



УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ – ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ  
UNIVERSITY OF BELGRADE – FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

# МАТЕРИЈАЛИ И КОНСТРУКЦИЈЕ У САВРЕМЕНОМ ГРАЂЕВИНАРСТВУ

*Монографија  
посвећена 85-ом рођендану  
професора Михаила Мурављова*

Уредници

Проф. др Драгица Јевтић  
Проф. др Бошко Стевановић  
Проф. др Димитрије Закић

Београд, новембар 2022.

Издавач

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ – ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ

За издавача

Проф. др Владан Кузмановић, декан Факултета

Уредници

Проф. др Драгица Јевтић

Проф. др Бошко Стевановић

Проф. др Димитрије Закић

Рецензенти

Проф. др Бранко Божић

Проф. др Душан Продановић

Техничка припрема

Стоја Годоровић - Сашка

Дизајн корица

Александра Ђорђевић

Штампа

Planeta print, Београд

Тираж: 200 примерака

ISBN 978-86-7518-232-0

**Мира ПЕТРОНИЈЕВИЋ, Мирослав МАРЈАНОВИЋ**

## **МУЛТИМОДАЛНА PUSHOVER АНАЛИЗА МОСТА СА УТИЦАЈЕМ ИНТЕРАКЦИЈЕ ТЛА И ОБЈЕКТА**

### *MULTI MODAL PUSHOVER ANALYSIS OF BRIDGE STRUCTURE CONSIDERING SSI EFFECT*

**др Мира ПЕТРОНИЈЕВИЋ, дипл.грађ.инж.**  
**редовни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду, у пензији**

**др Мирослав МАРЈАНОВИЋ, мастер инж.грађ.**  
**доцент Грађевинског факултета Универзитета у Београду**

#### *Резиме*

Стандард EN 1998-2 за прорачун мостова на сеизмичка дејства прописује две нелинеарне методе за анализу и пројектовање мостова отпорних на земљотресе: (а) нелинеарна динамичка анализа (NRHA) и (б) нелинеарна статичка pushover анализа (SPA). SPA је постала доминантна метода за процену структурних перформанси мостова при земљотресу због једноставности и мањег утрошка времена у поређењу са NRHA. Пошто узима у обзир само један, доминантни тон осциловања, SPA се показала недовољно поузданом за анализу мостова код којих виши тонови осциловања имају значајну улогу. Код таквих мостова примењује се мултимодална pushover анализа (MPA). У овом раду дат је крагак приказ MPA анализе, као и резултат процене сеизмичке отпорности једног армиранобетонског (АБ) моста, чији су стубови фундирани на флексибилним плитким темељима, применом N2 методе. Анализиран је утицај избора референтне тачке за праћење циљног померања, утицај броја тонова, као и утицај тла на одговор конструкције. Коришћен је комерцијални софтверски пакет SAP2000.

Кључне речи: АБ мост, мултимодална pushover анализа, N2 метода, плитак темељ, интеракција тла и конструкције

#### *Summary*

Standard EN 1998-2, for the seismic design of bridges, prescribes two nonlinear methods for the analysis and design of earthquake resistant bridges: (a) nonlinear response-history analysis (NRHA) and (b) nonlinear static pushover analysis (SPA). The SPA became a dominant method for evaluating structural performance of bridges during the earthquake, due to lower computation costs and less time-consuming in comparison with NRHA. As only one (dominant) tone of oscillation is taken into account, SPA has proven insufficiently reliable for the analysis of bridges in which higher modes have a significant role. In those cases, multi modal pushover analysis (MPA) is applied. In the paper, a brief overview of MPA is presented, as well as the seismic resistance of a RC bridge, whose columns are founded on the shallow foundations obtained by using N2 method. A critical review of the influence of reference point selection, the number of modes and the effects of soil foundation on the response of the structure is presented. Commercial SAP2000 software package was used for numerical analysis.

Keywords: RC bridge, multi modal pushover analysis, N2 method, shallow foundation, soil-structure interaction

## 1. УВОД

Последњих година поклања се све већа пажња анализи мостова на дејство земљотреса. Непосредан узрок томе јесу колапси мостова који су се догађали у областима са високом сеизмичношћу. Европска унија је усвојила стандарде EN 1998-1 [1] и EN 1998-2 [2] којим се дефинише потреба за поузданом проценом нелинеарног сеизмичког одговора мостова у сеизмички ризичним подручјима, а који од 2019. важе и у нашој земљи (SRPS EN 1998-1, SRPS EN 1998-2). Еврокод EN 1998-2 прописује две нелинеарне методе за анализу и дизајн мостова отпорних на земљотресе: (а) нелинеарна динамичка анализа (NRHA) и (б) нелинеарна статичка pushover анализа (SPA). Код SPA капацитет конструкције, у форми pushover криве, пореди са захтевом за конструкцију, у форми спектра одговора, пошто се обе криве конвертују у тзв. ADRS формат (спектрално убрзање-спектрално померање). Пресек спектра капацитета и спектра одговора апроксимира одговор конструкције: спектрално убрзање и спектрално померање, и омогућава процену оштећења конструкције услед задатог земљотреса. Практично, реч је о Методи спектра капацитета [3,4] у сеизмичком пројектовању на бази перформанси конструкције.

