

Primljen / Received: 17.10.2017.

Ispravljen / Corrected: 30.1.2019.

Prihvaćen / Accepted: 10.8.2023.

Dostupno online / Available online: 10.11.2023.

Utjecaj kuta djelovanja potresa na seizmičko ponašanje betonskih mostova na autocestama

Autori:



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



Dr.sc. **Ebru Kalkan Okur**, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište Karadeniz, Trabzon, Turska
Odjel za građevinarstvo
ebrukalkan@ktu.edu.tr

Stručni rad

Ahmet Can Altunışık, Ebru Kalkan Okur

Utjecaj kuta djelovanja potresa na seizmičko ponašanje betonskih mostova na autocestama

Cilj je ovog istraživanja procijeniti učinak kuta djelovanja potresa na seizmičko ponašanje betonskog mosta na autocesti. Analiziran je dvostruki prednapeti betonski sandučasti gredni most na autocesti (odvojena konstrukcija za svaki smjer vožnje) kao numerički primjer i to primjenom metode konačnih elemenata. Most je bio izložen djelovanju potresa ubrzanja tla u Erzincanu iz 1992. i to u 19 smjerova čije vrijednosti variraju od 0 ° do 90 ° s povećanjima od 5 stupnjeva. Kako bi se ispitali učinci različitih kutova djelovanja potresa na seizmičku izvedbu, proučene su promjene vrijednosti maksimalnih pomaka, unutarnjih sila te glavnih naprezanja na kolničku konstrukciju mosta, stupova, izolatora i temelja. Rezultati su se znatno promijenili u slučaju različitih kutova djelovanja potresa. Pojavile su se promjene vrijednosti pomaka, unutarnjih sila i glavnih naprezanja pri različitim upadnim kutovima. Drugim riječima, ne postoji jedinstveni upadni kut za svaku konstrukciju.

Ključne riječi:

betonski most na autocesti, utjecaj kuta djelovanja potresa, metoda konačnih elemenata, seizmička izvedba

Professional paper

Ahmet Can Altunışık, Ebru Kalkan Okur

Influence of earthquake angle on seismic performance of concrete highway bridges

This study aims to evaluate the effect of earthquake angle on the seismic performance of a concrete highway bridge. As a numerical example, a twin prestressed concrete box-girder highway bridge was analysed using finite element methods. The bridge was subjected to the 1992 Erzincan earthquake ground accelerations in 19 directions with values ranging from 0 ° to 90 ° in 5-degree increments. To evaluate the effects of different earthquake angles on seismic performance, variations in the maximum displacements, internal forces and principal stresses on the bridge deck, columns, isolator and foundation were studied. The results changed considerably for different earthquake angles. Variations in the displacement, internal forces and principal stresses occurred at different incidence angles. In other words, there is no unique angle of incidence for each structure.

Key words:

concrete highway bridge, earthquake angle influence, finite element method, seismic performance

1. Uvod

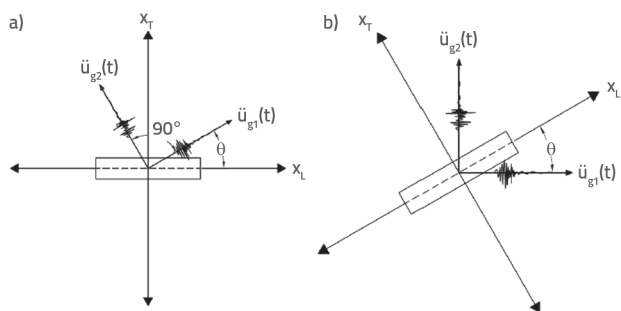
U mnogim različitim nacrtima mostova načinjenih od raznih konstrukcijskih materijala, mostove koriste pješaci i vozila kao uobičajeni dio naših svakodnevnih života. Šteta nastala na mostovima zbog dinamičkog opterećenja izazvanog potresima može imati goleme fizičke i financijske posljedice za zajednice, kao i mnoge nematerijalne nuspojave. Poznato je da taj učinak znatno varira ovisno o promjeni kuta djelovanja potresa. Mnoga istraživanja ispituju ovaj učinak i opisuju najekstremnije uvjete. Potresna kretanja tla imaju tri komponente različitih intenziteta uključujući dvije pravokutne komponente u bočnim i vertikalnim smjerovima; općenito, svi kodeksi projektiranja preporučuju da dvije bočne komponente potresa trebaju biti okomite jedna prema drugoj [1-3]. Prema normi EN 1998-2 [1], vjerojatno maksimalno djelovanje utječe na E zbog istovremene pojave komponenata seizmičkog djelovanja duž horizontalnih osi X-Y i vertikalne osi Z, a što se može procijeniti primjenom SRSS metode na maksimalni učinak djelovanja E_x , E_y i E_z zbog neovisnog seizmičkog djelovanja duž svake osi. U mnogim programima analize smjerovi potresnih sila primijenjeni su prema zadanoj vrijednosti. Kad su kutovi smjera djelovanja potresa promijenjeni tako da je kut između X-, Y- i Z- iznosio 90° , bio je značajan utjecaj na pomak i unutarnje sile nastale u svakom elementu konstrukcije. Analičke formule upotrebljavaju se godinama kako bi se odredio kritički kut kretanja tla izazvanog djelovanjem potresa. Iz tih jednadžbi određene su maksimalne vrijednosti koje su se pojavile pri kritičnom kutu [4, 5]. Zabilježeno je kretanje potresa u određenoj točki na tlu između dva horizontalna smjera i jednog vertikalnog smjera. Međutim, prema nekim istraživanjima, može se smatrati da ne postoji uzajamna veza između komponente vertikalnog smjera kretanja tla i komponenti horizontalnog smjera [6]. Iz svih ispitivanja proučenih do danas, mnogi opisuju učinak potresnih kutova (2 smjera) u inženjerskim konstrukcijama [7-11]. U tim istraživanjima konstrukcije su bile izložene potresnim ubrzanjima tla čije su vrijednosti varirale od 0° do 90° i 0° do 180° i to s povećanjima od 5, 6, 15 i 20 stupnjeva [12-15]. Ipak, mnogi radovi prikazuju da kretanja potresa postoje ne samo u dva smjera, već i u tri smjera kad se određuje ponašanje različitih inženjerskih konstrukcija izloženih potresu [16, 17]. Tipovi konstrukcija procijenjeni su, pa tako postoje one asimetričnog tlocrta [18], visoka čelična zgrada [19], RCC okvirna konstrukcija (eng. *Reinforced Cement Concrete-RCC*) [20], tunel na autocesti [21], prigušivači s usklađenim gibanjem tekućine [22], AB most [23], kosi mostovi naknadno opremljeni podupiračima za sprječavanje izvijanja [24], zidana zgrada [25], AB zgrada [26], hibridna betonska zgrada ojačana čelikom [27], a oni su analizirani i projektirani u odnosu na različite kutove seizmičkog uzbuđenja. Kada su ispitani rezultati ovih ispitivanja, uočeno je da se maksimalne potresne sile koje djeluju na konstrukciju mogu pojaviti pri različitim kutovima. Iznimno je važno da se te maksimalne sile uzmu u obzir tijekom projektiranja konstrukcije. Postoje različite nesigurnosti kad je u pitanju određivanje smjera gibanja tla u seizmičkim analizama

mostova. Projektanti često ne znaju smjer u kojem će se pojaviti prevladavajuće gibanje tla na mjestu gdje se nalazi most. Mnoga se istraživanja provode kako bi se odredilo ponašanje mosta koji je izložen potresu [28-36]. U Croninovu radu [37] ispitan je učinak upadnog kuta na nelinearni odgovor konstrukcije mostova na autocesti primjenom opsežnih statističkih simulacija. Bortoli i dr. analizirali su vremensku diskretizaciju sustava 2D-SDOF izloženog trima setovima po 40 kretanja tla primjenom linearno elastične opruge i elastično plastične opruge [38].

Ovo istraživanje pokazuje učinak kuta djelovanja potresa na konstrukcijsko ponašanje betonskog mosta na autocesti. Usporedbe radi, 19 smjerova je razmatrano čije su vrijednosti varirale od 0° do 90° , povećavajući se svaka za 5° . Razmatrane su promjene u maksimalnim pomacima i unutarnjim silama na ploči, stupu, pilotu i izolatoru kako bi se odredio njihov utjecaj na seizmičku izvedbu. Rezultati su pokazali značajne promjene u pomacima, unutarnjim silama i naprezanjima. Maksimalne vrijednosti pojavile su se pri različitim upadnim kutovima za svaki element mosta.

