

Primljen / Received: 7.4.2023.

Ispravljen / Corrected: 15.6.2023.

Prihvaćen / Accepted: 4.8.2023.

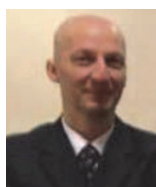
Dostupno online / Available online: 10.11.2023.

Nelinearno ponašanje spremnika za ukapljeni prirodni plin s različitim sustavima potresne izolacije

Autori:



Dr.sc. **İbrahim Hüner**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Pamukkale, Denizli, Turska
Odjel za građevinarstvo
fsm-1453@hotmail.com
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Bülent Akbaş**, dipl.ing.građ.
Institut za tehnologiju Gebze, Kocaeli, Turska
Odjel za građevinarstvo
akbasb@gyte.edu.tr



Prof.dr.sc. **Abdullah Cem Koç**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Pamukkale, Denizli, Turska
Odjel za građevinarstvo
a_c_koc@pau.edu.tr

Prethodno priopćenje

İbrahim Hüner, Bülent Akbaş, Abdullah Cem Koç

Nelinearno ponašanje spremnika za ukapljeni prirodni plin s različitim sustavima potresne izolacije

Ovaj rad pobliže određuje učinke različitih tipova izolacijskih sustava na ponašanje spremnika za ukapljeni prirodni plin (engl. *liquefied natural gas* - LNG) tijekom potresa. Provedene su nelinearne analize primjenom vremenskog zapisa neizoliranih i triju različitih izoliranih modela za prosječno ubrzanje sedam vrsta gibanja tala stupnjevanih kako bi se postigla određena moguća sigurna obustava rada postrojenja tijekom potresa. Program ANSYS Workbench primijenjen je za modeliranje tekućine ukapljenog plina, unutarnjeg čeličnog spremnika, vanjske stijenke, serklaže, krova, betonskih temelja i izolacije stražnje stijenke. Program LS-DYNA primijenjen je za nelinearne analize tekućine LNG-a, unutarnjeg čeličnog spremnika i betonskih temelja. Uspoređeni su rezultati ukupne poprečne potresne sile u podnožju, visine zapljuskivanja, naprezanja čeličnog spremnika i bočnog pomaka. Rezultati su pokazali da nema razlike između konvektivnih i impulsivnih modova za izolirane spremnike LNG-a. Zaključeno je da se valno gibanje tekućine razlikuje od osciliranja konstrukcije, a razdoblja protupotresnih izolacija nisu utjecala na zapljuskivanje. U neizoliranom su sustavu vrijednosti naprezanja dosegle 400 MPa, dok su te vrijednosti u izoliranim spremnicima za LNG prosječno iznosile 350 MPa.

Ključne riječi:

spremnik za ukapljeni prirodni plin, gumeni ležajevi s velikim prigušenjem (HDRB), gumeni ležajevi s olovnom jezgrom (LRB), klizni ležajevi s njihalom (FPS), nelinearne analize

Research Paper

İbrahim Hüner, Bülent Akbaş, Abdullah Cem Koç

Nonlinear behaviour of liquefied natural gas tanks with different seismic isolation systems

This study determines the effects of different types of base isolator systems on the seismic performance of liquefied natural gas (LNG) storage tanks. Nonlinear time-history analyses of the non-isolated and three different isolated models were performed for the average acceleration of seven ground motions scaled to achieve a specified safe shutdown earthquake. The ANSYS Workbench program was used in the modelling studies of the LNG liquid, inner steel tank, outer shell, ring beam, roof and concrete foundation and side wall insulation. The LS-DYNA program was used for the nonlinear analyses of the LNG liquid, inner steel tank and concrete foundation. The results of the total base shear force, sloshing height, steel tank stresses and lateral deflection were compared. The results indicated that there was no difference between the convective and impulsive modes for the LNG tanks with isolators. It was concluded that the wave motion of the liquid was different from the oscillation of the structure and the earthquake isolation times did not affect the sloshing motion. In the non-isolated system, the stress reached 400 MPa, whereas it was 350 MPa on average in the LNG tanks with isolators.

Key words:

liquefied natural gas tanks, HDRB, LRB, FPS, LS-DYNA, ANSYS workbench, nonlinear analyses

1. Uvod

Prirodni plin je plin na bazi ugljikovodika, koji se najvećim dijelom sastoji od metana i vrlo je male gustoće ($0,66 \text{ kg/m}^3$). Prijevoz prirodnog plina, koji je prijeko potreban za zadovoljavanje globalnih energetske potrebe od izvora do krajnjeg korisnika, ključan je postupak. Cestovni je prijevoz postao važna alternativa za opskrbu prirodnim plinom zbog problema kao što su prirodne katastrofe i pitanja sigurnosti cjevovoda za prijenos prirodnog plina u moru i na kopnu. Ukapljeni prirodni plin (engl. *liquefied natural gas* - LNG) ($430\text{--}480 \text{ kg/m}^3$) prevozi se kopnenim i morskim putem, a dobiva se kondenzacijom prirodnog plina na temperaturi od $-168 \text{ }^\circ\text{C}$ i normalnim atmosferskim uvjetima tlaka. Potrebno je napomenuti da je razlika u gustoći između ukapljenog plina i plina u plinovitom stanju oko 600 puta. Kako bi se LNG mogao prevesti razumno brzo i predvidljivo, upotrebljavaju se različite vrste spremnika za skladištenje i transport. Ti su spremnici obično podijeljeni u različite grupe, kao što su kamioneti visoke tonaže, brod, terminali i cisterne [1]. U ovom se radu istražuje tip fiksnog spremnika za skladištenje LNG-a s vrlo velikom zapreminom. Ovi spremnici, poznati i kao dvostruki spremnici, sastoje se od unutarnjeg spremnika od kriogenog čelika (9 % nikla) i vanjske cilindrične stijenke izrađene od tipičnog armiranog betona prenapetog poslije stvrdnjavanja duž okomitog i radijalnog smjera. Donja ploča i krovna kupola izrađene su od armiranog betona. Između spremnika predviđena je odgovarajuća toplinska izolacija [2]. U češćim slučajevima, kada je potporna ploča u izravnom kontaktu s tlom, smrzavanje se sprječava električnim pločama za grijanje [1].

U skladu s normama API 620 [3], API 625 [4] i NFPA 59A [5], konstrukcijski zahtjevi za spremnike ukapljenog plina strogi su jer skladište visokoenergetsku kemijsku tvar. Spremnici za skladištenje LNG-a konstruirani su u skladu s trima razinama seizmičke aktivnosti. Gibanje tla pri potresu karakteristika OBE (potres pri kojem se postrojenje može odmah ponovno pokrenuti i nastaviti s radom) odgovara spektru odziva ubrzanja s vjerojatnošću premašaja od 10 % tijekom razdoblja od 50 godina (srednje povratno razdoblje od 475 godina). Sustav spremnika trebao bi biti oblikovan za nastavak rada tijekom i nakon potresa karakteristika OBE. Nakon potresa karakteristika SSE (potres pri kojem je moguća sigurna obustava rada postrojenja, engl. *Safe Shutdown Earthquake* - SSE) ne bi trebalo biti deformacija na potpornim sustavima spremnika, izolacijskim slojevima ili izolatorima. Vjerojatnost premašaja prihvaćenog najjačega mogućeg potresa (engl. *maximum considered earthquake* - MCER), koji je utvrđen na temelju istraživanja specifičnog za lokaciju, iznosi 2 % unutar razdoblja od 50 godina (srednje povratno razdoblje od 2475 godina). Gibanje tla izazvano naknadnim potresima (ALE) definirano je kao polovina potresa SSE. Sustav spremnika LNG-a izložen naknadnim potresima (engl. *Aftershock Level Earthquake* - ALE) trebao bi održavati zapreminu primarnog spremnika na maksimalnoj operativnoj razini bez gubitaka iz sekundarnog spremnika [3-5].

Ponašanje konstrukcija izloženih tlaku tekućine uzrokovanog potresima prvi je istraživao Westergaard 1933. godine [6]. U istraživanjima koje je proveo Jacobsen [7, 8] analizirani su čvrsti

spremnik s tekućinom i potporne noge koje podupiru spremnik tekućine s horizontalnim ubrzanjem. U istraživanjima koje je proveo Housner [9, 10], hidrodinamički tlak nastao djelovanjem tekućine u spremniku raščlanjen je na svoje komponente te su ispitani učinci impulsnog tlaka uzrokovanog dijelom tekućine koja ubrzava sa spremnikom i konvektivnog tlaka uzrokovanog protresenom tekućinom. Konvektivna komponenta oblikovana je pomoću oscilatora s jednim stupnjem slobode (engl. *degree-of-freedom*, DOF) [11, 12]. Haroun i Housner [13] razvili su model s tri stupnja slobode za deformabilne spremnike pričvršćene za tlo, uključujući fleksibilno ponašanje. Također, Veletsos i Tang [14] proveli su slična istraživanja. Malhatro i sur. [15] razmatrali su pulsirajuće i konvektivne modove i mijenjali svojstva kako bi uključili više modove u dobivene vrijednosti poprečne potresne sile u podnožju i momenata prevrtanja.

Seizmički rizici spremnika za LNG veći su od rizika u tradicionalnim građevinama jer mogu dovesti do sekundarnih nepogoda kao što su eksplozije i zagađenje okoliša, što bi moglo prouzročiti značajnu materijalnu štetu ili gubitak života. Na primjer, tijekom potresa u Niigati 1964. u Japanu uništen je spremnik za ukapljeni plin, što je izazvalo požare i eksplozije i rezultiralo ozbiljnim društvenim gubicima i zagađenjem [16]. Od 1990-ih godina provedeno je nekoliko istraživanja dinamičke analize spremnika za LNG [17, 18]. Osnovne tehnike izolacije, kao što su gumeni ležajevi s olovnom jezgrom (LRB), gumeni ležajevi s visokim prigušenjem (engl. *high damping rubber bearings* - HDRB), čelični histerezni prigušivači i klizni ležajevi s njihovom primjenom se u projektiranju potresne otpornosti spremnika LNG-a te imaju i mnoge druge primjene u modernom konstrukcijskom projektiranju [19-22]. U [19] ispitane su tri različite strukturne konfiguracije spremnika za LNG, odnosno spremnik s pričvršćenim dnom, seizmički izolirani spremnik samo s gumenim ležajevima i seizmički izolirani spremnik s gumenim ležajevima i čeličnim histereznim prigušivačima. Rezultati ispitivanja potvrdili su da je primjena čeličnih histereznih prigušivača značajno smanjila velike pomake. Christovasilis i Whittaker [23] proučavali su seizmički odziv konvencionalnog i izoliranog vertikalnog cilindričnog spremnika za LNG zapremine od 150.000 m^3 primjenom analize konačnih elemenata na mehaničke modele. Vrijednosti poprečne potresne sile u podnožju i momenta prevrtanja, izračunane u spremniku LNG-a izoliranom od potresa, iznosile su između 10 % i 15 % vrijednosti izračunanih za konvencionalni spremnik, dok na visine valova nije utjecala upotreba potresne izolacije. Gregoriou i sur. [20, 21] analizirali su seizmički odziv triju tipičnih spremnika za LNG izoliranih gumenim ležajevima s visokim prigušenjem i gumenim ležajevima s olovnom jezgrom. Kao posljedica ovih procesa, problemi povezani s poprečnom potresnom silom u podnožju i progibom unutarnjeg čelika smanjeni su za oko 70 % do 60 %. Međutim, zabilježeno je povećanje visine prilikom miješanja tekućine u odnosu na neizolirani spremnik, osobito u slučaju izolacije gumenim ležajevima s visokim prigušenjem. Marti i sur. [1] proučavali su tipični moderni spremnik za LNG zapremine od 160.000 m^3 i objavili su da se spremnici izolirani protiv potresa mogu upotrebljavati kada su vrijednosti vršnog

