

Primljen / Received: 20.1.2016.

Ispravljen / Corrected: 27.10.2016.

Prihvaćen / Accepted: 11.1.2017.

Dostupno online / Available online: 10.1.2023.

Učinak pomaka tla s impulsnim signalom uslijed bliskih potresa na dinamički odziv sustava brana – akumulacija – temelj

Autori:



Prof.dr.sc. **Ahmet Can Altunisik**, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište Karadeniz, Trabzon, Turska
Odjel za građevinarstvo
ahmetcan8284@hotmail.com

Autor za korespondenciju



Doc.dr.sc. **Hasan Sesli**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Yalova, Yalova, Turska
Odjel za građevinarstvo
hasan_sesli@hotmail.com

Stručni rad

Ahmet Can Altunisik, Hasan Sesli, Metin Husem

Učinak pomaka tla s impulsnim signalom uslijed bliskih potresa na dinamički odziv sustava brana – akumulacija – temelj

U ovom radu cilj je utvrditi učinke impulsnih pomaka tla uslijed bliskih potresa na dinamički odgovor gravitacijskih brana uključujući i interakciju brana – akumulacija – temelj na različite pristupe modeliranju akumulacije kao što su Westergaardov, Lagrangeov i Eulerov pristup. Kao studija slučaja, betonska gravitacijska brana Sariyar smještena na rijeci Sakarya, 120 km sjeveroistočno od Ankare, odabrana je za istraživanje učinaka impulsnog pomaka tla uslijed bliskog potresa na odziv brane. Prvo su izložena glavna načela i osnovna formulacija pristupa. Zatim su uspostavljeni modeli brane s konačnim elementima uzimajući u obzir interakciju brana-akumulacija-temelj, pomoću računalnog programa ANSYS., sve da bi se odredio strukturni odgovor brane pod utjecajem impulsnog pomaka tla. Linearne privremene analize provedene su korištenjem Taiwan Chi-Chi 1999. i Imperial Valley 1979. koji prikazuju prividne impulse brzine kao reprezentativne za bliske potrese. Na kraju analize uspoređene su dinamičke karakteristike sve kako bi se demonstrirali modeli učinaka domene fluida i učinaka impulsnog signala.

Ključne riječi:

betonska gravitacijska brana, interakcija brana-akumulacija-temelj, hidrodinamički tlak, bliski potres

Professional paper

Ahmet Can Altunisik, Hasan Sesli, Metin Husem

Effect of near-fault ground motion with pulse signal on dynamic response of dam-reservoir-foundation systems

This paper aimed to determine the effects of a pulse signal of near-fault ground motion on the dynamic response of gravity dams, including dam-reservoir-foundation interaction, using different reservoir modelling approaches such as Westergaard, Lagrange, and Euler. As a case study, a Sariyar concrete gravity dam located on the Sakarya River, 120 km northeast of Ankara, was considered for investigating the near-fault ground-motion pulse effects on dam responses. First, the main principles and basic formulations of these approaches were presented. Then, finite element models of the dam were realized considering dam-reservoir-foundation interaction using ANSYS software. To determine the structural response of the dam under pulse effects of the near-fault ground motion, linear transient analyses were performed using the 1999 Taiwan Chi-Chi and 1979 Imperial Valley ground motions, which display apparent velocity pulses as representative of the near-fault earthquakes. Subsequently, the dynamic characteristics were compared to demonstrate the models of the fluid domain effects and pulse signal effects.

Key words:

concrete gravity dam, dam-reservoir-foundation interaction, hydrodynamic pressure, near-fault ground motion

1. Uvod

Brane su važne građevine podložne interakciji fluida i konstrukcije koje su dugo pridonosile razvoju civilizacije. Betonske gravitacijske brane također se grade kako bi se zadovoljile sve veće potrebe za strujom, navodnjavanjem i pitkom vodom itd. Često se grade u seizmičkim područjima. A svaki njihov slom može uzrokovati nepopravljiv gubitak za živote i imovinu.

Važni čimbenici koji utječu na dinamički odziv betonskih gravitacijskih brana tijekom potresa su interakcija brane i akumulacije i hidrodinamički pritisci koji djeluju na uzvodnu površinu brane. Razmatranje tih čimbenika važno je posebno u slučaju potresnih dinamičkih opterećenja. U analizama interakcije brane i akumulacije općenito se primjenjuju tri pristupa. Najjednostavniji je Westergaardov pristup (pristup dodane mase) koji je predstavio Westergaard 1933. [1]. Drugi pristup je Lagrangeov pristup u kojem se odziv brane i akumulacije izražava samo pomacima. Stoga specifične jednadžbe sučelja nisu bitne [2-7]. Treća metoda za predstavljanje interakcije akumulacija-brana je Eulerov pristup u kojem se pomaci konstrukcije i pomaci fluida izražavaju pomacima i pritiscima [8]. Postoje brojne studije u literaturi o statičkom i dinamičkom ponašanju brana koje razmatraju interakciju brana, akumulacije i temelja koristeći različite FSI pristupe [9-23].

Snažni pomaci tla najvažniji su dinamički problem za stabilnost i sigurnost betonskih gravitacijskih brana. Potresi se mogu značajno razlikovati u području u blizini epicentra (bliski potresi) u usporedbi s područjem daleko od epicentra (udaljeni potresi). Glavne karakteristike tih impulsnih pomaka su period i najveće amplitude impulsa brzine. Impuls brzine ima specifične karakteristike kod bliskih potresa koje se ne mogu vidjeti u udaljenim potresima [24].

Pomaci tla uslijed bliskih potresa, zabilježeni u nedavnim potresima (1989. Loma Prieta, 1994. Northridge, 1995. Japan Hyogoken-Nanbu, 1999. Tajvan Chi-Chi), karakterizirani su velikim impulsom brzine koji izlaže konstrukciju visokoj ulaznoj energiji na početku potresa. Ti impulsi su pod jakim utjecajem orijentacije rasjeda, smjera pomaka i lokacije stanice za snimanje u odnosu na rasjed, što se naziva efektom usmjerenja zbog širenja pukotine prema lokaciji snimanja [25-29].

Pomaci tla koja su stanice pozicionirane u smjeru rasjedne plohe zabilježile unutar područja u blizini epicentra kvalitativno su različita od uobičajenog pomaka tla na dalekoj udaljenosti od rasjeda. Pomaci tla bliskih potresa tla prikazuju impuls dugog perioda u zapisu ubrzanja koji se pojavljuje kao koherentni impuls u vremenskim zapisima brzine i pomaka. Tako izražen impuls ne postoji u pomacima tla zabilježenim na područjima daleko od rasjedne zone [30].

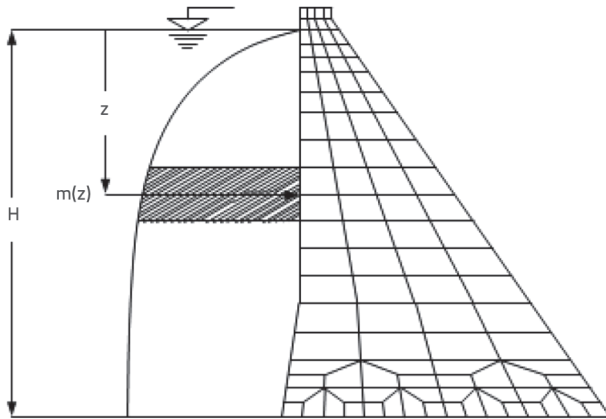
Pomaci tla bliskih potresa mogu se klasificirati kao pomaci s impulsnim signalom ili bez njega. Valni oblici brzine odabrani su za identifikaciju signala impulsa, jer je lakše detektirati impuls iz brzine [27, 30]. Zbog tih jedinstvenih karakteristika pomaka tla bliskih potresa, tijekom posljednjih desetljeća na važnosti su dobila pitanja uspostave odgovarajućih mjera za ublažavanje seizmičkog odgovora građevinskih konstrukcija kao što su zgrade, tuneli, mostovi, nuklearne stanice, brane, tornjevi, vijadukti, vjetroturbine i spremnici [5, 7, 11, 24, 28, 30, 32-49].

Iz provedenog pregleda literature može se vidjeti da nema dovoljno istraživanja o učincima pomaka tla bliskih potresa s impulsnim signalom na dinamički odziv gravitacijskih brana primijenjenih u različitim pristupima modeliranja akumulacije. Ovaj rad predstavlja učinke pomaka tla s impulsnim signalom bliskih potresa na dinamički odziv gravitacijskih brana primjenom pristupa kao što su Westergaardov, Lagrangeov i Eulerov. Betonska gravitacijska brana Sarıyar smještena na rijeci Sakarya, 120 km sjeveroistočno od Ankare, odabrana je kao studija slučaja. Model brane pomoću konačnih elemenata uspostavljen je uzimajući u obzir interakciju brane, akumulacije i temelja pomoću računalnog programa ANSYS. Zapis pomaka tla iz 1999. iz Taiwana Chi-Chija i iz 1979. iz Imperial Valleyja koji prikazuju pomake tla s prividnim impulsom brzine odabrani su da predstavljaju bliski potres. Pomacima tla bliskih potresa se ovdje nazivaju pomaci tla dobiveni u blizini rasjedne zone s prividnim impulsom brzine (trajanje impulsa dulje od 1,0 s), udaljenosti do rasjeda manjom od 10 km i omjerom vršne brzine tla/vršnog ubrzanja tla (PGV/PGA) većim od 0,1 s. Za usporedbu, pomaci tla zabilježeni od istih potresa bez početnog impulsa koriste se za određivanje učinka impulsa na dinamički odziv betonskih gravitacijskih brana. Iz analiza, dinamičke karakteristike, najveći pomaci, najveća - najmanja glavna naprezanja i najveća - najmanja glavna deformacija korišteni su za usporedbu kako bi se demonstrirali učinci FSI i impulsnog signala.

2. Formulacija

2.1. Westergaardov pristup (pristup dodane mase)

Pristup dodane mase prvi je put predstavio Westergaard 1933. [1]. U ovom pristupu, brana se pretpostavlja kao kruta, polu-beskonačna i s okomitom uzvodnom površinom. Zanimaju se površinski valovi u fluidu. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka duž uzvodne površine nakon potresa zamijenjena je početnim silama koncentriranih masa vezanih za sučelje. Pojedinačne mase se dodaju u čvorove mreže konačnih elemenata duž uzvodne površine brane. Slika 1. prikazuje promjenu hidrodinamičkog tlaka s dubinom.



Slika 1. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka na konačnoj mreži

Zadane su pojedinačne mase prema slici 1. kako slijedi,

$$m(z) = \frac{7w}{8g} \sqrt{Hz} \quad (1)$$

gdje je $m(z)$ distribucija mase kao funkcija dubine akumulacije, w je jedinična težina vode, g je gravitacija, H i z su dubina vode od površine.

2.2. Lagrangeov pristup

U Lagrangeovom pristupu, odziv brane i akumulacije izražava se pomacima i specifične jednadžbe sučelja nisu bitne [2, 3]. Formulacija fluidnog sustava temeljena na ovom pristupu može se pronaći u literaturi [50]. Pretpostavlja se da je fluid linearno elastičan, neviskozan i s irrotacijskim poljem strujanja. Za opću trodimenzionalnu akumulaciju, odnosi naprezanja i deformacija mogu se napisati u matričnom obliku kako slijedi u izrazu (2):

$$\begin{Bmatrix} P \\ P_x \\ P_y \\ P_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_v \\ w_x \\ w_y \\ w_z \end{Bmatrix} \quad (2)$$

gdje su P_x, P_y, P_z rotacijska naprezanja; C_{22}, C_{33}, C_{44} parametri ograničenja; w_x, w_y, w_z su rotacije oko Kartezijeve osi x, y i z ; i P, C_{11} i ε_v su tlakovi koji su jednaki srednjim naprezanjima, volumenskom modulu i volumetrijskim deformacijama fluida. Irotacija fluida razmatra se metodom penala [51], rotacije i parametri ograničenja uključeni su u jednadžbu naprezanja i deformacije fluida, izraz (2).

U ovom su istraživanju jednadžbe gibanja fluidnog sustava dobivene na principu potencijalne i kinetičke energije. Primjenjujući metodu konačnih elemenata, ukupna energija deformacije fluidnog sustava može se napisati kao:

$$\pi_e = \frac{1}{2} \mathbf{U}_f^T \mathbf{K}_f \mathbf{U}_f \quad (3)$$

gdje su \mathbf{U}_f i \mathbf{K}_f vektori pomaka čvorta i matrice krutosti fluidnog sustava. \mathbf{K}_f se dobiva zbrajanjem matrica krutosti fluidnih elemenata:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{K}_f &= \sum \mathbf{K}_f^e \\ \mathbf{K}_f^e &= \int_V \mathbf{B}_f^{eT} \mathbf{C}_f \mathbf{B}_f^e dV^e \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

gdje je \mathbf{C}_f je matrica elastičnosti koja se sastoji od dijagonalnih članta danih u izrazu (2), a \mathbf{B}_f^e je matrica deformacija-pomak fluidnog elementa. Važna karakteristika fluidnih sustava je sposobnost pomicanja (premještanja) bez promjene volumena. Za akumulacije i spremnike to je pomicanje poznato kao zapljuskivanje valova u kojima je pomak u vertikalnom smjeru. Povećanje potencijalne energije sustava zbog pomaka slobodne površine može se napisati kao:

$$\pi_s = \frac{1}{2} \mathbf{U}_{sf}^T \mathbf{S}_f \mathbf{U}_{sf} \quad (5)$$

gdje je \mathbf{U}_{sf} vektor vertikalnog pomaka čvorta, a \mathbf{S}_f matrica krutosti slobodne površine fluidnog sustava. \mathbf{S}_f se dobiva zbrojem matrica krutosti fluidnih elemenata slobodne površine, kao:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{S}_f &= \sum \mathbf{S}_f^e \\ \mathbf{S}_f^e &= \rho_f g \int_A \mathbf{h}_s^T \mathbf{h}_s dA^e \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

gdje je \mathbf{h}_s vektor koji se sastoji od interpolacijskih funkcija elementa fluida slobodne površine, ρ_f je gustoća mase fluida a g je ubrzanje gravitacije. Kinetička energija sustava može se napisati kao:

$$T = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{U}}_f^T \mathbf{M}_f \dot{\mathbf{U}}_f \quad (7)$$

gdje je $\dot{\mathbf{U}}_f^T$ vektor čvorne brzine, a \mathbf{M}_f je matrica mase fluidnog sustava. \mathbf{M}_f se može dobiti zbrajanjem matrica masa fluidnih elemenata:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}_f &= \sum \mathbf{M}_f^e \\ \mathbf{M}_f^e &= \rho_f \int_V \mathbf{H}^T \mathbf{H} dV^e \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

gdje je \mathbf{H} matrica koja se sastoji od interpolacijskih funkcija elementa fluida. Kombinirajući izraze (3), (5) i (7) koristeći Lagrangeovu jednadžbu [52], dobiva se sljedeći skup jednadžbi,

$$\mathbf{M}_f \ddot{\mathbf{U}}_f + \mathbf{K}_f^* \mathbf{U}_f = \mathbf{R}_f \quad (9)$$

gdje su $\mathbf{K}_f^*, \ddot{\mathbf{U}}_f$ i \mathbf{R}_f matrica krutosti sustava uključujući krutost slobodne površine, vektor čvornog ubrzanja i vremenski promjenjivi vektor čvorne sile za fluidni sustav. U formiranju matrica fluidnih elemenata korišteni su reducirani redovi integracije.

Jednadžbe pomaka fluidnog sustava, izraz (9), imaju sličan oblik kao jednadžbe pomaka konstrukcije. Da bi se dobile sparene jednadžbe sustava fluid-konstrukcija, potrebno je odrediti uvjet sučelja. Budući da se pretpostavlja da je tekućina neviskozna, samo je pomak u normalnom smjeru prema sučelju kontinuiran na sučelju sustava. Uz pretpostavku da je pozitivna površina konstrukcija, a negativna površina tekućina, rubni uvjet na sučelju fluid- konstrukcija je,

$$U_n^- = U_n^+ \tag{10}$$

gdje je U_n normalna komponenta pomaka sučelja [53]. Primjenom uvjeta sučelja, jednadžbe gibanja sparenog sustava i pomaka tla, uključujući učinke prigušenja, dane su ovako:

$$M_c \ddot{U}_c + C_c \dot{U}_c + K_c U_c = R_c \tag{11}$$

u kojem su M_c , C_c i K_c matrice mase, prigušenja i krutosti za spareni sustav; a U_c , \dot{U}_c , \ddot{U}_c i R_c vektori pomaka, brzina, ubrzanja i vanjskih opterećenja spregnutog sustava.

