

Pojednostavnjene nelinearne metode proračuna betonskih mostova

Tatjana Isaković, Matej Fischinger

Ključne riječi

norme, nelinearni proračun, proračun za djelovanje potresa, nelinearne metode, metoda N2, metoda MPA, betonski most

Key words

standards, nonlinear analysis, analysis for earthquake action, nonlinear methods, N2 method, MPA method, concrete bridge

Mots clés

normes, analyse non-linéaire, analyse pour l'action sismique, méthode non-linéaire, méthode N2, méthode MPA, pont en béton

Ключевые слова

нормы, нелинейный расчет, расчет на действие землетрясений, нелинейные методы, метод N2, метод MPA, бетонный мост

Schlüsselworte

Normen, unlineare Berechnung, Berechnung für seismische Wirkungen, unlineare Methoden, Methode N2, Methode MPA, Betonbrücke

T. Isaković, M. Fischinger

Izvorni znanstveni rad

Pojednostavnjene nelinearne metode proračuna betonskih mostova

U radu se polazi od toga da europske norme za projektiranje konstrukcija u potresnim područjima sve više u projektantsku praksu uvode nelinearne metode proračuna. Prikazuje se jedna od njih – metoda N2 koja se upotrebljava onda kada na odziv mosta značajno utječe samo jedan oblik oscilacije koji se bitno ne mijenja. Metoda N2 se ne primjenjuje pri proračunu dugih mostova. Za njih se preporučuje metoda MPA koja je ukratko opisana i kojom se u obzir uzimaju viši oblici oscilacija.

T. Isaković, M. Fischinger

Original scientific paper

Simplified nonlinear method for the analysis of concrete bridges

The paper starts with assertion that European standards for design of structures in earthquake prone areas are increasingly introducing nonlinear analysis methods into the design practice. The authors present one of them - the so called N2 method - which is used in cases when the bridge response is greatly influenced by only one form of oscillation that is not subject to significant changes. The N2 method is not used in the analysis of long bridges. The method MPA, used specifically for long bridges, takes into account higher forms of oscillation. The latter method is also briefly presented.

T. Isaković, M. Fischinger

Ouvrage scientifique original

Méthode non-linéaire simplifiée pour l'analyse des ponts en béton

L'ouvrage commence par l'assertion que les normes européennes pour l'étude des structures dans les zones sismiques introduisent de plus en plus souvent l'analyse non-linéaire dans les études pratiques. Les auteurs présentent une de ces méthodes, appelée méthode N2, qui est utilisée dans les cas où la réponse des ponts est influencée de manière importante par seulement une forme d'oscillation qui n'est pas sujet aux changements considérables. La méthode N2 n'est pas utilisée dans l'analyse des longs ponts. La méthode MPA, utilisée notamment pour les longs ponts, prend en compte des oscillations plus élevées. Un bref aperçu de cette méthode est également donné.

T. Исакович, М. Фишингер

Оригинальная научная работа

Упрощенные нелинейные методы расчета бетонных мостов

Работа опирается на предпосылку, связанную с тем, что в соответствии с европейскими нормами по проектированию конструкций в сейсмически опасных районах все больше вводятся нелинейные методы расчетов. Приведен один из них – метод N2, применяемый в случаях, когда на отзвм моста значительно влияет только одна форма колебаний, которая не меняется. Метод N2 не применяется при расчете длинных мостов. Для них рекомендуется метод MPA, который описан и учитывает высшие формы колебаний.

T. Isaković, M. Fischinger

Оригинальная научная работа

Vereinfachte unlineare Berechnungsmethoden für Betonbrücken

Im Artikel geht man von der Tatsache aus dass die europäischen Normen für den Entwurf von Konstruktionen in seismischen Gebieten immer mehr die unlinearen Berechnungsmethoden in die Entwerferpraxis einführen. Dargestellt ist eine von diesen : die Methode N2 die angewendet wird im Fall dass den Widerhall der Brücke nur eine Form der Schwingung wesentlich beeinflusst die sich nicht wesentlich ändert. Die Methode N2 wird bei der Berechnung langer Brücken nicht angewendet. Für diese empfiehlt man die Methode MPA die kurz beschrieben ist und mit der höhere Schwingungsformen in Betracht genommen werden.

Autori: Prof. dr. sc. **Tatjana Isaković**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Matej Fischinger**, dipl. ing. građ., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, Slovenija

1 Uvod

Potresno je opterećenje često najznačajnije opterećenje koje pogađa konstrukciju. Pritom štete mogu biti vrlo velike. U armiranobetonskim konstrukcijama s nosivim elementima vrlo različite krutosti i nosivosti to može značiti prilične preraspodjele učinaka u usporedbi s odzivom u elastičnom području. Stoga je za takve konstrukcije često potreban nelinearni proračun jer rezultati elastičnoga proračuna ne daju pravu sliku o rasporedu opterećenja u konstrukciji. S obzirom na to, većina novih norma uvodi takav način proračuna i u projektantsku praksu, što je jedna od većih novosti s obzirom na dosadašnji način projektiranja. Nelinearne metode proračuna uključene su u posljednju verziju norme Eurokod 8/2 [1] za projektiranje mostova u potresnim područjima.

Na izbor je više takvih metoda. Najpribližniji se odziv konstrukcije općenito dobiva nelinearnim proračunom vremenskoga odziva. To je nelinearna dinamička metoda koja još uvijek komplicirana za uporabu u svakodnevnoj praksi. Za njezinu pravilnu uporabu potrebno je imati dosta iskustva na području modeliranja nelinearnoga dinamičkog ponašanja konstrukcija i mnogo iskustva za pravilan izbor akcelerograma, s kojima se u obzir uzima potresno opterećenje. Za nelinearni je dinamički proračun potreban i odgovarajući specijalizirani program.