ubrzanja tla u rasponu od približno 0,30 do 0,90 g. Ruifu i sur. [22] analizirali su seizmički odziv vertikalnog, cilindričnog, jako velikog i izoliranog spremnika za LNG s višestrukim kliznim ležajevima s njihovom (engl. *multiple friction pendulum system* - MFPS). Predstavili su statistički razvrstane podatke, uključujući posmik pilota, visinu vala, impulsno ubrzanje, konvektivno ubrzanje i ubrzanje vanjskog spremnika, te dokazali da se izolacijski sustav može savršeno prilagoditi različitim razinama tekućina i da je vrlo učinkovit u kontroli seizmičkog odziva vrlo velikih spremnika LNG-a. Datoli i sur. [24] ispitali su spremnik LNG-a zapremnine približno 172.000 m³ tijekom potresa magnitude 7,1 po Richteru. Stvorili su model konačnih elemenata (FEM) koji se sastoji od ravnog pričvršćenog dna i metalne cilindrične stijenke u kontaktu s ukapljenim plinom te objavili da su gibanje fluida i interakcije fluid-konstrukcija odgovorni za otkazivanje poznato i pod nazivom „slonova noga“. Zhao i sur. [25] istraživali su učinke brzine punjenja tekućine i perioda potresnog gibanja na učinkovitost gumenog ležaja s olovnom jezgrom pomoću programa ABAQUS. Zhao i sur. [26] istraživali su brzinu punjenja tekućine i period potresnog gibanja za određivanje učinkovitosti gumenog ležaja s olovnom jezgrom metodom konačnih elemenata pomoću programa ABAQUS. Analizirali su prenapeti spremnik LNG-a zapremnine 160 000 m³ za 12 valova koji nastanu uslijed potresa u četiri razreda tala pomoću raspodjele naprezanja na vanjskom i unutarnjem spremniku, kao i pomak vrha i poprečnu potresnu silu u podnožju. Maksimalno naprezanje unutarnjeg spremnika bilo je veće od 500 MPa pri stopostotnoj razini tekućine u sva četiri razreda, čime se značajno ugrožava sigurnost. Optimiranje oblikovanja i uspostavljanje sustava ranog upozorenja ključni su za kontrolu visokih razina tekućine. Barone i Sartori [27] proučavali su dva visoka spremnika LNG-a ukupne zapremnine od 10.130 m³ izolirana pomoću 91 kliznog ležaja s njihovom (engl. *friction pendulum systems* - FPS) u luci Corsini u talijanskoj Ravenni. U svojim su eksperimentima otkrili da velika bočna fleksibilnost i visok koeficijent trenja učinkovito odvajaju gibanje tla od konstrukcije i raspršuju dio seizmičke energije. Kilic i sur. [28] proučavali su ponašanje širokog, srednjeg i tankog spremnika s dvodimenzionalnim i trodimenzionalnim elastomernim ležajevima izoliranim samo u horizontalnom smjeru odnosno u oba smjera (horizontalnom i vertikalnom) na temelju nelinearne dinamičke analize primjenom vremenskog zapisa. Utvrđeno je da 3D izolatori daju učinkovitije rezultate od 2D izolatora. Chen i sur. [29] proveli su ispitivanja na vibracijskom stolu i numeričkim modelima spremnika LNG-a s izolatorom tipa LRB. Iako su se poprečna potresna sila u podnožju, moment prevrtanja i

spektri ubrzanja spremnika značajno smanjili, pomak spremnika predstavljao je opasnost za sustav cjevovoda povezanih na spremnik. Sharari i sur. [30] proučavali su dvostruki spremnik LNG-a zapremnine od 160.000 m³ uzimajući u obzir strukturu tla i interakcije tekućine i konstrukcije tijekom procjenjivanja utjecaja dubine likvefakcije tla na ponašanje različitih komponenti sustava. Na temelju rezultata nelinearne analize primjenom vremenskog zapisa, djelovanje potresnih sila na stijenke unutarnjeg čeličnog spremnika i vanjskog spremnika od armiranog betona smanjilo se s povećanjem dubine likvefakcije. Međutim, uočena su povećanja bočnih pomaka, poprečnih potresnih sila i momenata savijanja glave pilota. Uspoređeni su pozitivni učinci izolatora na spremnik za ukapljeni plin tijekom potresa od 0,4 g i više. Da bi se izračunala visina zapljuskivanja u širokim i visokim spremnicima LNG-a s dugim periodom od 9,80 sekundi, odabrani su potresi s najmanjim trajanjem od 27 sekundi i više. Istraživani su učinci izolatora na visinu zapljuskivanja tekućine ukapljenog plina. Procijenjeni su rezultati analize srednje jakih i jakih potresa u spremnicima LNG-a s ankerima i izolatorima.

Ovaj rad predstavlja studiju slučaja koja analizira ponašanje spremnika za LNG bez potresne izolacije i s tri različite vrste potresne izolacije u podnožju.

2. Opis i modeliranje spremnika za skladištenje ukapljenog prirodnog plina (LNG)

Za potrebe ovog istraživanja odabran je spremnik LNG-a zapremnine od 232.000 m³, izrađen za upotrebu u područjima visoke seizmičke aktivnosti. Proučavani su učinci vrste izolacije na klizanje sferne podnice, visinu valova zapljuskivanja ukapljenog plina, bočne pomake na stijenci čeličnog spremnika, naprezanja u spremniku i dijagrame sile-pomaka za izolatore. U ovom spremniku omjer visine i polumjera iznosi 1. Spremnik ukapljenog plina čine unutarnji, izolacijski i vanjski sloj. Visina unutarnjih i vanjskih spremnika iznosi 45 m, a promjer 84 odnosno 88 m. Najveća visina tekućine je 42 m. Debljina vanjske stijenke je konstantna (0,8 m duž njezine visine), a debljina unutarnje stijenke povećava se s vrha prema dnu, od 12 do 32 mm. Prostor (1,20 m) između dvije stijenke ispunjen je perlitom koji osigurava toplinsku izolaciju. Dok je vanjska stijenka postavljena izravno na kružnu temeljnu ploču (1,80 m), između unutarnje stijenke i temeljne ploče postavljen je sloj pjenastog stakla (0,70 m) za toplinsku izolaciju. Provedene su analize uzimajući u obzir geometrijska svojstva navedena u tablici 1. i svojstva

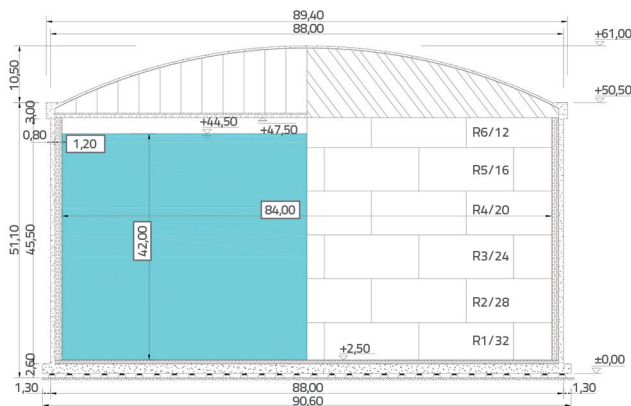
Tablica 1. Svojstva materijala spremnika za ukapljeni plin

Opis	Youngov modul elastičnosti E [MPa]	Poissonov koeficijent ν	Obujamska masa γ [kg/m ³]
Unutarnji čelični spremnik	210000	0,30	7850
Beton	37000	0,20	2500
LNG	2000	-	480
Izolacija od perlita	7500	-	240
Izolacija od pjenastog stakla	1200	-	150

Tablica 2. Geometrijske mjere spremnika za skladištenje LNG-a

Opis	Dimenzije
Visina čeličnog unutarnjeg spremnika	45,00 m
Promjer čeličnog unutarnjeg spremnika	84,00 m
Debljina stijenke čeličnog unutarnjeg spremnika	32 mm-12 mm
Debljina dna čeličnog unutarnjeg spremnika	5 mm
Visina LNG-a	42,00 m
Visina vanjskog betonskog spremnika	61,00 m
Promjer vanjskog betonskog spremnika	88,00 m
Debljina stijenke vanjskog betonskog spremnika	0,80 m
Debljina sfere vanjskog betonskog spremnika	0,40 m
Vanjski betonski zid s debljinom izolacije od perlita između unutarnjeg čeličnog spremnika	1,20 m
Debljina izolacije (pjenasto staklo) donjeg temelja	0,70 m
Debljina temelja	1,80 m

materijala u tablici 2. Čelični spremnik koji čini unutarnji sloj izrađen je od čelične legure koja sadrži nikal (9 % Ni). Zahvaljujući spomenutoj čeličnoj leguri, unutarnji spremnik odlikuje se izvrsnom otpornošću na hladnoću, dobrom sposobnošću zavarivanja i ima malu sklonost pucanju zbog hladnoće [3, 26]. Kao što je prikazano na slici 1., unutarnji se spremnik sastoji od šest različitih slojeva visine od 8 m.

Slika 1. Shematski prikaz presjeka spremnika jednostavnog oblikovanja za skladištenje ukapljenog plina (LNG) zapremnine 232.000 m³

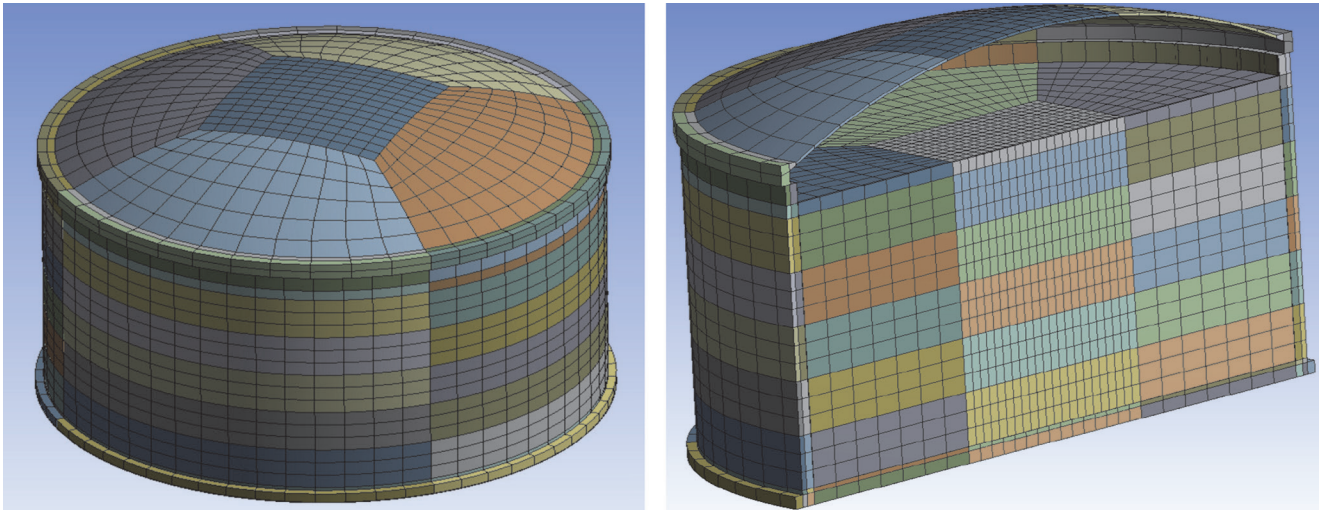
Na primjer, sloj R1/32 odnosi se na prvi sloj debljine 32 mm na dnu. Debljine tih slojeva postupno se povećavaju od vrha prema dnu, kao što je prikazano u tablici 3. Kada je unutarnji spremnik potpuno (100 %) ispunjen ukapljenim plinom, maksimalno naprezanje u njemu prelazi 500 MPa za četiri razreda tla. S obzirom na to da je granica popuštanja upotrijebljene čelične legure između 500 i 600 MPa, ova vrijednost naprezanja predstavlja rizik za sigurnost konstrukcije [26, 31]. Odabrani modeli spremnika za LNG modelirani su pomoću metode konačnih elemenata u programu ANSYS Workbench [32]. Vanjske i unutarnje stijenke te kupola i ploča temelja modelirane

su pomoću plošnih elemenata sa četiri čvora i 24 stupnjeva slobode. Slojevi izolirani pjenastim staklom i perlitom modelirani su pomoću volumnih elemenata s osam čvorova i 12 stupnjeva slobode. Udio tekućine modeliran je pomoću elemenata fluida s osam čvorova i 12 stupnjeva slobode. Međudjelovanje fluida i konstrukcije pretpostavljeno je određivanjem odgovarajućih jednadžbi uparivanja na čvorovima spoja fluida i konstrukcije. Vanjski betonski zid, unutarnji čelični spremnik, betonska kupola i serklaž, ploča temelja, pjenasto staklo na dnu te bočna izolacija od perlita oblikovani su pomoću četverokutnih plošnih elemenata. U tim je analizama tekućina opisana kao akustični element i kombinirana je s konstrukcijom kako bi se dobili rezultati u skladu s teorijskim izračunima.