2. Upadni kut pod kojim dolazi do kretanja tla

Kako bi se procijenio utjecaj rotacije kretanja tla, dvije pravokutne (uzdužna i poprečna) komponente ubrzanja $\ddot{u}_{xg}(t)$ i $\ddot{u}_{yg}(t)$ bile su rotirane prema razmatranom stupnju i razdvojene na strukturne stupnjeve slobode (slika 1.a). Potvrđeno je da se $\ddot{u}_{xg}(t)$ početno orijentirala duž X (uzdužnog) smjera, a $\ddot{u}_{yg}(t)$ duž Y (poprečnog) smjera. Komponente kretanja tla u smjeru suprotnom od smjera kazaljke na satu (θ) mogu se riješiti da bi izjednačile komponente kretanja tla duž osi ($\ddot{u}_{s1}(t)$ i $\ddot{u}_{s2}(t)$) stupnjeva slobode konstrukcije. $\ddot{u}_{zg}(t)$ i $\ddot{u}_{s3}(t)$ predstavljaju vertikalna kretanja na koja ne utječu rotacije ravnine.



Slika 1. Rotacija ubrzanja kretanja: a) tla; b) konstrukcije

$$\ddot{u}_s = T \cdot \ddot{u}_g \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{u}_{s1}(t) \\ \ddot{u}_{s2}(t) \\ \ddot{u}_{s3}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_{xg}(t) \\ \ddot{u}_{yg}(t) \\ \ddot{u}_{zg}(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Matrica transformacije (T) upotrebljava se kako bi se izvela ta operacija te se temelji samo na geometriji [36]. Izraz $\ddot{u}_{zg}(t)$ poglavito pokazuje vertikalno kretanje na koje ne utječe rotacija ravnine.

Sličan pristup može se primijeniti kako bi se ispitali upadni kutovi pod kojima dolazi do kretanja tla [31, 39]. To rotira konstrukciju i transformira izvorne komponente kretanja tla u rotirane stupnjeve slobode konstrukcije (slika 1.b).

$$\ddot{u}_s = T_t \ddot{u}_g \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{u}_{s1}(t) \\ \ddot{u}_{s2}(t) \\ \ddot{u}_{s3}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_{xg}(t) \\ \ddot{u}_{yg}(t) \\ \ddot{u}_{zg}(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Matrica transformacije T_t obrnuta je od T i može ju se smatrati rotacijom kretanja tla u smjeru kazaljke na satu u odnosu na nepomičnu konstrukciju [37].

3. Opis mosta

Most na autocesti Gülburnu nalazi se između 20+362 km i 20+692 km od državne ceste Giresun-Espiye u Giresunu, Turskoj, a odabran je kao numerički primjer. Most se nalazi na predjelu koji krasi prirodna ljepota, blizu luke Zefre i luke Gulburnu Cove. Slika 2. prikazuje neke prizore na most Gülburnu na autocesti.

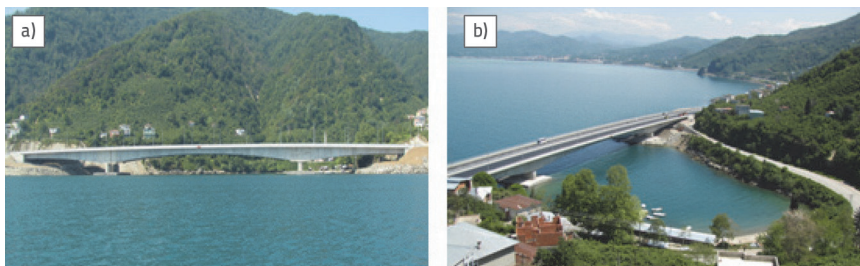
Modeliranje dugačkih mostova na autocesti metodom konačnih elemenata, a koje je izgrađeno primjenom konzole, ključno je za procjenu stvarnih odgovora konstrukcije. 2D ili 3D modeli

konačnih elemenata mogu se konstruirati tako što se uzmu u obzir različiti projektni kriteriji:

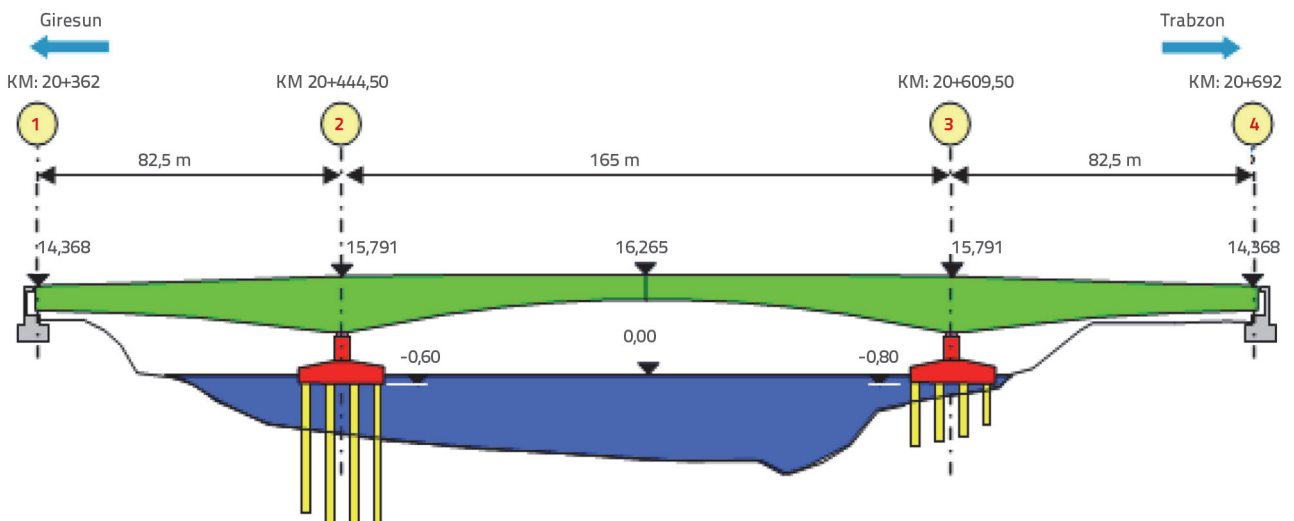
- Ploča mosta i stupovi modelirani su primjenom elemenata okvira.
- U 2D modelu konačnih elemenata izračunana su svojstva presjeka svakog segmenta te su se pridružili elementima okvira. Elementi krutog okvira upotrebljavali su se za udaljene spojeve.
- U 3D modelu konačnih elemenata, opcija definicije neprizmatičnih presjeka korištena je za izravno dobivanje varijabilnih presjeka.
- Modelirani su kablovi prethodnog napinjanja i/ili naknadnog napinjanja koristeći okvirne elemente ograničene na rotaciju i fiksirane na kraj svakog segmenta. Opterećenja u prethodnom napinjanju i/ili naknadnom napinjanju smatrana su se deformacijama.
- Rubni uvjeti na krajevima ploče i stupova određuju se primjenom krutih opruga i blokada.
- Ako postoji, dilatacijska spojnica mosta modelirana je primjenom elementa opruge kako bi dopustila kretanje u uzdužnom smjeru.

Most na autocesti Gülburnu gradio se metodom balansne monolitne konzolne gradnje zato što je to najbolja i optimalna metoda za prelazak velikih i dugačkih dolina uz pomoć armiranobetonskih mostova na autocesti primjenjujući maksimalni raspon i minimalni broj potpornih stupova. U ovoj metodi, stupovi i mali segment gornjeg ustroja je građen iznad temeljne konstrukcije primjenom prikladne oplata.