2.3. Eulerov pristup

Eulerov pristup naširoko se primjenjuje u analizi konačnih i rubnih elemenata brana s obzirom na interakciju fluid-konstrukcija. U ovom pristupu, pomaci konstrukcija i pomaci fluida izražavaju se pomacima i pritiscima. I konstrukcija i fluid kreću se zajedno radi sučelja konstrukcije i fluida. Stoga se moraju identificirati specifične jednadžbe sučelja. Na trodimenzionalno pomicanje linearno stlačivog, neviskoznog i nerotacijskog fluida pod malim pomacima referira se sljedeća valna jednadžba [54, 55],

$$P_{,xx} + P_{,yy} + P_{,zz} = \frac{1}{C^2} P_{,tt} \tag{12}$$

gdje su x, y i z Kartezijeve koordinate. t je vrijeme, C predstavlja brzinu tlačnog vala fluida i $P_{,xx}$, $P_{,yy}$, $P_{,zz}$ su druge derivacije hidrodinamičkog tlaka za varijable x, y i z , redom. Hidrodinamički tlakti u tekućini dobivaju se iz odgtarajućih rubnih uvjeta za izraz (12).

$$P = 0 \text{ (ako nisu površinski valovi na slobodnoj površini)} \tag{13}$$

$$P = \rho g u_{sf} \text{ (ako postoje površinski valovi na slobodnoj površini)} \tag{14}$$

$$P_{,n} = \rho u_n \text{ (za sučelje fluid-konstrukcija)} \tag{15}$$

gdje su ρ, n, u_n i u_{sf} gustoća mase fluida, normala na površinu fluida za sučelje fluid-konstrukcija, ubrzanje u smjeru normale i pomak slobodne površine fluida u vertikalnom smjeru. Površinski valovi fluida nisu razmatrani u ovom istraživanju, a jednadžbe konačnih elementa pomaka sustava fluida i jednadžbe konačnih elementa za dinamički pomak medija imaju sljedeće oblike:

$$[M_f^p] \{\ddot{P}\} + [K_f^p] \{P\} = -\rho [R]^T \{\dot{U}_{fs}\} \tag{16}$$

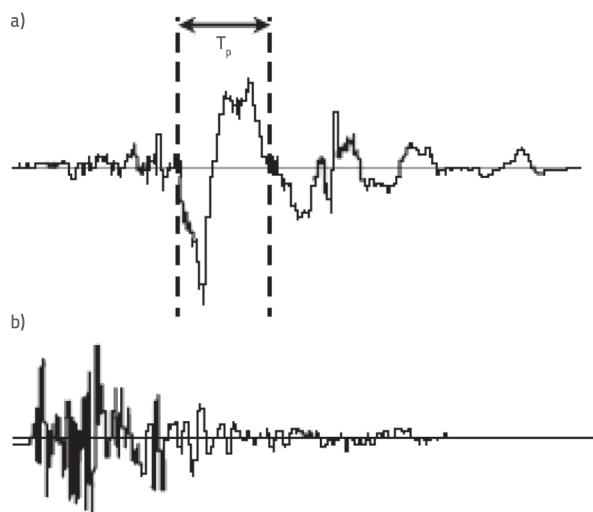
$$[M_s] \{\ddot{U}_s\} + [C_s] \{\dot{U}_s\} + [K_s] \{U_s\} = \{F\} + \{F_{fs}\} \tag{17}$$

Gdje su $[M_f^p]$, $\{\ddot{P}\}$, $[K_f^p]$, $\{P\}$, $[R]$, $\{\dot{U}_{fs}\}$, $[M_s]$, $[C_s]$, $[K_s]$, $\{U_s\}$, $\{\dot{U}_s\}$, $\{F\}$ i $\{F_{fs}\}$ matrica mase fluida, druga derivacija vektora hidrodinamičkog tlaka za vrijeme, matrica krutosti, vektor hidrodinamičkog tlaka, matrica sučelja fluid-konstrukcija i ubrzanja konstrukcije u sučelju fluid- konstrukcija, matrica mase, matrica prigušenja, matrica krutosti, vektor ubrzanja, vektor brzine, vektor pomaka, vektor vanjskog opterećenja i vektor dodatnog vanjskog opterećenja na konstrukciju od hidrodinamičkih tlakta u fluidu, redom. Dodatno, $\{F_{fs}\}$ izražava se kao $\{F_{fs}\} = [R]\{P\}$.

Kao rezultat kombiniranja izraza (16) i (17), može se dobiti zajednička jednadžba pomaka za interakciju fluid-konstrukcija.

3. Pomaci tla bliskih potresa

Pomaci tla bliskih potresa (u blizini rasjeda) mogu se klasificirati kao pomaci simpulsom ili bez impulsnog signala. Valni oblici brzine odabrani su za identifikaciju signala impulsa jer je lakše otkriti impuls na temelju brzine. Vremenske serije brzina prikazane su na slici 2. za usporedbu pomaka tla bliskih potresa s impulsnim signalom i bez njega.



Slika 2. Vremenske serije brzina: a) s impulsnim signalom; b) bez impulsnog signala

Zapisi pomaka tla bliskih potresa odabrani kao ulazna pobuda s impulsnom karakteristikom su potresi Chi-Chi u Tajvanu iz 1999. godine (TCU053EW) i potresi u Imperial Valleyju (E06230) 1979. godine. Osim toga, odabran je još jedan skup zapisa potresa snimljenih iz istih potresa za ilustraciju impulsa tla dalekih potresa karakteristika impulsa: TCU120EW i E08230.

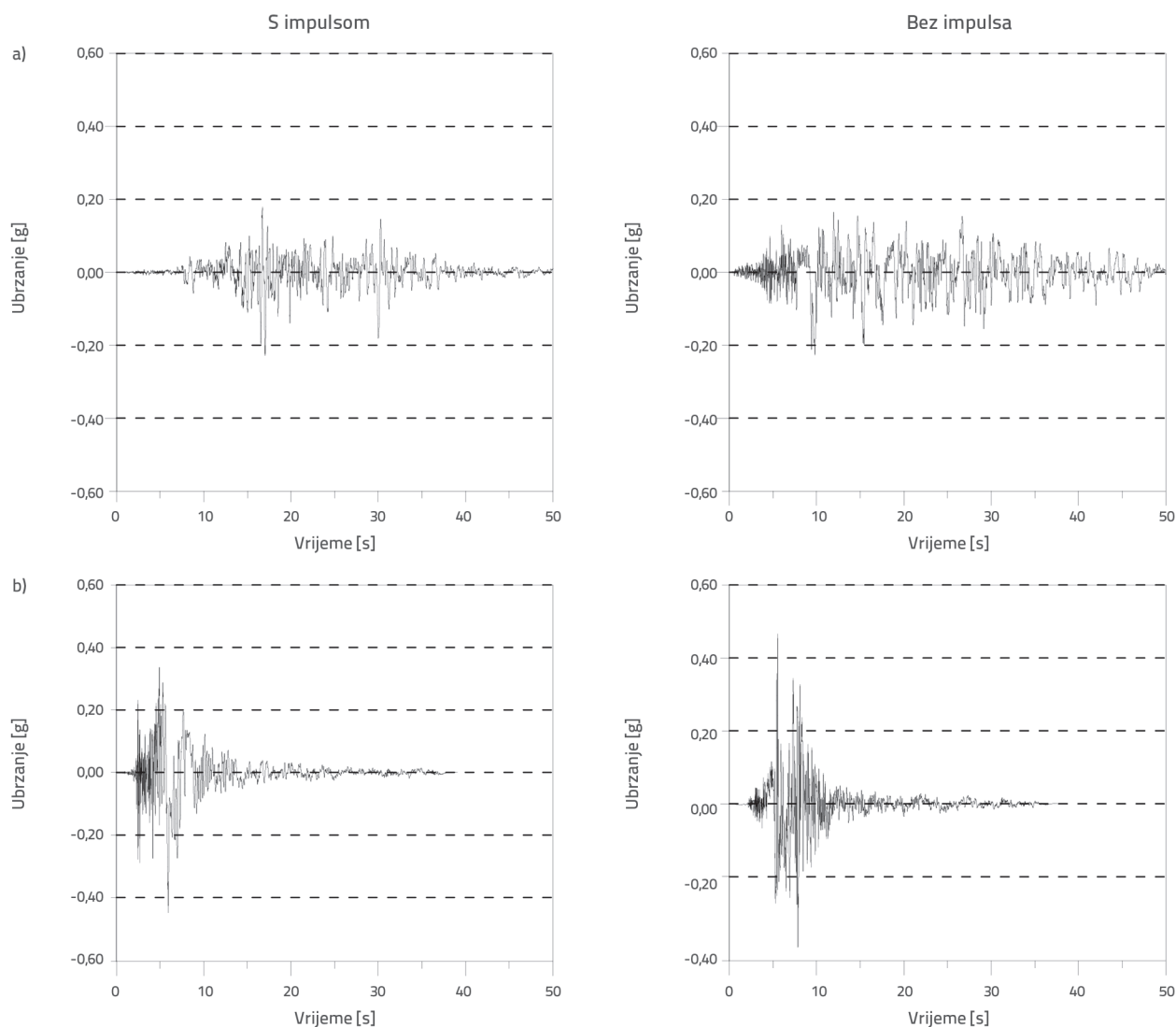
Tablica 1. Svojstva odabranih zapisa pomaka tla blizu rasjeda i daleko od rasjeda

Pomak tla	Potres	Komponenta	PGA [m/s ²]	PGV [cm/s]	PGV/PGA [s]	Mw*	Udaljenost od rasjeda [km]
S impulsom	1999. Chi-Chi	TCU053EW	0,229g	39,6	0,176	7,62	5,95
Bez impulsa	1999. Chi-Chi	TCU120EW	0,228g	59,8	0,264	7,62	9,0
S impulsom	1979. Imperial Valley	IMPVALL-E06230	0,449g	113,5	0,258	6,53	1,35
Bez impulsa	1979. Imperial Valley	IMPVALL-E08230	0,466g	52,1	0,114	6,53	3,86

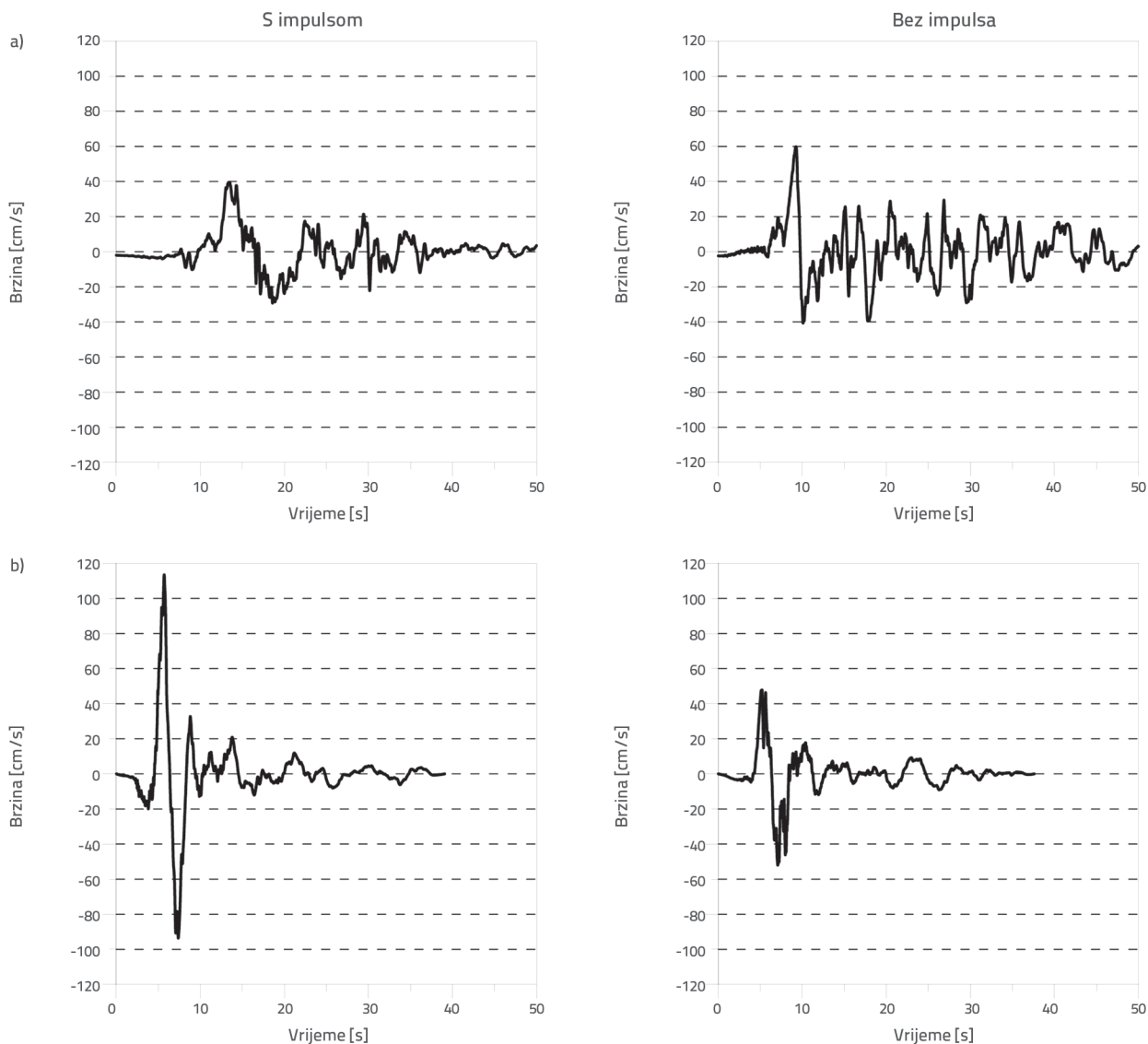
Mw* - magnituda potresa prema Richteru

Ti se zapisi primjenjuju na smjer uzvodno-nizvodno, koji je smjer prvog moda, kako bi se postigli osjetljiviji i pouzdaniji rezultati. Vertikalni i uzdužni smjerovi tih potresa zanemareni su u linearno elastičnim dinamičkim analizama. Zapisi o pomacima tla dobiveni su iz baze podataka PEER Strong Motion [56]. Ta baza podataka sadrži informacije o uvjetima lokacije i tipu tla

na lokacijama instrumenata. PGA, PGV, epicentralne udaljenosti od mjesta do rasjeda, projekcija na površinu i omjeri PGV/PGA prikazani su u tablici 1. Za točniju usporedbu rezultata odabrani su pomaci tla bliskih potresa koja imaju iste vršne vrijednosti ubrzanja. Da su zapisi o pomacima tla bili s različitim vršnim ubrzanjima, usporedba ne bi bila jasna.



Slika 3. Vremenski zapisi ubrzanja pomaka tla bliskih i dalekih potresa dobiveni iz potresa: a) Chi-Chi u Tajvanu 1999.; b) Imperial Valley 1979.



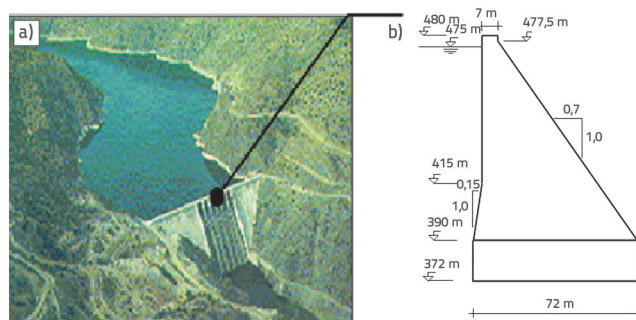
Slika 4. Vremenski zapisi brzine pomaka tla bliskih i dalekih potresa dobiveni iz potresa: a) u Tajvanu Chi-Chi 1979.; b) u Imperial Valleyju iz 1999.

Vremenski zapisi ubrzanja i vremenski zapisi brzine pomaka tla bliskih potresa s impulsima i bez njih prikazani su na slikama 3. i 4. U obzir se uzima samo efektivno trajanje od 50 sekundi kako bi se smanjilo vrijeme potrebno za izračune.