Tablica 3. Debljina svakog sloja u unutarnjem spremniku

Sloj	Razina [m]	Visina [m]	Debljina [mm]
1	+2,50 do +10,50	8,00	32
2	+10,50 do +18,50	8,00	28
3	+18,50 do +25,50	8,00	24
4	+25,50 do +33,50	8,00	20
5	+33,50 do +41,50	8,00	16
6	+41,50 do +47,50	5,00	12

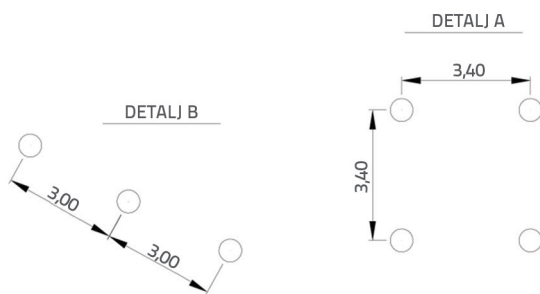
Seizmička analiza metodom konačnih elemenata, koja je razvijena pomoću programa ANSYS Workbench, prevedena je u program LS-DYNA, a nelinearne seizmičke prolazne analize izvedene su pomoću programa LS-DYNA. Plošni i volumni elementi imali su slične stupnjeve slobode i vrste. Multilinearni model materijala po odsječcima MAT_24 primijenjen je za metalne dijelove, a elastični model MAT_01 za betonske i izolacijske dijelove. Kada je u pitanju fluid, učinak zapljuskivanja prikazan je pomoću MAT_NULL s Langrangeovom metodom primijenjenom s automatskim uparivanjem čvorova i površine.



Slika 2. Struktura mreže konačnih elemenata za sustav spremnika za ukapljeni plin

3. Modeliranje izolacijskog sustava

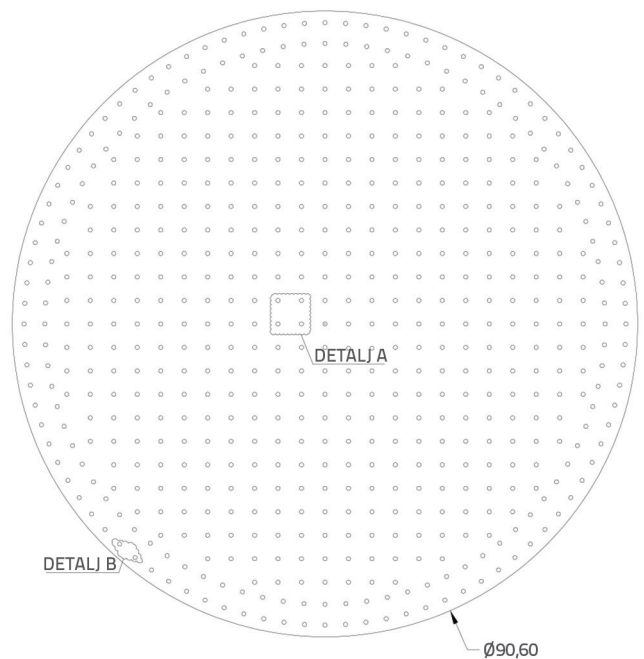
Izolacijski sustavi u podnožju primijenjeni u ovom radu obuhvaćaju niz sličnih gumenih ležajeva ravnomjerno raspoređenih pod pločom temelja. Ukupan broj potrebnih ležajeva izračunan je uzimajući u obzir da pojedinačni element podupire najviše 10-12 m² površine ploče temelja [20, 21]. Budući da je cilj ovog rada bio ispitati razlike u ponašanju različitih tipova izolatora u istom sustavu, nije provedeno polaganje kombinirane izolacije. Stoga, procijenjeni broj ležajeva za spremnik zapremnine 232.000 m³ iznosio je 597. Frekvencija iznimno velikih spremnika za ukapljeni plin općenito je između 2 i 10 Hz, što odgovara specifičnom području rezonancije za gibanja tla izazvana potresom [18].



Slika 3. Detalji A i B

Model konačnih elemenata za prethodno opisan spremnik LNG-a razvijen je kako bi se uključili seizmički izolatori u podnožju konstrukcije tijekom modalnih analiza. Pretpostavlja se da ležajevi posjeduju beskonačnu vertikalnu krutost. Na temelju te pretpostavke smanjeno je ograničenje pomaka u smjeru gibanja tijekom potresa na dnu stijenci spremnika i postavljene su nelinearne horizontalne opruge koje povezuju dno stijenci i tlo. U programu ANSYS Workbench za modeliranje sustava potresne izolacije korišteni su elementi veze (LINK8)

koji djeluju kao rešetkasti elementi i kombiniraju nelinearne materijale [32]. Pomoću programa SpaceClaim ležajevi su pretvoreni u gredne/elemente veze kako bi se održala točna lokacija, a spojne točke povezane su na betonsku podlogu kako bi se stvorila veza. U programu ANSYS Workbench pretpostavlja se da su elementi veze čvrsto povezani s betonom, a s druge strane upeti. Ti su elementi veze za izvođenje simulacije potresa pretvoreni u ležajeve pomoću formulacije Beam ELFORM 6. Grednim elementima u programu LS-DYNA pridružen je MAT_197_SEISMIC_ISOLATOR, čija su svojstva opisana u nastavku teksta.



Slika 4. Raspored potresne izolacije za gumene ležajeve s visokim prigušenjem (HDRB), gumene ležajeve s olovnom jezgrom (LRB) i klizne ležajeve s njihalom (FPS)

Tablica 4. Inženjerska svojstva i bilinearni parametri opruge gumenih ležajeva s visokim prigušenjem, SI-N 900/204, i gumenih ležajeva s olovnom jezgrom, SI-N 900/225-185

Opis	HDRB SI-N 900/204	LRB SI-N 900/225-185
Vertikalna krutost K_v [kN/mm]	2317	2198
Efektivna horizontalna krutost K_e [kN/mm]	2,50	2,47
Elastična horizontalna krutost K_1 [kN/mm]	19,67	17,33
Pomak pri popuštanju d_1 [mm]	12	18
Plastična horizontalna krutost K_2 [kN/mm]	1,97	1,77
Najveći seizmički pomak d_2 [mm]	400	400
Najveće vertikalno opterećenje pri kombinacijama opterećenja uključujući seizmičko djelovanje [kN]	7980	6630
Krutost elastomera [mm]	900	900
Ukupna debljina elastomera t_e [mm]	204	225
Dinamički modul klizanja G_{din} na $\gamma = 1$ [MPa]	0,8	0,6

Tablica 5. Inženjerska svojstva i bilinearni parametri opruge za klizni ležaj s njihalom (FPS), FIP-D M 1600/800 (3700)

Opis	FIP-D M 1600/800 (3700)
Vertikalna krutost K_v [kN/mm]	36715
Povratna krutost K_r [kN/mm]	0,6376
Efektivna horizontalna krutost K_e [kN/mm]	1,145
Sila trenja koju stvara izolator F_o [kN]	203,5
Najveća horizontalna sila F_{max} [kN]	458
Najmanji koeficijent trenja μ [%]	4,872
Proračunski koeficijent viskoznog prigušenja ξ_e	0,2826
Ekvivalentni polumjer zakrivljenosti R [mm]	3700
Najveći seizmički pomak d [mm]	400
Promjer izolatora bez ankera D [mm]	940
Visina izolatora bez spojki H [mm]	199

3.1. Gumeni ležajevi s visokim prigušenjem (HDRB)

Gumeni ležaj s visokim prigušenjem jedan je od tri glavne podvrste armiranih elastomernih ležajeva [33]. Sastoje se od tankih gumenih slojeva ojačanih čeličnim pločama. Prema idejnom projektu [34], broj gumenih ležajeva s visokim prigušenjem (SI-N 900/204) za upotrebu u spremniku za ukapljeni plin zapremnine 232.000 m³ iznosi 597. Svojstva primijenjena u ovom radu navedena su u tablici 4.

3.2. Gumeni ležajevi s olovnom jezgrom (LRB)

Gumeni ležajevi s olovnom jezgrom sastoje se od slojeva čeličnih ploča, gumenih slojeva i olovne jezgre. Slično čeličnim pločama u ležajevima od prirodnog kaučuka, čelični slojevi omogućuju vertikalnu krutost, gumeni slojevi pružaju visoku horizontalnu fleksibilnost, a olovna jezgra ovim komponentama osigurava dodatnu krutost i svojstva

prigušivanja vibracija. Prema idejnom projektu [34], broj gumenih ležajeva s olovnom jezgrom (SI-N 900/ 225- 225) za upotrebu u spremniku za ukapljeni plin zapremnine 232.000 m³ iznosi 597. Svojstva primijenjena u ovom radu navedena su u tablici 4.

3.3. Klizni ležajevi s njihalom (FPS)

Klizni ležajevi s njihalom su klizni ležajevi sa zakrivljenom površinom i sastoje se od pokretnog klizača i pokrovne ploče. Klizač primijenjen u ovom sustavu obložen je samopodmazujućom kompozitnom oblogom. Tijekom potresa, pokretni klizač na strani ležaja duž zaobljene površine omogućuje konstrukciji da se kreće polaganim pokretima poput njihala. Prema idejnom projektu [34], broj kliznih ležajeva [FIP-D M 1600/800 (3700)] za upotrebu u spremniku za ukapljeni plin zapremine 232.000 m³ iznosi 597. Svojstva primijenjena u ovom radu navedena su u tablici 5.

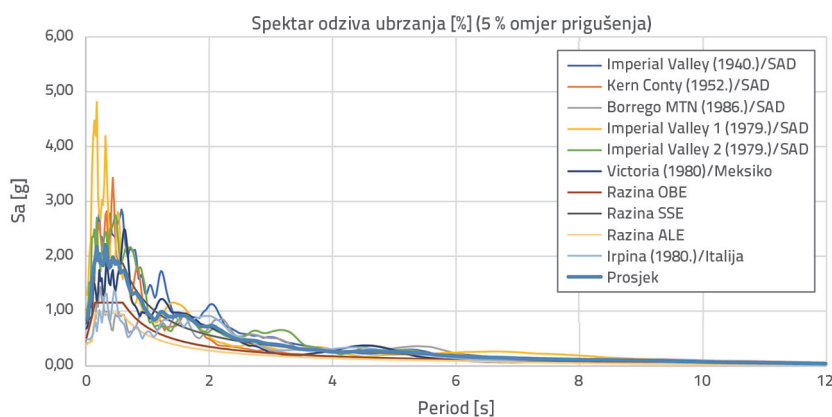
Tablica 6. Specifikacije potresa korištene za analize primjenom vremenskih zapisa

Br.	Gibanja tla tijekom potresa (registracijski broj iz Pacifičkog centra za potresno inženjerstvo - PEER)	Stanica	Kratica	Godina	M_w	Vrijeme [s]	Skalirajući faktor potresa SSE	Vršno ubrzanje tla - PGA (SSE)
1	Imperial Valley / SAD (RSN6)	El Centro Array	IV2	1940.	6,95	53,72	4,85	1,022
2	Kern County / SAD (RSN15)	Škola Taft Lincoln	KC	1952.	7,36	54,35	5,75	1,037
3	Borrego Mtn / SAD (RSN36)	El Centro Array	BM	1968.	6,80	79,99	7,20	0,414
4	Imperial Valley-I / SAD (RSN162)	Vatrogasna stanica Calexico	IV06-1	1979.	6,53	37,86	6,30	1,282
5	Imperial Valley-II / SAD (RSN169)	Delta	IV06-2	1979.	6,53	70,00	3,95	0,931
6	Victoria / Meksiko (RSN266)	Chihuahua	VM	1980.	6,33	27,00	4,50	0,679
7	Irpina / Italija (RSN286)	Bisaccia	IITA	1980.	6,90	38,26	5,05	0,482