У конвенционалном анализи моста интеракција тла и конструкције (SSI) је обично занемарена због преовлађујућег мишљења да SSI има поволјан утицај на сеизмички одговор конструкција. Milonakis и Gazetas [5] су показали да је ово гледиште превише поједностављено и да може довести до недовољно поузданог дизајна мостова. Анализа утицаја SSI применом NRHA сложена је и временски захтевна, јер захтева дискретизацију конструкције са великим уделом околног тла, што има за последицу формирање нумеричких модела са великим бројем непознатих. Због тога SPA има предност, као мање захтевна процедура. Постоје врло ограничена истраживања ефеката интеракције тла и конструкције у pushover анализи мостова.

Стандардна pushover анализа (SPA) је првобитно развијена за сеизмичку процену зграда. Основна идеја методе је да се конструкција излаже монотонно растућем бочном оптерећењу све док се не постигне циљно померање врха конструкције. Циљно померање се дефинише као сеизмички захтев, одређен из еластичног спектра одговора као померање еквивалентног

система са једним степеном слободе померања. И расподела силе и процена циљног померања заснивају се на претпоставци да је одговор конструкције под контролом основног тона осцилација и да он током осциловања конструкције остаје непромењен [4]. Анализа примене различитих модела SPA анализе (на бази силе, на бази померања, адаптивна, стандардна) у процени понашања мостова приказана је у раду [6]. Њена примена у анализи мостова истакла је у први план 2 проблема: (а) избор референтне тачке за одређивање циљног померања; и (б) утицај виших тонова на динамички одговор, који код мостовских конструкција могу имати значајну улогу [7]. Истраживања су показала да је SPA довољно тачна за мостове са регуларном конфигурацијом, код којих ефективна модална маса основног тона износи најмање 80% укупне масе. За нерегуларне мостове, код којих виши тонови имају значајног удела у одговору конструкције користи се мултимодална pushover анализа (MPA) [8] и проширена мултимодална pushover (EMPA) [7,9,10]. Утицај избора референтне тачке је анализиран у раду [7].

Сврха ове студије је да се утврди утицај виших тонова, као и утицај интеракције тла и објекта (SSI) на капацитет померања типичне конструкције армиранобетонског (АБ) моста фундираног на плитким темељима. Модална pushover анализа је спроведена у попречном правцу моста, за три различита сценарија, односно три случаја темељења конструкције моста: (1) круто ослоњена конструкција на мекој стени (тло типа В према EN 1998-1), (2) флексибилно ослоњена конструкција фундирана на мекој стени (тло типа В) и (3) конструкција фундирана на чврстом пешчару и кречњаку (тло типа С према EN 1998-1). Утицај тла се узима у обзир применом граничних опруга чије су крутости једнаке динамичким крутостима појединих темеља. Усвојено је убрзање на површини основне стене  $a_g = 0.30g$ .

Анализиран је избор референтне тачке и за изабрану тачку у центру резултанте модалног оптерећења спроведена је мултимодална pushover анализа у попречном правцу моста. Приказани су резултати прорачуна са освртом на утицај SSI као и виших тонова на попречна померања, силу у бази и формирање пластичних зглобова.

Нумеричка анализа конструкције спроведена је у програму SAP 2000.

## 2. МУЛТИМОДАЛНА PUSHOVER АНАЛИЗА

Мултимодалну pushover анализу (МРА) развили су Чорга и Goel [9] са циљем да анализирају утицај виших тонова код прорачуна капацитета померања високих зграда. Paraskeva и др. [7] су методу применили на процену капацитета мостовских конструкција. Основна идеја је да се pushover анализа спроводи одвојено за сваки тон осциловања  $n$ , а да се тражени одговор конструкције (померање, силе, итд.) добија коришћењем одговарајућег правила за комбинавање одговора у појединим тоновима (SRSS или CQC). У оквиру МРА потребно је:

1. Срачунати основне периоде и тонове осциловања моста. Изабрати  $n$  својствених периода  $T_n$  и својствених облика  $\phi_n$ , који дају 80-90% ефективне модалне масе у посматраном правцу осциловања.
2. Одредити положај контролне тачке (*monitoring point* - МР) за праћење померања у посматраном правцу и одређивање циљног померања. У раду се за положај контролне тачке МР усваја положај резултанте модалног оптерећења у првом тону осциловања [7]:

$$x^* = \left( \sum_{j=1}^N x_j m_j \phi_{jn} \right) / \left( \sum_{j=1}^N m_j \phi_{jn} \right) \quad (1)$$

где је  $x_j$  растојање  $j$ -те масе  $m_j$  од посматране тачке MDOF система, док је  $\phi_{jn}$  померање масе  $m_j$  у тону  $n$ .