Jednostavniji nelinearni potresni proračun konstrukcija omogućavaju različite pojednostavnjene metode. Među najupotrebljivijima je metoda N2 [2], čija je varijanta uključena i u norme Eurokod 8/1 [3] i Eurokod 8/2 (EC8/2). Metodu N2 je razvio prof. Fajfar sa suradnicima na Univerzitetu u Ljubljani. Prvi je puta predložena 1987. [4]. Njezina uporaba za proračun mostova prvi je puta prikazana 1997. [5]. Metoda N2 sadrži dvije vrste proračuna i dva modela konstrukcije: 1) nelinearni statički proračun na stvarnom modelu konstrukcije (model s više stupnjeva slobode – MDOF model) i 2) nelinearni dinamički proračun na pojednostavnjenom modelu (model s jednim stupnjem slobode – SDOF model). Statičkim se proračunom određuju karakteristike konstrukcije (npr. krutost) potrebne za dinamički proračun. U usporedbi s nelinearnim proračunom vremenskoga odziva dinamički se proračun metodom N2 bitno pojednostavnjuje jer se izvodi na pojednostavljenom modelu. Pored toga, u metodi N2 se potresno opterećenje uobičajeno definira nelinearnim spektrima odziva koji se određuju na osnovi standardnih elastičnih spektara, što omogućava da se izbjegnu poteškoće i dvojbe pri izboru akcelerograma potrebnih pri nelinearnom proračunu vremenskoga odziva. Ta dva pojednostavnjenja omogućavaju da nelinearni dinamički proračun izvede i »pješke«, bez posebnih programa. Metoda N2 opisana je u poglavlju 2.1 gdje je prikazan i numerički primjer proračuna mosta upotrebom te metode.

Metoda N2 bila je prvo razvijena i testirana na zgrada-ma. Zato je njezina osnovna varijanta prilagođena, prije svega, tom tipu konstrukcija. Na prvi se pogled može reći da ju je za proračun mostova još lakše upotrebljavati jer je njihov konstrukcijski sustav uobičajeno prividno jednostavniji, iako je potresni odziv mostova, unatoč jednostavnom konstrukcijskom sustavu, kompliciraniji i bitno drugačiji od zgrada, posebno u poprečnome smjeru mosta. Stoga su pri uporabi metode N2 potrebne određene promjene koje su prilagođene posebnostima u potresnom odzivu mosta. Pojedine posebnosti pri uporabi metode N2 za proračun mostova u obzir su uzete i u normi EC8/2, u obavijesnom dodatku H. Za neka od tih rješenja autori su mišljenja da nisu najprimjerenija. Stoga daju svoje rješenje (pogledati poglavlje 2.2) i to na osnovi proteklih ispitivanja [5-7].

Metodom N2 nelinearni se potresni proračun bitno pojednostavnjuje. Zbog pojednostavnjenja metoda ima i određena ograničenja (pogledati poglavlje 2.3). Primjerena je prije svega za proračun konstrukcija gdje nema velikoga utjecaja viših oblika oscilacije i gdje se pri različitim intenzitetima potresnoga opterećenja dominantne oscilacije bitno ne mijenjaju. Kriterij, koji se predlaže za ocjenu vjerodostojnosti metode N2 u proračunu mostova, opisan je u poglavlju 2.3.

U velikom broju primjera, za koje metoda N2 ne daje dobru aproksimaciju potresnoga odziva (to su većinom vrlo dugi mostovi), za proračun se može upotrijebiti i neka druga pojednostavnjena nelinearna metoda u kojoj se u obzir uzima i utjecaj viših oblika oscilacije. To su takozvane *multimode pushover* metode. Jedna od njih je metoda MPA [8]. Kada se upotrebljava za proračun mostova i u toj su metodi potrebne određene promjene. Njezina ograničenja analizirana su u poglavlju 3.

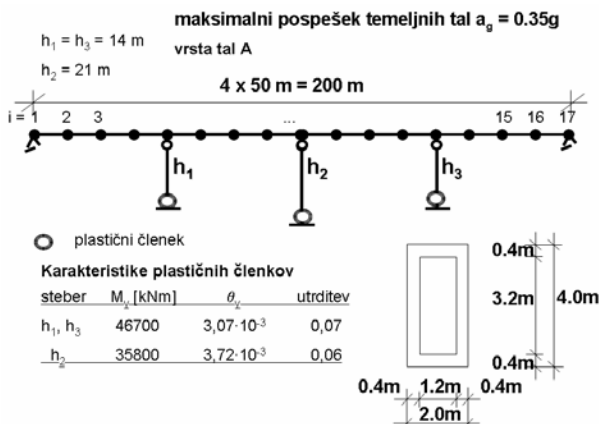
2 Metoda N2

2.1 Uporaba metode N2 za mostove, ilustrirana s numeričkim primjerom

Uporaba metode N2 prikazana je korak po korak, pri čemu je svaki korak ilustriran numeričkim primjerom mosta, prikazanim na slici 1. Prikazan je proračun mosta u njegovome poprečnom smjeru.

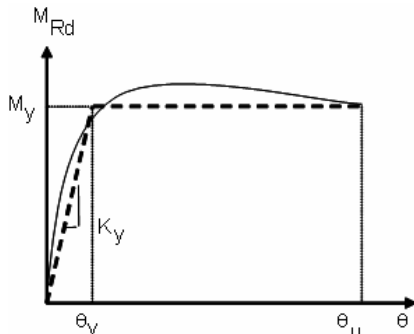
1. korak *Priprema stvarnog MDOF modela konstrukcije, s kojim se izvodi nelinearni statički proračun konstrukcije*

Najprije se pripremi model konstrukcije, primjeran za nelinearni proračun. Priprema se na jednaki način kao za elastični proračun, samo se dopuni podacima o nelinearnom odnosu opterećenja i deformiranja (pomaka) za svaki pojedini nosivi element. Najjednostavniji modeli



Slika 1. Shema i osnovni podaci o analiziranom mostu

sastavljeni su od linijskih elemenata, kojima se na kraju dodaju plastični zglobovi s kojima se opisuje nelinearno ponašanje. Najčešće se to ponašanje opisuje odgovarajućom nelinearnom vezom momenta savijanja i rotacije (odnos $M-\theta$) (slika 2.). U tom je odnosu najvažnija točka koja predstavlja početak popuštanja, a određuje ju moment na granici popuštanja M_y i rotacija na granici popuštanja θ_y . Slični se postupci za određivanje takvih modela pronalaze u različitim člancima i knjigama, npr. [9].



