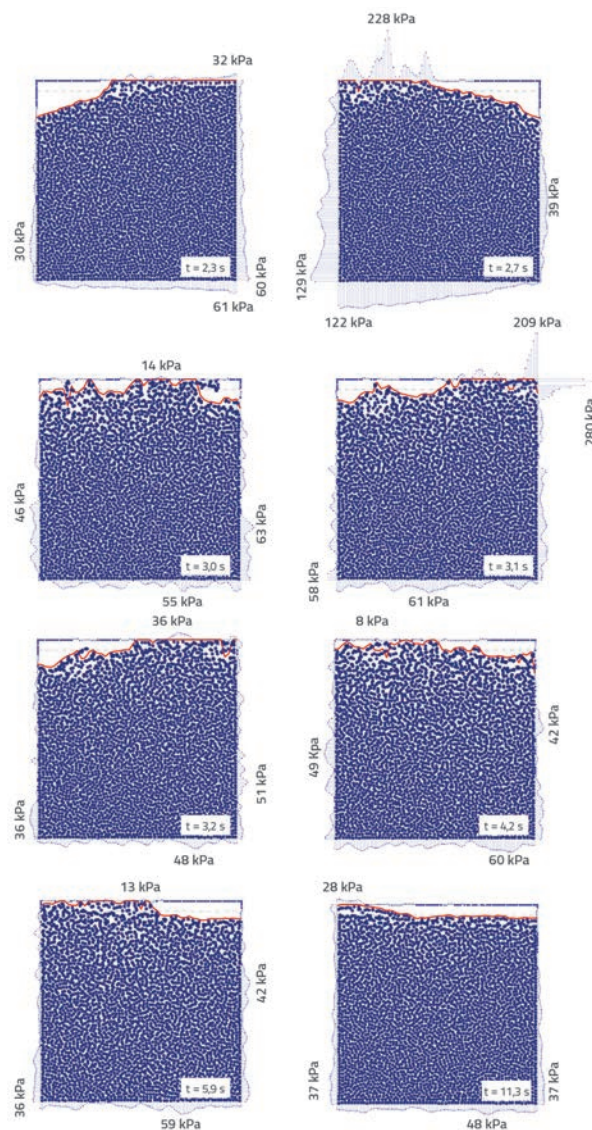
Bočne sile određene modelom hidrodinamike izgladenih čestica također se dobro podudaraju s analitičkim rezultatima (slika 5.). Gornja polovica dijagrama prikazuje maksimalne sile, donja polovica negativne ili minimalne vrijednosti sila, a sredina, gdje je sila čija je vrijednost približno nula, predstavlja prosječnu vrijednost bočne sile. Utjecaj bočnog pritiska zbog zapljuskivanja povećava se s većom razinom vode u spremniku. U slučaju veće razine punjenja, valovi dolaze u kontakt s krovom spremnika, što uzrokuje veći bočni pritisak. Kritični parametar je razina punjenja, stoga zapljuskivanje može rezultirati otkazivanjem krova zbog intenzivnog tlaka zapljuskivanja, kako je istaknuto u uvodu. Valovi zapljuskivanja mogu dostići visinu gornjeg zida spremnika pri svim razinama



Slika 5. Usporedba bočnih sila koje djeluju na spremnik tekućine zbog zapljuskivanja tekućine



Slika 6. Udarne sile na gornjoj stijenci (zidu) spremnika uslijed Northridge potresa (razina punjenja 95 %)



Slika 7. Potres Northridge, raspodjela tlaka i maksimalni tlak (razina punjenja 95 %) po gornjoj stijenci

vode u spremniku. Maksimalno djelovanje udarnih sila na gornju stijenu pri svim razinama vode u spremniku prikazano je u tablici 3. U slučaju niske razine punjenja, nema utjecaja jer su pomaci valova manji od visine zidova spremnika. Udarne sile koje djeluju na gornju stijenu spremnika ovise o razini vode u spremniku i spektru pomaka pobude za prirodni period vibracije spremnika. Čak i pri niskoj razini punjenja od 50 %, u slučaju Northridge potresa pojavljuje se umjerena udarna sila, a pri razini punjenja od 95 % iznos udarne sile gotovo doseže težinu fluida u spremniku.

Zapljuskivanje ne uzrokuje samo udarne sile na zidovima, nego se stvaraju i usisna područja. Osobito u slučaju Northridge potresa, pri razini punjenja od 95 %, taj utjecaj je naglašen u području gornjih stijeni. Najveći utjecaj nastupa naglo pri $t = 2,7$ s (slika 6).

3. Zaključak

Metoda hidrodinamike izgladenih čestica (SPH) nudi obećavajući pristup u analizi pomaka uslijed zapljuskivanja i hidrodinamičkog tlaka u spremnicima tekućina. Ta bezmrežna metoda omogućuje prikaz slobodne površine, ali i omogućuje motrenje formiranja sekundarnih valova, što je vrlo korisno pri rješavanju problema dinamike fluida s pomacima slobodne površine. Simulacije svih 42 slučaja provedene su na osobnom računaru s INTEL i3 procesorom tijekom približno četiri dana. Amplitude valova zapljuskivanja, kao i pomaci slobodne površine te bočne sile određeni u Veletsosovom analitičkom modelu podudaraju se s rezultatima dobivenima metodom izgladenih čestica prikazanom u ovom radu.

Zapaženo je da su amplitude zapljuskivanja, osim s vršnim ubrzanjem tla, usko povezane s vrijednostima spektra odziva pomaka pojedinog potresnog zapisa. S na to obzirom da je približna prirodna frekvencija modela spremnika koji su upotrijebljeni u ovom radu oko 2s, veliki pomaci uslijed zapljuskivanja i hidrodinamički tlak posebno su naglašeni u simulacijama za zapis potresa Northridge gdje je zabilježen najveći spektralni pomak pri približno $T = 2$ s.