3. Спровести pushover анализу за сваки тон  $n$  задавањем оптерећења у изабраном правцу са модалном расподелом:  $s_n^* = \mathbf{m} \phi_n$  (где је  $\mathbf{m}$  матрица маса конструкције), како би се добиле модалне pushover криве  $V_{bn} - u_{rn}$ , где је  $V_{bn}$  смичућа сила у бази, а  $u_{rn}$  померање референтне тачке.

4. Идеализовати модалну pushover криву тона  $n$  билинеарним дијаграмом користећи правило једнаке апсорпције енергије.
5. Трансформисати идеализовану криву капацитета тона  $n$  система са више степени слободе померања (MDOF) на криву капацитета еквивалентног система са једним степеном слободе померања (SDOF) у формату спектрално убрзање ( $S_{an}$ ) - спектрално померање ( $S_{dn}$ ) (ADRS формат), користећи параметре модалне конверзије:

$$S_{an} = \frac{V_{bn}}{M_n^*}, \quad S_{dn} = \frac{u_{rn}}{\Gamma_n \phi_{rn}} \quad (2)$$

где је  $\phi_{rn}$  ордината тона осциловања  $\phi_n$  у контролној тачки МР,  $M_n^* = L_n \Gamma_n$  је ефективна модална маса,  $L_n = \phi_n^T \mathbf{m} \mathbf{1}$ ,  $\Gamma_n = L_n / M_n$  је фактор модалне партиципације, а  $M_n = \phi_n^T \mathbf{m} \phi_n$  је генерализована маса тона  $n$ .

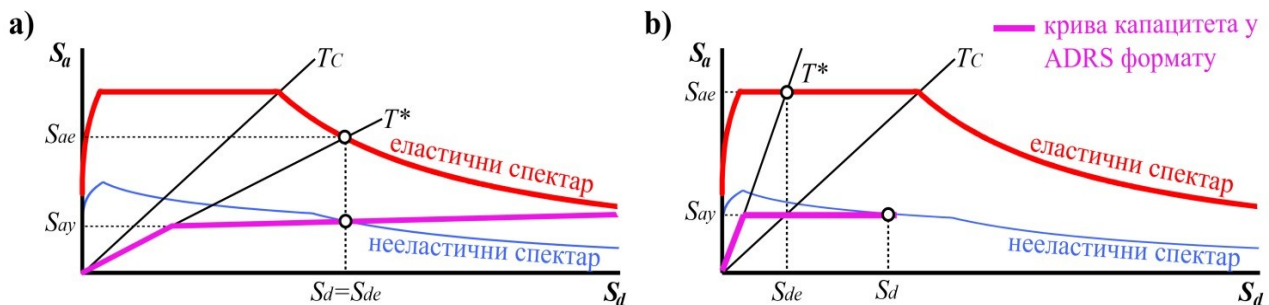
6. Из добијених кривих капацитета одредити спектрално померање  $S_{dy,n}$  и спектрално убрзање  $S_{ay,n}$  контролне тачке на граници течења, за сваки тон  $n$ , слика 1.
7. Израчунати еластични период осциловања еквивалентног SDOF система  $T_n^*$  за сваки тон  $n$ :

$$T_n^* = 2\pi \sqrt{\frac{S_{dy,n}}{S_{ay,n}}} = 2\pi \sqrt{\frac{M_n^* S_{dy,n}}{V_{by,n}}} \quad (3)$$

где је  $V_{by,n}$  смичућа сила у бази на граници течења.

8. Трансформисати еластични спектар  $S_a(g)$  у ADRS формат  $S_a(g) - S_d$ , где је:

$$S_d = \frac{T^2}{(2\pi)^2} S_a(g) \quad (4)$$



Слика 1. Графичко одређивање циљног померања:  
а) област средњих и дугих периода; б) област кратких периода

9. Срачунати спектрално циљно померање  $S_{de,n}$  еквивалентног SDOF система са познатим периодом  $T_n^*$ , за случај бесконачно еластичног понашања, користећи следећу једначину:

$$S_{de,n} = S_{ae}(T_n^*) \left( \frac{T_n^*}{2\pi} \right)^2 \quad (5)$$

где је  $S_{ae}(T_n^*)$  спектрално убрзање за случај еластичног понашања за период  $T_n^*$ , слика 1.