Slika 2. Nelinearna ovisnost momenta i rotacije, s kojim se opisuju karakteristike plastičnih zglobova

Tablica 1. Mase m_i , pomaci Φ_i , pretpostavljene horizontalne sile F_i , s kojima opteretimo konstrukciju; proračun mase m^* - SDOF sustava i faktora Γ , pomoću kojega određujemo karakteristike SDOF sustava

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
masa m_i [t]	127,4	254,8	254,8	254,8	329,0	254,8	254,8	254,8	366,1
Φ (kvadratna parabola)	0	0,234	0,438	0,609	0,750	0,859	0,938	0,984	1,000
$F_i = m_i \Phi_i$	0	59,7	111,5	155,3	246,8	219	238,9	250,8	366,1
$m_i \Phi_i^2$	0	14,0	48,8	94,6	185,1	188,2	224,0	246,9	366,1
i	10	11	12	13	14	15	16	17	
masa m_i [t]	254,8	254,8	254,8	329	254,8	254,8	254,8	127,4	
Φ_i (kvadratna parabola)	0,984	0,938	0,859	0,750	0,609	0,438	0,234	0	
$F_i = m_i \Phi_i$	250,8	238,9	219,0	246,8	155,3	111,5	59,7	0	
$m_i \Phi_i^2$	246,9	224,0	188,2	185,1	94,6	48,8	14,0	0	

Za mostove se nelinearno ponašanje očekuje samo u stupovima, za grede se pretpostavlja da će ostati u elastičnome području. Tako je u obrađivanom slučaju gređa modelirana standardnim elastičnim grednim elementima, u stupovima je predviđena mogućnost formiranja plastičnih zglobova pri učvršćenju u temelj (na vrhu su stupovi s gredom povezani zglobno). Za pojedine su stupove mosta, s pomoću kojih je ilustrirana metoda N2, karakteristike tih zglobova prikazane na slici 1.

2. korak *Nelinearni STATIČKI proračun (u literaturi znan proračun postupnim guranjem) – određivanje veze potresnih sila i pomaka konstrukcije)*

Nelinearni statički proračun postupnim guranjem provede se tako da se model konstrukcije, koji je određen u 1. koraku, optereti horizontalnim statičkim opterećenjem koje se postupno povećava te se određuju pomaci konstrukcije. Tako se proračunava odnos opterećenja i pomaka za cijelu konstrukciju. Uobičajeno se prati odnos ukupne poprečne sile, koja je jednaka sumi horizontalnih sila u svim stupovima i ležajevima, i maksimalnoga pomaka gredne konstrukcije (pogledati komentar u 2.2).

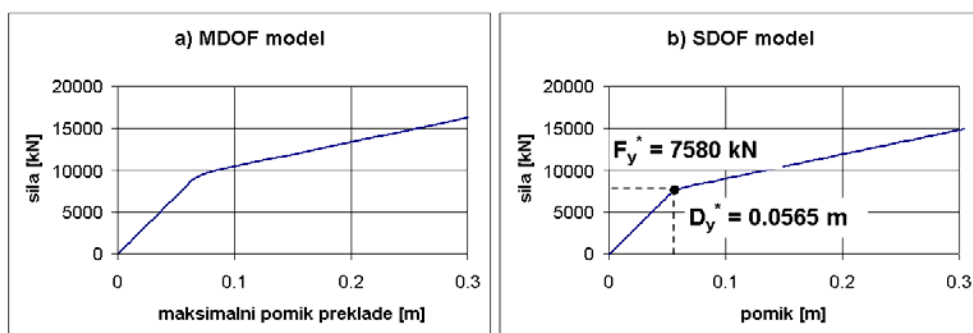
Rezultat proračuna ovisi o rasporedu opterećenja uzduž konstrukcije. Pretpostavka je da je opterećenje proporcionalno pomacima grede. Kako su ti pomaci na početku nepoznati, pretpostavka je da će biti raspoređeni uzduž konstrukcije u obliku kvadratne parabole (pogledati komentar u poglavlju 2.2), gdje je pomak na sredini konstrukcije najveći i iznosi 1,0, zatim se u smjeru ležaja smanjuje na 0,0. Sile se, s kojima se opterećuje konstrukcija, određuju kao umnožak mase u pojedinoj točki i odgovarajućeg pomaka (pogledati sile F_i u tablici 1.). Opterećenje se postupno povećava i prati se pomak grede na mjestu najvećeg pomaka. Na taj se način dobiva veza prikazana na slici 3a.

3. korak Pretvorba na ekvivalentan sustav s jednim stupnjem slobode

Nelinearni se dinamički proračun konstrukcije izvodi na pojednostavnjenome sustavu s jednim stupnjem slobode (SDOF). Zanima nas njegova krutost k^* , masa m^* i period oscilacije T^* . Krutost SDOF se sustava određuje na osnovi veze sila i pomaka, definirane u prethodnom koraku (slika 3.a). Sile i pomake dijelimo faktorom Γ :

$$\Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \Phi_i^2} \quad (1)$$

$$m^* = \sum m_i \Phi_i \quad (2)$$



Slika 3. Ovisnost sila i maksimalnog pomaka poprečne grede mosta na slici 1

S m_i su označene mase u pojedinim točkama MDOF modela (slika 1.), Φ_i su pretpostavljeni pomaci i m^* je masa ekvivalentnoga sustava s jednim stupnjem slobode. Proračun m^* i Γ je za obrađivani primjer prikazan u tablici 1., njihove su vrijednosti $m^* = 2930$ i $\Gamma = 1,24$.

Krutost SDOF sustava iznosi:

$$k^* = \frac{F_y^*}{D_y^*} \quad (3)$$

F_y^* i D_y^* su sila i pomak na granici popuštanja (slika 3.b.). U obrađivanom primjeru iznosi $F_y^* = 7580$ kN, $D_y^* = 5,65$ cm i $k^* = 134200$ kN/m.

Period titraja SDOF sustava određuje se kao:

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^*}{k^*}} \quad (4)$$

U obrađivanom mostu iznosi period ekvivalentnoga SDOF sustava $T^* = 0,928$ s.

4. korak Potresna opterećenja SDOF sustava – nelinearni DINAMIČKI proračun SDOF modela

Na osnovi perioda SDOF sustava, ocijenjenoga u prethodnom koraku i nelinearnoga spektra odziva [2] određuju se potresna opterećenja SDOF modela. U slučaju konstrukcija koje su u području srednjih i dugih

perioda ($T^* > T_C$ [3], za tlo A iznosi $T_C = 0,4$ s) proračun pomaka SDOF sustava D^* može se bitno pojednostaviti i određuje se kao:

$$D^* = \frac{a_g S \cdot 2,5 \cdot T_C T^*}{4 \cdot \pi^2} \quad T_C < T^* < T_D \quad (5)$$

$$D^* = \frac{a_g S \cdot 2,5 \cdot T_C T_D}{4 \cdot \pi^2} \quad T^* > T_D$$

Gornje su jednadžbe određene na osnovi elastičnoga spektra odziva, određenog u EC8/1 i u obzir uzimajući pretpostavku da je pomak konstrukcije koji se pri odzivu ponaša neelastično jednak pomaku konstrukcije, s

jednakim periodom oscilacije, koja se odziva elastično.