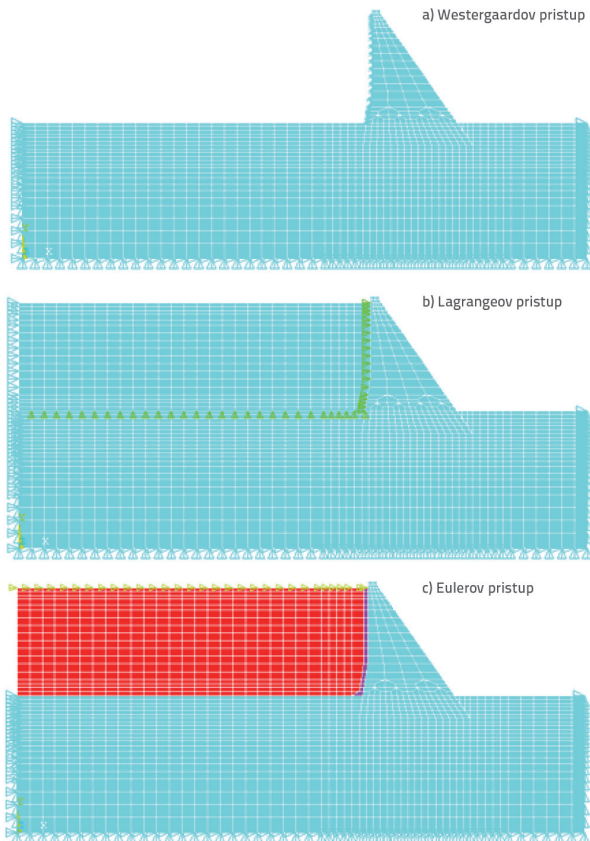
4. Numerički primjer

Betonska gravitacijska brana Sariyar (slika 5.a) odabrana je za analize kako bi se odredili i usporedili učinci impulsnih pomaka tla bliskih potresa na strukturni dinamički odgovor betonskih gravitacijskih brana, uključujući interakciju brane, akumulacije i temelja primjenom različitih pristupa modeliranju kao što je Westergaard (dodane mase), Lagrange (na temelju pomaka) i Euler (na temelju tlaka) za hidrodinamički tlak. Brana Sariyar nalazi se na rijeci Sakarya, 120 km sjeveroistočno od Ankare, u Turskoj. Brana je izgrađena za proizvodnju električne energije. Duljina krune brane je 257 m, a širina 7 m. Najveća visina

akumulacije je 85 m. Dimenzije brane prikazane su na slici 5.b. Modeli brane pomoću konačnih elemenata, uključujući interakciju brane, akumulacije i temelja, primjenjujući Westergaardov, Lagrangeov i Eulerov pristup, razvijeni su u programu ANSYS i prikazani na slici 6.



Slika 5. Betonska gravitacijska brana Sariyar



Slika 6. Dvodomenzionalni modeli konačnih elemenata betonske gravitacijske brane Sariyar uključujući sustave brana-akumulacija-temelj primjenjujući Westergaardov, Lagrangeov i Eulerov pristup

U tim modelima tijelo brane i temelj predstavljeni su konačnim elementima. Učinak akumulacije predstavljen je korištenjem dodanih masa na tijelu brane za Westergaardov pristup, a u Lagrangeovom i Eulerovom pristupu fluidni elementi definiraju vodu akumulacije i njezine hidrodinamičke tlakove. Temelj se u analizi tretira kao bezmaseni. Detaljne informacije o teoretskom objašnjenju primijenjene SSI metode i njezinom utjecaju na rezultate mogu se pronaći u literaturi [57, 58]. U svim analizama uzima se u obzir vlastita težina. Izvedena je studija konvergencije mreže. Modalne analize provode se za različite veličine konačnih elemenata i na početku analize se odlučuje o optimalnom modelu konačnih elemenata. Najveća

veličina konačnog elementa navedena je kao 10 m, 12 m i 10 m za tijelo brane, temelj i akumulaciju. Model konačnih elemenata primjenjuje elemente Plane182 za predstavljanje tijela brane i temelja. Također, elementi MASS21, fluid79 i fluid29 (nema konstrukcije) odabrani su da predstavljaju vodu iz akumulacije za Westergaardov, Lagrangeov i Eulerov pristup.

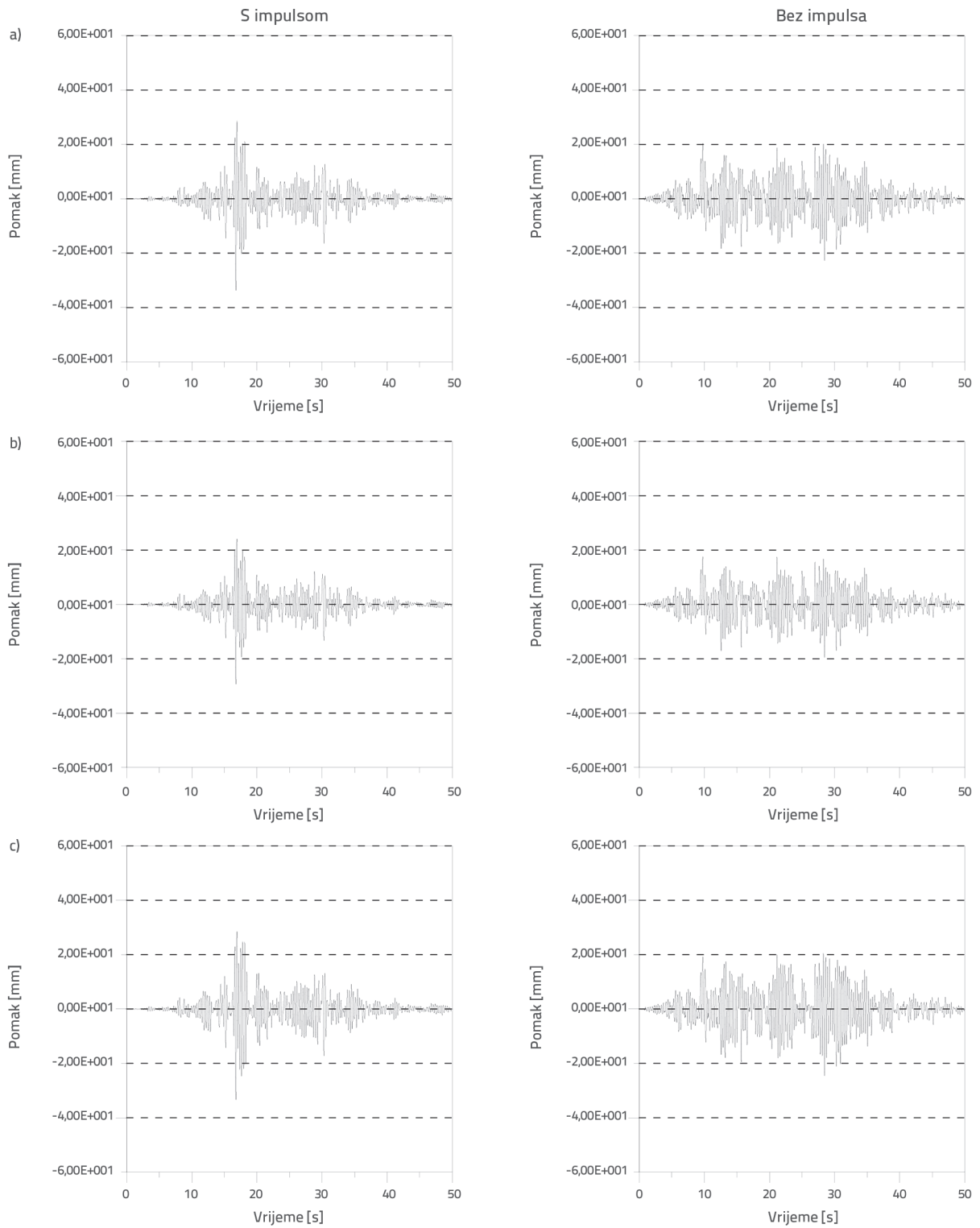
Modalne analize provode se kako bi se odredile prirodne frekvencije i povezani modalni oblici za sve FSI pristupe. Prvih petnaest prirodnih frekvencija dobiveno je između 3,246–40,959 Hz, 3,301–13,198 Hz, 3,258–16,538 Hz, a Rayleighti parametri prigušenja (konstante α i β) izračunani su kao 1,7464–0,00071, 1,4017–0,00156 i 1.3793–0.00178 Westergaardov, Lagrange i Euler pristupi razmatraju frekvencije prvog i desetog moda. U dinamičkim analizama, matrice elemenata izračunavaju se pomoću tehnike Gaussove numeričke integracije. U rješavanju jednačbe gibanja primjenjuje se Newmarkta metoda.

4.1. Pomaci

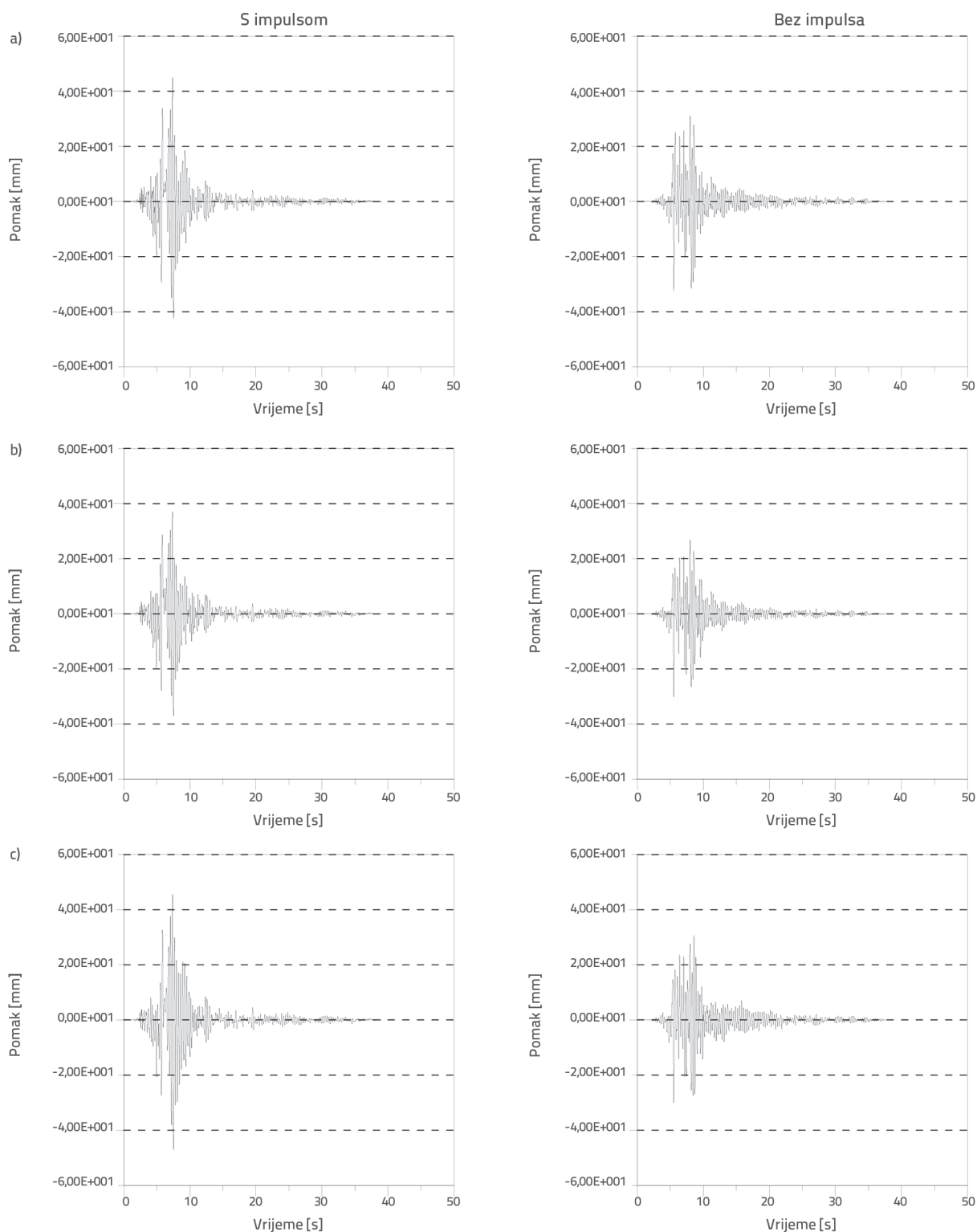
Vremenski zapisi horizontalnih pomaka (smjer uzvodno-nizvodno) na točki na kruni, dobiveni linearnom privremenom analizom pod pomacima tla uslijed bliskih potresa s impulsnim signalom i bez njega prikazane su na slikama 7. i 8. Najveći postignuti pomaci su na slikama 7. i 8. 33,73–22,81 mm, 29,33–19,60 mm i 33,36–24,60 mm za Westergaardove, Lagrangeove i Eulerove pristupe pod impulsom i bez impulsnih ulaznih pomaka za tajvanski Chi-Chi potres 1999. godine. Oni su 45,10–32,61 mm, 37,07–30,25 mm i 47,10–30,81 mm za sve FSI pristupe u potresu u Imperial Valleyju 1979. godine. Na slikama 7. i 8. može se uočiti da impulsni pomaci znatno utječu na frekventni sastav pomaka. Omjeri povećanja pomaka izračunani su kao 47,87 %, 49,64 % i 35,20 % za Chi-Chi potres iz 1999. i 38,30 %, 22,55 % i 52,87 % za potres u Imperial Valleyju iz 1979. uzimajući u obzir Westergaardov, Lagrangeov i Eulerov pristup, redom. Varijacije najvećih pomaka s visinom brane za Westergaardov, Lagrangeov i Eulerov pristup prikazane su na slici 9. Na slici je vidljivo da se pomaci povećavaju s visinom tijela brane. Minimalni pomaci izračunani su s Lagrangetim modelom, a pomaci izračunani s Westergaardtim i Eulertim modelima pokazuju slične vrijednosti. Najveće razlike između svih FSI pristupa postignute su kao 15,23 % i 25,32 % za potres Chi-Chi u Tajvanu 1999. uzimajući u obzir vrijednosti s impulsnim signalom i bez njega. Te su razlike izračunane kao 27,48 % i 8,19 % za potres u Imperial Valleyju iz 1979. godine. Štoviše, pomaci se značajno mijenjaju u skladu sa sadržajem impulsa i frekvencijskim sastavom pomaka tla.