10. Срачунати захтев за нееластично померање  $S_{d,n}$  за сваки тон  $n$  еквивалентног SDOF система користећи N2 методу [1,4], као на слици 1:

а) за  $T_n^* \geq T_C$  (област средњих и дугих периода)

$$S_{d,n} = S_{de,n} \quad (6)$$

б) за  $T_n^* < T_C$  (област кратких периода)

$$S_{d,n} = \frac{S_{de,n}}{R_\mu} \left[ 1 + (R_\mu - 1) \frac{T_C}{T_n^*} \right] \geq S_{de,n} \quad (7)$$

где је  $S_{de,n}(T_n^*)$  спектрално померање еквивалентног SDOF система са еластичним понашањем, а  $R_\mu$  однос између спектралног убрзања  $S_{ae}(T_n^*)$  еквивалентног SDOF система са еластичним понашањем и спектралног убрзања на граници течења  $S_{ay,n}$ , у разматраном тону  $n$ :

$$R_\mu = \frac{S_{ae}(T_n^*)}{S_{ay,n}} \quad (8)$$

11. Конвертовати нееластични захтев за померање  $S_{d,n}$  у референтној тачки и одговарајућу силу у бази  $V_{bn}$ , за сваки тон  $n$ , из нееластичног SDOF система у MDOF систем:

$$u_{rn} = S_{d,n} \Gamma_n \phi_n \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

$$V_{bn} = S_{a,n} \Gamma_n L_n = S_{a,n} M_n^*$$

где је  $u_{rn}$  захтев за модално померање у референтној тачки, а  $V_{bn}$  сила смицања у бази у тону  $n$  MDOF система.

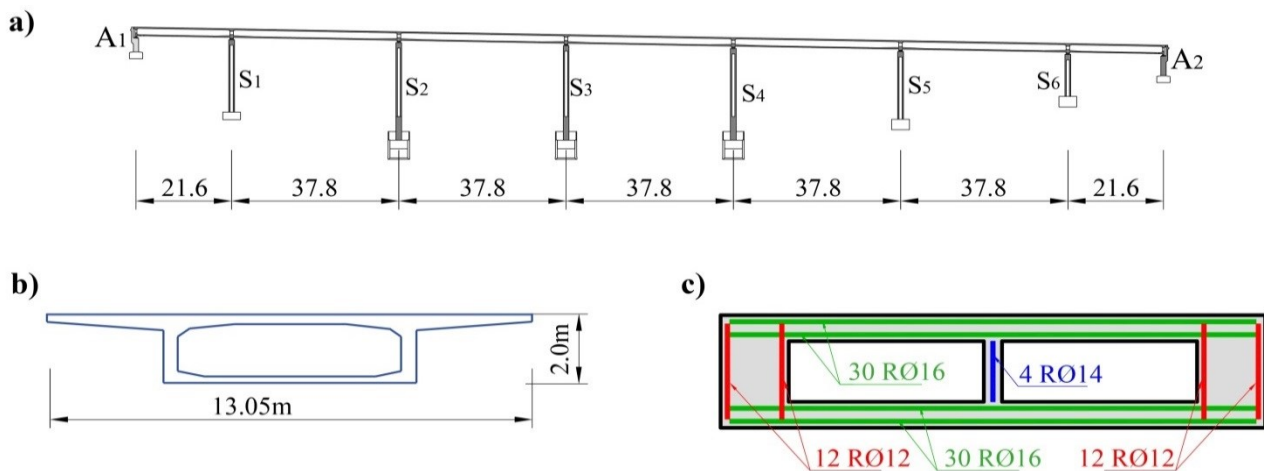
Укупан одговор било које величине  $r$  се добија комбинацијом модалних одговора  $r_n$  за сваки тон, користећи правило SRSS

$$r = \left( \sum_i^N r_n^2 \right)^{1/2}$$

Тако добијено померање референтне тачке представља циљно померање до кога се нагурава конструкција ради одређивања распореда пластичних зглобова.

### 3. КОНСТРУКЦИЈА МОСТА

Мост на реци Нишави је континуални носач са седам поља (21.6+5×37.8+21.6), укупне дужине 232.2m. Пројектован је у хоризонталној кривини полупречника  $R=540$ м и у подужном нагибу од 1.82%. (слика 2а). Идеализован попречни пресек моста је приказан на слици 2б. Главни носач је ослоњен на шест АБ стубова,  $S_1$ - $S_6$  висине:  $S_1=17.14$  m,  $S_2=17.51$  m,  $S_3=16.82$  m,  $S_4=16.11$  m,  $S_5=16.07$  m,  $S_6=9.95$  m, истог попречног пресека. Стубови су фундирани на призматичним темељима. Унутрашњи стубови, ( $S_2$ - $S_5$ ) су монолитно



Слика 2. а) Изглед моста; б) идеализовани попречни пресек главног носача моста; в) попречни пресек стуба са усвојеном арматуром

повезани са главним носачем, док су спољашњи стубови,  $S_1$  и  $S_6$ , ослоњени тако да дозвољавају померања у тангенцијалном правцу. Ротације око оса у подужном и попречном правцу су дозвољене у свим ослонцима. Коришћена су "Neotopf" лежишта.