U slučaju kratkih perioda ($T^* < T_C$) postupak je nešto kompliciraniji [2], što se u mostovima, zbog u pravilu duljih perioda oscilacije, razmjerno rijetko susreće.

U obrađivanom primjeru iznosi

$$D^* = \frac{0,35 \cdot 9,81 \cdot 1,0 \cdot 2,5 \cdot 0,4 \cdot 0,928}{4 \cdot \pi^2} = 0,0807 \text{ m}$$

5. korak Određivanje opterećenja MDOF sustava

Pomak D^* SDOF sustava pretvori se u maksimalni pomak MDOF sustava pomoću faktora Γ (pogledati 3. korak) kao:

$$D = D^* \cdot \Gamma \quad (6)$$

U obrađivanom primjeru taj pomak iznosi:

$$D = 0,0807 \cdot 1,24 = 0,10 \text{ m}$$

Kada je određen najveći pomak grede D (u obrađivanom je primjeru on na sredini konstrukcije - pogledati komentar u sljedećem potpoglavlju) ponovi se nelinearni statički proračun MDOF sustava i to tako da se konstrukcija optereti s jednakim rasporedom sila kao u koraku 2. i to takvim intenzitetom, koji uzrokuje pomak D . Zatim se analiziraju pomaci pojedinih elemenata.

2.2 Posebnosti uporabe metode N2 za proračun mostova

Pri proračunu mostova metodom N2 potrebno je u obzir uzeti neke posebnosti, koje se prije svega odnose na:

- 1) izbor točke, u kojoj se prate pomaci konstrukcije, na osnovi kojih se određuje veza između sila i pomaka (pogledati 2. korak u poglavlju 2.1.),

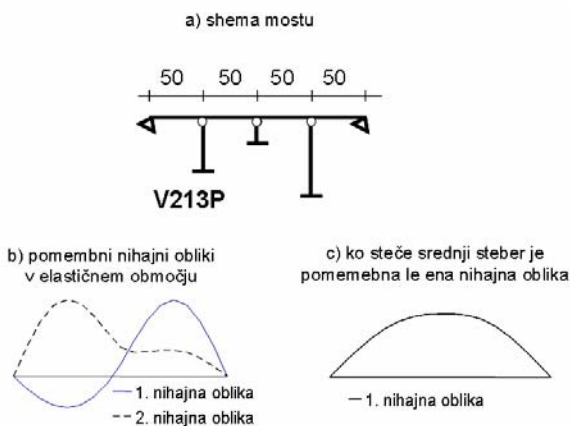
2) izbor rasporeda potresnih sila uzduž konstrukcije (pogledati 2. korak u poglavlju 2.1.)

3) idealizaciju odnosa sila i pomaka, odnosno određivanje F_y^* i D_y^* (pogledati 3. korak u poglavlju 2.1.).

1) *Izbor točke, u kojoj se prate pomaci*

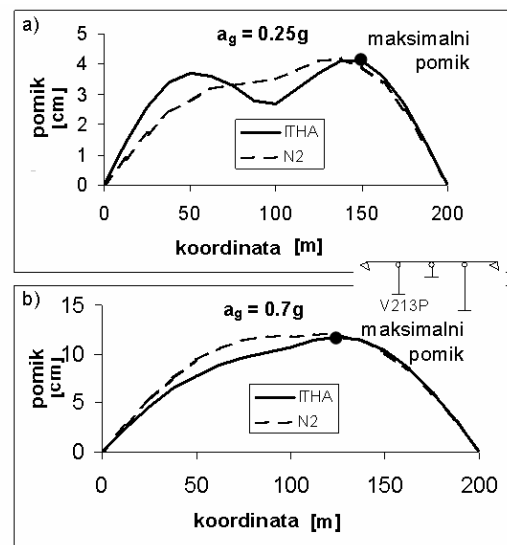
Jedan od ključnih koraka u upotrebi metode N2 je nelinearni statički proračun konstrukcije. Tim se proračunom određuje ovisnost pomaka i sila u konstrukciji i zatim i karakteristike ekvivalentnoga sustava s jednim stupnjem slobode. U mostovima se kao točka, u kojoj se prate pomaci, odabire točka najvećega pomaka gredne konstrukcije. Takav izbor točke, u kojoj se prate pomaci, postaje jasnija ako se most određuje kao greda koja je elastično oslonjena na stup. Ako se prati najveći pomak može se primjereno ocijeniti krutost grede oslonjene na stup (elastično oslonjena greda).

U određenim se slučajevima pri različito jakim potresnim opterećenjima položaj najvećeg pomaka grede znatno promijeni. Tipičan je primjer most prikazan na slici 4. Pomaci su gredne konstrukcije tog mosta pri slabom potresu (odziv je elastičan) prikazani na slici 5.a punom crtom. Najveći je pomak nad desnim stupom. Kada se intenzitet potresnoga opterećenja poveća, stup u sredini konstrukcije se smekša (raspuca). Posljedično se smanjuje njegova krutost. Stoga se snažno promijeni oblik deformacijske linije grede (pogledati punu crtu na slici 5.b). Najveći pomak se u tom slučaju pomakne prema sredini konstrukcije za približno pola polja (otprilike 25 m).