Tablica 2. Svojstva materijala korištena u analizama

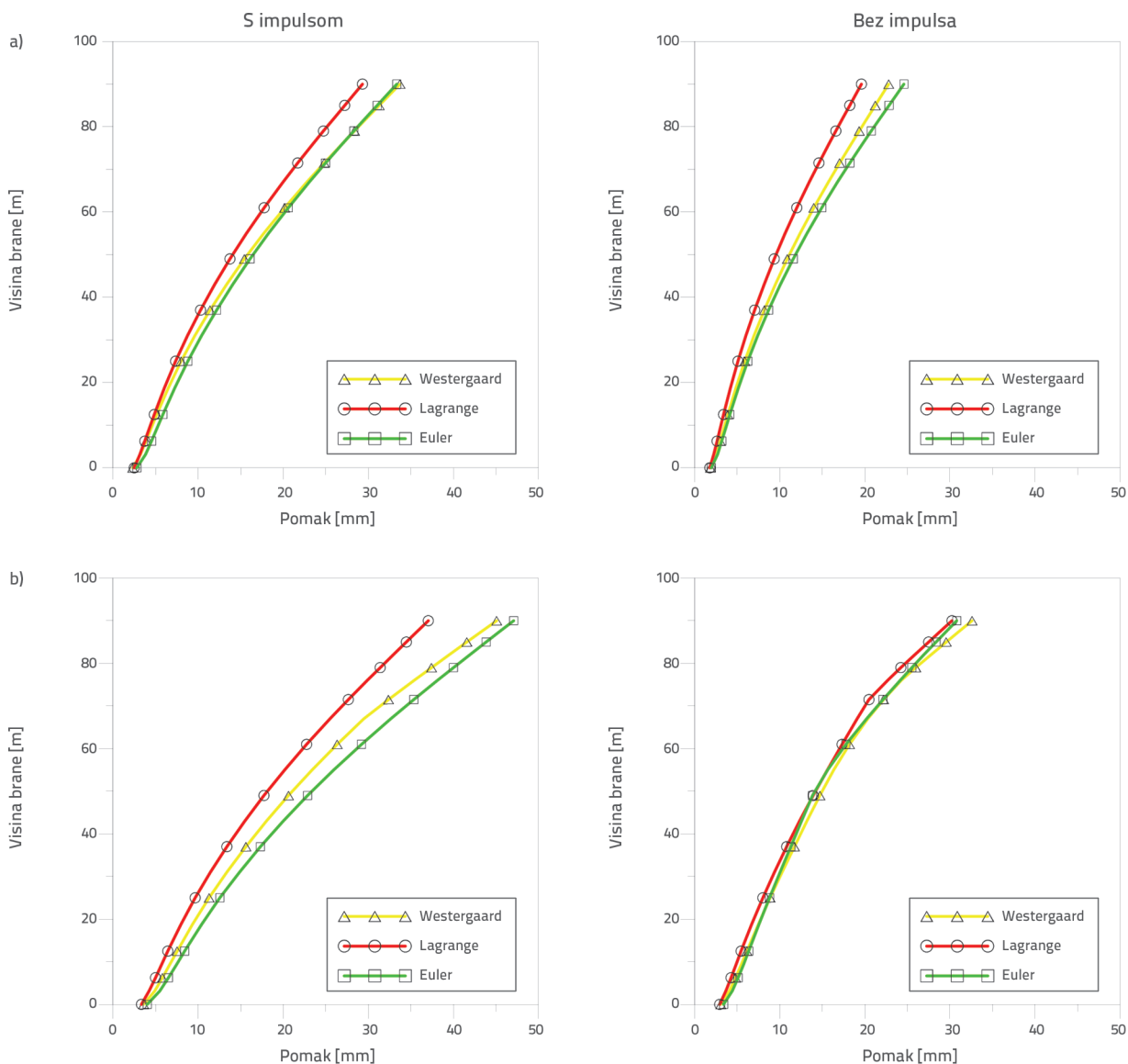
Materijal	Svojstva materijala		
	Modul elastičnosti [N/m]	Poissonov koeficijent [-]	Masa po jedinici volumena [kg/m ³]
Brana (betonska)	35 · 10 ⁹	0,15	2400
Temelj	30 · 10 ⁹	0,2	-
Akumulacija	20,7 · 10 ⁹	-	1000



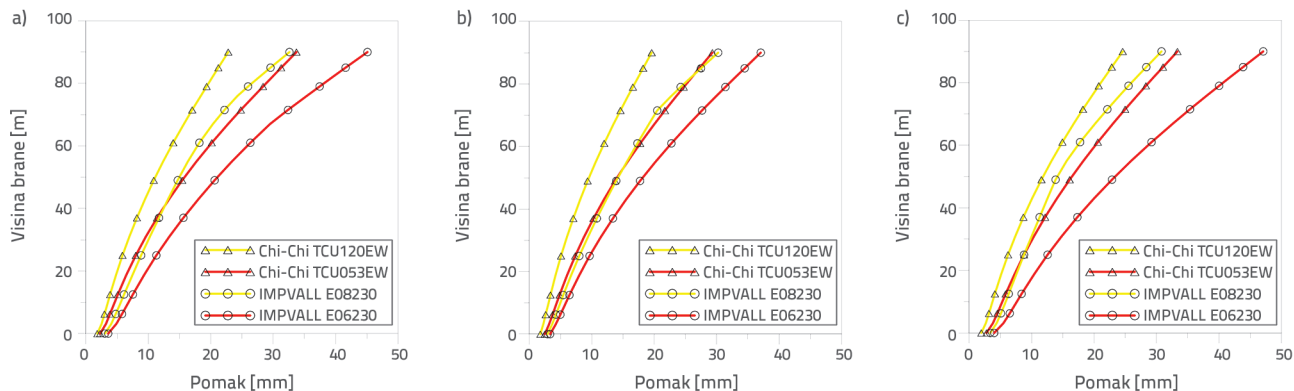
Slika 7. Vremenski zapisi horizontalnih pomaka krune za Chi-Chi potres u Tajvanu 1999. za pristupe: a) Westergaard; b) Lagrange; c) Euler



Slika 8. Vremenski zapisi horizontalnih pomaka krune za potres u Imperial Valleyju 1979. za pristupe: a) Westergaard; b) Lagrange; c) Euler



Slika 9. Najveći horizontalni pomaci po visini betonske gravitacijske brane Sariyar za potres: a) Chi-Chi u Tajvanu 1999.; b) u Imperial Valleyju 1979.



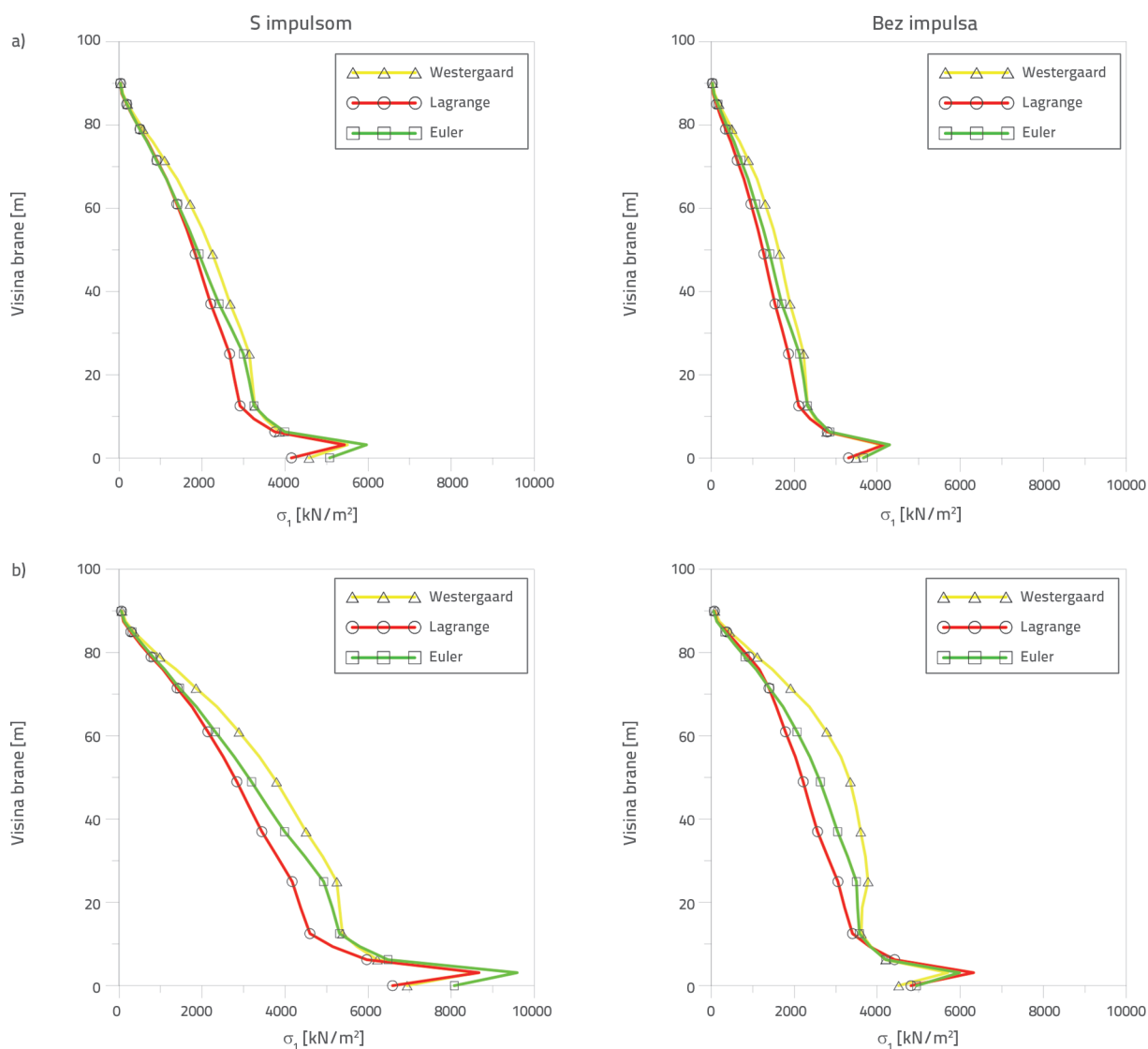
Slika 10. Najveći horizontalni pomaci po visini betonske gravitacijske brane Sariyar za pristupe pod zabilježenim pomakom s impulsom (crvena boja) i bez impulsnog signala (žuta boja): a) Westergaard; b) Lagrange; c) Euler

Varijacije najvećih pomaka s visinom tijela brane za sve modele fluidne domene prikazane su na slici 10. Kao što se vidi na slikama 9. i 10., brana ima horizontalni pomak uzroktan hidrodinamičkim silama na dnu akumulacije. Opet, najveći pomaci dobiveni iz pomaka tla bliskih potresa s impulsnim signalom znatno su veći od pomaka tla bez impulsa. Također, pomaci dobiveni za bliske potrese variraju prema FSI pristupu.

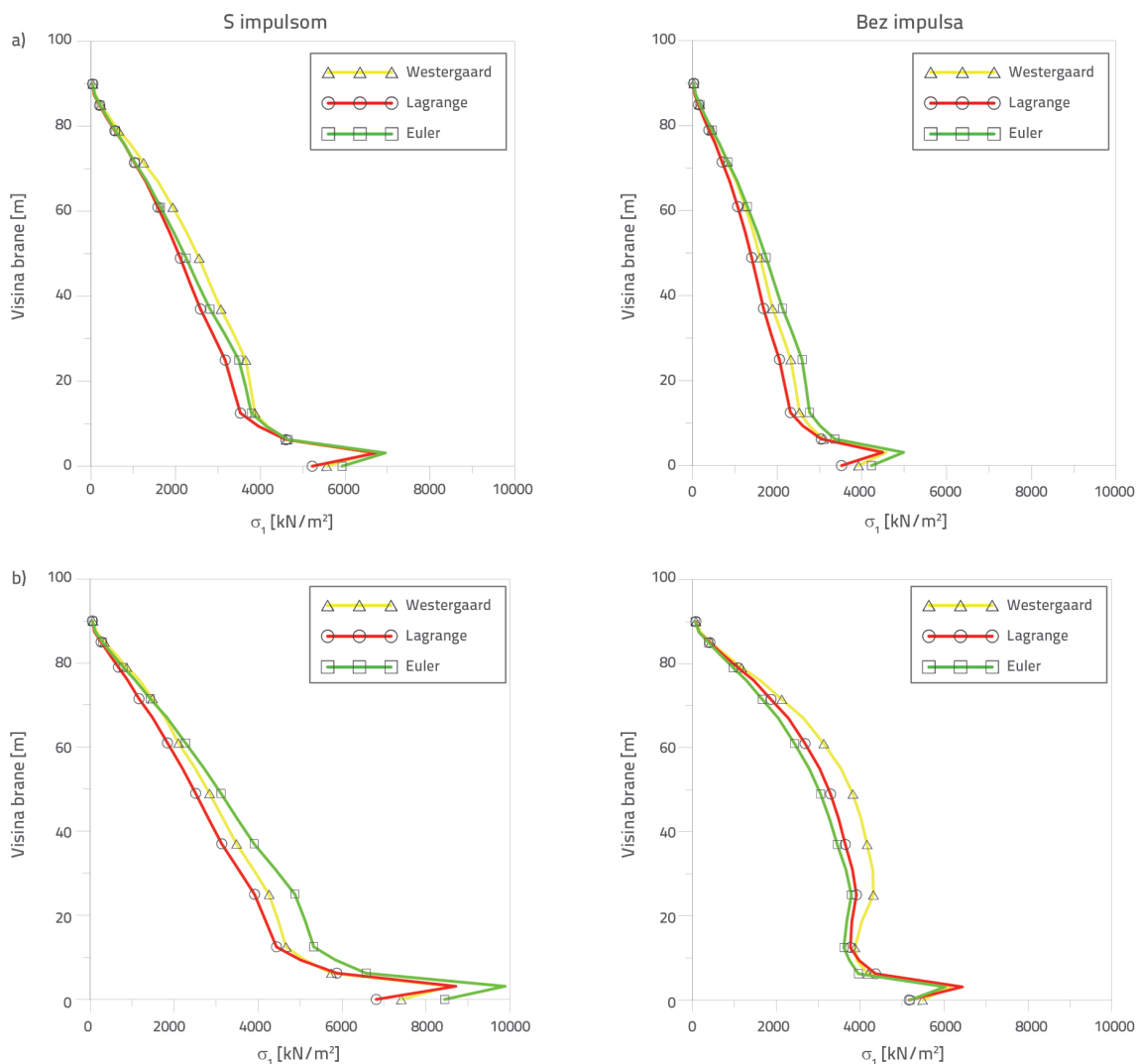
4.2. Glavna naprezanja

Varijacije najvećih tlačnih i vlačnih glavnih naprezanja s visinom za Westergaardov, Lagrangeov i Eulerov pristup dane su na slikama 11. i 12. Iz slika se jasno vidi da se najveće vrijednosti oba glavna naprezanja postižu na 3,1 m od podnožja brane. Najveća vlačna naprezanja su 5,5-4,0 MPa, 5,4-4,1 MPa, 5,9-

4,3 MPa; dok su najveća tlačna naprezanja 6,6-4,5 MPa, 6,7-4,4 MPa, 6,9-4,9 MPa za Westergaardov, Lagrangeov i Eulerov pristup za tajvanski Chi-Chi potres 1999. godine. Osim toga, najveća vlačna naprezanja su 8,5-5,7 MPa, 8,6-6,3 MPa, 9,5-5,9 MPa; najveća tlačna naprezanja postignuta su kao 8,5-6,1 MPa, 8,7-6,4 MPa, 9,8-6,0 MPa za sve FSI pristupe za potres u Imperial Valleyju 1979. godine. Iz slika 11. i 12. može se zaključiti da su najveća glavna naprezanja veća za pomake tla s impulsnim signalom. Vrijednosti naprezanja postignute na 3,125 m više su za Eulerov model, ali su vršne vrijednosti dobivene s Westergaardtim modelima. Drugim riječima, vrijednosti naprezanja variraju prema sadržaju impulsa i frekvencijskog sastava pomaka tla. Ti dijagrami uključuju vlastitu težinu i naprezanja/deformacije pod hidrodinamičkim pritiscima.



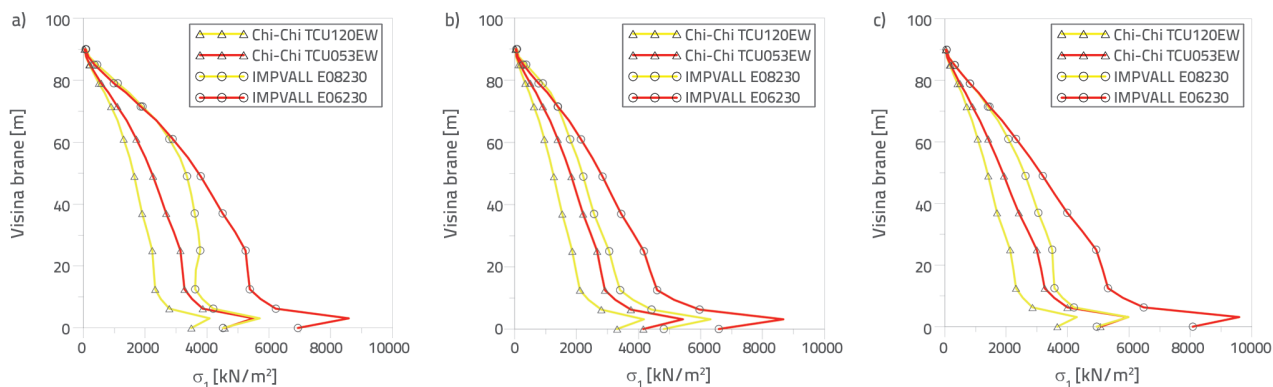
Slika 11. Najveća vlačna glavna naprezanja s visinom betonske gravitacijske brane Sariyar za potres: a) Chi-Chi u Tajvanu 1999.; b) u Imperial Valleyju 1979.