Мост је пројектован према српским стандардима, као објекат од изузетног значаја, у VII сеизмичкој зони (PGA вредност 0.1g), за тло типа I (еквивалентно тлу типа В у EN 1998-1). Усвојено пригушење у попречном правцу је  $\xi_i=7\%$ . Армирање у складу са домаћим прописима резултирало је високим процентом армирања. Усвојена арматура је приказана на слици 2с.

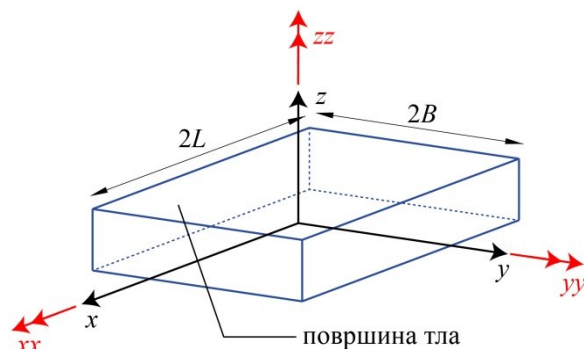
#### 4. НУМЕРИЧКИ МОДЕЛ

Провера капацитета конструкције на дејство земљотреса спроведена је применом мултимодалне pushover анализе за убрзање на основној стени  $a_g=0.3g$ . Утицај SSI анализиран је применом три различита сценарија, тј. три случаја ослањања: (1) круто укљештена конструкција на мекој стени (тло типа В), (2) флексибилно ослоњена конструкција, тло типа В и (3) флексибилно ослоњена конструкција, тло типа С. Нумеричка анализа конструкције спроведена је у програму SAP2000. Користи се идеализован попречни пресек, тј. занемарују се нагиби у подужном и попречном правцу, као и промена геометрије носача по дужини. Претпоставка је да носач остаје у еластичној области, а да се пластични зглобови јављају на крајевима стубова. Торзиона крутост и крутост на савијање стубова се редукују на 50% вредности како би се узеле у обзир појаве прслина у бетону. Материјалне карактеристике АБ елемената и арматуре дате су у Табели 1. Арматура у стубовима је усвојена према пројекту [10], и задата у програму SAP2000 применом алатке Section Designer. Ка-

рактеристике тла су дате у Табели 2. Потпорни зидови на крајевима моста А1 и А2 су моделирани билинеарним опругама, чије су крутости у вертикалном и подужном правцу једнаке редом  $K_z=1800000\text{kN/m}$ ,  $K_{long}=4644\text{kN/m}$ . На оба краја су постављени тзв. gap елементи чија је крутост  $K_{gap}=1000\text{kN/m}$ , а зазор  $d_{gap}=5\text{cm}$ . Утицај тла се моделира применом опруга чије крутости практично представљају динамичку крутост правоугаоног, крутог темеља на одговарајућем тлу.

#### 4.1 Динамичка крутост темеља

Динамичка крутост призматичног темеља је комплексна функција померања, која зависи од геометрије, тј. димензија темеља и карактеристика тла. Повећање деформације смицања током земљотреса доводи до смањења смичућег модула тла  $G$ , и повећања пригушења у тлу  $\eta$ . На основу односа ефективног модула смицања  $G$  и почетног модула  $G_0$  за случај малих деформација срачунате су вредности модула  $G$  [12] за задате типове тла и убрзање  $a_g=0.3g$ , Табела 3. Пројектно спектрално убрзање  $S_{DS}=S_d(T)=2.5a_g(g)S\eta$ , одређено је у складу са EN1998-1. Промена пригушења услед интеракције



Слика 3. Правоугаони крути темељ на еластичној подлози, са означеним димензијама и осама у односу на које се одређују компоненте динамичке крутости

Табела 1. Карактеристике материјала

Елемент	Материјал	$E$ [GPa]	$\nu$	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$f_c'$ [MPa]	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]
Носач	C30/37	31.5	0.2	25.0	23.00	-	-
Стубови	C35/45	35.0	0.2	25.0	27.75	-	-
Арматура	RA 400/500	210.0	0.3	78.5	-	400	500

Табела 2. Карактеристике тла

Сценарио	Тло	Тип тла	$G_0$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\rho$ [t/m <sup>3</sup> ]	$\nu$ [-]
1	Стена	-	-	-	-
2	Меко тло	В	300000	2.20	0.20
3	Песак и кречњак	С	90000	2.00	0.35

Табела 3. Фактор редукције  $G/G_0$  и вредност модула клизања  $G$  за различите типове тла [9]