Kolnička ploča mosta na autocesti Gülburnu, sa svojim dvostrukim prednapetim betonskim sandučastim nosačima, sastoji se od glavnog raspona koji iznosi 165 m i dvaju bočnih raspona

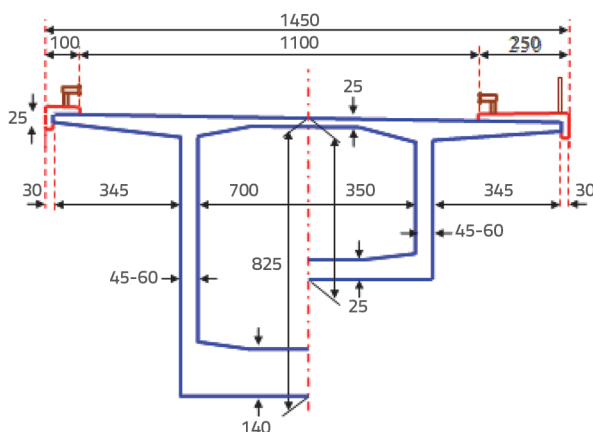


Slika 2. Pogledi na most Gülburnu na autocesti



Slika 3. Uzdužna dispozicija mosta na autocesti Gülburnu [40]

koja iznose 82,5 m. Ukupna duljina mosta iznosi 330 m, a njegova širina 30 m. Slika 3. prikazuje uzdužnu dispoziciju mosta. Ploča mosta sastoji se od 65 segmenata koji su dugi približno 5 m te variraju po dužini poprečnog presjeka mosta. Debljina donje betonske ploče varirala je poput parabole od 25 do 140 cm. Gornja betonska ploča debljine 25 cm fiksirana je duž čitave konstrukcije. Širine mrežnih elemenata varirale su od 45 do 60 cm. Projektna čvrstoća monolitnog betona sandučastog nosača iznosila je 40 MPa. Ploča sandučastog nosača bila je u potpunosti prednapeta primjenom zatega s granicom tečenja 1860 MPa te dijametrom od 15,7 mm. Varirali su brojevi zatega u gornjoj ploči, bočnim upornjacima i na sredini mosta. Broj zatega u donjoj ploči varira od šest do dva od upornjaka duž potpornih stupova. Na sredini mosta su 34 zatege koje se smanjuju na dvije zatege kod potpornih stupova. Slika 4. prikazuje dimenzije poprečnog presjeka sandučastog nosača.



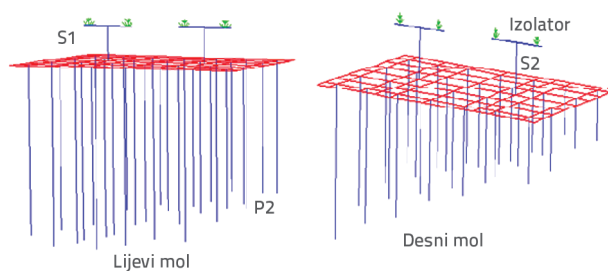
Slika 4. Dimenzije poprečnog presjeka sandučastog nosača (sve dimenzije su cm)

Četiri stupa visine 4,50 m te dimenzija poprečnog presjeka od 9,00 x 3,75 m nalaze se na dvije temeljne ploče od kojih svaka ima dimenzije 32 x 22 m i debljinom 3 m. Ispod temeljne ploče je 28 bušenih pilota s promjerom 200 cm te prosječne duljine od 25 m. Projektne čvrstoće betona u temelju i na pilotu iznosile su 35 MPa, odnosno 30 MPa, a u temelju se koriste čelik S420. Slika 5. prikazuje neke elemente mosta koji su odabrani za analizu modela konačnih elemenata.

Tablica 1. Materijalna svojstva u analizama konačnih elemenata

Elementi	Razred	Modul elastičnosti [N/m ²]	Poissonov koeficijent [-]	Gustoća [kg/m ³]
Ploča	C40	$3,4 \cdot 10^{10}$	0,2	2500
Stupovi	C35	$3,3 \cdot 10^{10}$	0,2	2500
Piloti	C30	$3,2 \cdot 10^{10}$	0,2	2500
Temeljna ploča	C30	$3,2 \cdot 10^{10}$	0,2	2500
Čelik*	S420	$2,1 \cdot 10^{11}$	0,3	7850

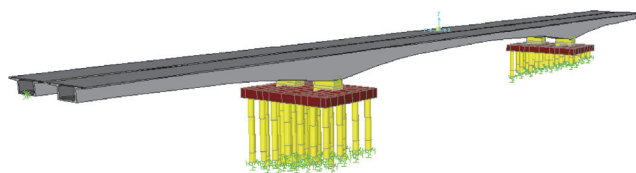
*Granica tečenja = 1600 MPa, Vlačna čvrstoća = 1860 MPa



Slika 5. Pogledi na elemente odabrane za analizu

4. Analize modela konačnih elemenata i analiza dinamičkih karakteristika

Prostorni model konačnih elemenata mosta bio je modeliran upotrebom programa SAP2000 [41]. Ploča, potporni stupovi i bušeni piloti bili su modelirani primjenom okvirnih elemenata s tri translacijska DOF-a na svakom čvoru. Temeljna ploča je modelirana kao pločasti elementi. Upornjaci su bili modelirani uz pomoć ograničenih rubnih uvjeta koji imaju slobodnu uzdužnu translaciju. Rubni uvjeti na krajevima zbijenih pilota bili su određeni primjenom krutih opruga koji se temelje na vrijednostima nacrtu projekta [42]. Slika 6. prikazuje prostorni model konačnih elemenata mosta na autocesti Gülburnu. Tablica 1. prikazuje svojstva materijala koji su korišteni u analizama. Osam prirodnih frekvencija koje su u rasponu 0 do 6 Hz dobiveno je analitički iz analize modalnih oblika mosta. Odabrano je prvih osam modalnih oblika s 80 % omjera modalne participacije i aktivirane mase. Analitički modalni oblici mogu se klasificirati u vertikalne, torzijske, poprečne i uzdužne modalne oblike [40].



Slika 6. Model konačnih elemenata mosta na autocesti Gülburnu

5. Seizmičko ponašanje mosta

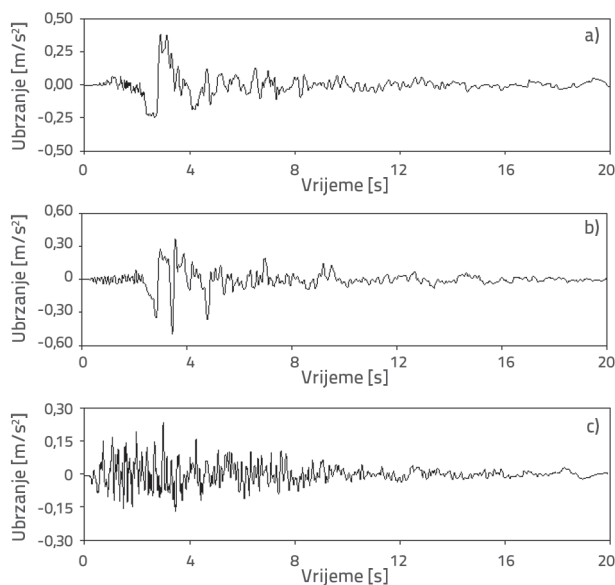
Ovo istraživanje ispituje seizmičko ponašanje mostova izloženo djelovanju potresa pod različitim kutovima, i to

Tablica 2. Zapisi snažnog podrhtavanja tla uzeti u analizu

Ne	Snažna podrhtavanja tla koja vode gotovo do rasjeda					Vršno ubrzanje tla
	Potres	Komponenta	Magnituda	Dubina [km]	Nalazište [°]	
1	1992., Erzincan	NS (sjever - jug)	6,7	4,38	C-D	0,3869g
2	1992., Erzincan	EW (istok - zapad)				0,4961g
3	1992., Erzincan	UP (gore)				0,2345g

*Nalazište: Razredi lokalnog gradilišta (C i D grupe tla)

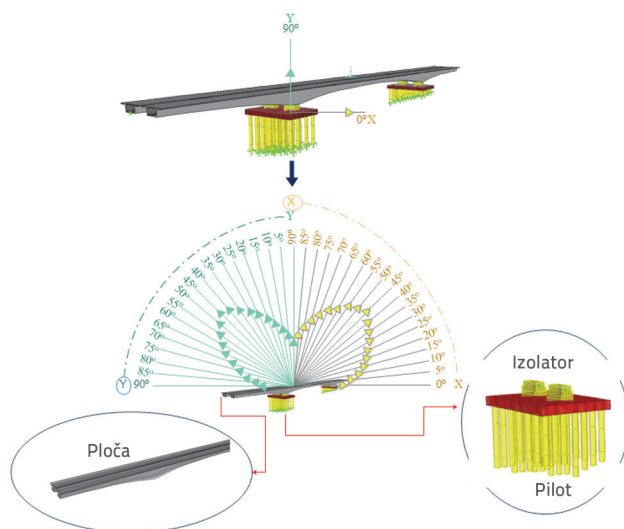
upotrebom seizmičkih zapisa potresa koji je uzrokovao gubitke života i imovine 1992. u Erzincanu, u Turskoj. ERZINCAN/ERZ-NS, ERZINCAN/ERZ-EW i ERZINCAN/ERZ-UP su termini korišteni za komponente potresa u Erzincanu iz 1992., a koji su odabrani kao referentni izvor za zapise kretanja tla. Slika 7. prikazuje vremenske zapise ubrzanja tla u tri smjera. Zapisi snažnog kretanja tla dobiveni su iz baze podataka PEER Strong-Motion [43]. Tablica 2. prikazuje informacije o uvjetima na nalazištu te zapisima snažnog podrhtavanja tla uzeti u analizu.