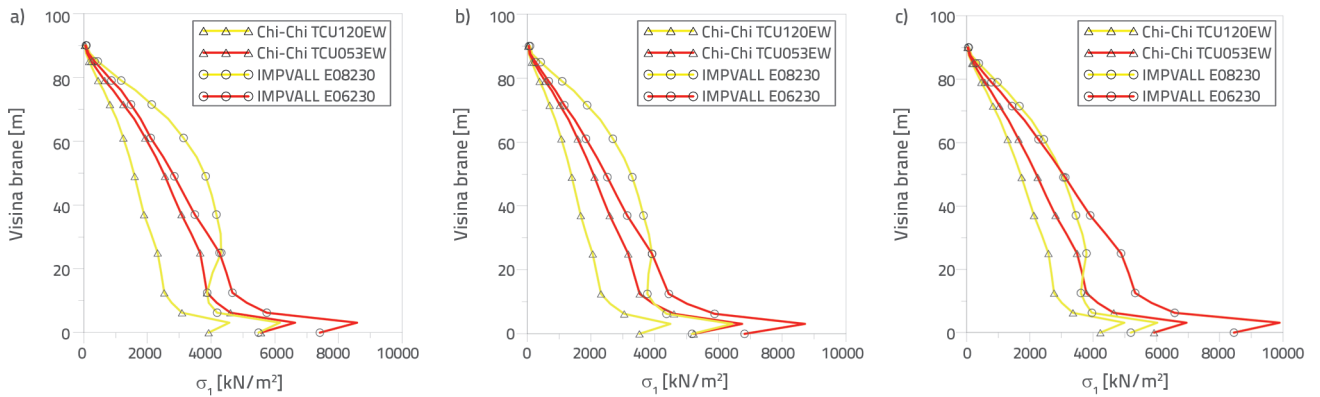
Slika 12. Najveća tlačna glavna naprezanja s visinom betonske gravitacijske brane Sariyaz za potres: a) Chi-Chi u Tajvanu 1999.; b) u Imperial Valleyju 1979.

Varijacije najvećih i najmanjih glavnih naprezanja s visinom za sve modele iz domene fluida dane su na slikama 13. i 14. Na slikama se jasno vidi da se veličine naprezanja smanjuju duž visine brane gdje su najveća naprezanja dobivena u slučaju pomaka tla s impulsnim

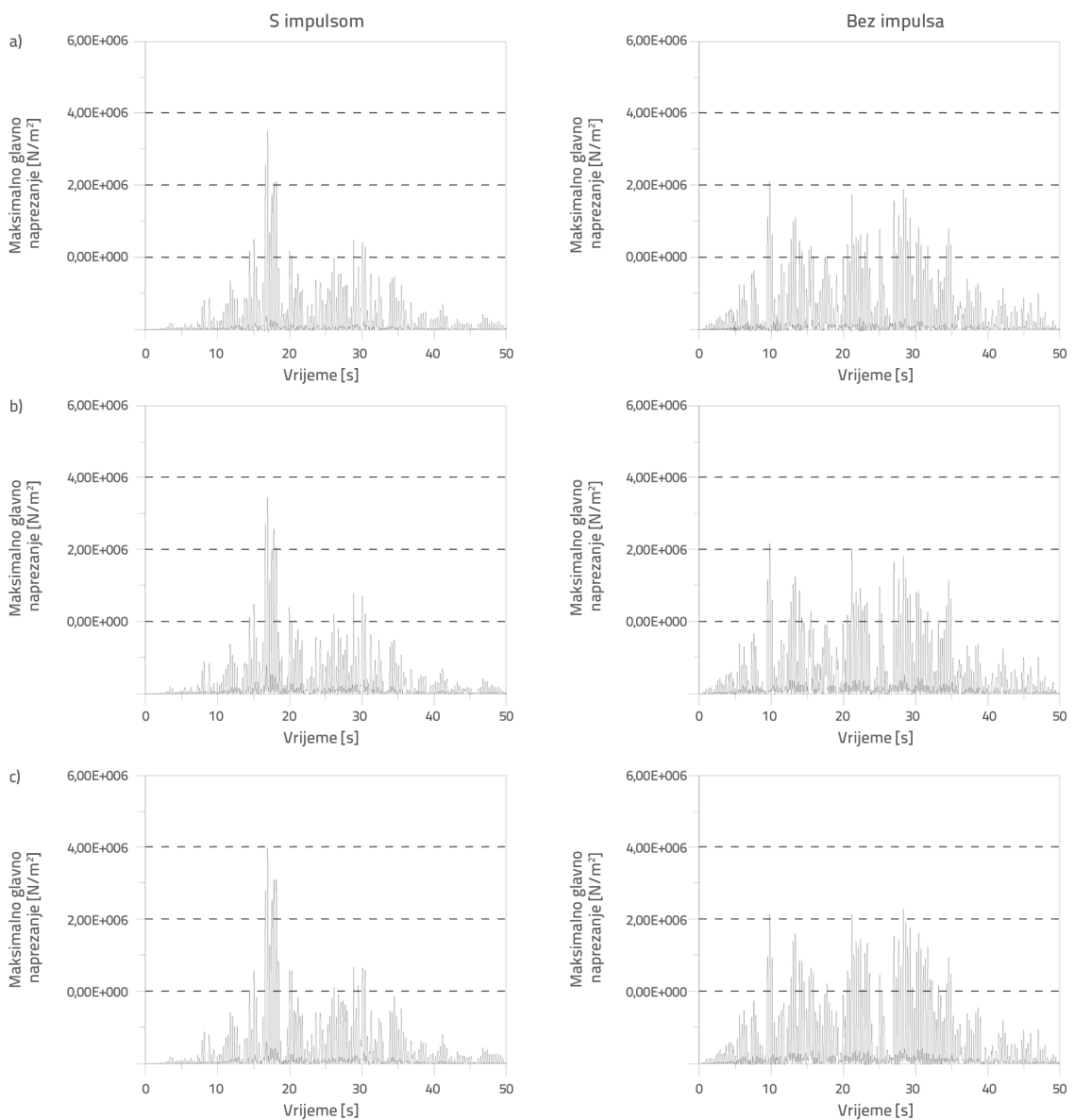
signalom uslijed bliskih potresa i veća su od onih dobivenih pod pomacima tla bez impulsa. Također, naprezanja variraju ovisno o FSI pristupu. Vršne vrijednosti naprezanja, dobivene u blizini krune brane, veće su za zabilježene pomake bez impulsnog signala.



Slika 13. Najveća vlačna naprezanja u odnosu na visinu za pomake tla sa (crvena boja) i bez impulsnog signala (žuta boja), za pristupe: a) Westergaard; b) Lagrange; c) Euler



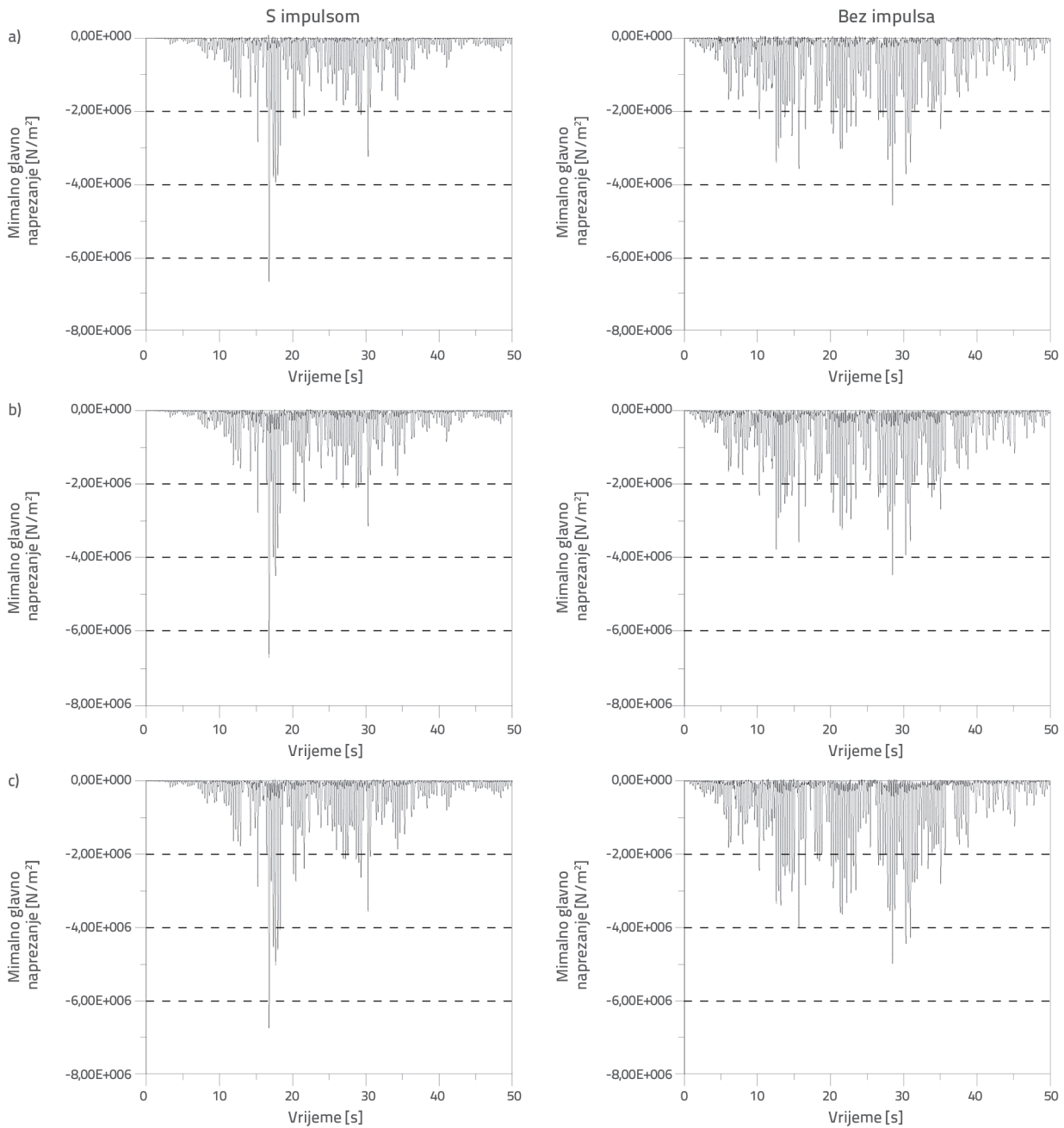
Slika 14. Najveća tlačna naprezanja u odnosu na visinu za pomake tla s (crvena boja) i bez impulsnog signala (žuta boja), za pristupe: a) Westergaard; b) Lagrange; c) Euler



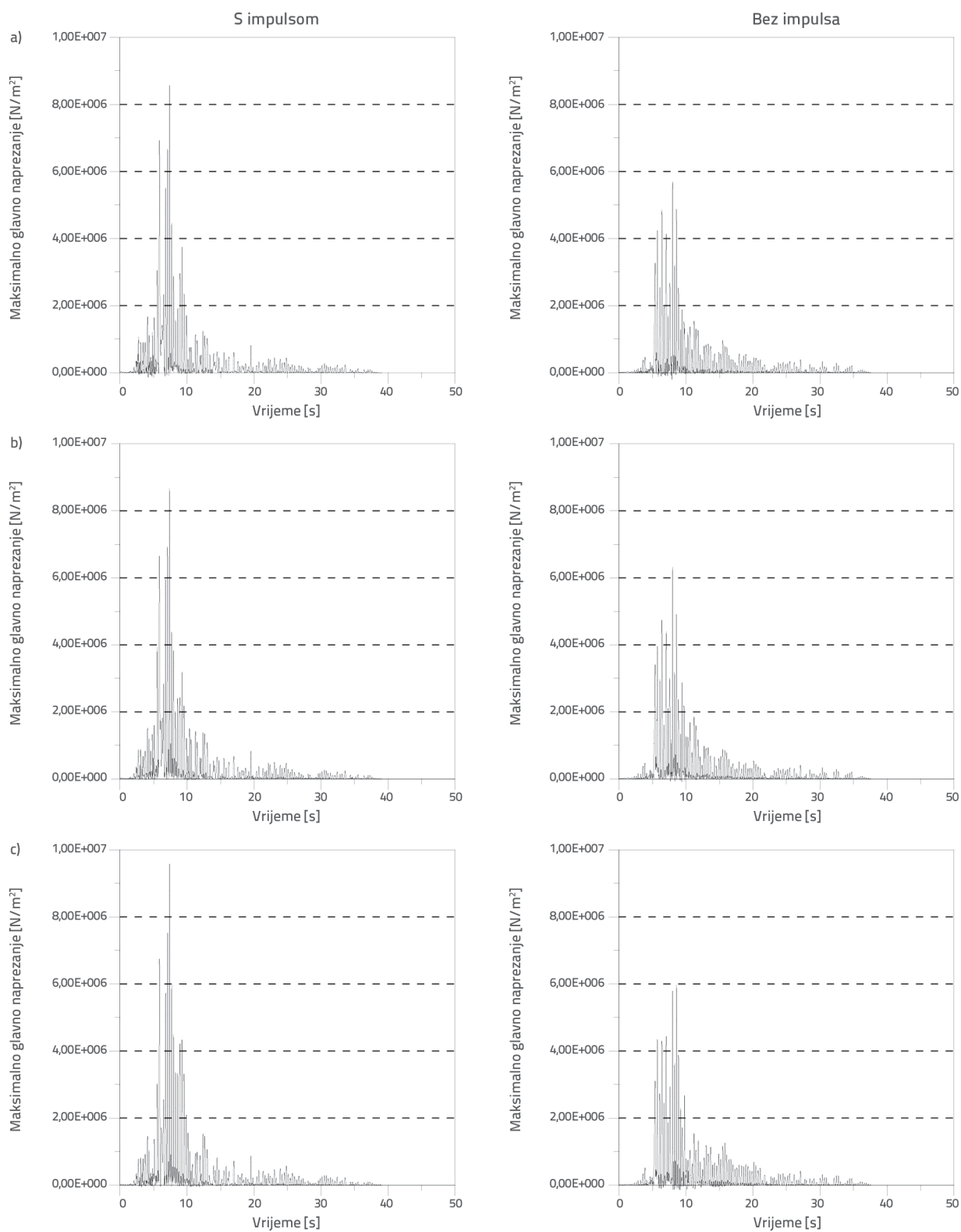
Slika 15. Vremenski zapisi najvećih glavnih naprezanja u čvoru u blizini dna za tajvanski Chi-Chi potres iz 1999., za pristupe: a) Westergaard; b) Lagrange; c) Euler

Vremenski zapisi najvećih i najmanjih glavnih napreznja (na 3,125 m iznad temeljne točke čvora interakcije brane i temelja na uzvodnoj strani) prikazani su na slikama 15. do 18. Što se tiče ostalih parametara odziva, najveća glavna napreznja su