Тло	Класа тла	$S_{De} / 2.5$ [10]			Разматрана конструкција				
		$\leq 0.1$	0.4	$\geq 0.8$	$\eta$	$S$	$S_{DS} / 2.5$	$G/G_0$	$G$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Мека стена	В	1.00	0.95	0.90	1	1.20	0.360g	0.957	287100
Песак и кречњак	С	0.95	0.75	0.60	1	1.15	0.345g	0.787	70830

\*  $S_{DS}$  је параметар спектралног убрзања кратког периода;  $S_{DS}/2.5=S*a(g)$

тла и конструкције срачуната је према FEMA 440 [13]. Резултат је показао да нема повећања пригушења, а самим тим ни редукције спектра. Компоненте динамичке крутости правоугаоног, крутог темеља на еластичној подлози (слика 3) срачунате су према решењу Pais и Kausel-а [12], као:

$$K_{i,d} = \alpha K_i, \quad K_{ii,d} = \alpha_i K_i, \quad i = x, y, z \quad (10)$$

где су:

$K_i, i=x,y,z$  транслационе статичке крутости,

$K_{ii}, i=x,y,z$  ротационе статичке крутости,

док су  $\alpha_i$  и  $\alpha_{ii}, i=x,y,z$ , фреквентно зависни динамички коефицијенти крутости.

Имајући у виду да вибрације услед земљотреса спадају у нискофреквентне вибрације, у пракси се усваја јединична вредност коефицијента динамичке крутости, тј  $\alpha_{ij}=1$ .

У Табели 4 дате су димензије темеља, модул смицања, Поасонов коефицијент и добијене статичке крутости темеља за сценарије (2) и (3), тј. за тла типа В и С.

Статичке крутости крутог темеља на површини тла добијене су на основу израза:

$$\begin{aligned}
 K_z &= \frac{GB}{1-\nu} \left[ 3.1 \left( \frac{L}{B} \right)^{0.75} + 1.6 \right], & K_{zz} &= GB^3 \left[ 4.25 \left( \frac{L}{B} \right)^{2.45} + 4.06 \right], \\
 K_y &= \frac{GB}{2-\nu} \left[ 6.8 \left( \frac{L}{B} \right)^{0.65} + 0.8 \left( \frac{L}{B} \right) + 1.6 \right], & K_{yy} &= \frac{GB^3}{1-\nu} \left[ 3.37 \left( \frac{L}{B} \right)^{2.4} + 0.27 \right], \\
 K_x &= \frac{GB}{2-\nu} \left[ 6.8 \left( \frac{L}{B} \right)^{0.65} + 2.4 \right], & K_{xx} &= \frac{GB^3}{1-\nu} \left[ 3.2 \left( \frac{L}{B} \right) + 0.8 \right].
 \end{aligned} \quad (11)$$

Табела 4. Димензије и статичке крутости темеља за тло типа В и С

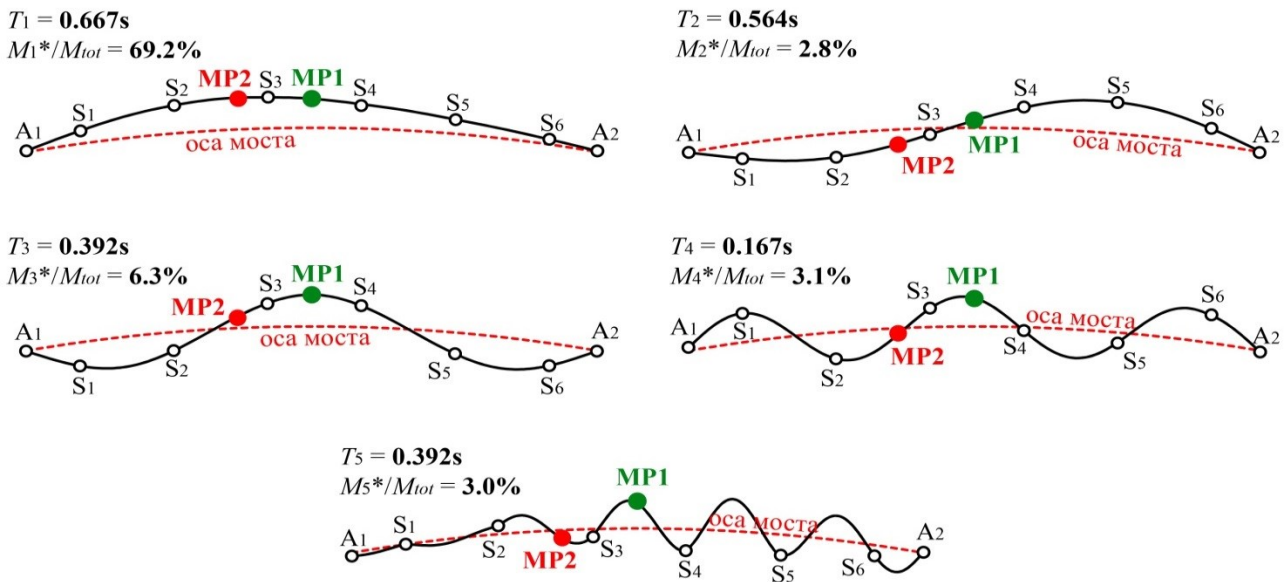
Тло	$L \times B$	$G$	$\nu$	$K_x$	$K_y$	$K_z$	$K_{xx}$	$K_{yy}$	$K_{zz}$
	[m]	[MPa]	[-]	[MN/m]			[MNm/m]		
В	3.75×2.00	287.1	0.20	4028	4251	4712	19516	49169	54843
С	5.00×3.00	70.8	0.35	1529	1598	2009	18038	38173	36161