4. Rezultati analize

4.1. Gibanja tla tijekom potresa

Analize sustava spremnika za ukapljeni plin i sustava punjenja dodanih ovom sustavu provedene su za tri vrste seizmičkih gibanja tla: Potresi karakteristika OBE, SSE i ALE. Prema normama API 625 [4] i NFPA 59A [5] gibanje tla uzrokovano potresom OBE definirano je spektrom odziva ubrzanja s vjerojatnošću premašaja od 10 % u 50 godina (prosječno povratno razdoblje od 475 godina). Na temelju istraživanja u posebnim lokacijama, potres SSE definiran je kao gibanje tla uzrokovano prihvaćenim najjačim mogućim potresom (MCER) u razdoblju od 50 godina (srednje povratno razdoblje od 2475 godina). Gibanje tla izazvano naknadnim potresom (ALE) definira se kao polovina potresa SSE. Magnitude primijenjene za analize prijašnjih potresa navedene su u tablici 6., uključujući godinu, vrijeme, skalirajući faktor potresa SSE, vršno ubrzanje tla potresa SSE. Pristup linearnog skaliranja upotrijebljen je kako bi se prilagodio vremenski zapis ubrzanja za odgovarajući period. Zadani raspon vrijednosti perioda određen je između 0,1 i 12 sekundi. Taj raspon predstavlja vrlo širok pojas spektra



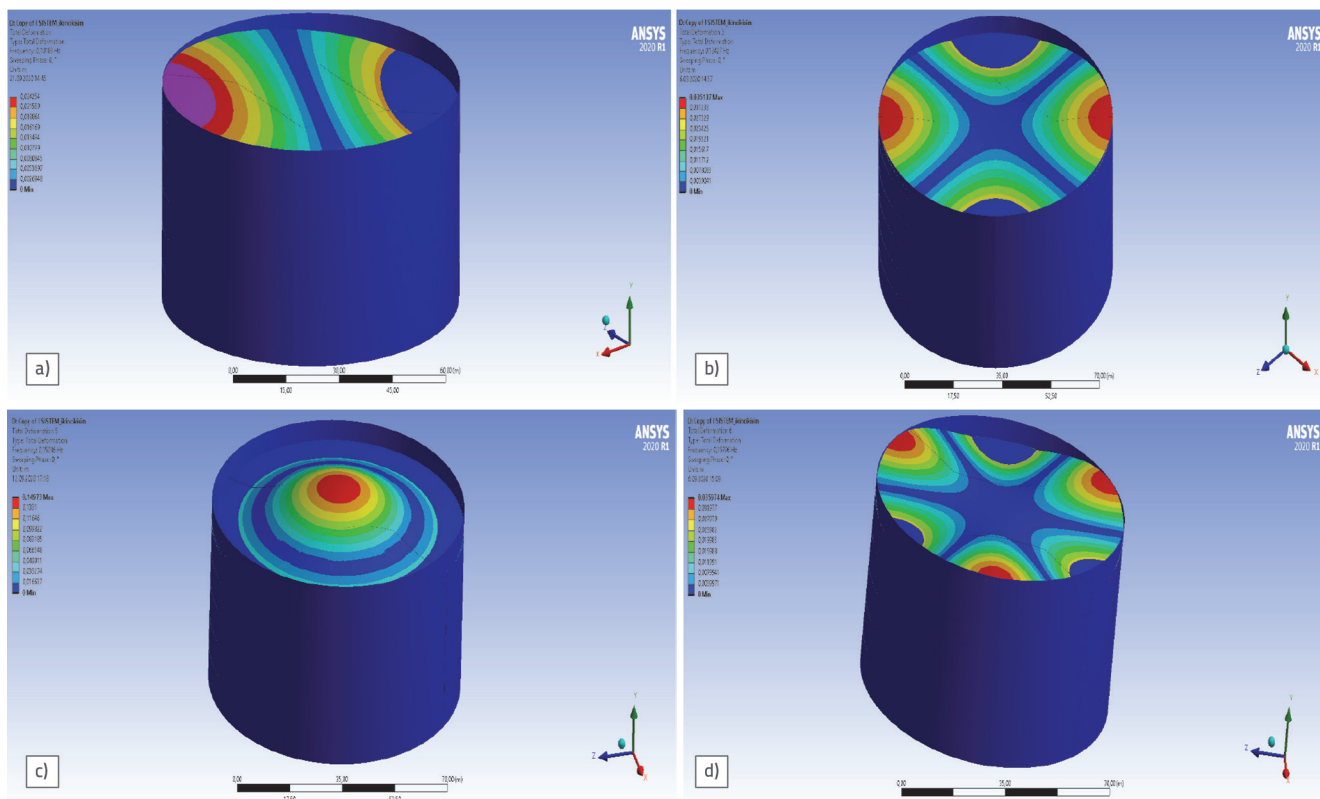
Slika 5. Spektri odziva ubrzanja lokacijski specifični za predviđeni potres uvećani za skalirajuće faktore potresa pri kojem je moguća sigurna obustava rada postrojenja (SSE)

koji odgovara ciljanom spektru ubrzanja zbog dugog perioda miješanja ($T_{c1} = \sim 9,7$ s) uskladištenog LNG-a. Za usklađivanje sa spektrom potresa SSE primijenjeno je sedam parova gibanja tla tijekom potresa, poznatih i kao početna ili osnovna gibanja. Prema izračunima, impulsni mod srednjih spektralnih koordinata odgovarao je projektnom spektru za navedene periode, dok je konvektivni mod bio znatno niži od projektnog spektra za te periode. Prihvaćen je razred tala D, a parametarske vrijednosti gibanja tla i ubrzanja projektirane razine utvrđene su kao $S_s = 1,926$, $S_1 = 0,660$, $S_{D5} = 1,926$ (SSE) i $S_{D1} = 1,123$ (SSE). Za usklađivanje sa spektrima potresa SSE primijenjeno je sedam parova gibanja tla tijekom potresa.

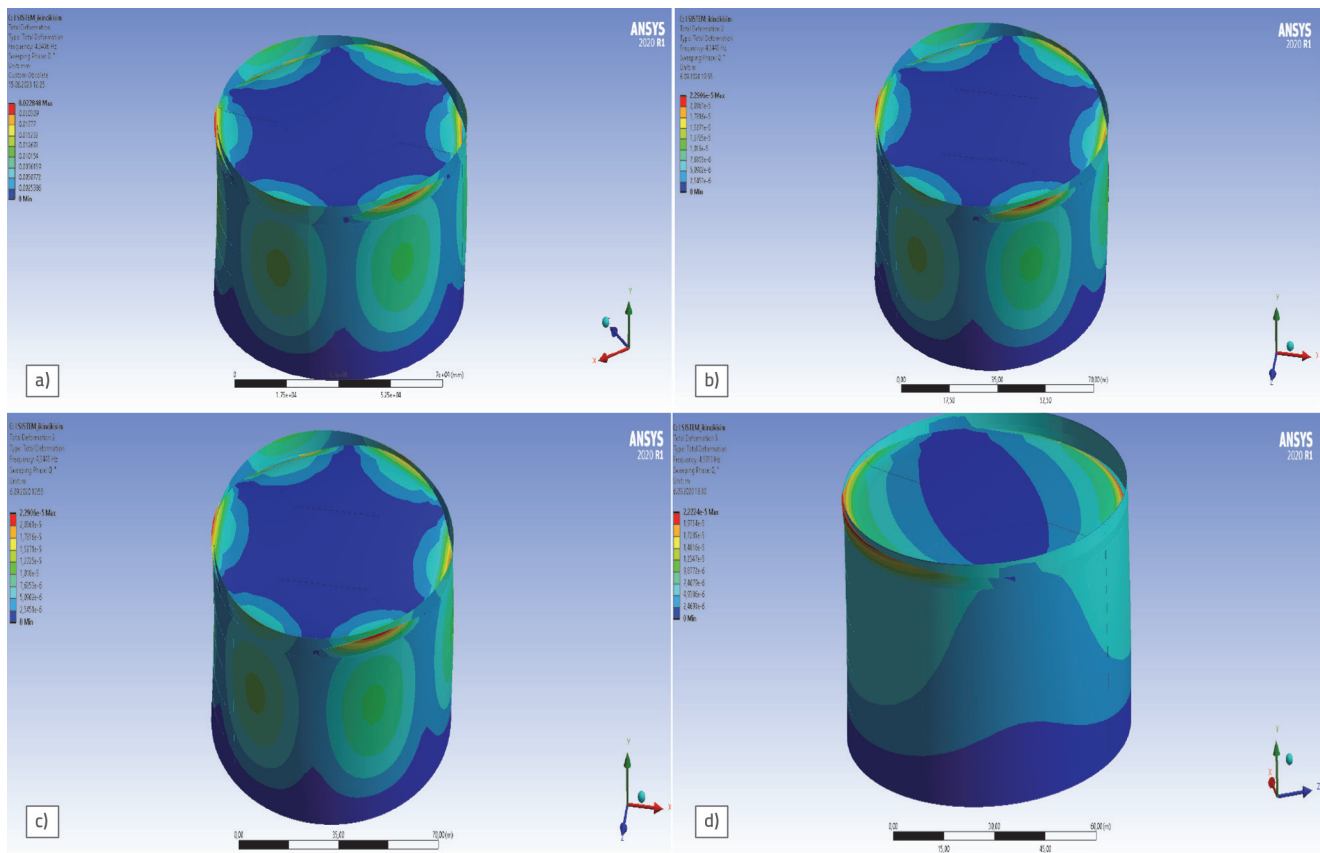
4.2. Rezultati modalne analize

4.2.1. Čelični unutarnji spremnik i ukapljeni plin

Rezultati modalne analize za čelični unutarnji spremnik i fluid ukapljenog plina navedeni su u tablici 7. za neizolirani spremnik (s pričvršćenim dnom) i za spremnike s izolatorima tipa HDRB, LRB i FPS. Slika 6. prikazuje prvi, drugi, treći i četvrti konvektivni mod modela konačnih elemenata. Konvektivni modalni oblici prikazuju mućkanje tekućine u spremniku bez stijenke spremnika. Impulsni modalni oblici predstavljaju kombinirano gibanje spremnika i tekućine. Slika 7. prikazuje prvi, drugi, treći i četvrti impulsni mod modela konačnih elemenata. U ovom poglavlju predstavljeni su rezultati statičkih i dinamičkih analiza. Prvi horizontalni konvektivni i impulsni period iznosio je 10, odnosno 0,2302 sekundi. Dulji period (niskofrekventni) konvektivnog moda uzrokovao je turbulenciju tekućine i ošteti krov spremnika. Razlika između frekvencija impulsnog i konvektivnog moda dokazala je da učinci interakcije između tih modova nisu značajni.



Slika 6. Vrste konvektivnih modova modela konačnih elemenata za neizolirani spremnik za ukapljeni plin: a) Prvi konvektivni mod $T_1 = 9,8232$ s; b) Drugi konvektivni mod $T_2 = 7,4460$ s; c) Treći konvektivni mod $T_3 = 6,6269$ s; d) Četvrti konvektivni mod $T_4 = 6,3291$ s



Slika 7. Vrste impulsnih modova modela konačnih elemenata za neizolirani spremnik za ukapljeni plin: a) Prvi impulzni mod $T_1 = 0,2302$ s; b) Drugi impulzni mod $T_2 = 0,2301$ s; c) Treći impulzni mod $T_3 = 0,2178$ s; d) Četvrti impulzni mod $T_4 = 0,2158$ s