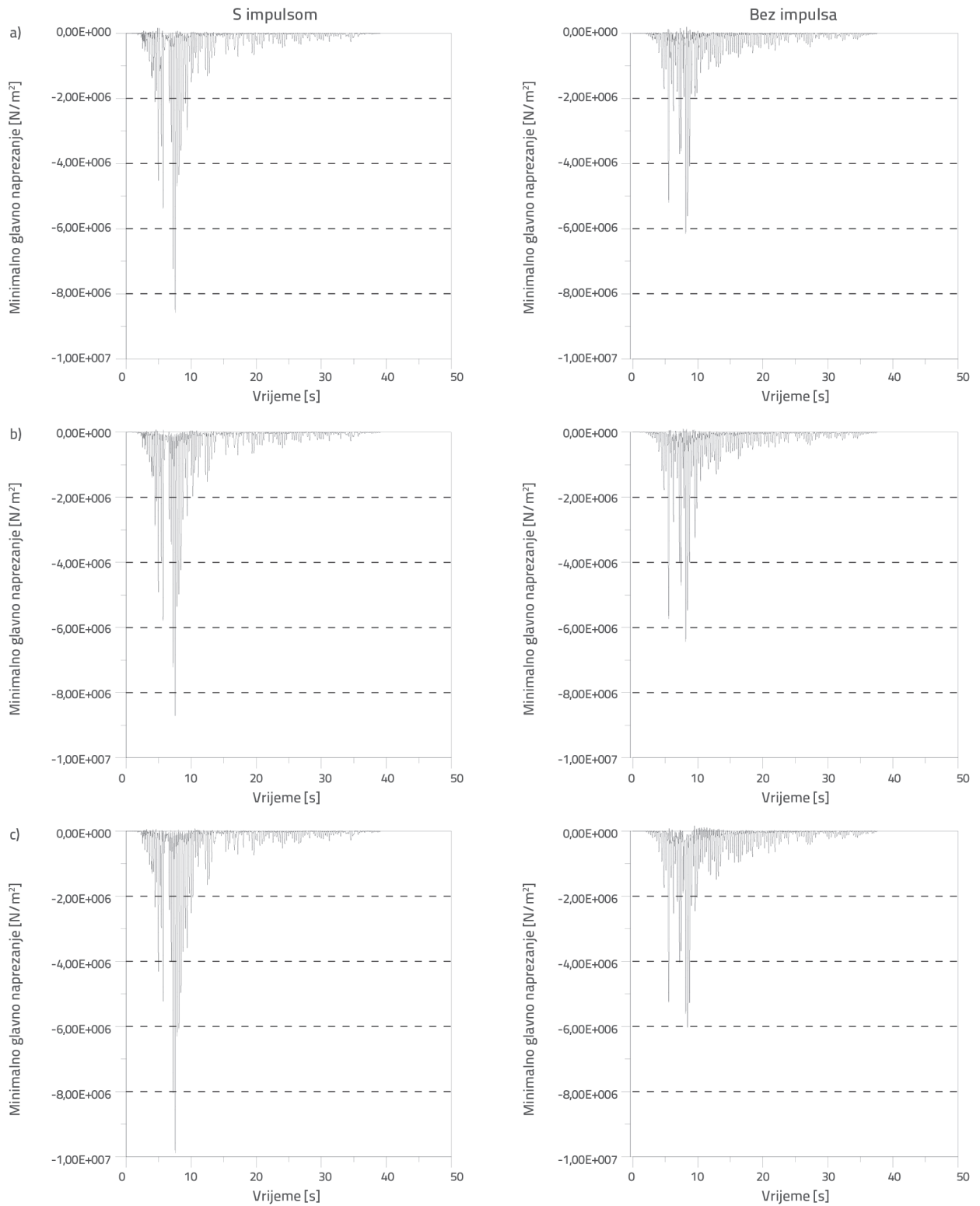
veća za pomake tla s impulsnim signalom. Iako su vrijednosti napreznja postignute na 3,125 m najveće za Eulerove modele u cjelini, vršna vrijednost je dobivena s Lagrangetim modelom zapisa potresa u Imperial Valleyu iz 1979. bez impulsa.



Slika 16. Vremenski zapisi najmanjih glavnih napreznja u čvoru u blizini dna za tajvanski Chi-Chi potres iz 1999., za pristupe: a) Westergaard; b) Lagrange; c) Euler



Slika 17. Vremenski zapisi najvećih glavnih naprezanja u čvoru u blizini dna za potres u Imperial Valleyju 1979., za pristupe: a) Westergaard; b) Lagrange; c) Euler

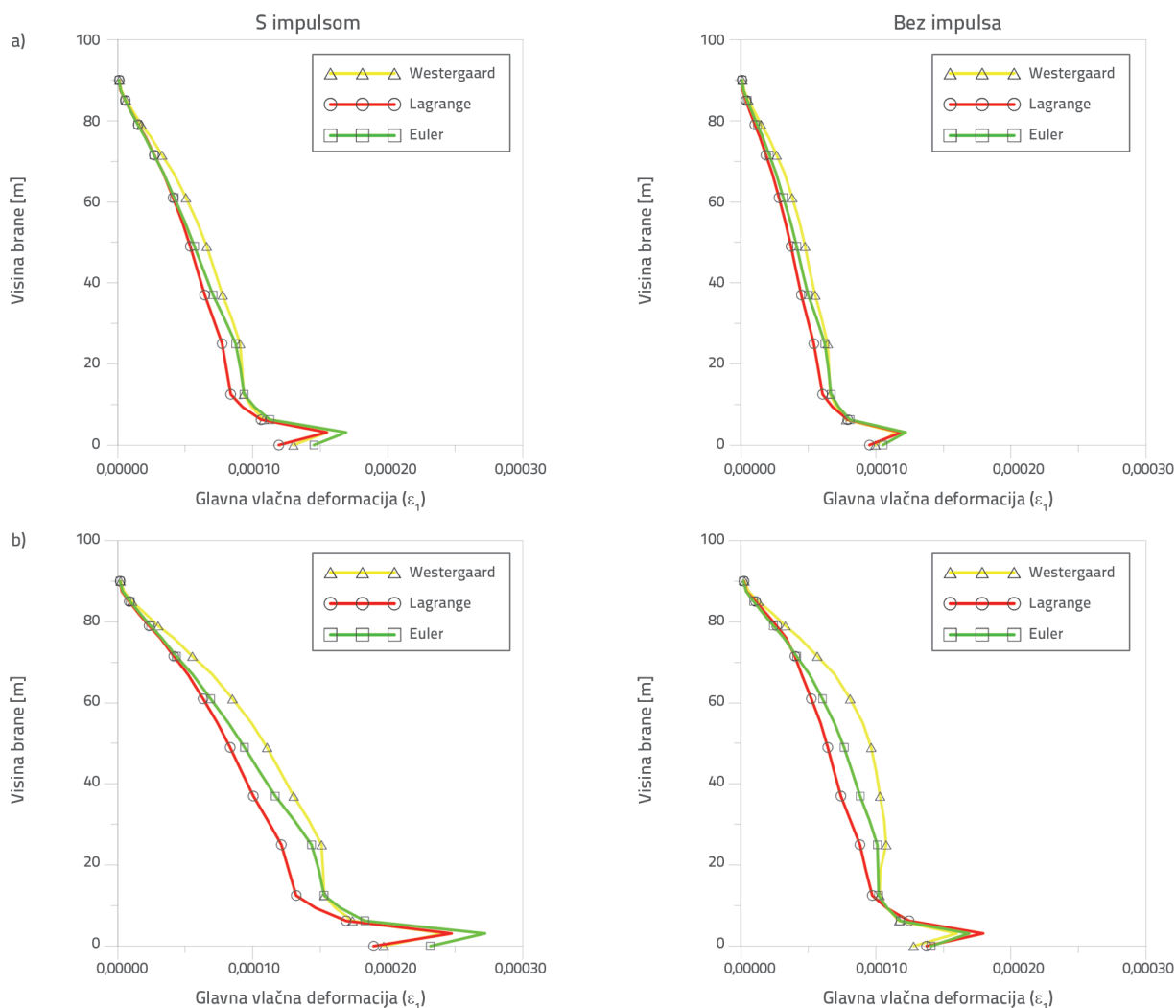


Slika 18. Vremenski zapisi najmanjih glavnih naprezanja u čvoru u blizini dna za potres u Imperial Valleyju iz 1979., za pristupe: a) Westergaard; b) Lagrange; c) Euler

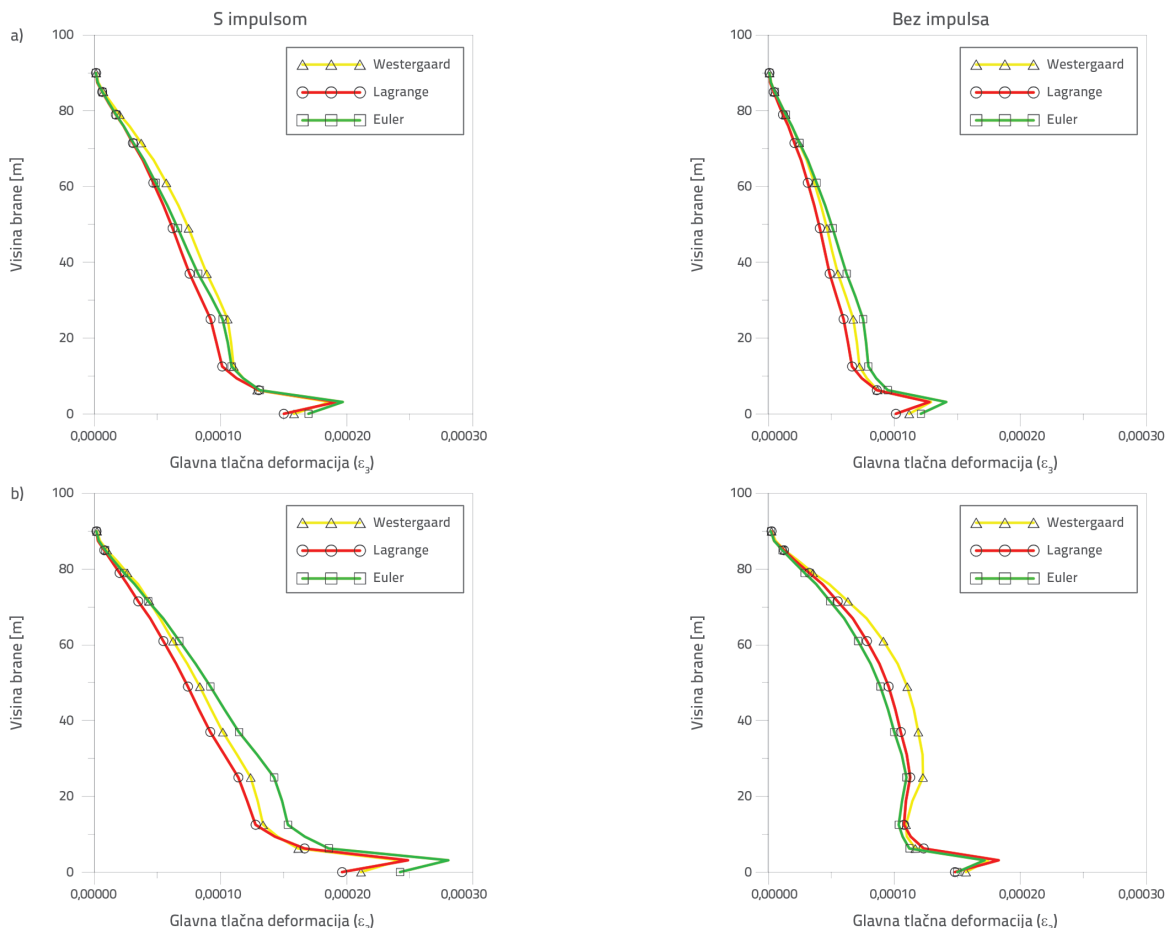
4.3. Glavne deformacije

Varijacije najvećih tlačnih i vlačnih glavnih deformacija s visinom za Westergaardov, Lagrangeov i Eulerov pristup prikazane su na slikama 19. i 20. Iz slika se jasno vidi da se najveće vrijednosti obaju glavnih deformacija postižu na 3,1 m od dna brane. Najveće vlačne deformacije su $(15,5 \cdot 10^{-5}) - (11,5 \cdot 10^{-5})$, $(15,4 \cdot 10^{-5}) - (11,8 \cdot 10^{-5})$, $(16,9 \cdot 10^{-5}) - (12,2 \cdot 10^{-5})$; a najveće su tlačne deformacije $(18,7 \cdot 10^{-5}) - (12,9 \cdot 10^{-5})$, $(19,2 \cdot 10^{-5}) - (12,7 \cdot 10^{-5})$, $(19,7 \cdot 10^{-5}) - (14,1 \cdot 10^{-5})$ za Westergaardov, Lagrangeov i Eulerov pristup za Chi-Chi potres u Tajvanu 1999.

Osim toga, najveće vlačne deformacije su $(24,1 \cdot 10^{-5}) - (16,0 \cdot 10^{-5})$, $(24,7 \cdot 10^{-5}) - (17,9 \cdot 10^{-5})$, $(27,2 \cdot 10^{-5}) - (16,8 \cdot 10^{-5})$; najveće tlačne deformacije su $(24,2 \cdot 10^{-5}) - (17,4 \cdot 10^{-5})$, $(24,8 \cdot 10^{-5}) - (18,2 \cdot 10^{-5})$, $(28,0 \cdot 10^{-5}) - (17,1 \cdot 10^{-5})$ za sve FSI pristupe za potres u Imperial Valleyju iz 1979. Iz slika 19. i 20. može se zaključiti da su najveće glavne deformacije veće za pomake tla s impulsnim signalom. Vrijednosti deformacije postignute na 3,125 m veće su za Eulerov model, ali su vršne vrijednosti dobivene s Westergaardtim modelima. Osim toga, vrijednosti deformacije dobivene iz svih modela domene fluida variraju prema sadržaju impulsa i frekventnog sastava pomaka tla.



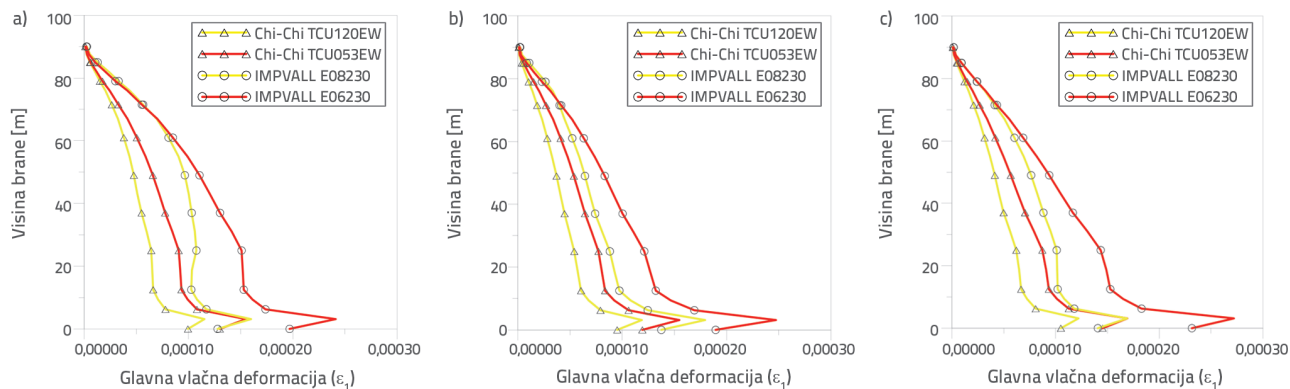
Slika 19. Najveće vlačne glavne deformacije u odnosu na visinu betonske gravitacijske brane Sariyar za potres: a) Chi-Chi u Tajvanu 1999.; b) Imperial Valleyju 1979.



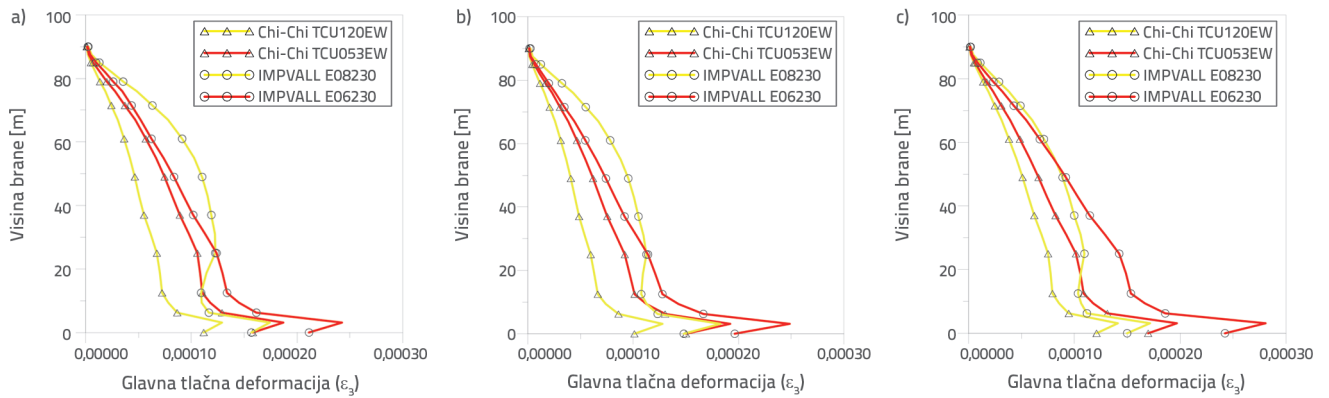
Slika 20. Najveće tlačne glavne deformacije u odnosu na s visinom betonske gravitacijske brane Sariyar za: a) tajvanski Chi-Chi potres 1999.; b) potres Imperial Valley 1979.