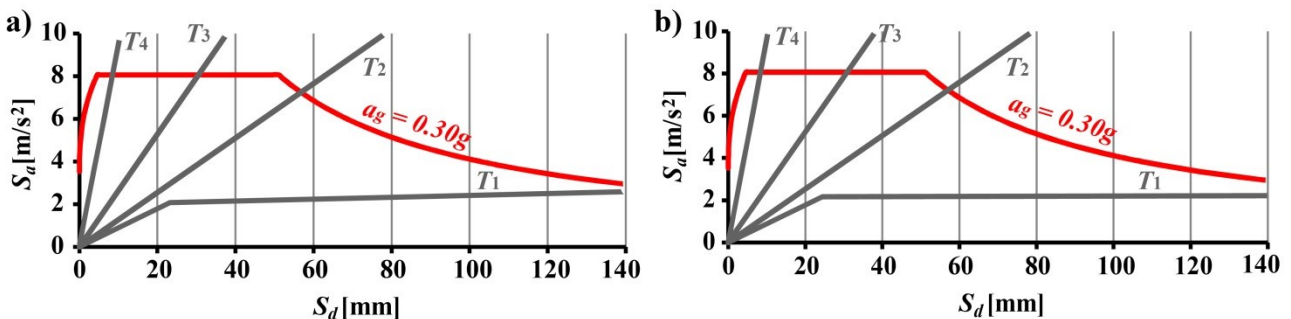
треба укључити 90% ефективне модалне масе конструкције, код мостова се показало превише конзервативним. Paraskeva и др. [7] сматрају да је укључивање онолико тонова који дају 80% ефективне модалне масе моста сасвим прихватљиво, а да тонови код којих је фактор партиципације мањи од 1% немају никакву улогу у анализи и да се стога могу занемарити.

На слици 4 приказано је првих пет тонова осциловања тотално укљештене конструкције у попречном правцу, са периодима осциловања и факторима партиципације за сваки тон. На слици су означене контролне тачке, и то: MP1 у тежишту масе конструкције моста, и MP2, у центру модалног оптерећења за први тон.

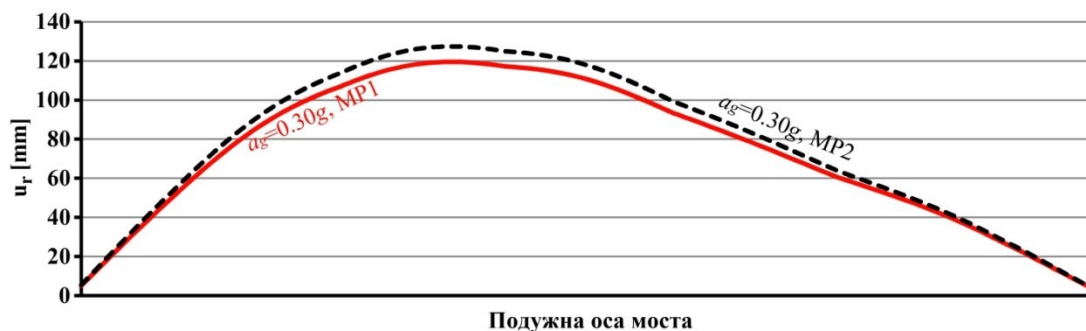
Слика 4 указује да контролна тачка MP1 даје добре резултате за тонове 1, 3, 4 и 5, али не и за тон 2, док је MP2 валидна само за случај првог тона. Стога би се могло закључити да је избор центра маса за контролну тачку оправдан. Pushover анализа је спроведена за свих пет тонова. Резултати су показали да конструкција има нелинеарно понашање само у првом попречном тону, док у остала 4 тона остаје у линеарној области, слика 5. На слици 5 пети тон је изостављен ради прегледности. Након спроведене комплетне pushover мултимодалне анализе добијено је померање у попречном правцу главног носача моста, које је приказано на слици 6. Пошто су у случају MP2 добијене нешто веће вредности померања моста, MP2 је усвојена за контролну тачку у даљој анализи.