Slika 7. Vremenski zapis ubrzanja tla ERZINCAN/ERZ potresa Erzincan iz 1992.: a) ERZINCAN/ERZ-EW komponente; b) ERZINCAN/ERZ-NS komponente; c) ERZINCAN/ERZ-UP komponente

Ti su zapisi bili istovremeno dodijeljeni x (uzdužnim), y (poprečnim) i z (vertikalnim) smjerovima tijekom analize. U prvoj analizi, za 0°, bila je primijenjena komponenta EW duž smjera x, komponenta NS duž smjera Y te komponenta UP duž smjera z.

Slika 8. prikazuje dijagram toka seizmičkih analiza za djelovanje potresa pod različitim kutovima. Na toj slici promjena kuta u x smjeru prikazana je žutom bojom, a promjena kuta u y-smjeru zelenom bojom i to tako da su okomite i jednake jedna naspram druge.

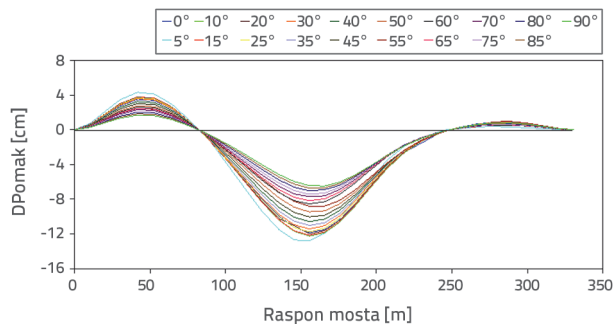


Slika 8. Dijagram toka seizmičkih analiza za djelovanje potresa pod različitim kutovima

5.1. Pomaci

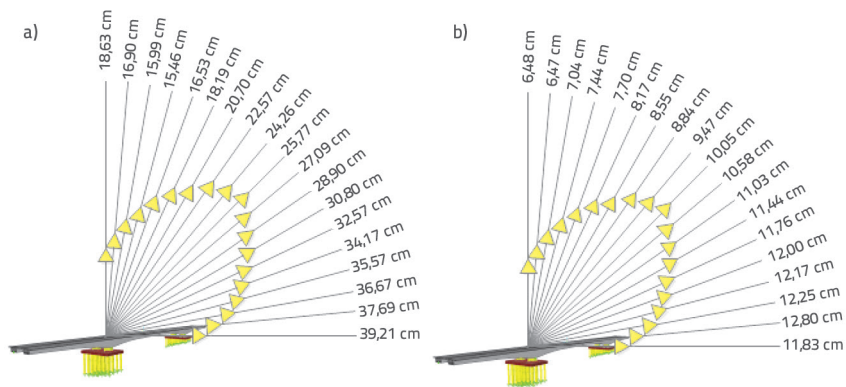
5.1.1. Pomak ploče mosta

Bilo je primijenjeno devetnaest potresa pod različitim kutovima u rasponu od 0° do 90°, te su dobiveni pomaci na ploči mosta. Kutovi smjerova pod kojim potres djeluje bili su određeni povećanjima od 5 stupnjeva te su bili okomiti jedan na drugoga.



Slika 9. Promjene maksimalnih vertikalnih pomaka duž ploče mosta

Slika 9. prikazuje vertikalne pomake koji su posljedica promjena kuta na ploči. Maksimalne razlike u uzdužnom smjeru bile su

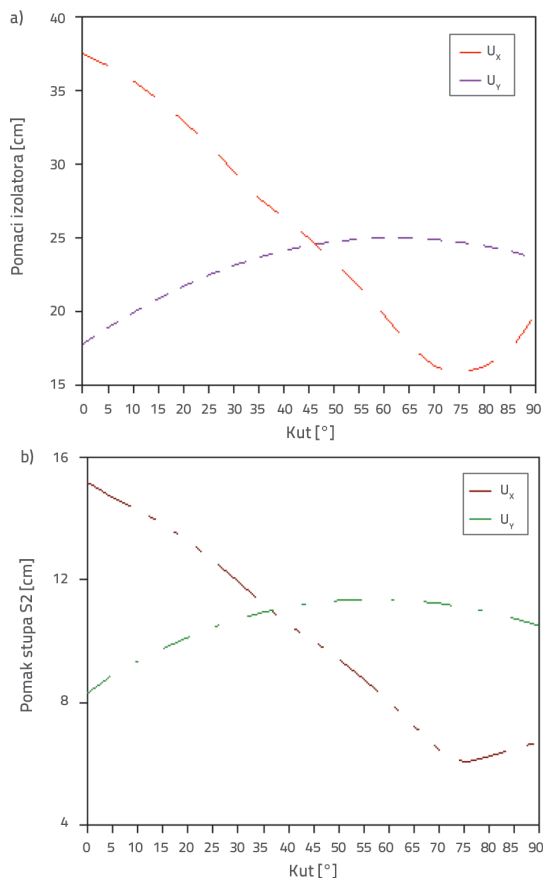


Slika 10. Maksimalna razlika u pomaku za svaki kut djelovanja potresa: a) X smjer; b) Z smjer

60,57 %, odnosno 49,45 % u vertikalnom smjeru. Maksimalni pomaci u uzdužnim i vertikalnim smjerovima, nastali na svakom kutu ploče mosta, prikazani su na slici 10. Može se uočiti da se promjenom kuta djelovanja potresa znatno mijenjaju pomaci ploče mosta u uzdužnim i vertikalnim smjerovima.

5.1.2. Pomak izolatora i S2 stupa

Slika 11. prikazuje maksimalne pomake u smjerovima X i Y, a koji su posljedica promjena kuta djelovanja na seizmičkom izolatoru mosta i gornjem spoju S2 stupa.



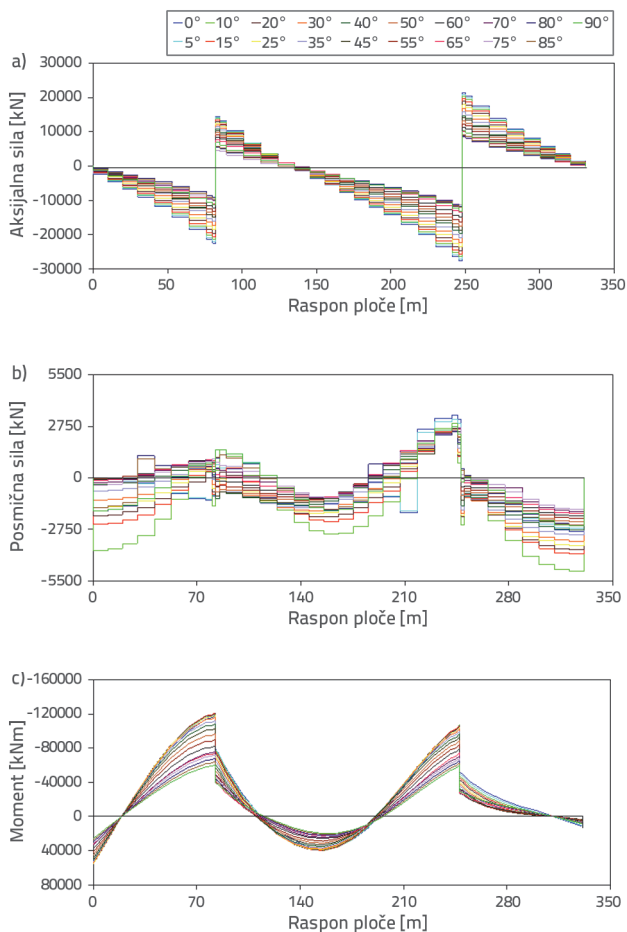
Slika 11. Promjene maksimalnih smjerova X i Y pomaka izolatora mosta i gornjeg spoja S2 stupa

Bile su izračunane maksimalne razlike za uzdužni smjer od 58,07 % za izolator i 60,34 % za S2 stup, odnosno 40,57 % za poprečni smjer za izolator i 37 % za S2 stup. Očito je da su se promjenom kuta djelovanja potresa znatno promijenili pomaci u uzdužnim i poprečnim smjerovima izolatora mosta i S2 stupa.