Slika 4. Oblici oscilacije mosta, koji sadrži kratak krut stup u sredini konstrukcije, ovise o intenzitetu potresnoga opterećenja

Ovisnost se sila i pomaka uvijek konstruira na osnovi najvećeg pomaka gredne konstrukcije bez obzira na njegov promjenjiv položaj. Takav izbor točke, u kojoj se mijenja pomak gredne konstrukcije, razlikuje se od onoga koji se predlaže u normi EC8/2 (dodatak H). Norma, naime, predlaže da se pomak mijenja u središtu mase konstrukcije, što je uobičajeno u sredini ili vrlo blizu



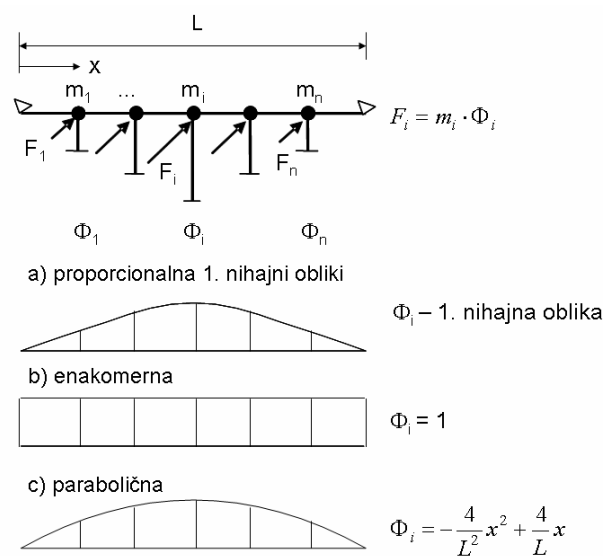
ITHA-proračun vremeskog odziva

Slika 5. Odziv mosta sa slike 4. pri različito jakim potresnim opterećenjima: a) ubrzanje temeljnog tla iznosi 0,25 g; b) ubrzanje temeljnog tla iznosi 0,7 g

sredine gredne konstrukcije. To je ujedno približan položaj najvećega pomaka samo u mostovima koji ne sadrže kratke (krute) stupove u blizini sredine konstrukcije.

2) *Izbor rasporeda potresnih sila uzduž konstrukcije*

Pri određivanju veze između sila i pomaka mora se pretpostaviti raspored horizontalnih sila (inercijskih sila) s kojima se opterećuje konstrukcija. U slučaju su mostova u normi EC8/2 (dodatak H) predložene sljedeće dvije raspodjele sila uzduž gredne konstrukcije: a) raspored sila koji je proporcionalan 1. obliku oscilacije konstrukcije u elastičnom (početnom) stanju, b) konstantan ras-



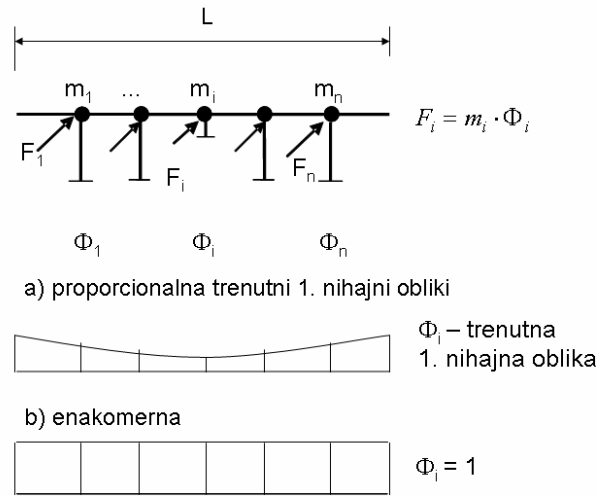
Slika 6. Raspodjela sila, koje su primjerene za mostove, oslonjene na nepomičnim ležajevima u poprečnom smjeru

pored (pogledati sliku 6a. i 6b.). Drugi raspored sila može se odrediti na osnovi jednostavnog proračuna oblika oscilacije nekim od standardnih programa koji omogućavaju elastični modalni proračun konstrukcije.

U posebnim je istraživanjima [6] ustanovljeno da je u slučaju mostova koji su okretljivo (ali nepomično) oslonjeni na ležajeve u poprečnom smjeru primjeren parabolčan raspored sila (slika 6c.). Takva se raspodjela određi jednostavnije od one proporcionalne 1. obliku oscilacije, ocjena odziva je bolja nego u slučaju jednolične raspodjele.

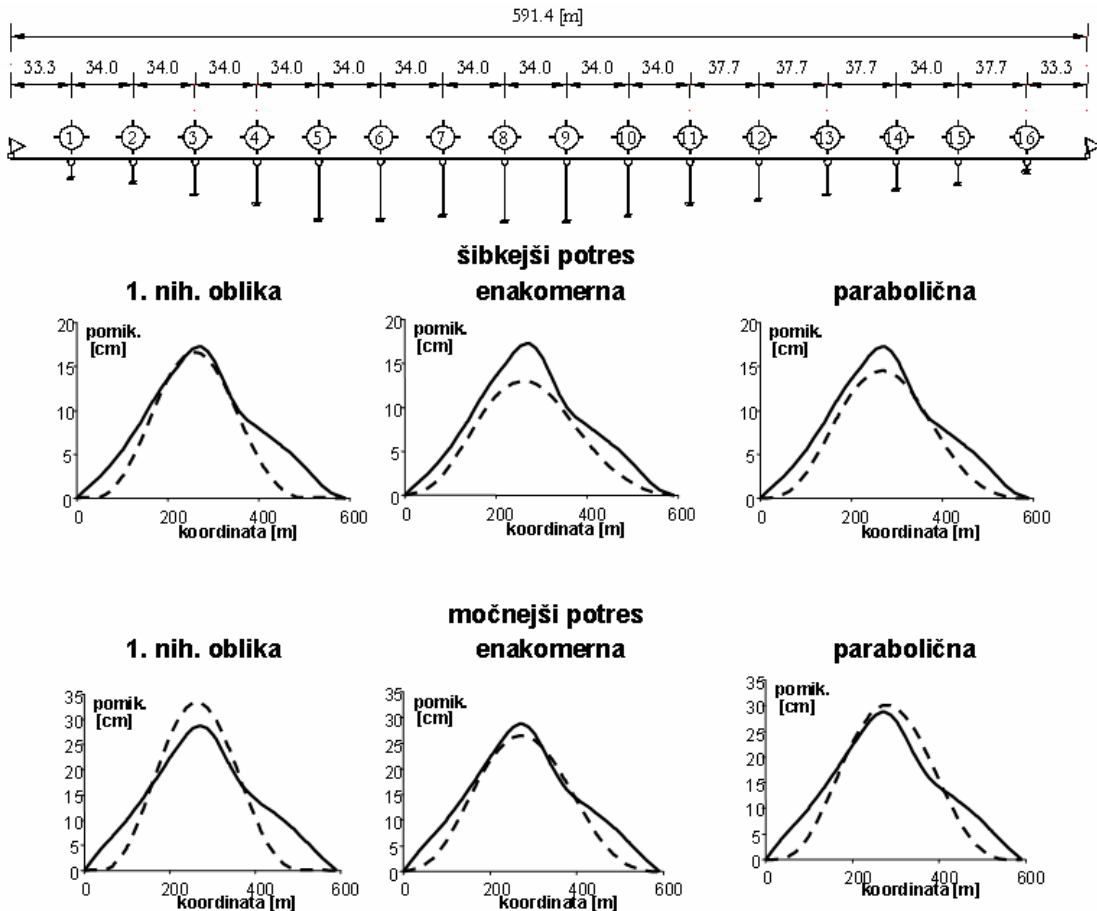
U mostovima s kliznim ležajevima u poprečnom smjeru rabi se jednolična raspodjela sila ili raspodjela koja je proporcionalna trenutno najvažnijem obliku oscilacije (slika 7,a). Drugo rješenje zahtijeva iteracije u mostovima s kratkim stupovima u blizini sredine grede jer se u takvim mostovima oblik oscilacije jako mijenja s intenzitetom potresnoga opterećenja.