Varijacije najvećih i najmanjih glavnih deformacija s visinom za sve modele fluidne domene prikazane su na slikama 21. i 22. Iz slika se jasno vidi da se veličine deformacija smanjuju duž visine brane, pri čemu su najveće deformacije dobivene u slučaju pomaka tla s impulsnim signalom uslijed bliskih potresa veće od onih dobivenih pri pomacima tla bez impulsa. Također, deformacije se razlikuju prema FSI pristupu. Vršne vrijednosti deformacije dobivene u blizini krune brane veće su za zabilježene pomake bez impulsnog signala.

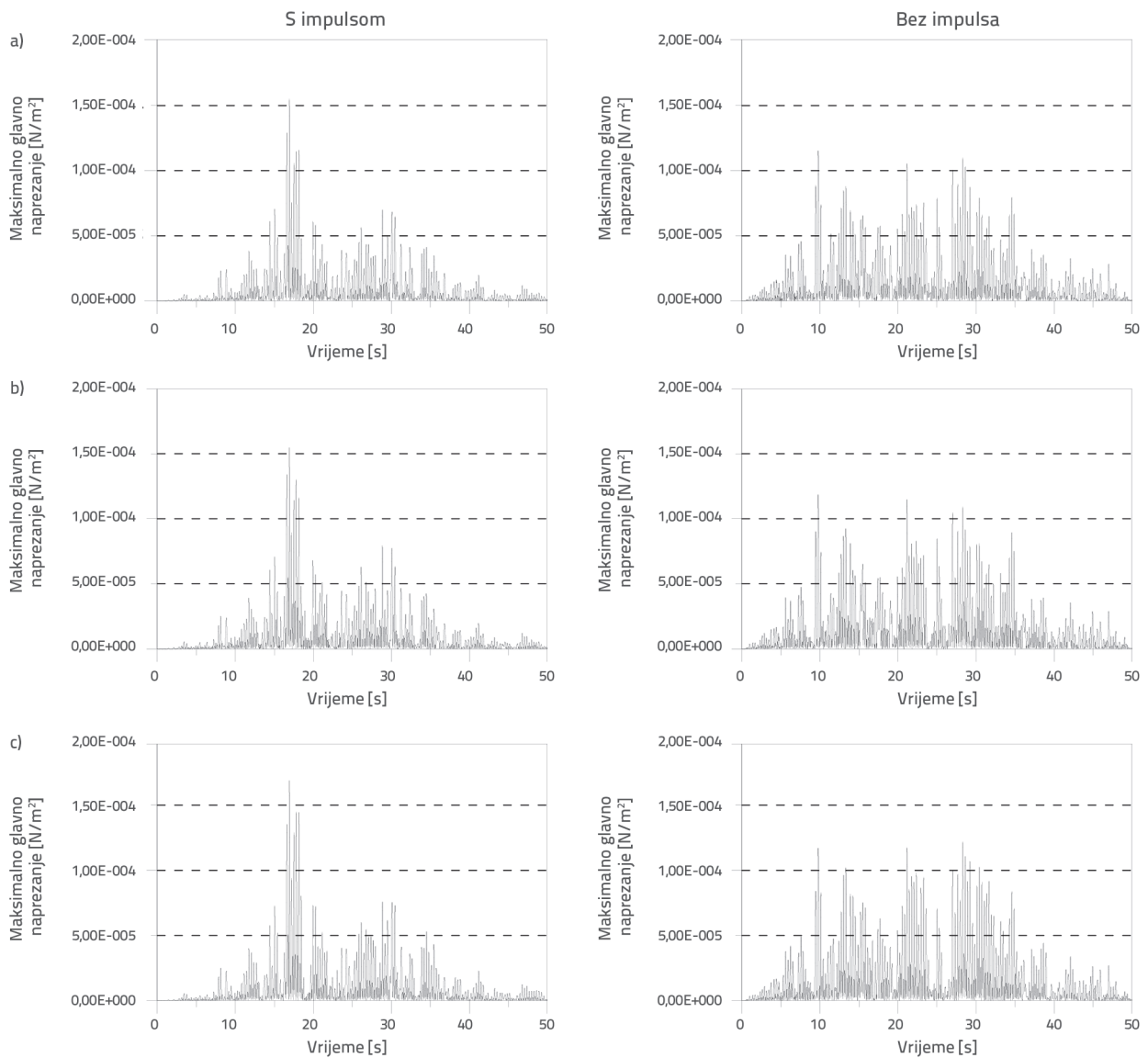
Vremenski zapisi najvećih i najmanjih glavnih naprezanja (na 3,125 m iznad temeljne točke čvora interakcije brane i temelja na uzvodnoj strani) prikazani su na slikama 23. do 26. Što se tiče ostalih parametara odziva, najveće glavne deformacije su veće za pomake tla s impulsnim signalom. Iako su vrijednosti deformacije postignute na 3,125 m najveće za Eulerove modele u cjelini, vršna vrijednost je dobivena s Lagrangetim modelom u zapisu potresa u Imperial Valleyu iz 1979. bez impulsa.



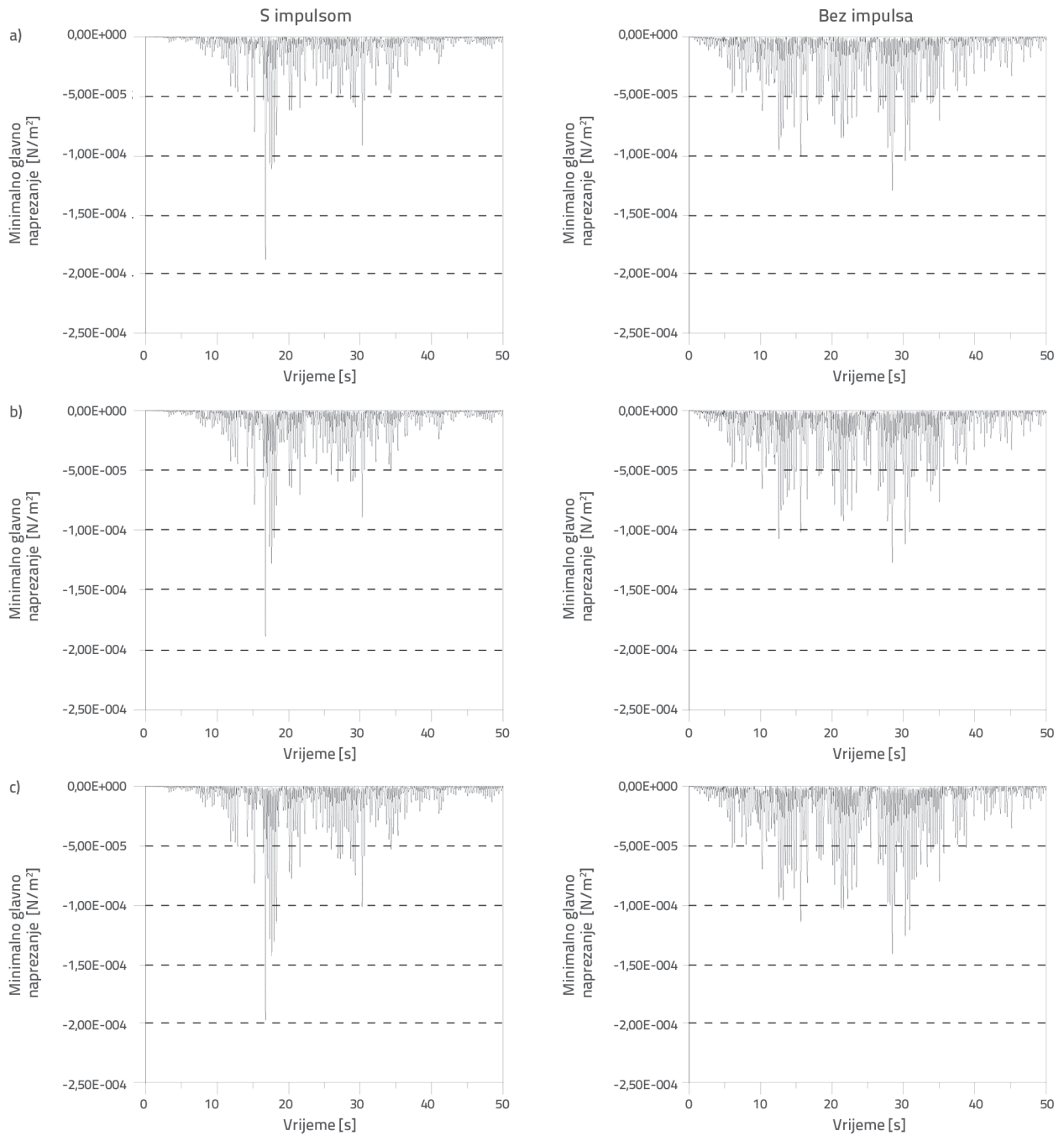
Slika 21. Najveće vlačne deformacije u odnosu na visinu za pomake tla sa (žuta boja) i bez impulsnog signala (crvena boja), za pristupe: a) Westergaard; b) Lagrange; c) Euler



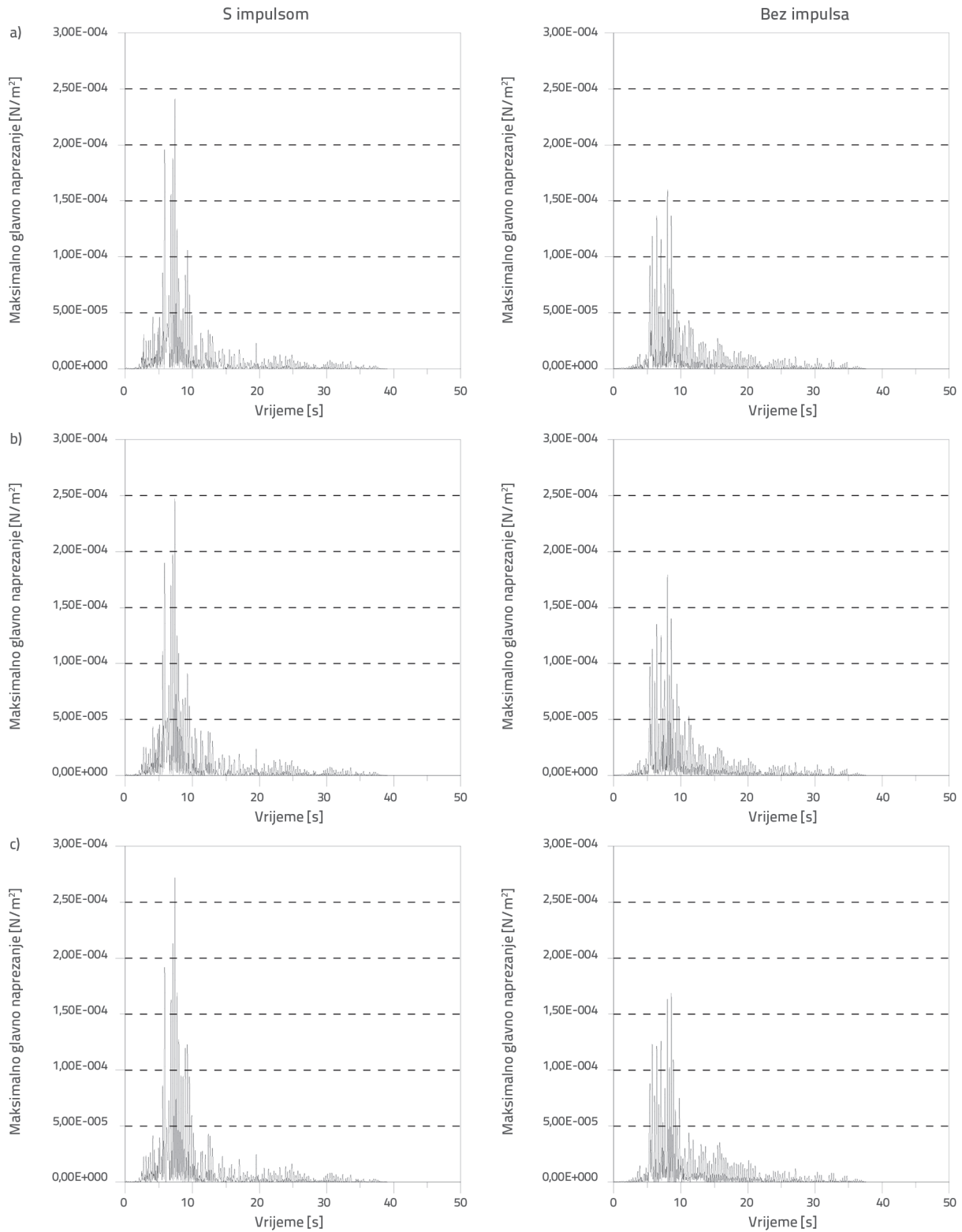
Slika 22. Najveće tlačne glavne deformacije u odnosu na visinu za pomake tla sa i bez impulsnog signala, za pristupe: a) Westergaard; b) Lagrange; c) Euler



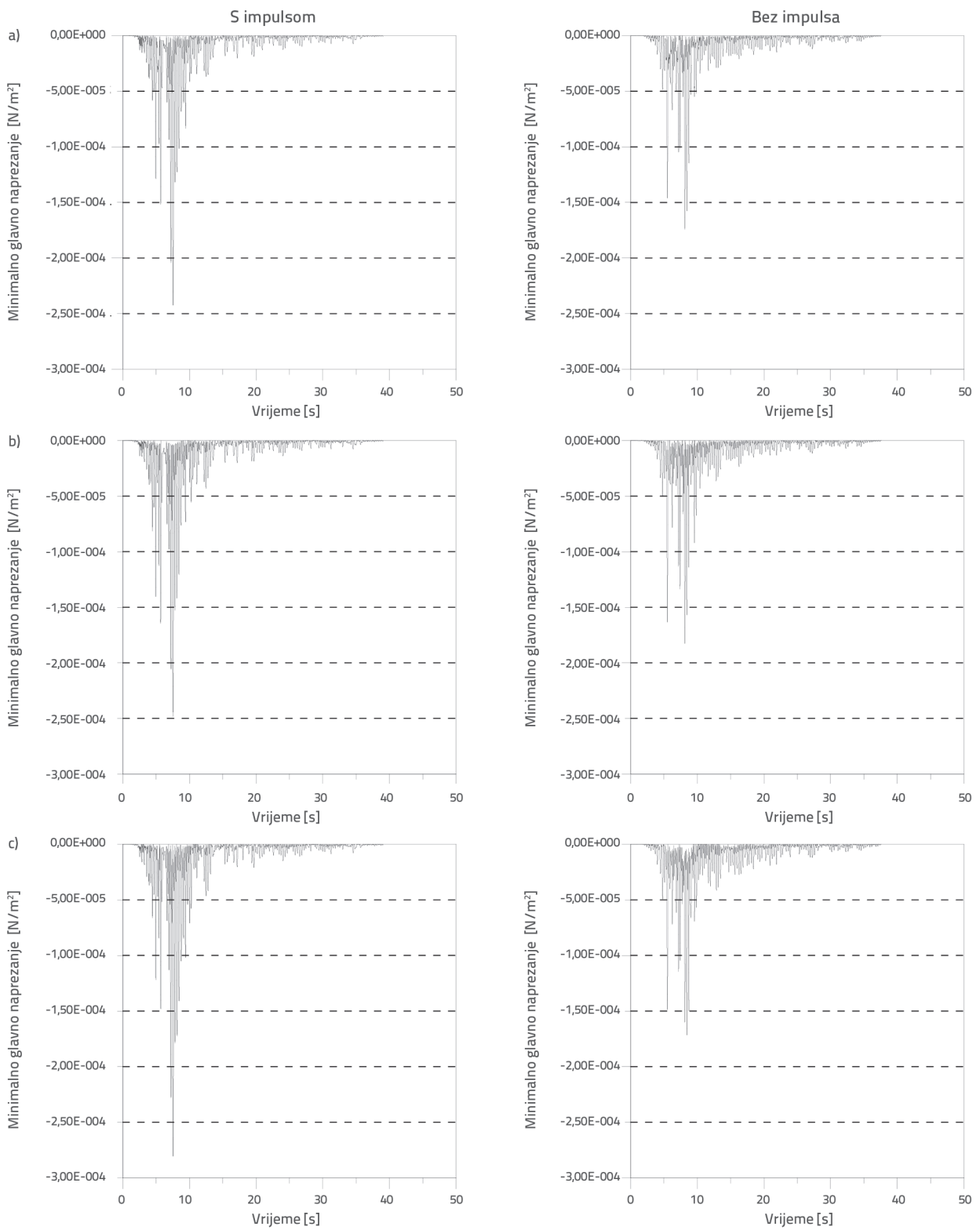
Slika 23. Vremenski zapis najvećih glavnih deformacija u točki krune za tajvanski Chi-Chi potres 1999., za pristupe: a) Westergaard; b) Lagrange; c) Euler



Slika 24. Vremenski zapis najmanjih glavnih deformacija u točki krune za tajvanski Chi-Chi potres 1999., za pristupe: a) Westergaard; b) Lagrange; c) Euler



Slika 25. Vremenski zapisi najvećih glavnih deformacija na kruni za potres u Imperial Valleyu 1979., za pristupe: a) Westergaard; b) Lagrange; c) Euler



Slika 26. Vremenski zapisi najmanjih glavnih deformacija na kruni za potres u Imperial Valleyu 1979., za pristupe: a) Westergaard; b) Lagrange; c) Euler

5. Zaključak

Prikazani su učinci pomaka tla impulsnim signalom uslijed bliskih potresa na strukturni dinamički odgovor betonskih gravitacijskih brana uključujući interakciju brane, akumulacije i temelja. Različiti FSI pristupi za procjenu hidrodinamičkog tlaka su primijenjeni: Westergaardov (dodane mase), Lagrangeov (na temelju pomaka) i Eulerov (na temelju tlaka). Za studiju slučaja je odabrana betonska gravitacijska brana Sariyar smještena u Ankari, Turska. Zapisi bliskih potresa Chi-Chi u Tajvanu iz 1999. i potresa u Imperial Valleyu iz 1979. uzeti su u obzir kao reprezentativni za pomake tla s impulsnim signalom i bez njega.