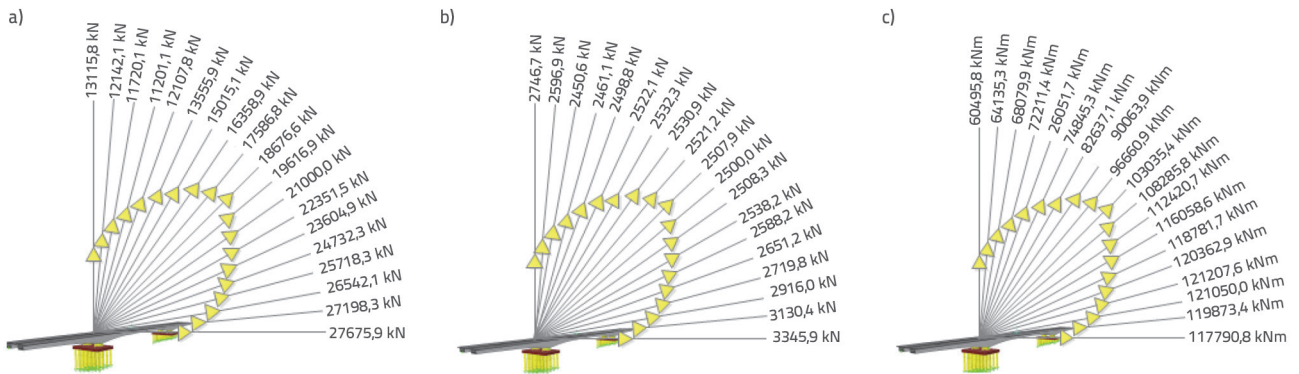
5.2. Unutarnje sile

5.2.1. Ploča mosta

Na kraju analiza, slika 12. prikazuje promjene u uzdužnim silama, posmičnim silama i maksimalnim momentima savijanja ploče mosta. Ti rezultati pokazuju da su se uzdužne sile promijenile za 59,53 %, posmične sile za 26,78 % te momenti savijanja za 50,09 % na ploči mosta. Slika 13. prikazuje maksimalne razlike u uzdužnim silama, posmičnim silama i momentu savijanja nastalom na svakom kutu ploče mosta.



Slika 12. Promjene u maksimalnim uzdužnim silama, posmičnim silama i momentima savijanja duž ploče mosta: a) Aksijalne sile; b) Posmične sile; c) Momenti savijanja



Slika 13. Maksimalne razlike u unutarnjim silama za raspon ploče mosta: a) maksimalna uzdužna sila; b) maksimalna posmična sila; c) maksimalni moment savijanja

5.2.2. Stup S1

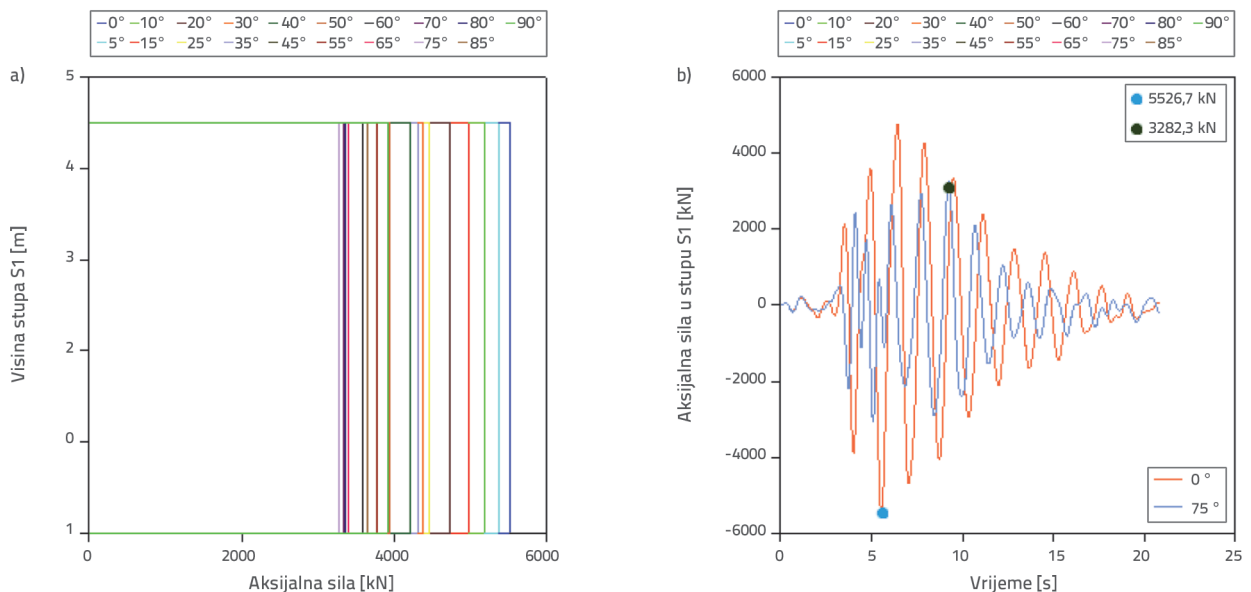
Slike 14.a, 15.a i 16.a prikazuju promjene u uzdužnim, posmičnim i maksimalnim momentima savijanja stupa S1. Ti rezultati pokazuju da su se uzdužni momenti znatno promijenili za 40,61 %, posmični momenti za 165,51 % te momenti savijanja za 132,07 % kad je u pitanju stup S1. Odziv maksimalnih i minimalnih uzdužnih sila, posmičnih sila te momenata savijanja S1 prikazuju slike 14.b, 15.b, odnosno 16.b.

Uzimajući u obzir maksimalne vrijednosti stupa S1 za različite kutove djelovanja potresa, može se uočiti da posmična sila i moment savijanja imaju velike razlike. Postizanje maksimalnog

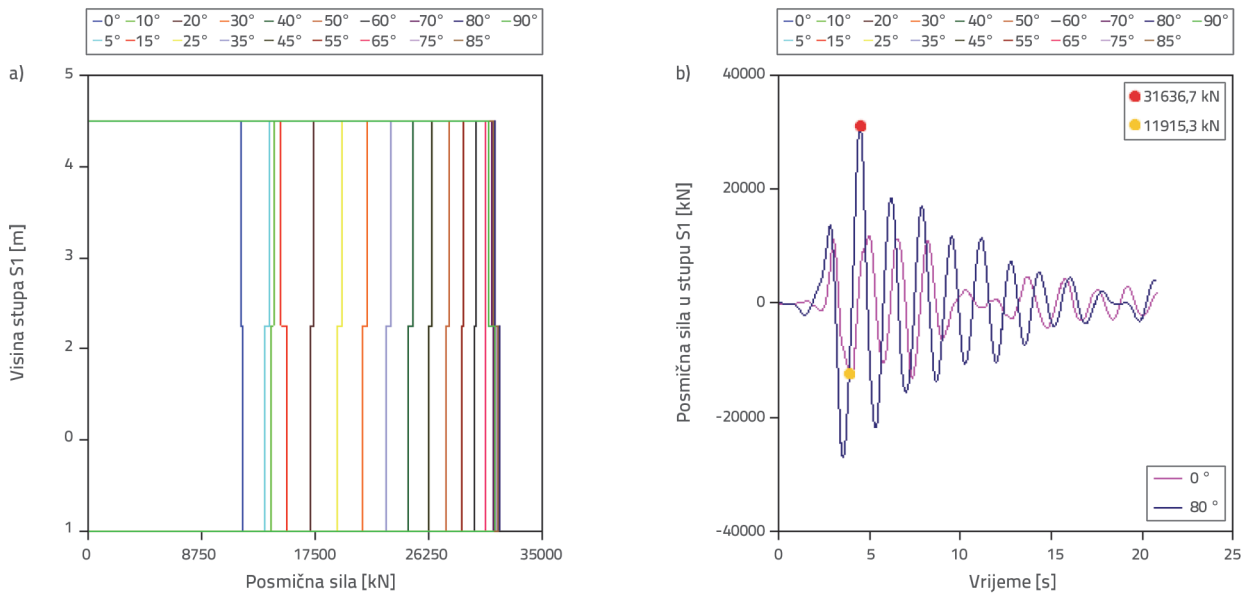
potresnog opterećenja tako što se uzimaju u obzir različiti kutovi u fazi projektiranja bit će vrlo učinkovito u smislu dimenzija.