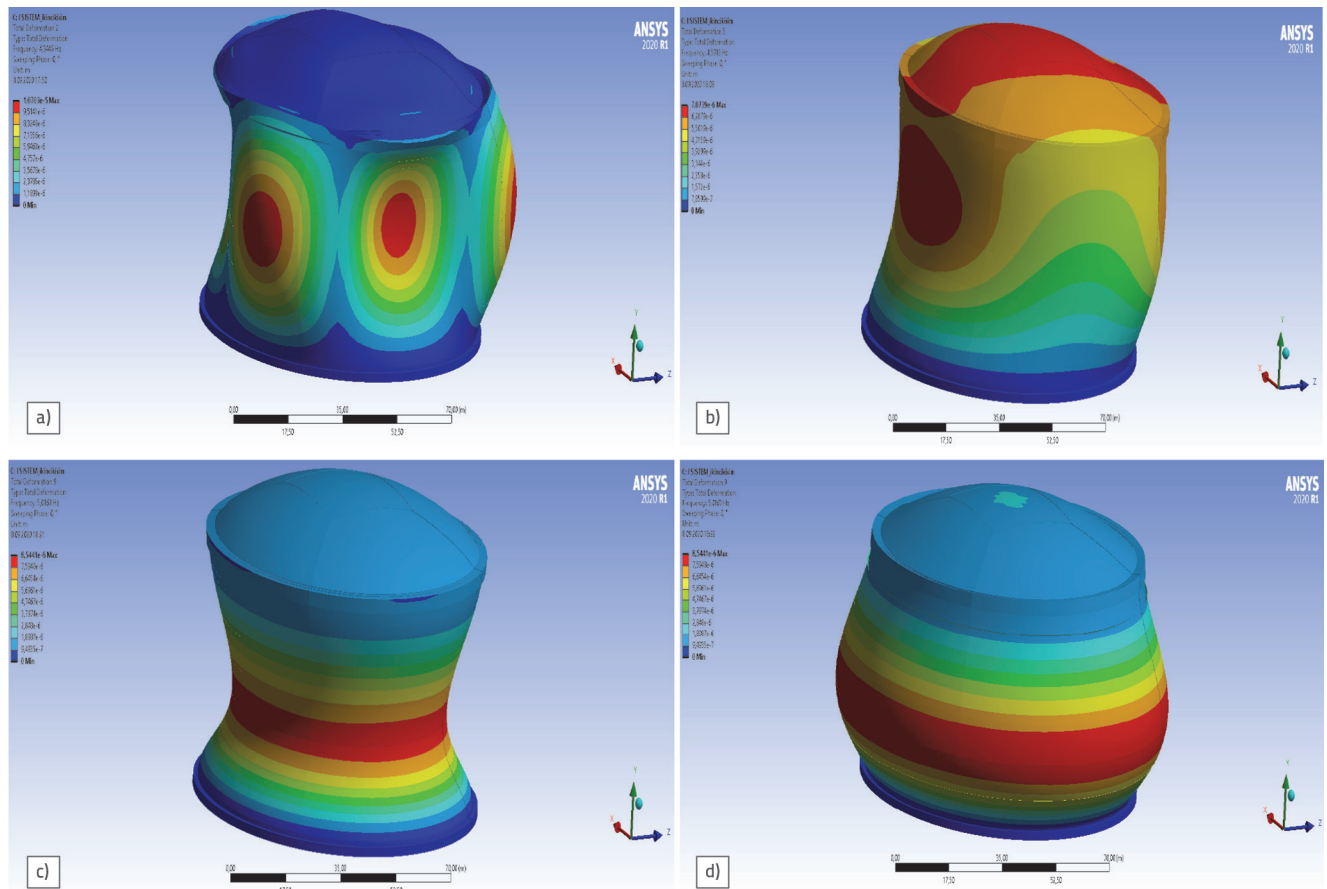
Tablica 7. Prirodni periodi unutarnjeg modela

Dio	Broj moda	Neizoliran		HDRB izolator		LRB izolator		FPS izolator	
		Frekvencija [Hz]	Period [s]	Frekvencija [Hz]	Period [s]	Frekvencija [Hz]	Period [s]	Frekvencija [Hz]	Period [s]
Fluid LNG-a	Mod 1	0,1018	9,8232	0,1011	9,8912	0,1011	9,8912	0,1006	9,9404
	Mod 2	0,1343	7,4460	0,1343	7,4460	0,1343	7,4460	0,1343	7,4460
	Mod 3	0,1509	6,6269	0,1509	6,6269	0,1509	6,6269	0,1509	6,6269
	Mod 4	0,1580	6,3291	0,1580	6,3291	0,1580	6,3291	0,1580	6,3291
	Mod 5	0,1780	5,6180	0,1780	5,6180	0,1780	5,6180	0,1780	5,6180
	Mod 6	0,1784	5,6054	0,1782	5,6117	0,1782	5,6117	0,1781	5,6148
Čelični spremnik i fluid LNG-a	Mod 1	4,3436	0,2302	3,9718	0,2518	3,9706	0,2519	3,4718	0,2880
	Mod 2	4,3445	0,2301	4,0986	0,2440	4,0975	0,2441	3,8823	0,2576
	Mod 3	4,5913	0,2178	4,1754	0,2395	4,1741	0,2396	3,9885	0,2507
	Mod 4	4,633	0,2158	4,7762	0,2094	4,7417	0,2109	4,099	0,2440
	Mod 5	5,016	0,1994	5,0602	0,1976	5,0593	0,1977	4,8246	0,2073
	Mod 6	5,301	0,1886	5,7193	0,1748	5,7174	0,1749	5,010	0,1996

4.2.2. Vanjski betonski spremnik

Također su provedene modalne analize vanjskih stijenci od prenapetog betona, serklaža, kupola i temeljne ploče. Rezultati

modalnih analiza za vanjski betonski spremnik bez izolacije i s izolatorima tipa HDRB, LRB i FPS navedeni su u tablici 8. Slika 8. prikazuje prvi, drugi i treći modalni oblik modela konačnih elemenata. U prvom je modu deformacija stijenci bila radijalna. Međutim, kod



Slika 8. Modalni oblici neizoliranog vanjskog betonskog spremnika (FEM): a) Prvi mod $T_1 = 0,2302$ s; b) Drugi mod $T_2 = 0,2178$ s; c) Treći mod $T_3 = 0,1994$ s

Tablica 8. Prirodni periodi vanjskog betonskog modela

Dio	Broj moda	Neizoliran		HDRB izolator		LRB izolator		FPS izolator	
		Frekvencija [Hz]	Period [s]	Frekvencija [Hz]	Period [s]	Frekvencija [Hz]	Period [s]	Frekvencija [Hz]	Period [s]
Vanjski betonski spremnik	Mod 1	4,3445	0,2302	3,9718	0,2518	3,9716	0,2518	3,4718	0,2880
	Mod 2	4,5913	0,2178	4,7762	0,2094	4,7174	0,2120	3,8823	0,2576
	Mod 3	5,0163	0,1994	5,7193	0,1748	5,7174	0,1749	4,8246	0,2073

krovne dijafagme nije došlo do bočnog pomaka. U drugom su modu stijenke bile pomaknute lateralno, dok su serklaža, kupola i temelj bili čvrsti. U trećem su se modu stijenke od prenapetog betona kretale duž svojih osi u pozitivnom i negativnom smjeru.

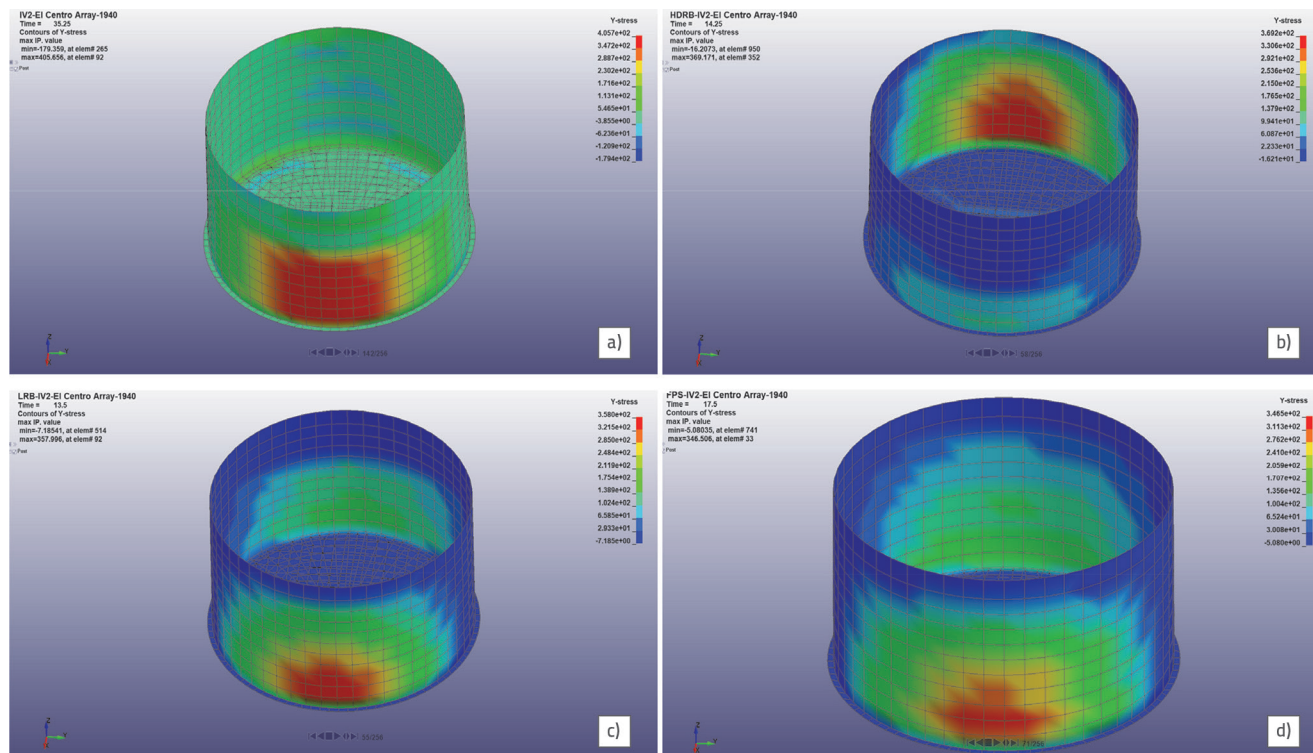
4.3. Rezultati analize primjenom vremenskih zapisa

Ubrzanje gibanja tla definirano je pomoću opcije LOAD_BODY_X u programu LS-DYNA. Dno je bilo pričvršćeno kako bi se osigurala inercija spremnika. Osim toga, definiran je LOAD_BODY_Z radi očuvanja gravitacije. Budući da je analizirana velika konstrukcija s domenom tekućine, primijenjeno je vrijeme nagibnog sučelja kako bi se zanemario početni gravitacijski učinak i izbjeglo nepotrebno opterećenje konstrukcije. Pomoću programa LS-DYNA napravljena je simulacija interakcije fluida i konstrukcije u spremniku napunjenom fluidom. Program ima značajne prednosti, osobito za rješavanje problema povezanih s dinamičkim dodirom. Osim toga, program LS-DYNA pruža materijale i standardizirane kontaktne formulacije pomoću kojih

se mogu modelirati fluidi i predstaviti interakciju između stijenke spremnika i fluida tijekom seizmičke uzbude.

4.3.1. Naprezanja u čeličnom unutarnjem spremniku

Maksimalne vrijednosti naprezanja prema kriteriju von Misesa (MPa) unutarnjeg spremnika i postoci (%) smanjivanja u odnosu na neizolirane vrijednosti koje nastaju tijekom sedam potresa u neizoliranim spremnicima i potpuno napunjenim spremnicima LNG-a s HDRB, LRB i FPS izolatorima prikazane su u tablici 9. Podaci o najvećoj raspodjeli naprezanja neizoliranih i spremnika s HDRB, LRB i FPS izolatorima za potres Imperial Valley, stanica El Centro Array prikazani su na Sl. 9. U usporedbi s konvencionalnim spremnicima, potresni izolatori HDRB, LRB i FPS pružaju prosječno smanjenje s 15 % na 5 % u odbojnim modovima. Uzimajući u obzir uvjete fiksne baze, smanjenje maksimalnog naprezanja unutarnje stijenke od oko 15 % u usporedbi s neizoliranim spremnikom otkriva važnost upotrebe izolatora. Dinamička opterećenja uzrokuju veće naprezanje nego



Slika 9. Vlačna naprezanja stijenke unutarnjeg čeličnog spremnika bez izolacije i spremnika s izolatorima tipa HDRB, LRB i FPS: a) neizolirani; b) HDRB izolator; c) LRB izolator; d) FPS izolator

Tablica 9. Maksimalne vrijednosti naprezanja prema kriteriju von Misesa (MPa) i stope smanjenja (%) za unutarnje spremnike u odnosu na neizolirane vrijednosti