Drugi značajni zaključak donesen temeljem prikazanih simulacija je taj da gornje stijene spremnika mogu biti izložene jakim udarnim silama čiji iznos katkad premašuje težinu tekućine u spremniku, na što projektanti trebaju obratiti posebnu pažnju.

Model SPH predstavljen u ovom radu uzima u obzir samo dvodimenzionalni pravokutni spremnik, stoga utjecaj interakcije bočnih stijeni nije ispitivan. Ispitivanje se može proširiti na trodimenzionalni spremnik, međutim to bi zahtijevalo znatno povećanje računalnih resursa potrebnih za simulacije. Također treba napomenuti da je SPH formulacija primijenjena u ovom radu izvedena za spremnike s krutim stijenama. Pretpostavka krutih stijeni široko je primijenjena u projektiranju pravokutnih spremnika, osobito onih armiranobetonskih. Međutim treba napomenuti da, kod spremnika s vrlo tankim zidovima, fleksibilnost zidova može utjecati na bočnu raspodjelu udarnog tlaka [23, 24].

LITERATURA

- [1] Davey, R.: Damage to Potable Water Reservoirs in the Darfield Earthquake, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 43 (2010) 4, pp. 429-431.
- [2] Schiff, A., Tang, A.: Chi-Chi, Taiwan, Earthquake of September 21, 1999, *Lifeline Performance*, Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, Monograph 18, ASCE, 2000.
- [3] Yazıcı, G., Cili, F.: Evaluation of the liquid storage tank failures in the 1999 Kocaeli Earthquake, *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 2008.
- [4] Hamdan, F.: Seismic Behavior of Cylindrical Steel Liquid Storage Tanks, *Journal of Constructional Steel Research*, 53 (2000) 3, pp. 307-333.
- [5] Manos, G., Clough, R.: Tank Damage During the 1983 Coalinga Earthquake, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 13 (1985), pp. 449-466., <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.4290130403>
- [6] Haroun, M.: Behavior of Unanchored Oil Storage Tanks: Imperial Valley Earthquake, *Journal of Technical Councils of ASCE*, 109 (1983) 1, pp. 23-40.
- [7] Hanson, R.: Behavior of Liquid Storage Tanks, The Great Alaska Earthquake of 1964, *National Academy of Science*, Washington D.C., 7 (1973), pp. 331-339.
- [8] Steinbrugge, K.; Rodrigo, F.: The Chilean Earthquakes of May 1960: A Structural Engineering Viewpoint, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53 (1963), pp. 225-307.
- [9] Housner, G. W.: The dynamic behaviour of water tanks, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53 (1963), pp. 381-387.
- [10] Frandsen, J.: Sloshing motions in excited tanks, *J. Comput. Phys.*, 196 (2004), pp. 53-87., <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcp.2003.10.031>
- [11] Nakayama, T., Washizu, K.: The Boundary Element Method Applied to The Analysis of Two-Dimensional Nonlinear Sloshing Problems, *International Journal For Numerical Methods in Engineering*, 17 (1981), pp. 1631-1646., <http://dx.doi.org/10.1002/nme.1620171105>
- [12] Sames, P., Marcouly, D., Schellin T.: Sloshing in rectangular and cylindrical tanks, *J. Ship Res.*, 46 (2002), pp. 186-200.
- [13] Lucy, L.: A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, *Astron J.*, 82 (1977), pp. 1013-1020., <http://dx.doi.org/10.1086/112164>
- [14] Gingold, R., Monaghan, J.: Smoothed Particle Hydrodynamics: theory and application to nonspherical stars, *Mon. Not R. Astr. Soc.*, 181 (1977), pp. 375-389., <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/181.3.375>
- [15] Desbrun, M., Gascuel, M.: Smoothed Particles: A new paradigm for animating highly deformable bodies. *Proceedings of Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation '96*, (1996), pp. 61-76., http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-7486-9_5
- [16] Monaghan, J.: Heat conduction with discontinuous conductivity, *Applied Mathematics Reports and Preprints 95/18*, Monash University, Melbourne, Australia, 1995.
- [17] Batchelor, G.: *An Introduction to Fluid Mechanics 4th Edn.*, Cambridge University Press, Cambridge, 1974.
- [18] Monaghan, J.: Simulating free surface flow with SPH, *J. of Comput. Physics*, 110 (1994), pp. 399-406., <http://dx.doi.org/10.1006/jcph.1994.1034>
- [19] SPH Modeling of Solid Boundaries through a Semi-Analytic Approach, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 5 (2011), pp. 1-15., <http://dx.doi.org/10.1080/19942060.2011.11015348>
- [20] PEER Strong Motion Database, <http://peer.berkeley.edu/smcat>, 01.03.2014.
- [21] Veletsos, A., Shivakumar, P.: Sloshing Response of Layered Liquids in Rigid Tanks, *Free Vibration (Section 4)*, Technical Report prepared for Office of Environmental Restoration and Waste Management Department of Energy, Washington, D.C., 1993.
- [22] Raouf, A.: *Liquid Sloshing Dynamics. Theory and Applications*, Cambridge University Press, 2005.
- [23] Haroun, M., Housner, G.: Seismic design of liquid storage tanks, *Journal of Technical Councils of ASCE*, 107 (1984), pp. 191-207.
- [24] Jaiswal, O., Rai, D., Jain, S.: Review of Seismic Codes on Liquid-Containing Tanks, *Earthquake Spectra*, 23 (2007) 1, pp. 239-260.