5.2.3. Pilot P2

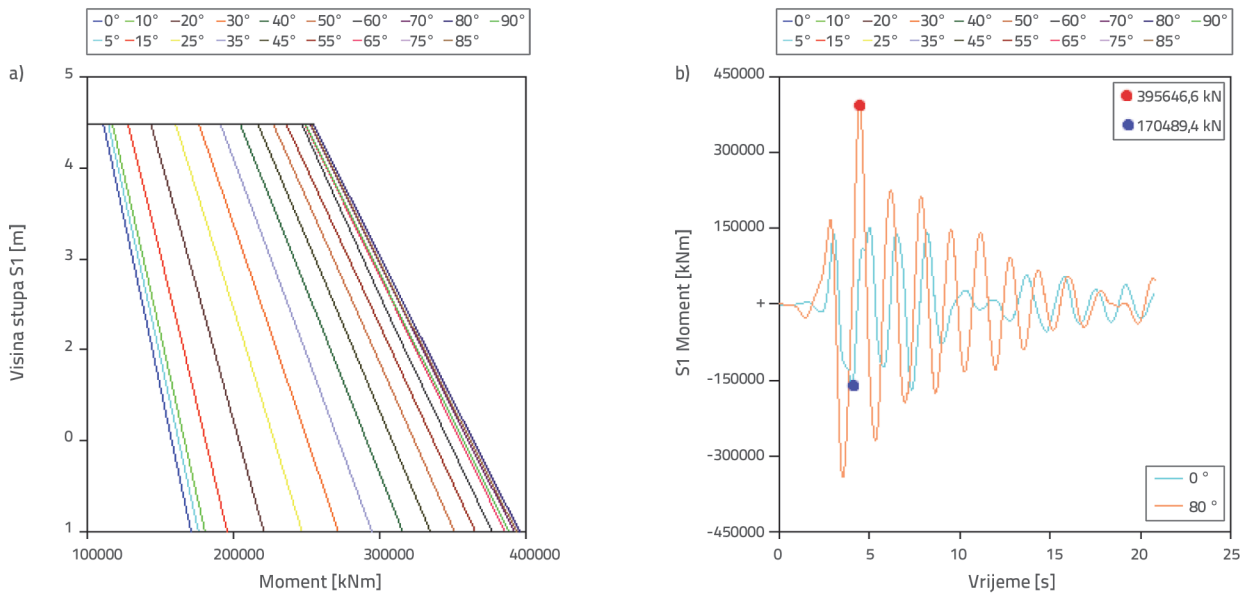
Slike 17.a, 18.a i 19.a prikazuju promjene u uzdužnim silama, posmičnim silama i maksimalnim momentima savijanja pilota P2. Ti rezultati pokazuju da su se uzdužne sile znatno promijenile za 51,28 %, posmične sile za 49,06 %, odnosno momenti savijanja za 49,07 % za pilot P2. Slike 17.b, 18.b i 19.b prikazuju vremenske diskretizacije maksimalnih i minimalnih uzdužnih sila, posmičnih sila i momenta savijanja za pilot P2.



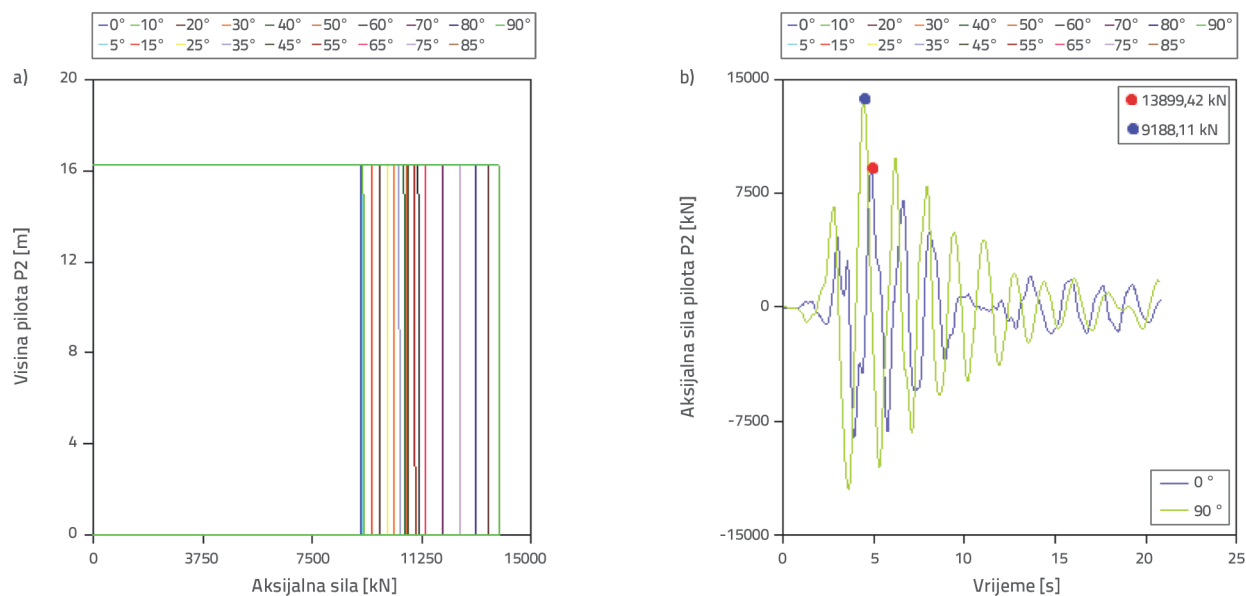
Slika 14. a) i b) promjene odziva maksimalnih uzdužnih sila duž visine stupa S1



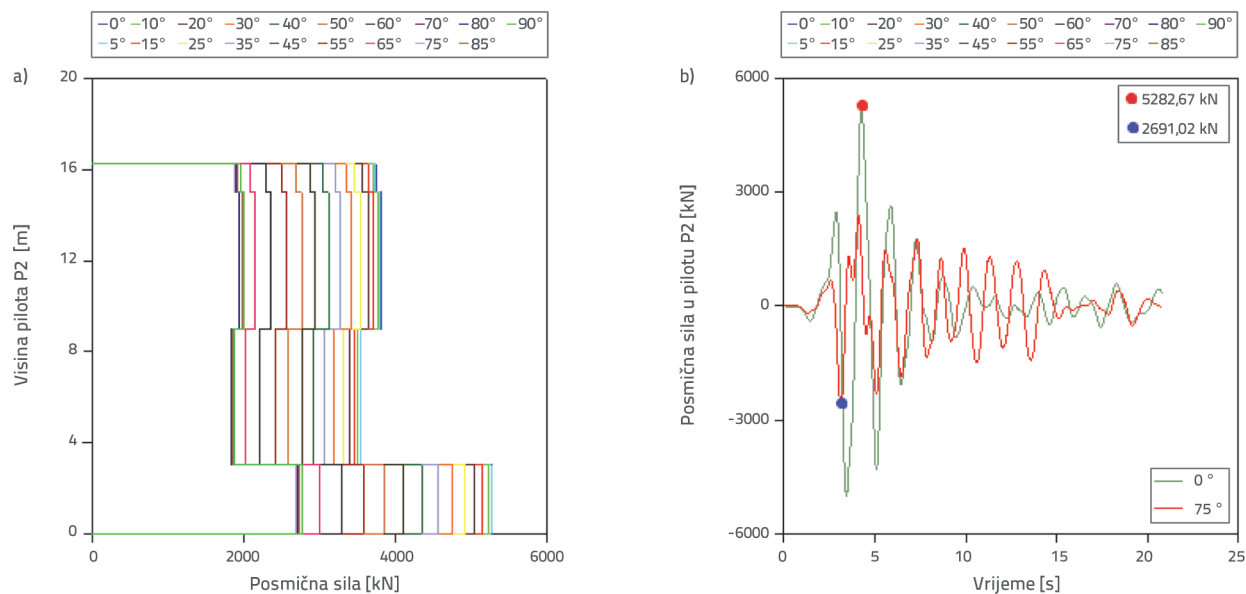
Slika 15. a) i b) promjene odziva maksimalnih posmičnih sila duž visine stupa S1