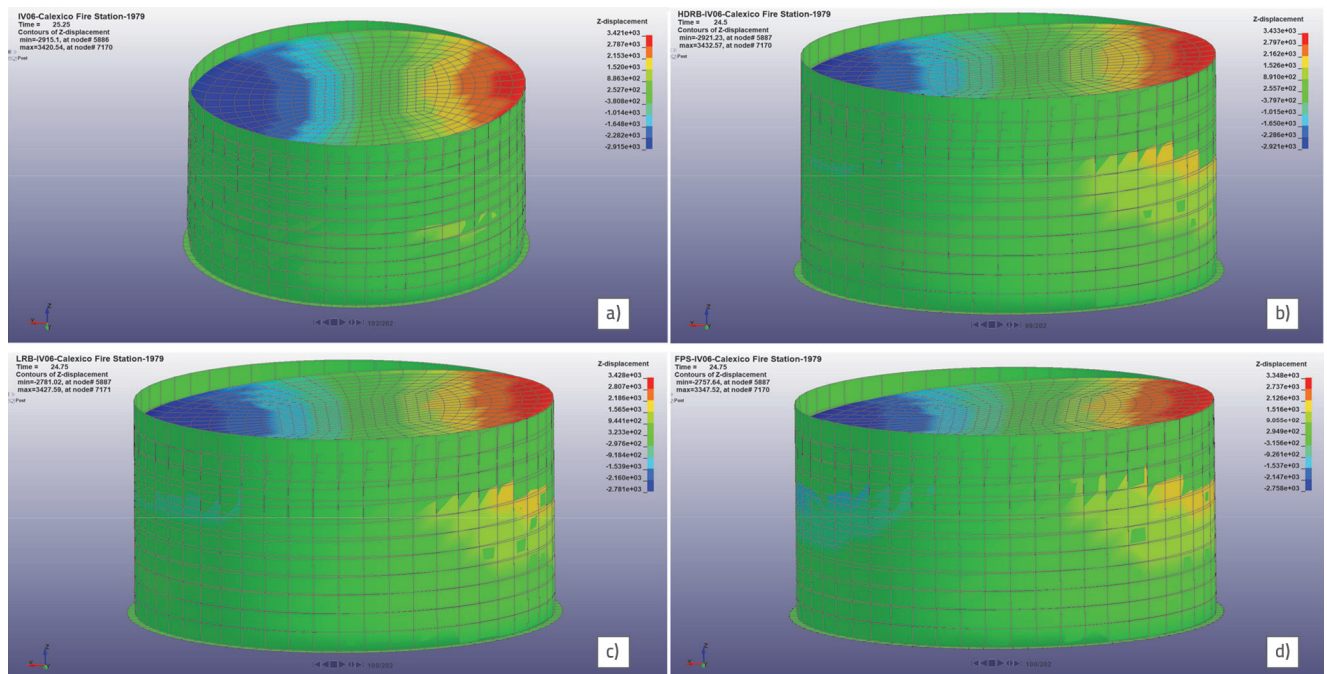
Gibanja tla tijekom potresa	Vrsta temelja							
	Neizoliran	HDRB izolator		LRB izolator		FPS izolator		
IV2-1940	406	369	9 %	358	12 %	347	15 %	
KC-1952	378	354	6 %	354	6 %	349	8 %	
BM-1968	380	348	8 %	348	8 %	346	9 %	
IV06-I-1979	392	357	9 %	346	12 %	350	11 %	
IV06-II-1979	405	348	14 %	355	12 %	345	15 %	
VM-1980	382	352	8 %	352	8 %	345	10 %	
IITA-1980	375	351	6 %	356	5 %	328	12 %	

statička opterećenja, što je od presudne važnosti za spremnike LNG-a. S obzirom na to da je granica popuštanja čelika koji sadrži 9 % Ni između 515 MPa i 585 MPa, maksimalno naprezanje u unutarnjem spremniku LNG-a s ankerima koje prelazi 400 MPa predstavlja rizik za sigurnost konstrukcije [26, 31].

4.3.2. Maksimalna visina vala zapljuskivanja fluida LNG-a

Vrijednosti maksimalne visine vala zapljuskivanja fluida LNG-a (mm) i postoci (%) smanjivanja u odnosu na neizolirane vrijednosti koje nastaju tijekom sedam potresa u neizoliranim spremnicima i potpuno napunjenim spremnicima LNG-a s HDRB, LRB i FPS izolatorima prikazane su u tablici 10. Podaci o najvećim visinama vala zapljuskivanja neizoliranih i spremnika s HDRB, LRB i FPS izolatorima za potres Imperial Valley, vatrogasna stanica Calexico

prikazani su na slici 10. FPS i LRB izolatori pokazali su najbolju izvedbu na visini protresenog fluida u spremniku LNG-a, koji se ispitivao na sedam različitih potresa i četiri različita sustava. Ovaj se rezultat može objasniti silom trenja od približno 200 kN pri primjeni potresnog izolatora tipa FPS. Sila trenja upija horizontalne sile koje nastaju tijekom potresa. Kod LRB izolatora, olovna jezgra u središtu upija horizontalne sile. Pri primjeni HDRB izolatora zabilježene su više visine zapljuskivanja u usporedbi s izolatorima tipa LRB, FPS i spremnika LNG-a s pričvršćenim dnom. U spremniku LNG-a došlo je do oscilacija zbog djelovanja horizontalne sile koja potječe iz gumenog dijela. Zbog toga se visina tekućine ukapljenog plina u konvektivnom modu povećala tijekom potresa. Visina zapljuskivanja u konvencionalnim spremnicima bila je veća od one u izoliranim spremnicima LNG-a u potresima zabilježenima u okrugu Kern i Imperial Valley-II, a oscilacije potresa u konvektivnom modu nastavile su se s visokim ubrzanjima.



Slika 10. Maksimalna visina vala zapljuskivanja tekućine UPP-a u neizoliranim spremnicima i spremnicima s izolatorima tipa HDRB, LRB i FPS: a) neizolirani; b) HDRB izolator; c) LRB izolator; d) FPS izolator

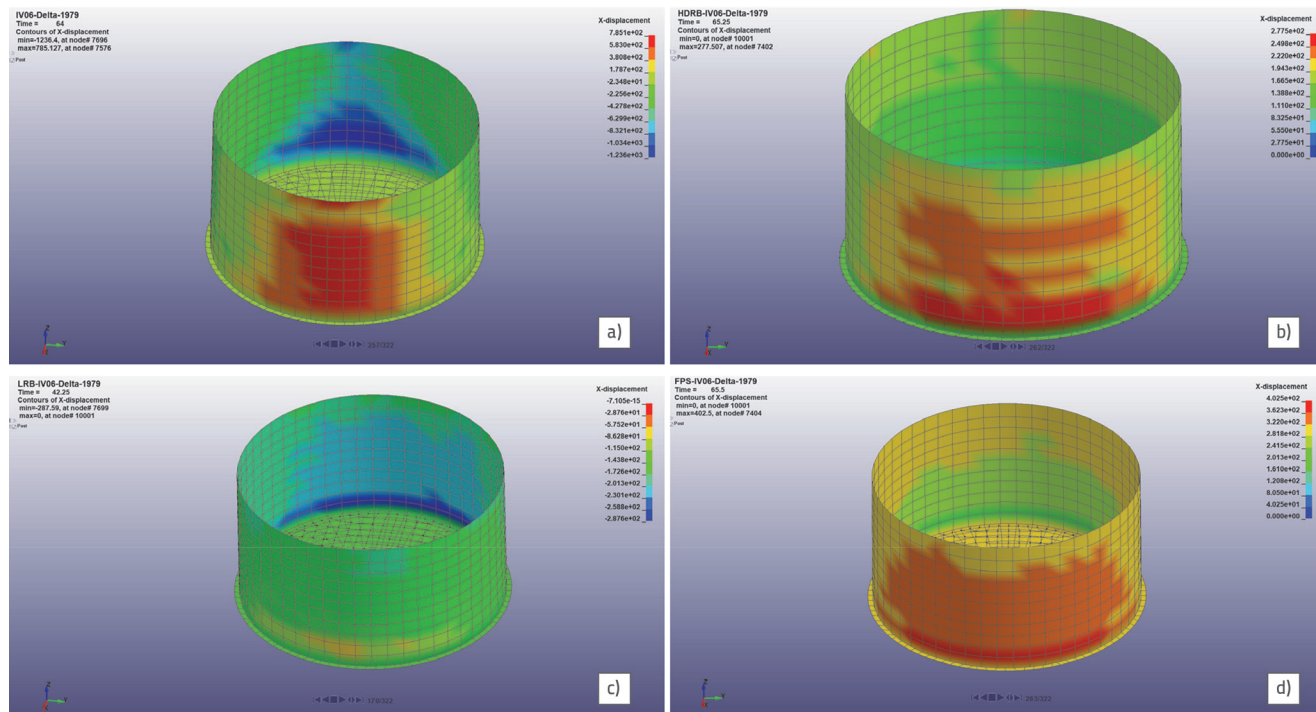
Tablica 10. Vrijednosti maksimalne visine vala zapljuskivanja tekućine LNG-a (mm)

Vrsta konstrukcijskog ležaja	IV2-1940	KC-1952	BM-1968	IV06-I-1979	IV06-II-1979	VM-1980	IITA-1980
Nepomični	2463	2119	3317	3421	2006	2567	3355
HDRB	2577	1920	3638	3433	1959	2836	3488
LRB	2379	1934	3560	3428	1880	2470	3438
FPS	2090	1932	3550	3348	1899	2760	3276

4.3.3. Maksimalni bočni pomak stijenske čeličnog unutarnjeg spremnika

Vrijednosti maksimalnog bočnog pomaka (mm) čeličnog unutarnjeg spremnika i postoci smanjivanja (%) u odnosu na neizolirane vrijednosti koje nastaju tijekom sedam potresa u neizoliranim spremnicima i potpuno napunjenim spremnicima

LNG-a s HDRB, LRB i FPS izolatorima prikazane su u tablici 11. Vrijednosti maksimalnog bočnog pomaka stijenske čeličnog unutarnjeg spremnika neizoliranih i spremnika s HDRB, LRB i FPS izolatorima za potres Imperial Valley, Delta Station prikazani su na slici 11. Utvrđeno je da su horizontalni pomaci unutarnjih spremnika u izoliranom spremniku LNG-a bili manji od spremnika s nepokretnim sustavom tijekom potresa s velikim ubrzanjima i

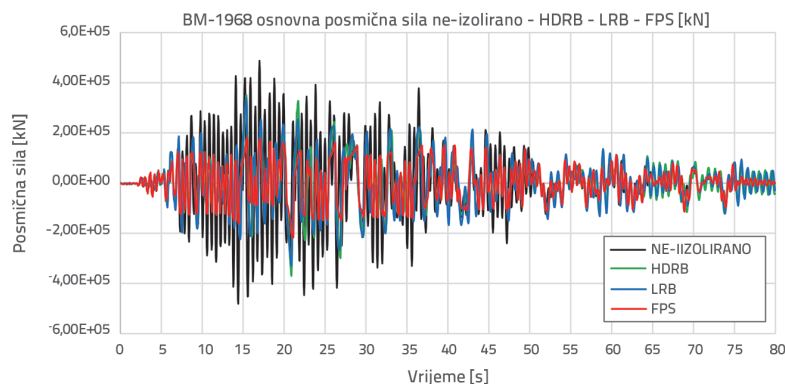


Slika 11. Vrijednosti maksimalnog bočnog pomaka (mm) na čeličnim stijenkama za neizolirani spremnik i spremnike s izolatorima tipa HDRB, LRB i FPS: a) neizolirani; b) HDRB izolator; c) LRB izolator; d) FPS izolator

Tablica 11. Vrijednosti maksimalnog bočnog pomaka (mm) na čeličnim stijenkama i postoci smanjenja (%) u odnosu na neizolirane vrijednosti

Gibanja tla tijekom potresa	Vrsta temelja						
	Neizoliran	HDRB izolator		LRB izolator		FPS izolator	
IV2-1940	898	496	45 %	424	53 %	604	33 %
KC-1952	578	361	38 %	369	36 %	329	43 %
BM-1968	369	322	13 %	278	25 %	345	7 %
IV06-I-1979	706	553	22 %	430	39 %	299	58 %
IV06-II-1979	1120	287	74 %	287	74 %	401	64 %
VM-1980	449	444	1 %	312	30 %	440	2 %
IITA-1980	171	263	-53 %	253	-48 %	297	-74 %

dugim oscilacijama. Međutim, „slonovska noga”, tj. tip deformacije koji se očituje kod potresa niskog intenziteta, manje je učestala u spremnicima LNG-a koji su pričvršćeni za tlo s ankerima nego u spremnicima s izolacijskim sustavima. Primjenom izolatora tipa LRB tijekom jakih potresa dolazi do manje bočne deformacije u unutarnjem spremniku u usporedbi s deformacijom koja nastaje u drugim izolacijskim sustavima. To je zbog sposobnosti olovne jezgre u središtu izolatora tipa LRB da spriječi bočni pomak.