Općenito se preporuča da se pri proračunu svakoga mosta rabe dvije različite raspodjele sila i u obzir uzima anvelopa odgovarajućih rezultata. Pretpostavljena raspodjela sila, s kojima se proračunava most, može važno utjecati



Slika 7. Raspodjela sila, koje su primjerene za mostove, koji su oslonjeni na klizne ležajeve u poprečnom smjeru

na raspored pomaka i na vrijednost najvećega pomaka grede konstrukcije. Kao primjer se mogu pogledati pomaci grede konstrukcije mosta prikazanoga na slici 8. Pomaci su određeni s tri različita rasporeda sila koji su primjereni za analizu mostova oslonjenih na ležajeve.



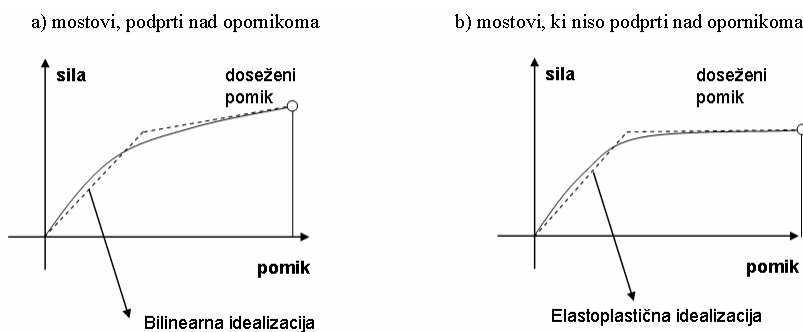
Slika 8. Primjer odziva mosta, određen s različnim raspodjelama sila

Rezultati metode N2 (crtkana crta) uspoređeni su s rezultatima nelinearnog dinamičkog proračuna vremenskoga odziva (puna crta). Pomaci grede prikazani su za dva intenziteta potresnoga opterećenja.

U sredini su mosta pomaci najveći u slučaju proporcionalnih 1. oblika oscilacije. S tako pretpostavljenim rasporedom sila dobivaju se i najveći pomaci gredne konstrukcije. U blizini ležaja pomaci su najveći onda kada se u obzir uzima jednolična raspodjela sila. Pomaci koji odgovaraju paraboličnom rasporedu sila međuvarijanta su između prethodne dvije.

3) Idealizacija ovisnosti sila i pomaka

U 3. se koraku metode N2 određuje krutost SDOF sustava na osnovi procijenjene vrijednosti sile i pomaka na granici popuštanja (F_y^* i D_y^*). U slučaju, prikazanom u poglavlju 2.1 ta je točka jasno određena jer svi stupovi približno istodobno popuštaju, modelirani su bilinearnom anvelopom. Za drugačiju konfiguraciju mostova i drugačije nelinearne modele stupova ta će ovisnost biti sličnija onoj prikazanoj na slici 9. U takvim se slučajevima mora za određivanje F_y^* i D_y^* ovisnost sila i pomaka idealizirati. U slučaju mostova koji nisu oslonjeni na ležajevima uobičajeno je primjerena elastoplastična idealizacija (pogledati crtkanu crtu na slici 9.b). Pri mostovima, oslonjenim na ležajevima zbog specifične je ovisnosti sila i pomaka primjerena bilinearna idealizacija (pogledati crtkanu crtu na slici 9.a).



Slika 9. Idealizacija ovisnosti sila i pomaka

Idealizacija ovisnosti sila i pomaka jedan je od ključnih koraka metode N2 jer izravno utječe na početnu krutost pojednostavnjenoga modela i posljedično na konačnu vrijednost najvećega pomaka konstrukcije. Ako se krutost slabo procijeni, vrijednost najvećega pomaka jako će se razlikovati od stvarnog [6].

Ovisnost sila i pomaka idealizira se uzimajući u obzir princip jednakosti energija idealizirane i stvarne krivulje. Kako energija ovisi o postignutom pomaku, koji je unaprijed nepoznat, mišljenja smo da je idealizaciju potrebno napraviti iterativno. U većini se slučajeva proračun brzo završi jer je često potrebna samo jedna iteracija.

U EC8/2 u dodatku H predlaže se da se najveći pomak procijeni pomoću elastičnog proračuna. Takvo je rješenje na prvi pogled logično i jednostavno. Iako se pri elastičnom proračunu mora pretpostaviti koliko će pri određenom intenzitetu opterećenja stupovi raspucati, odnosno koliko će se smanjiti njihov efektivni moment inercije. To upravo znači iteraciju. Kako se unaprijed ne zna koji će stupovi popustiti i koliko će se smanjiti njihov efektivni moment inercije, proračunski je postupak dugotrajniji nego onaj koji predlažu autori članka.

2.3 Ograničenja metode N2 i kriterij za njezinu uporabu

Metodom N2 se nelinearni potresni proračun bitno pojednostavnjuje.