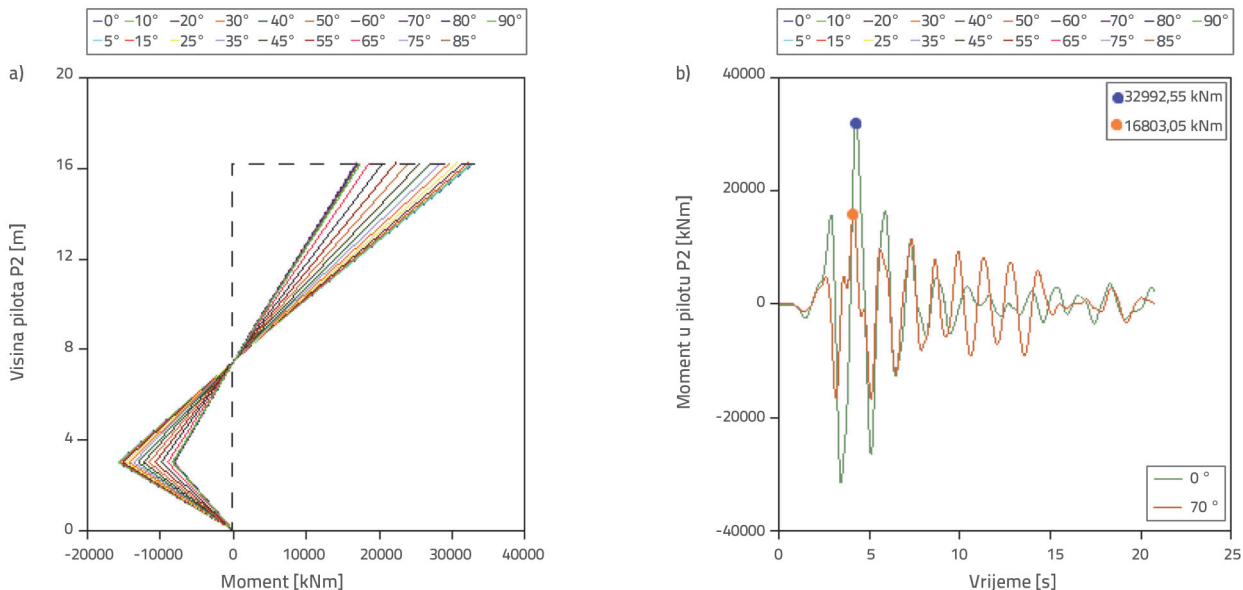
Slika 16. Promjene odziva maksimalnih momenata savijanja duž visine stupa S1



Slika 17. Promjene vremenskih diskretizacija maksimalnih uzdužnih sila duž visine P2 pilota



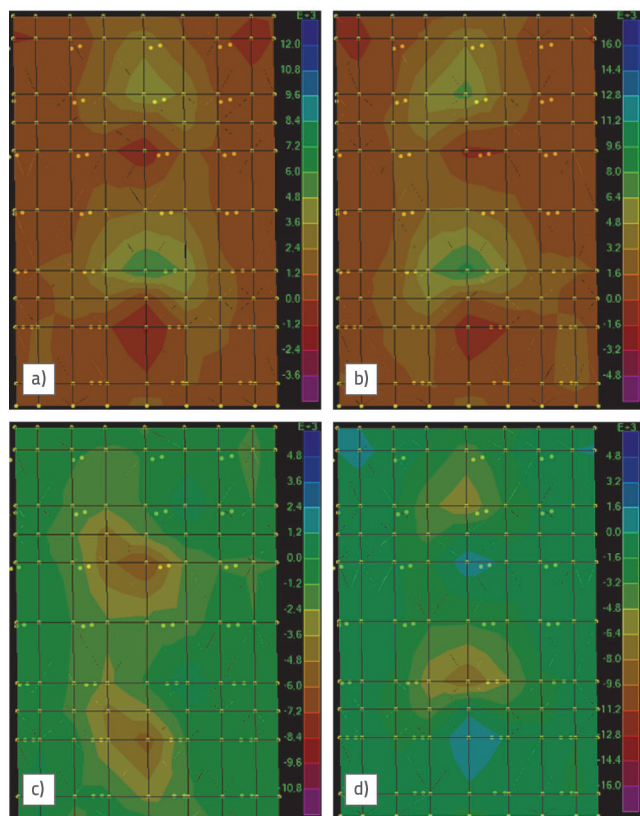
Slika 18. Promjene u pilotu P2 i odziv maksimalnih posmičnih sila duž njegove visine



Slika 19. Promjene u pilotu P2 i vremenske diskretizacije maksimalnih savijanja duž njegove visine

5.3. Glavna naprezanja

Slika 20. prikazuje konture maksimalnog tlačnog i glavnog vlačnog naprezanja dobivene iz temelja pri svim kutovima djelovanja potresa.



Slika 20. Konture maksimalnog tlačno-vlačnog glavnog naprezanja u lijevom dijelu temeljne ploče mosta

Kontura naprezanja predstavlja raspodjelu vršnih vrijednosti dosegnutih maksimalnim naprezanjima u svakoj točki unutar presjeka. Maksimalna vlačna naprezanja pri 90° iznosila su 15,742 MPa, a minimalna pri 0° su iznosila 11,203 MPa (slika 20.a i 20.b). Osim toga, maksimalna tlačna naprezanja pri 90° iznosila su 17,112 MPa, a minimalna pri 0° su iznosila 11,692 MPa (slika 20.c i 20.d). Ti rezultati pokazuju da su se vlačna naprezanja znatno promijenila za 40,50 %, odnosno tlačna naprezanja za 46,36 %.

6. Zaključak

Cilj je ovog istraživanja procijeniti utjecaj djelovanja potresa pod različitim kutovima na seizmičko ponašanje betonskog mosta na autocesti. U tu svrhu analiziran je dvostruki prednapeti betonski sandučasti gredni most na autocesti i to primjenom metode konačnih elemenata. Most je bio izložen djelovanju potresa ubrzanja tla u Erzincanu iz 1992. i to u 19 smjerova, čije su vrijednosti varirale od 0° do 90° s povećanjima od 5 stupnjeva. Osam prirodnih frekvencija koje su u rasponu 0-6 Hz dobivene su iz modalnih analiza. Analitički modalni oblici mogu se klasificirati u vertikalne, torzijske, poprečne i uzdužne modove. Horizontalni i vertikalni pomaci mosta znatno su se promijenili pri različitim kutovima djelovanja potresa. Maksimalne razlike za X smjer bile su 60,57 %, odnosno 49,45 % za Z-smjer. U slučaju seizmičkog izolatora i stupa S2, maksimalne razlike bile su 58,07 % i 60,34 % u uzdužnom smjeru, odnosno 40,57 % i 37,00 % u poprečnom smjeru. Uzdužne sile, posmične sile i momenti savijanja znatno su se promijenili i iznosili su: 59,53 %, 26,78 % i 50,09 % za ploču mosta; 40,61 %, 165,51 % i 132,07 % za stup S1; 46,71 %, 44,08 % i 37,03 % za pilot P1; te 51,28 %, 49,06 % i 49,07 % za pilot P2. Vlačna i tlačna naprezanja varirala su između 40,50 % i 46,36 %. Rezultati u ovom istraživanju pokazuju značajne promjene u

pomacima, unutarnjim silama i naprezanjima. Maksimalne vrijednosti pojavile su se pri različitim upadnim kutovima za svaki element mosta. Ni za jednu strukturu nije uočen jedinstveni specifični upadni kut. Zato je primjena maksimalnih vrijednosti dobivenih uzimanjem u obzir efektivnog kuta svakog elementa u fazi projektiranja konstrukcijskih elemenata vrlo učinkovita u određivanju dimenzija konstrukcije. U ovom istraživanju

preporuka je da se koriste maksimalne vrijednosti dobivene pri različitim seizmičkim kutovima za potresna opterećenja koja se trebaju uzeti u obzir tijekom faze projektiranja novih mostova. Kad su u pitanju postojeći mostovi strateške važnosti, na istraživanja koja se bave konstrukcijama s ojačanjem mogu se primijeniti dimenzije dobivene ponavljanjem analiza djelovanja potresa pri različitim kutovima.