Provedene analize pokazuju da se pomaci povećavaju s visinom brane za sve pomake tla i pristupe modeliranju. Najveća vlačna i tlačna naprezanja i deformacije dobivaju se na visini od 3,125 m od dna brane. Najveća i najmanja glavna naprezanja i deformacije pokazuju trend pada od dna (3,125 m visine od dna brane) do krune brane. Iako pomaci tla impulsom i bez impulsnog signala imaju isto vršno ubrzanje tla, najveće vrijednosti dobivene su iz pomaka tla s impulsom za bliske potrese.

Pomaci dobiveni iz impulsnih ulaznih pomaka znatno su veći nego bez impulsnih ulaznih pomaka. Omjeri povećanja pomaka izračunani su kao 47,87 %, 49,64 % i 35,20 % za Chi-Chi potres iz 1999. i 38,30 %, 22,55 i 52,87 % za potres u Imperial Valleyu iz 1979. uzimajući u obzir Westergaardov, Lagrangeov i Eulerov pristup, redom.

Najveća i najmanja glavna naprezanja dobivena iz impulsnih ulaznih pomaka znatno su veća nego bez impulsnih ulaznih pomaka. Vrijednosti vlačnih naprezanja imaju trend porasta s

impulsnim signalima. Najveće razlike postignute su kao 37,50 %, 31,70 % i 37,21 % za Chi-Chi potres 1999. i 49,12 %, 36,51 % i 61,02 % za potres u Imperial Valleyju uzimajući u obzir Westergaardov, Lagrangeov i Eulerov pristup, redom. Ti omjeri povećanja izračunani su za minimalno tlačno naprezanje kao 46,67 %, 52,27 % i 40,82 % za potres u Chi-Chi 1999. i 39,34 %, 35,94 % i 63,33 % za potres u Imperial Valleyju.

Vrijednosti deformacije dobivene iz impulsnog signala veće su od onih bez impulsnih signala. Najveće razlike za vlačne deformacije utvrđene su kao 34,78 %, 30,51 % i 38,52 % za Chi-Chi potres 1999. i 50,63 %, 37,99 % i 61,90 % za potres u Imperial Valleyju uzimajući u obzir Westergaardov, Lagrangeov i Eulerov pristup. Osim toga, najveće razlike za tlačne deformacije određene su kao 44,96 %, 51,18 %, 39,72 % i 39,08 %, 36,26 %, 63,74 % za oba potresa uz sve pristupe.

Vrijednosti pomaka, naprezanja i deformacija dobivene iz svih modela domene fluida variraju s obzirom na pojavu impulsa i frekvencijski sastav pomaka tla.

Element MASS21, sparene linije i element FLUID29 (koristeći opcije prisutnosti konstrukcije) mogu se smatrati interakcijom brana-akumulacija i akumulacija-temelj u Westergaardovom, Lagrangeovom i Eulerovom pristupu.

Može se zaključiti da za isto vršno ubrzanje tla i trajanje pomaka tla uslijed bliskih potresa, onaj s impulsnim signalom stvara znatno veće pomake, naprezanja i deformacije u betonskim gravitacijskim branama. Pomaci tla s impulsnim signalom uslijed bliskih potresa imaju značajan učinak na strukturne karakteristike betonskih gravitacijskih brana i treba ih uzeti u obzir kako bi se dobili realniji rezultati za betonske gravitacijske brane u seizmičkim područjima.

LITERATURA

- [1] Westergaard, H.M.: Water Pressures on Dams during Earthquakes, Transactions of the American Society of Civil Engineers, 98 (1933) 2, pp. 418–433
- [2] Calayır, Y.: Dynamic Analysis of Concrete Gravity Dams Using Euler and Lagrange Approaches, PhD. Thesis, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey, 1994.
- [3] Calayır, Y., Dumanoğlu, A.A., Bayraktar, A.: Earthquake analysis of gravity dam-reservoir systems using the Eulerian and Lagrangian approaches, Computers and Structures, 59 (1996) 5, pp. 877–890
- [4] Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Kartal, M.E., Türker, T.: Near-fault ground motion effects on the nonlinear response of the dam-reservoir-foundation systems, Structural Engineering & Mechanics, 28(2008) 4, pp. 411–442
- [5] Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Kartal, M.E., Türker, T., Bilici, Y.: Comparison of near- and far-fault ground motion effect on the nonlinear response of dam-reservoir-foundation systems, Nonlinear Dynamics, 58 (2009) 4, pp. 655–673
- [6] Bayraktar, A., Türker, T., Akköse, M., Ateş, Ş.: The effect of reservoir length on seismic performance of gravity dams to near- and far-fault ground motions, Natural Hazards, 52 (2010) 2, pp. 257–275
- [7] Zhang, S., Wang, G.: Effects of near-fault and far-fault ground motions on nonlinear dynamic response and seismic damage of concrete gravity dams, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 53 (2013), pp. 217–229
- [8] Maity, D., Bhattacharyya, S.K.: A parametric study fluid-structure interaction problems, Journal of Sound and Vibration, 263 (2003) 4, pp. 917–935
- [9] Samii, A., Lotfi, V.: Comparison of coupled and decoupled modal approaches in seismic analysis of concrete gravity dams in time domain, Finite Elements in Analysis and Design, 43 (2007), pp. 1003–1012
- [10] Fathi, A., Lotfi, V.: Effects of reservoir length on dynamic analysis of concrete gravity dams, Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- [11] Akköse, M., Şimşek, E.: Non-linear seismic response of concrete gravity dams to near-fault ground motions including dam-water-sediment-foundation interaction, Applied Mathematical Modelling, 34 (2010), pp. 3685–3700
- [12] Wood, C., Gil, A.J., Hassan, O., Bonet, J.: Partitioned block-Gauss-Seidel coupling for dynamic fluid-structure interaction, Computers and Structures, 88 (2010) 23–24, pp. 1367–1382

- [13] Gogoi, I., Maity, D.: A novel procedure for determination of hydrodynamic pressure along upstream face of dams due to earthquakes, *Computers and Structures*, 88 (2010) 5-6, pp. 539-548
- [14] Degroote, J., Annerel, S., Vierendeels, J.: Stability analysis of Gauss-Seidel iterations in a partitioned Simulation of fluid-structure interaction, *Computers and Structures*, 88 (2010) 5-6, pp. 263-271
- [15] Sevim, B., Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Akköse, M. and Calayir, Y.: Water length and height effects on the earthquake behavior of arch dam-reservoir-foundation systems, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15 (2011) 2, pp. 295-303
- [16] Heydari, M.M., Mansoori, A.: Dynamic Analysis of Dam-Reservoir Interaction in Time Domain, *World Applied Sciences Journal*, 15 (2011) 10, pp. 1403-1408
- [17] Shariatmadar, H., Mirhaj, A.: Dam-reservoir-foundation interaction effects on the modal characteristic of concrete gravity dams, *Structural Engineering and Mechanics*, 38 (2011) 1, pp. 65-79
- [18] Chen, B., Yuan, Y.: Hydrodynamic Pressures on Arch Dam during Earthquakes, *Journal of Hydraulic Engineering*, 137 (2011).1, pp. 34-44
- [19] Wang, H., Feng, M., Yang, H.: Seismic nonlinear analyses of a concrete gravity dam with 3D full dam model, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10 (2012) 6, pp. 1959-1977
- [20] Lin, G., Wang, Y., Hu, Z.: An efficient approach for frequency-domain and time-domain hydrodynamic analysis of dam-reservoir systems, *Earthquake Engineering and structural Dynamics*, 41 (2012) 13, pp. 1725-1749
- [21] Miquel, B., Bouaanani, N.: Accounting for Earthquake-Induced Dam-Reservoir Interaction Using Modified Accelerograms, *Journal of Hydraulic Engineering*, 139 (2013) 9, pp. 1608-1617
- [22] Samii, A., Lotfi, V.: A high order based boundary condition for dynamic analysis of infinite reservoirs, *Computers and Structures*, 120 (2013), pp. 65-76
- [23] Wick, T.: Coupling of fully Eulerian and arbitrary Lagrangian-Eulerian methods for fluid-structure interaction computations, *Computational Mechanics*, 52 (2013) 5, pp. 1113-1124
- [24] Yahyai, M., Rezaibana, B., Mohammadrezapour, E.: Effect of near-fault earthquakes with forward directivity on telecommunication towers, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 10 (2011) 2, pp. 211-218
- [25] Agrawal, A.K., He, W.L.: A closed-form approximation of near-fault ground motion pulses for flexible structures, *Proceedings of the 15th ASCE engineering mechanics conference*, New York, 2002.
- [26] Somerville, P.G.: Magnitude scaling of the near-fault rupture directivity pulse, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 137 (2003), pp. 201-212
- [27] Akkar, S., Yazgan, U., Gulkan, P.: Drift estimates in frame buildings subjected to near-fault ground motions, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 131 (2005), pp. 1014-1024
- [28] Adanur, S., Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Akköse, M.: Comparison of near-fault and far-fault ground motion effects on geometrically nonlinear earthquake behavior of suspension bridges, *Natural Hazards*, 64(2012), pp. 593-614
- [29] Bray, J.D., Rodriguez-Marek, A.: Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24 (2004) 11, pp. 815-828
- [30] Chopra, A.K., Chintanapakdee, C.: Comparing response of SDF systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30 (2001), pp. 1769-1789
- [31] Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B., Ates, S.: Effects of Pulse Signal of Near-Fault Strong Ground Motion on Nonlinear Response of Concrete Gravity Dam-Reservoir-Foundation, *Proceedings of the International Symp. On Advances in Earthquake & Structural Engineering*, Süleyman Demirel University, Isparta-Antalya, Turkey, 2007.
- [32] Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W., Wald, D.J.: Near-Source Ground Motion and its Effects on Flexible Buildings, *Earthquake Spectra*, 11 (1995) 4, pp. 569-605
- [33] Malhotra, P.K.: Response of buildings to near-field pulse-like ground motions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28 (1999), pp. 1309-1326
- [34] Alavi, B., Krawinkler, H.: Consideration of near-fault ground motion effects in seismic design, *Proceedings of the 12th World Conference of Earthquake Engineering*, New Zealand, 2000., Paper No. 2665
- [35] MacRae, G.A., Mattheis, J.: Three-dimensional steel building response to near-fault motions, *Journal of Structural Engineering*, 126 (2000), pp. 117-126
- [36] Alavi, B., Krawinkler, H.: Strengthening of moment-resisting frame structures against near-fault ground motion effects, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33 (2004), pp. 707-722
- [37] Liao, W.L., Loh, C., Lee, B.: Comparison of dynamic response of isolated and non-isolated continuous girder bridges subjected to near-fault ground motions, *Engineering Structures*, 26 (2004), pp. 2173-2183
- [38] Shen, J., Tsai, M., Chang, K., Lee, G.C.: Performance of a Seismically Isolated Bridge under Near-Fault Earthquake Ground Motions, *Journal of Structural Engineering*, 130 (2004) 6, pp. 861-868
- [39] Yan, X., Lee, G.C.: Traveling wave effect on the seismic response of a steel arch bridge subjected to near fault ground motions, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 6 (2007) 3, pp. 245-257
- [40] Prtidakis, C.P.: Pushover analysis of base isolated steel concrete composite structures under near fault excitations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28 (2007), pp. 293-304
- [41] Phan, V., Saiidi, M.S., Anderson, J., Ghasemi, H.: Near-fault ground motion effects on reinforced concrete bridge columns, *Journal of Structural Engineering*, 133 (2007) 7, pp. 982-989
- [42] Su, C., Sung, Y., Chang, S., Huang, C.: Analytical investigations of seismic responses for reinforced concrete bridge columns subjected to strong near-fault ground motion, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 6 (2007) 3, pp. 237-244
- [43] Jonsson, M.H., Bessason, B., Hafliðason, E.: Earthquake response of a base-isolated bridge subjected to strong near-fault ground motion, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30 (2010), pp. 447-455
- [44] Corigliano, M., Scandella, L.: Seismic analysis of deep tunnels in near fault conditions in Southern Italy as case study, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9 (2011), pp. 975-995
- [45] Karalar, M., Padgett, J.E., Dicleli, M.: Parametric analysis of optimum isolator properties for bridges susceptible to near-fault ground motions, *Engineering Structures*, 40 (2012), pp. 276-287
- [46] Amiri, F.S., Amiri, G.G., Razeghi, H.: Estimation seismic demands of steel frames subjected to near-fault earthquakes having forward directivity and comparing with pushover analysis results, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22 (2013), pp. 975-988
- [47] Panchal, V.R., Jangid, R.S.: Behaviour of liquid storage tanks with variable curvature friction pendulum system (VCFPS) under near-fault ground motions, *Structure and Infrastructure Engineering*, 8 (2014) 1, pp. 71-88

- [48] Gang, W., Changhai, Z., Shuang, L., Lili, X.: Effects of near-fault ground motions and equivalent pulses on Large Crossing Transmission Tower-line System, *Engineering Structures*, 77 (2014), pp. 161-169
- [49] Antonellis, G., Panagiotou, M.: Seismic response of bridges with rocking foundations compared to fixed-base bridges at near-fault site, *Journal of Bridge Engineering*, 19 (2014) 5.
- [50] Wilson, E.L., Khalvati, M.: Finite elements for the dynamic analysis of fluid-solid systems, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 19 (1983) 11, pp. 1657-1668
- [51] Bathe, K.J.: *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 1996.
- [52] Clough, R.W., Penzien, J.: *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, New York, USA, 1975.
- [53] Akkaş, N., Akay, H.U., Yılmaz, C.: Applicability of general-purpose finite element programs in solid-fluid interaction problems, *Computers and Structures*, 10 (1979) 5, pp. 773-783
- [54] Cook, R.D., Malkus, D.S., Plesha, M.E.: *Concept and Applications of Finite Element Analysis*, John Wiley and Sons, Singapore, 1989.
- [55] Zeinkiewicz, O.C., Taylor, R.L.: *Finite Element Method*, McGraw-Hill, London, 1991.
- [56] Pacific Earthquake Engineering Research Centre: <http://ngawest2.berkeley.edu>, 1.12. 2015.
- [57] Ghanaat, Y.: Seismic performance and damage criteria for concrete dams, *Proceedings of the 3rd US-Japan Workshop on Advanced Research on Earthquake Engineering for Dams*, San Diego, California, USA, 2002.
- [58] USACE: *Time-History Dynamic Analysis of Concrete Hydraulic Structures*, Engineering and Design, EM 1110-2-6051, USA, 2003.