Zbog pojednostavnjenja metoda ima i ograničenja. Primjerena je prije svega za proračun konstrukcija gdje nema velikog utjecaja viših oblika oscilacije i gdje se pri promjeni intenziteta potresnoga opterećenja oblici oscilacija bitno ne mijenjaju. Prethodnim istraživanjima [10], [7] ustanovljeno je da je metoda u većini slučajeva dovoljno točna onda kad na odziv mosta dominantno utječe samo jedan oblik oscilacije, čija je efektivna masa bar 80 posto ukupne mase konstrukcije.

U kratkim i srednje dugim mostovima pouzdanost metode N2 ovisi o intenzitetu potresnoga opterećenja. Uobičajeno se intenzitetom potresnoga opterećenja pouzdanost metode N2 povećava. Jedan je od takvih primjera most prikazan na slici 4.a. U elastičnom području važno utječu na potresni odziv dva njihajna oblika (slika 4.a). Zato se rezultati metode N2 (pogledati crtkanu crtu na slici 5.a) ne poklapaju najbolje s deformacijskom linijom, određenom nelinearnim proračunom vremenskoga odziva (pogledati punu crtu na slici

5.a). Iako kada se intenzitet potresnoga opterećenja poveća i popušta srednji stup, na odziv utječe samo još jedan oblik oscilacije (slika 4.c). Posljedično se rezultati metode N2 bolje poklapaju s rezultatima nelinearnog proračuna vremenskoga odziva (slika 5.b). U određenim tipovima mostova, koji su kod nas rjeđi, procjena odziva metodom N2 pri većem intenzitetu potresnoga opterećenja može se i pogoršati.

Općenito je metoda N2 upotrebljivija za analizu kraćih mostova. U prethodnim istraživanjima [7] ustanovljeno je da su grede standardnih tipova u duljim mostovima zbog svoje velike duljine već tako popustljive da na njihov odziv utječu viši oblici oscilacije i u slučaju kad

su oslonjene na relativno popustiljive stupove. To se događa u mostovima duljine veće od 500 m. U takvim je slučajevima metoda N2 manje pouzdana te se za proračun preporuča ili jedna od pojednostavnjenih nelinearnih metoda koje u obzir uzimaju više oblike oscilacije ili nelinearni proračun vremenskoga odziva.

3 Metoda MPA

3.1 Kratak opis i specifičnosti pri njezinoj uporabi za proračun mostova

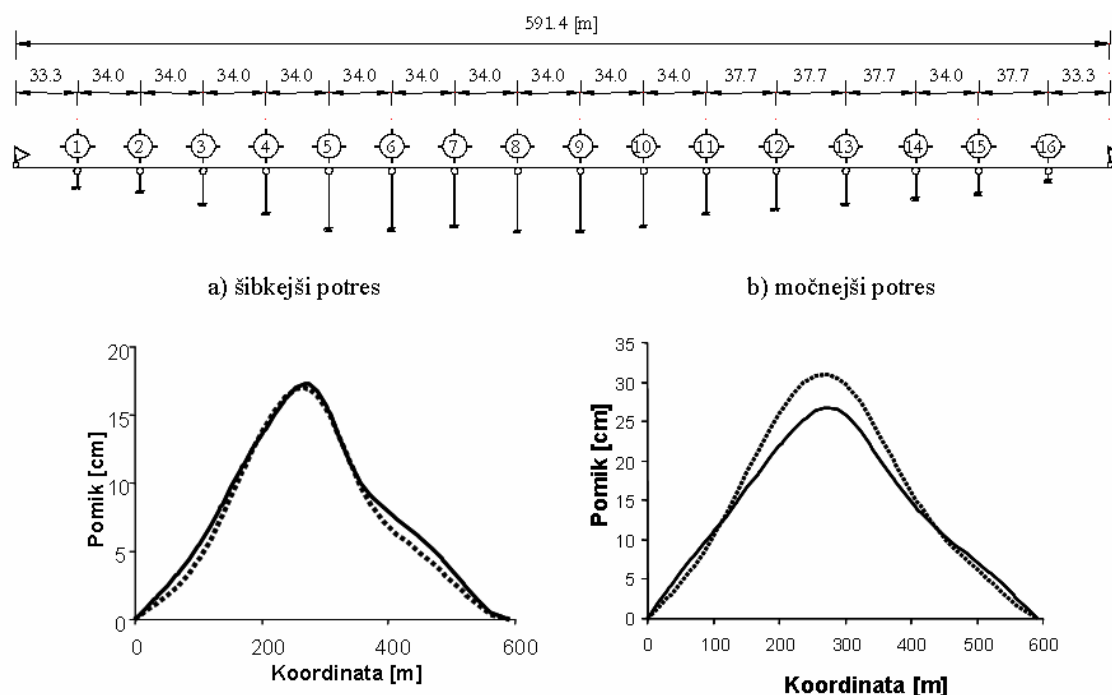
MPA je pojednostavljena nelinearna metoda s kojom se u obzir uzimaju i utjecaji viših njihovih oblika na odziv mosta. Postupak proračuna u biti je jednak onomu prikazanom u poglavlju 2.1 za metodu N2, samo se treba ponoviti toliko puta koliko je važnih oblika oscilacije. Najvažnija razlika između metoda MPA i N2 je u tom da se raspored potresnih sila (pogledati 2. korak u poglavlju 2.1) ne pretpostavi već se u obzir uzima onaj proporcionalan svakom obliku oscilacije, koji se u proračunu uzima u obzir. Ti se oblici oscilacije određuju elastičnim proračunom.

žan jer se mijenja međusoban odnos pomaka u pojedinim točkama gredne konstrukcije. Stoga se pri uporabi metode MPA preporuča da se ovisnost sila i pomaka određuje tako da se prati najveći pomak gredne konstrukcije bilo gdje (pogledati komentar u poglavlju 2.2).

Metodu MPA smisleno je upotrebljavati tada kad metoda N2 ne djeluje. To je npr. smisleno za vrlo duge mostove (npr. duljine približno veće od 500 m). Kad se grede takvih mostova podupru vrlo kratkim stupovima, utjecaj viših oblika oscilacije uobičajeno je vrlo velik. I tada kad ti stupovi popuštaju utjecaj se viših oblika oscilacije još uvijek bitno ne smanjuje jer je efektivna krutost tih stupova pri vrlo jakim potresima velika u usporedbi s malom krutosti grede. Ukoliko se oblici oscilacije takvoga mosta bitno ne mijenjaju, može se s MPA dosta dobro procijeniti potresni odziv (slika 10.).