Slika 12. Poprečna potresna sila u podnožju spremnika UPP-a bez izolacije i u spremnicima s izolatorima tipa HDRB, LRB i FPS

4.3.4. Maksimalna poprečna potresna sila u podnožju čeličnog unutarnjeg spremnika

Maksimalne poprečne potresne sile u podnožju čeličnog unutarnjeg spremnika (kN) i postoci smanjivanja (%) u odnosu na neizolirane vrijednosti koje nastaju tijekom sedam potresa na neizoliranim spremnicima i potpuno napunjenim spremnicima LNG-a s HDRB, LRB i FPS izolatorima prikazane su u tablici 12. Podaci o vrijednostima maksimalne poprečne potresne sile u podnožju neizoliranih i spremnika s HDRB, LRB i FPS izolatorima za potres Imperial Valley, Delta Station prikazani su na slici 12. Maksimalne poprečne potresne sile u podnožju čeličnog unutarnjeg spremnika za sustave izolatora tipa HDRB i LRB bile su između 50 % i 10 % niže od onih u neizoliranim spremnicima LNG-a. Uočeno je da su poprečne potresne sile u podnožju nastale u spremnicima LNG-a s izolatorima tipa FPS za 67 % do 49 % manje od onih u sustavima bez izolatora. Budući da sustavi s izolatorima tipa FPS rade na principu trenja, poprečne potresne sile u podnožju koje nastaju u ovim sustavima tijekom potresa manje su od onih u sustavima izolatora tipa LRB i HDRB. Prema tome, spremnici LNG-a s izolatorima tipa FPS ponašali su se znatno bolje od drugih sustava izolatora na bazi gume uzimajući u obzir poprečne potresne sile u podnožju koje su nastale tijekom potresa.

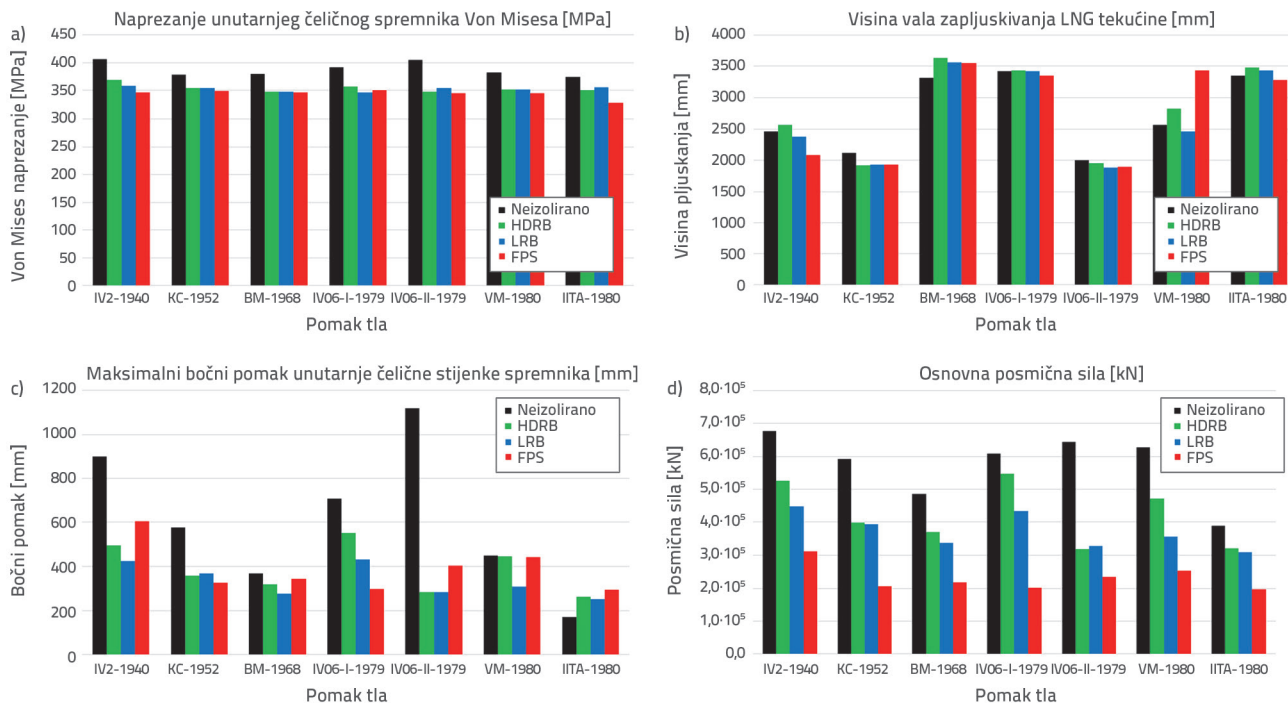
Rezultati komparativne analize maksimalnog von Misesovog naprezanja čeličnog unutarnjeg spremnika, visina valova zapljuskivanja tekućine LNG-a, bočnih pomaka čeličnog unutarnjeg spremnika i poprečnih potresnih sila u podnožju prikazani su na slici 13.

4.3.5. Dijagram odnosa sila–pomak za tipove izolatora za spremnik LNG-a

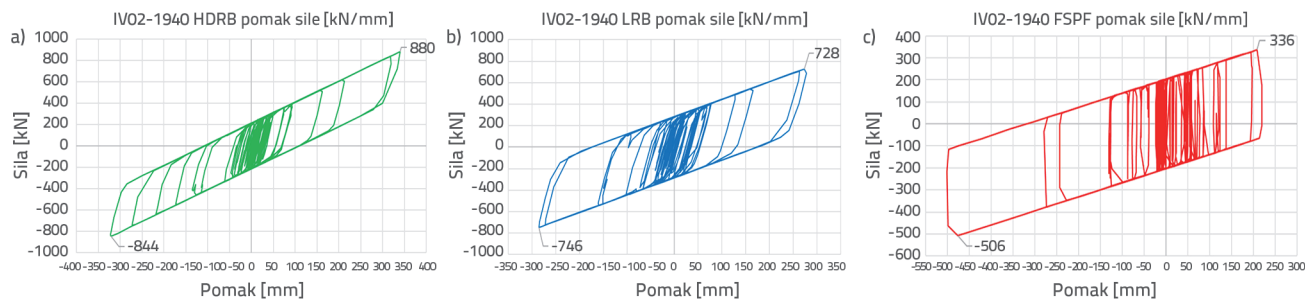
Vrijednosti sile (kN) i pomaka (mm) tijekom sedam potresa za spremnike s izolatorima tipa HDRB, LRB i FPS prikazani su u tablici 13. Slikovni prikaz podataka sile–pomaka izolatora spremnika za LNG, koji su izolirani izolatorima tipa HDRB, LRB i FPS i koji se odnose na potres Imperial Valley iz 1940., El Centro Array Base Station prikazani su na slici 14. Dok su u izolatorima tipa LRB uočeni manji pomaci u usporedbi s drugim izolatorima pod utjecajem snažne poprečne potresne sile iz spremnika za LNG tijekom potresa velikog ubrzanja i dugih oscilacija, uspješnost izolatora tipa FPS veća je tijekom potresa umjerenog intenziteta i niske oscilacije. Razlog je tomu što je omjer pomaka usred horizontalne sile i kuta pomaka u spremniku LNG-a tijekom potresa u slučaju primjene izolatora tipa FPS, pri čemu se premašuje sila trenja, veći nego u izolatorima tipa HDRB i LRB. U usporedbi

Tablica 12. Maksimalne poprečne potresne sile u podnožju (kN) i stope smanjenja (%) u odnosu na neizolirane vrijednosti za spremnike s izolatorima tipa HDRB, LRB i FPS

Gibanja tla tijekom potresa	Vrsta temelja						
	Neizoliran	HDRB izolator		LRB izolator		FPS izolator	
IV2-1940	$6,78 \times 10^5$	$5,26 \times 10^5$	22 %	$4,48 \times 10^5$	34 %	$3,10 \times 10^5$	54 %
KC-1952	$5,92 \times 10^5$	$3,98 \times 10^5$	33 %	$3,94 \times 10^5$	34 %	$2,08 \times 10^5$	65 %
BM-1968	$4,87 \times 10^5$	$3,70 \times 10^5$	24 %	$3,38 \times 10^5$	31 %	$2,18 \times 10^5$	55 %
IV06-I-1979	$6,08 \times 10^5$	$5,47 \times 10^5$	10 %	$4,33 \times 10^5$	29 %	$2,01 \times 10^5$	67 %
IV06-II-1979	$6,44 \times 10^5$	$3,19 \times 10^5$	50 %	$3,27 \times 10^5$	49 %	$2,36 \times 10^5$	63 %
VM-1980	$6,29 \times 10^5$	$4,72 \times 10^5$	25 %	$3,56 \times 10^5$	43 %	$2,53 \times 10^5$	60 %
IITA-1980	$3,89 \times 10^5$	$3,21 \times 10^5$	17 %	$3,09 \times 10^5$	21 %	$1,97 \times 10^5$	49 %



Slika 13. Rezultati nelinearne analize: a) Von Misesovo naprezanje (MPa); b) Visina vala zapljuskivanja (mm); c) Bočni pomak (mm); d) Poprečna potresna sila u podnožju (kN)



Slika 14. Slikovni prikaz podataka izolatora spremnika za LNG za odnos sila-pomak: a) HDRB izolator; b) LRB izolator; c) FPS izolator

Tablica 13. Najveće vrijednosti sila–pomaka izolatora spremnika za LNG

Gibanja tla tijekom potresa	Vrsta izolatora					
	HDRB		LRB		FPS	
	Sila [kN]	Pomak [mm]	Sila [kN]	Pomak [mm]	Sila [kN]	Pomak [mm]
IV2-1940	880	340	746	286	506	499
KC-1952	656	225	658	232	345	229
BM-1968	615	205	564	173	363	256
IV06-I-1979	904	360	710	274	336	210
IV06-II-1979	534	164	544	164	395	302
VM-1980	791	296	595	194	422	346
IITA-1980	536	165	518	145	328	195

sa sustavom izolatora tipa HDRB, olovo u jezgri izolatora tipa LRB ograničilo je horizontalno pomicanje spremnika za LNG. Horizontalni pomak spremnika za LNG tijekom potresa ključan je zbog mehaničkih i nosivih cjevovodnih sustava; u tom je pogledu izolator tipa LRB bolji od izolatora tipa FPS i tipa HDRB.

5. Zaključak

U ovom je radu provedena analiza spremnika za ukapljeni plin zapremnine od 232 000 m³, postavljen na četiri različite vrste temelja pod utjecajem sedam različitih potresa. Omjer visine i polumjera iznosio je 1 za maksimalnu količinu tekućine ukapljenog plina. Ispitani su poprečna potresna sila u podnožju, visina zapljuskivanja, bočni pomak čeličnog unutarnjeg spremnika, von Misesova naprezanja u čeličnom unutarnjem spremniku te odnos sile-pomaka kod izolatora.

- Usporedbom spremnika LNG-a s izolatorima tipa HDRB, LRB i FPS i spremnika pričvršćenih za tlo s ankerima nije zapažena razlika između konvektivnih i impulsnih modova. Zaključeno je da se valno gibanje tekućine razlikuje od oscilirajućih konstrukcija, a razdoblja protupotresnih izolacija nisu utjecala na zapljuskivanje.
- U unutarnjem čeličnom spremniku zbog statičkog je opterećenja došlo do prosječnog naprezanja od 270 MPa. Vrijednosti naprezanja razlikovale su se ovisno o intenzitetu potresa i ovisno o tome je li sustav bio izoliran ili neizoliran. Dok je u spremnicima pričvršćenima za tlo vrijednost naprezanja iznosila 400 MPa, vrijednosti naprezanja u spremnicima za LNG sa seizmičkim izolatorima tipa HDRB, LRB i FPS u prosjeku su iznosile 350 MPa. Granica popuštanja čeličnog spremnika je između 515 i 585 MPa. Prema normi API 620, tijekom potresa SSE ne smije se premašiti 80 % ove vrijednosti (412-468 MPa). U protivnom postoji značajan rizik za spremnike ukapljenog plina. Stoga bi se izolacijski sustavi u podnožju trebali primjenjivati u konstrukcijama koje su izložene riziku.
- Vrijeme zapljuskivanja iznosi se između 9,82 i 9,94 s za neizolirane spremnike i spremnike s izolatorima tipa HDRB, LRB i FPS. Za izolirane sustave i sustave s ankerima, visina vala razlikuje se ovisno o vremenu miješanja tekućine LNG-a. Visina vala zapljuskivanja tekućine proporcionalna je usklađenim gibanjima potresnog ubrzanja konstrukcije, a ne numeričkoj jačini potresnog ubrzanja. Na primjer, visina vala zapljuskivanja za vrijednosti ubrzanja između +0,3 g i -0,3 g potresa na području BM-1968 u razdoblju od 10 s veća je od one tijekom potresa na području IV06-II-1979.
- Osim potresa kao što je potres na području IV06-I-1979 s vrlo velikim vrijednostima ubrzanja, visina valova zapljuskivanja prikazana je kao rezultat redovnih vrijednosti ubrzanja harmoničkog gibanja u spremnicima LNG-a s

ankerima bila je niža nego u izoliranim konstrukcijama. Ovaj se rezultat može pripisati sposobnosti prigušivanja oscilirajućih između visokih i niskih vrijednosti ubrzanja. Međutim, vrijednosti ubrzanja smanjuju se zbog prigušenja koje omogućuje olovna jezgra u središtu izolatora tipa LRB i sila trenja koja se stvara u izolatoru tipa FPS, pri čemu je visina zapljuskivanja u spremnicima koji primjenjuju ove vrste izolatora manja od onih s izolatorima tipa HDRB.