LITERATURA

- [1] Eurocode: EN 1998-1-Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance-Part I: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011. Directive 98/34/EC. Directive 2004/18/EC], 2004.
- [2] FEMA, Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency; FEMA368-NEHRP, Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures. Washington. D.C., Building Seismic Safety Council, 2000.
- [3] TERDC, Turkish earthquake resistant design code: Specifications for structures to be built in disaster areas, Ministry of Public Works and Settlement. General Directorate of Disaster Affairs. Earthquake Research Department. Ankara. Turkey. <http://www.deprem.gov.tr>, 2007.
- [4] Athanapoulou, A.M.: Critical orientation of three correlated seismic components, *Eng. Struct.*, 27 (2005), pp. 301-312.
- [5] Song, B., Pan, J.S., Liu, Q.: The study on critical angle to the seismic response of curved bridges based on pushover method, The 14th World Conference on Earthquake Engineering October, 12-17, China, 2008.
- [6] Penzien, J., Watabe, M.: Characteristics of 3-d earthquake ground motions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3 (1975), pp. 365-373.
- [7] Gonzalez, P.: Considering earthquake direction in seismic analysis *Earthquake Engineering, Tenth World Conference, Balkema, Rotterdam, ISBN 9054100605*, 1992.
- [8] Rigato, A.B., Medina, R.A.: Influence of angle of incidence on seismic demands for inelastic single-story structures subjected to bidirectional ground motions. *Engineering Structures*, 29 (2007), pp. 2593-2601.
- [9] Fujita, K. and Takewaki, I.: Critical correlation of bidirectional horizontal ground motions, *Engineering Structure*, 32 (2010) 1, pp. 261-272.
- [10] Kostinakis, K.G., Athanapoulou, A.M.: Evaluation of scalar structure-specific ground motion intensity measures for seismic response prediction of earthquake-resistant 3D buildings, *Earthquakes and Structures*, 9 (2015) 5, pp. 1091-1114.
- [11] Altunışık, A.C., Kalkan, E.: Earthquake incidence angle influence on seismic performance of reinforced concrete buildings, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 35 (2017) 4, pp. 609-631.
- [12] Lagaros, N.D.: Impact of the earthquake incident angle on the seismic loss estimation. *Engineering Structures*, 32 (2010), pp. 1577-1589.
- [13] Lucchini, A., Monti, G., Kunnath, S.: Nonlinear response of two-way asymmetric single-story building under biaxial excitation, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 137 (2011) 1, pp. 34-40.
- [14] Kumar, N.K., Gajjar, R.K.: Nonlinear response of two-way asymmetric multistory building under biaxial excitation, *International J. Eng. Tech.*, 5 (2013) 2, pp. 1162-1168.
- [15] Kanya, S., Rao, C.M.: Effect of earthquake incidence angle on seismic performance of RC buildings, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 4 (2015) 13, pp. 156-161.
- [16] Fujita, K., Takewaki, I.: Property of critical excitation for moment-resisting frames subjected to horizontal and vertical simultaneous ground motion, *Journal of Zhejiang University Science*, 10 (2009) 11, pp. 1561-1572.
- [17] Altunışık, A.C., Kalkan, E.: Investigation of earthquake angle effect on the seismic performance of steel bridges, *Steel and Composite Structures*, 22 (2016) 4,
- [18] Nguyen, V.T., Kim, D.: Influence of incident angles of earthquakes on inelastic responses of asymmetric plan structures, *Structural Engineering and Mechanics*, 45 (2013) 3, pp. 373-389.
- [19] Tun, M., Htun, Z.M.: Comparison of the effect of irregular high-rise steel buildings based on different seismic excitation angles, *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 3 (2014) 10, pp. 2252-2256.
- [20] Quadri, S.A., Madhuri, M.N.: Investigation of the critical direction of seismic force for the analysis of RCC frames, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 5 (2014) 6, pp. 10-15.
- [21] Sevim, B.: Assessment of 3D earthquake response of the Arhavi Highway Tunnel considering soil-structure interaction, *Computers and Concrete*, 11 (2013) 1, pp. 51-61.
- [22] Altunışık, A.C., Yetişken, A., Kahya, V.: Experimental study on control performance of tuned liquid column dampers considering different excitation directions, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 102 (2018), pp. 59-71.
- [23] Tehrani, P., Ghanbari, R.: Investigating different methods for application of earthquake records in seismic evaluation of irregular RC bridges considering incident angles. *Structures*, 32 (2021), pp. 1717-1733.
- [24] Wang, Y., Ibarra, L., Pantelides, C.: Effect of incidence angle on the seismic performance of skewed bridges retrofitted with buckling-restrained braces, *Engineering Structures*, 211 (2020), 110411.
- [25] Liang, W., Xia, L., Zhu, Z., Mou, S., Zou, Zuyin, Yuan, S.: Torsional effect of the single-bay masonry building considering seismic wave incident angle, *Structures*, 44 (2022), pp. 1232-1246.

- [26] Morfidis, K., Kostinakis, K.: Rapid Prediction of Seismic Incident Angle's Influence on the Damage Level of RC Buildings Using Artificial Neural Networks, *Applied Sciences*, 12, 3 (2022), p. 1055.
- [27] Askouni, P.K.: The Behaviour of Hybrid Reinforced Concrete-Steel Buildings under Sequential Ground Excitations, *Computation*, 11, 5 (2023), pp. 102.
- [28] Tseng, W.S., Penzien, J.: Seismic analysis of long multiple-span highway bridges, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 4 (1975), pp. 3-24.
- [29] Zhu, D.S., Yu, L.S., Liu, S.Z.: The study of earthquake input principal direction for irregular bridges, *Journal of Lanzhou Railway University*, 19 (2000) 6, pp. 37-40.
- [30] Armouti, N.S.: Transverse earthquake-induced forces in continuous bridges. *Structural Engineering and Mechanics*, 14 (2002) 6, pp. 733-738.
- [31] Liang, Z., Lee, G.C.: Principal axes of m-DOF structures Part II: Dynamic loading, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2 (2003) 1, pp. 39-50.
- [32] Ateş, S., Soyluk, K., Dumanoğlu, A.A., Bayraktar, A.: Earthquake response of isolated cable-stayed bridges under spatially varying ground motions, *Structural Engineering and Mechanics*, 31 (2009) 6, pp. 639-662.
- [33] Torbol, M., Shinozuka, M.: Effect of the angle of seismic incidence on the fragility curves of bridges, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41 (2012), pp. 2111-2124.
- [34] Atak, B., Aşar, Ö., Yakut, A.: Directional effect of the strong ground motion on the seismic behaviour of skewed bridges, *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics*, Porto Portugal, 2014.
- [35] Newton, B.: Understanding directionality concepts in seismic analysis. *Memo to Designers*, pp. 20-17, 2014.
- [36] Ni, Y., Chen, J., Teng, H., Jiang, H.: Influence of earthquake input angle on seismic response of curved girder bridge *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2 (2015) 4, pp. 233-241.
- [37] Cronin, K.J.: Response sensitivity of highway bridges to random multi-component earthquake excitation, Master Thesis. University of Central Florida, Orlando, USA, 2007.
- [38] Bortoli, M.D., Zareian, F., Shantz, T.: Significance of ground motion incidence angle in seismic design of bridges, *National Conference on Earthquake Engineering*, *Frontiers of Earthquake Engineering*, Anchorage, Alaska, 2014.
- [39] Mohraz, B., Tiv, M.: Orientation of earthquake ground motion in computing response of structures *Seismic Engineering, Pressure Vessels and Piping Conference*, Minneapolis, USA, 195-202, 1994.
- [40] Altunışık, A.C., Bayraktar, A., Sevim, B.: Output-only system identification of post tensioned segmental concrete highway bridges, *J. Bridge Eng. ASCE*, 16 (2011), pp. 259-266.
- [41] SAP2000.: *Integrated finite element analysis and design of structures*, Computers and Structures Inc, Berkeley, California, USA, 2015.
- [42] Yüksel Project: *Gülburnu Bridge-detailed design*, Ankara, Turkey 2007.
- [43] PEER.: *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, <http://peer.berkeley.edu/smcat/data>, 2016.