3.2 Ograničenja

MPA je takozvana *nonadaptive pushover* metoda. To znači, da se u obzir ne može uzeti promjena važnih oblika oscilacije koji u armiranobetonskim mostovima nas-



Slika 10. Potresni odziv dugog mosta, određen nelinearnim proračunom vremenskoga odziva (puna crta) i metodom MPA (crtkana crta)

bitna razlika s obzirom na metodu N2 je i u tome da izbor točke u kojoj se prati pomak nije važan sve dok se oblik oscilacije bitno ne promijeni jer se pri proračunu s MPA u obzir uzima oblikovni faktor za svaki od oblika oscilacije [8]. U slučaju kad se oblici oscilacije pri različitim intenzitetima potresnoga opterećenja bitno promijene, izbor točke u kojoj se prate pomaci postaje va-

tupaju zbog različitih promjena krutosti pojedinih stupova pri različitim razinama opterećenja (raspucalost i opseg popuštanja u pojedinim stupovima može biti vrlo različita). Iz toga proizlaze i njezina ograničenja. Primjeri, za koje metoda MPA nije odgovarajuća, nalaze se opisani u literaturi [7], [10].

4 Zaključak

Nova europska norma EC8/2 za projektiranje mostova u potresnim područjima sadrži, pored standardnih elastičnih metoda proračuna, i nelinearne metode proračuna. Jedna od takvih metoda je metoda N2 koju je razvio prof. Fajfar sa suradnicima na IKPIR-u. Pri analizi mostova metodom N2 potrebno je u obzir uzeti određene posebnosti. Neke su predložene u EC8/2, a neke predlažu autori na osnovi vlastitih istraživanja.

Posebnosti pri uporabi metode N2 odnose se prije svega na: 1) izbor točke, u kojoj se prate konstrukcije pri nelinearnom statičkom proračunu modela s više stupnjeva slobode, 2) izbor rasporeda potresnih (horizontalnih) sila uzduž konstrukcije i 3) idealizaciju ovisnosti pomaka i sila.

- 1) Po pravilu u mostovima se prati najveći pomak gredne konstrukcije, bez obzira na njegov položaj.
- 2) U mostovima, koji su oslonjeni na ležajevima nepomičnim ali okretljivim u poprečnom smjeru, izabire se jednoličan raspored, paraboličan raspored ili raspored inercijskih sila koji je proporcionalan najvažnijem njihovom obliku. U mostovima s kliznim ležajevima u poprečnom smjeru primjeren je jednoličan raspored sila ili raspored sila proporcionalan najvažnijem obliku. Preporuča se da se proračun izvede s dva različita rasporeda sila i zatim se u obzir uzme anvelopa odgovarajućih rezultata.
- 3) S obzirom na specifičnu ovisnost sila i pomaka, kod mostova oslonjenim na ležajeve nepomične u popreč-

nom smjeru, primjerena je bilinearna idealizacija te krivulje, a za mostove s kliznim ležajevima u poprečnom smjeru elastoplastična.

Dan je i kriterij na osnovi kojega se ocjenjuje pouzdanost metode N2. U primjerima gdje je efektivna masa najvažnijeg oblika oscilacije veća od 80 posto od ukupne mase konstrukcije, ocjena potresnog odziva metodom N2 u većini je slučajeva dobra, pod uvjetom da se taj oblik oscilacije promjenom intenziteta potresnoga opterećenja bitno ne mijenja.

Pouzdanost metode N2 može se mijenjati s intenzitetom potresnoga opterećenja. Na osnovi rezultata metode N2 može se pri različitim intenzitetima opterećenja ocijeniti efektivna krutost stupova. Ona se može upotrijebiti za određivanje odgovarajućih oblika oscilacije i njihovih efektivnih masa te se pouzdanost metode ocjenjuje s prethodno opisanim kriterijem.

Općenito je metoda N2 manje upotrebljiva za mostove koji su dulji od približno 500 m. U takvim su mostovima zbog razmjerno velikih duljina standardni tipovi greda već toliko dugi da na njihov odziv značajno utječu viši oblici oscilacije i u slučajevima kad nisu poduprti kratkim krutim stupovima.

Za duge mostove s uobičajenom konfiguracijom stupova (tamo gdje nema vrlo krutih stupova na sredini konstrukcije) može se umjesto metode N2 upotrijebiti metoda MPA. Ona je primjenjiva za mostove gdje su važni viši oblici oscilacije, iako se pri promjeni intenziteta potresnoga opterećenja oni bitno ne mijenjaju.

LITERATURA

- [1] CEN: *Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 2: Bridges*, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2005.
- [2] Fajfar, P.: *Poenostavljena nelinearna analiza konstrukcij pri potresni optežbi*, Gradbeni vestnik 51(2002), 302 – 315.
- [3] CEN: *Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, Comité Européen de Normalisation, Brussels, 2004.
- [4] Fajfar, P., Fischinger, M.: *Non-linear seismic analysis of RC buildings: Implications of a case study*, European Earthquake Engineering 1 (1987), 31-43.
- [5] Fajfar, P., Gašperšič, P., Drobnič, D.: *A simplified nonlinear method for seismic damage analysis of structures*, Seismic design methodologies for the next generation of codes : proceedings of the international workshop, Bled, 24-27, junij, (1997). Rotterdam; Brookfield: Balkema, 183-194.
- [6] Isaković, T., Fischinger, M.: *Higher modes in simplified inelastic seismic analysis of single column bent viaducts*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35 (2006) 1, 95-114.
- [7] Isaković, T., Lazaro, Nino M.P., Fischinger, M.: *Applicability of pushover methods for the seismic analysis of single column bent viaducts*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 37 (2008) 8, 1185-1202.
- [8] Chopra, A. K., Goel, R. K.: *A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics 31 (2002) 3, 561-582.
- [9] Priestley, M. J. N., Seible, F., Calvi, G. M.: *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, 1st edn, John Wiley & Sons, 1996.
- [10] Isaković, T., Fischinger, M.: *Pushover analysis of the two-span reinforced concrete bridge system*, Poročilo o rezultatih raziskav, Univerza v Ljubljani, FGG, IKPIR, 2007.
- [11] Saïidi M., *Seismic Performance of Bridge Systems with Conventional and Innovative Design*, opis projekta na spletni strani <http://nees.unr.edu/4-spanbridges/index.html>, 2007.