- Kod potresa umjerene i slabe jačine, kao što je potres u Irpini, pritisak impulsne mase u unutarnjem čeličnom spremniku blokiraju ankeri, a bočni pomak konstrukcije nije dopušten. Zbog toga dolazi do izvijanja s manje pomaka nego kod izoliranih konstrukcija. Međutim, kod potresa od +0,4 g i više, bočni pomak unutarnje čelične stijenke spremnika u spremniku LNG-a s ankerima veći je nego u spremnicima s izolatorima tipa LRB, HDRB i FPS. Stoga je u spremnicima s ankerima uočeno elastično izvijanje unutarnjeg čeličnog spremnika, poznato i pod nazivom „slonovska noga“.
- Povećanjem prosječnog ubrzanja tla povećala se ukupna poprečna potresna sila u podnožju koja djeluje na spremnik za LNG. Osim toga, povećanjem maksimalne poprečne potresne sile na temelj spremnika povećao se i postotak smanjenja poprečne potresne sile u spremnicima s izolatorima. Vrijednosti poprečne potresne sile u podnožju bile su slične u spremnicima LNG-a s izolatorima tipa HDRB i LRB. Međutim, najučinkovitiji su bili spremnici za LNG s izolatorima tipa FPS u usporedbi sa spremnicima s izolatorima drugih dviju vrsta. To se može pripisati činjenici da je svaki izolator tipa FPS proizveo silu trenja koja je apsorbirala poprečnu potresnu silu u podnožju od 200 kN.
- Ukapljeni plin koji se prevozi cijevima s broda koji je pristao u luci ispušta se s krova spremnika za LNG u čelični unutarnji spremnik. Tijekom tog vremena, poželjno je da je horizontalni pomak spremnika za LNG ograničen tijekom potresa kako bi se izbjegla oštećenja mehaničkih i cjevovodnih sustava. Pregledom grafikona koji prikazuju odnos sila-pomak za spremnike LNG-a s izolatorima tipa HDRB, LRB i FPS, može se uočiti da izolatori tipa LRB u usporedbi s drugim potresnim izolatorima imaju najmanji bočni pomak. Pregledom grafikona koji prikazuju odnos ubrzanje-vrijeme za gibanje tla tijekom sedam potresa s 0,4 g i više, kod izolatora tipa FPS uočljiv je veći pomak u odnosu na izolatore tipa HDRB i LRB u spremnicima za ukapljeni plin zbog količine horizontalne sile koja djeluje na svaki izolator. To se može objasniti silama potresa koje premašuju silu trenja, pri čemu se postiže veći horizontalni pomak. Takva situacija nije poželjna kad su posrijedi spremnici za LNG. U međuvremenu, izolatori tipa LRB omogućuju prednost od 10 do 15 % u odnosu na izolator tipa HDRB zbog horizontalnog prigušenja središnje olovne jezgre.

- Uočeno je da su potresni izolatori koji se primjenjuju u spremnicima za skladištenje LNG-a vrlo učinkoviti čak i tijekom vrlo jakih potresa koji se mogu pojaviti jednom u 2475 godina. Primjena izolacijskih sustava preporučuje se radi zaštite od potresa spremnika za ukapljeni plin, s obzirom na to da potresi mogu uzrokovati ozbiljne ekološke katastrofe i razaranja. Sustavi s izolatorima tipa LRB pokazali su se boljim od izolatora tipa FPS i HDRB te nepokretnih sustava u svim kriterijima, osim glede poprečne potresne sile u podnožju.

Zahvale

Ovo istraživanje financirao je Odjel za koordinaciju znanstvenih istraživačkih projekata Sveučilišta Pamukkale. Autori zahvaljuju izvanrednom profesoru Temelu Varolu s Odsjeka za metalurški i materijalni inženjering Tehničkog sveučilišta Karadeniz, doktorandu Muratu Çeliku s Odjela za građevinarstvo Tehničkog sveučilišta u Istanbulu i dipl. inženjeru strojarstva Hakanu Balabanu na njihovom dragocjenom doprinosu.

LITERATURA

- [1] Marti, J., Crespo, M., Martinez, F.: Seismic isolation of liquefied natural gas tanks: A comparative assessment, *The Journal of the Anti-Seismic Systems International Society*, 1 (2010) 1, pp. 125-140, doi:10.2140/siaps.2010.1.125.
- [2] Summers, P.B., Castellano, M.G., Bergamo, G., Gatti, F., Marti, J., Poggianti, A.: Seismic risk reduction at petrochemical and LNG facilities: Main results from in-depth project, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, October, 2006.
- [3] API Standard 620, Design and construction of large, welded, low-pressure storage tanks, American Petroleum Institute Publishing Services, 12th Edition, Addendum 1, API, Washington D.C., USA, 2014.
- [4] API Standard 625, Tank systems for refrigerated liquefied gas storage, American Gas Association Publishing Services, 1st Edition, Addendum 2, AGA, Washington D.C., USA, 2014.
- [5] NFPA 59A, Standard for the production, storage and handling of liquefied natural gas LNG, National Fire Protection Association Publishing Services, NFPA, Washington D.C., USA, 2016.
- [6] Westergaard, H.M.: Water pressures on dams during earthquakes, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 98 (1933) 2, Washington D.C., USA.
- [7] Jacobsen, L.S.: Impulsive hydrodynamics of fluid inside a cylindrical tank and of fluid surrounding a cylindrical pier, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 39 (1949) 3, pp. 189-204, doi:10.1785/BSSA0390030189.
- [8] Jacobsen, L.S., Ayre, R.S.: Hydrodynamic experiments with rigid cylindrical tanks subjected to transient motions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 41 (1951) 4, pp. 313-346, doi:10.1785/BSSA0410040313.
- [9] Housner, G.W.: Dynamic pressures on accelerated fluid containers, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 47 (1957) 1, pp. 15-35, doi:10.1785/BSSA0470010015.
- [10] Housner, G.W.: The dynamic behavior of water tanks, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1963, 53 (1963) 2, pp. 381-387, doi:10.1785/BSSA0530020381.
- [11] Veletsos, A.: Seismic effects in flexible liquid storage tanks, in *Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering*, Rome, Italy, June, 1974.
- [12] Veletsos, A., Yang J.: Dynamics of fixed-base liquid storage tanks, in *Proceedings of the US-Japan Seminar for Earthquake Engineering Research with Emphasis on Lifeline Systems*, Tokyo, Japan, November, 1976.
- [13] Haroun, M.A., Housner, G.W.: Dynamic interaction of liquid storage tanks and foundation soil, in *Dynamic Response of Structures: Experimentation: Observation, Prediction and Control*, American Society of Civil Engineers, ASCE, New York, USA, 1981.
- [14] Veletsos, A.S., Tang, Y.: Soil-structure interaction effects for laterally excited liquid-storage tanks., *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 19 (1990) 4, pp. 473-496, doi:10.1002/eqe.4290190402.
- [15] Malhotra, P.K., Wenk, T., Wieland, M.: Simple procedures for seismic analyses of liquid storage tanks, *Structural Engineering International*, 10 (2000) 3, pp. 197-201, doi:10.2749/101686600780481509.
- [16] Zhao, Y., Li, H.N., Fu, X., Zhang, S., Mercan, O.: Seismic analyses of a large LNG tank considering the effect of liquid volume, *Hindawi*, (2020), Article ID 8889055, pp. 1-18, doi:10.1155/2020/8889055.
- [17] Bomhard, H., Stempniewski, L.: LNG tanks for seismically highly affected sites, *Intl. Post SMIRT Conference Seminar on Isolation, Energy Dissipation and Control of Vibrations of Structures*, IAEA, Capri, Italy, 1993.
- [18] Tajirian, F.F.: Base isolation design for civil components and civil structures, in *Proceedings of the Structural Engineers World Conference*, San Francisco, California, USA, July, 1998.
- [19] Castellano, M.G., Infanti, S., Dumoulin, C., Ducoup, L., Martelli, A., Dusi, A.: Shaking table tests on a liquefied natural gas storage tank mock-up seismically protected with elastomeric isolators and steel hysteretic torsional dampers, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, February, 1999.
- [20] Gregoriou, V.P., Tsinopoulos, S.V., Karabalis, D.L.: Base isolated LNG tanks: Seismic analyses and comparison studies, *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland, September, 2006.
- [21] Gregoriou, V.P., Tsinopoulos, S.V., Karabalis, D.L.: Dynamic analyses of liquefied natural gas tanks seismically protected with energy dissipating base isolation systems, 3rd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Corfu, Greece, May, 2011.
- [22] Ruifu, Z., Dagen W., Xiaosong, R.: Seismic analyses of a LNG storage tank isolated by a multiple friction pendulum system, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 10 (2011) 2, pp. 253-262, doi:10.1007/s11803-011-0063-3.
- [23] Christovasilis, I.P., Whittaker, A.S.: Seismic analyses of conventional and isolated LNG tanks using mechanical analogs, *Earthquake Spectra*, 2008, 24 (2008) 3, pp. 599-616, doi:10.1193/1.2945293.

- [24] Datoli, R., Danilo, B., Perillo, M.: Sloshing response of a LNG storage tank subjected to seismic loading, 6th European LS-DYNA Users' Conference, Gothenburg, Sweden, May, 2007.
- [25] Zhou, Y., Li, X., Chen, Z.: Seismic responses analyses of base-isolated LNG storage tank, in Proceeding of GeoShanghai 2018 International Conference: Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering, Singapore, May, 2018.
- [26] Zhou, Y., Li, H., Zhang S., Mercan, O., Caiyan, Z.: Seismic analyses of a large LNG tank considering different site conditions, Applied Sciences, 10 (2020) 22, pp. 8121, doi:10.3390/app10228121.
- [27] Barone, S., Sartori, M.: Seismic isolation of LNG storage tanks in Italy with curved surface sliders, 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan, September, 2020.
- [28] Kılıç, S., Akbaş, B., Shen, J., Paolacci, F.: Seismic behavior of liquid storage tanks with 2D and 3D base isolation systems, Structural Engineering and Mechanics, 83 (2022) 5, pp. 627-644, doi:10.12989/sem.2022.83.5.627.
- [29] Chen, Z., Xu, Z., Teng, L., Fu, J., Xu, T., Zhao, Z.: Experimental and numerical investigation for seismic performance of a large-scale LNG storage tank structure model, Applied Sciences, 12 (2022) 17, pp. 8390, doi:10.3390/app12178390.
- [30] Sharari, N., Behzad, F., Hokmabadi A., Xu, R.: Seismic resilience of extralarge LNG tank built on liquefable soil deposit capturing soilpilestructure interaction, Bulletin of Earthquake Engineering, 20 (2022) 4, pp. 3385-3441, doi:10.1007/s10518-022-01384-1.
- [31] Standardization Administration Committee of the People's Republic of China: 9 % Nickel Steel Plates for Pressure Vessels with Specified Low Temperature Properties, SAC, Beijing, China, 2010.
- [32] ANSYS Workbench 20, LS-DYNA 2018, Southpointe, 275 Technology Drive, PA 15317, ANSYS Inc., Canonsburg, USA, 2022.
- [33] Vaiana, N., Sessa, S., Marmo, F., Rosati, L.: An accurate and computationally efficient uniaxial phenomenological model for steel and fiber reinforced elastomeric bearings, Composite Structures, 211 (2019) 11, pp. 196-212, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.12.017>.
- [34] FIP MEC Srl., Via Scapacchio, 41/35030 Selvazzano Dentro, Italy, 2022.