Слика 4. Облици и периоди осциловања  $T_i$  у попречном правцу, ефективна модална маса  $M^*/M$ , контролне тачке MP1 и MP2, положај стубова  $S_i$



Слика 5. Криве капацитета за: а) контролну тачку MP1; б) контролну тачку MP2



Слика 6. Одговор конструкције моста за различит избор контролне тачке (MP1 и MP2)

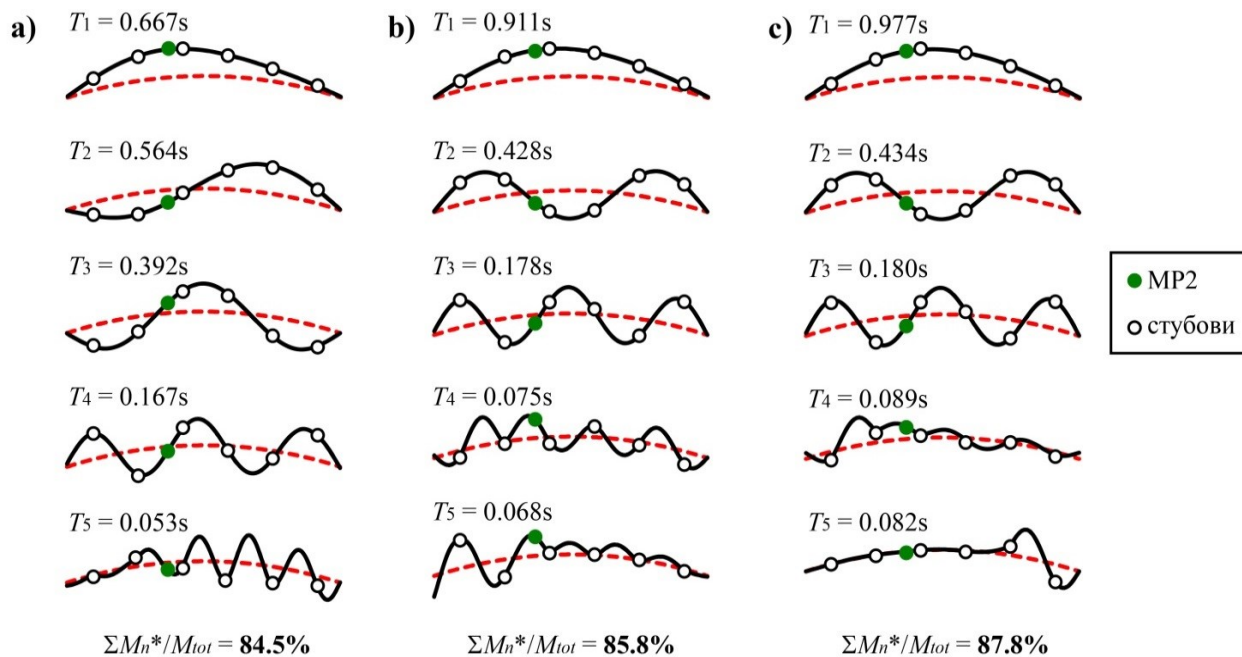
### 6. РЕЗУЛТАТИ АНАЛИЗЕ

Применом програма SAP2000 одређени су облици и периоди осциловања попречних вибрација моста и за преостала два случаја (сценарио 2 и 3), који узимају у обзир утицај тла. Показало се да и у овим случајевима пет тонова укључује више од 80% ефективне модалне масе моста. Својствени облици осциловања, периоди осциловања  $T_i$ , као и фактори модалне партиципације за првих пет тонова у попречном правцу, за сва три случаја ослањања, приказани су на слици 7.

У оба случаја флексибилног ослањања, тло типа В и тло типа С, дошло је до знатног пораста периода осциловања првог тона, са  $T_1=0.667$  за

круту базу на  $T_1=0.911$  за тло типа В, односно  $T_1=0.977$  за тло типа С. У следећа три тона (2, 3 и 4) периоди осциловања круто ослоњене конструкције су већи него у случају флексибилног ослањања, да би у петом тону период осциловања за круту базу био мањи него у друга два случаја. Утицај флексибилног ослањања на својствени облик осциловања уочљив је у тону 4, а нарочито у тону 5.

Pushover анализа је спроведена за сваки тон посебно. Нееластично понашање стубова је моделирано применом P-M2-M3 пластичних зглобова у програму SAP2000, према FEMA 356 [14]. Гравитационо оптерећење и P-Δ ефекат је узет у обзир у сваком тону.



Слика 7. Својствени облици  $\phi_i$  за модел са: а) крутом базом; б) флексибилном базом - тло типа В; в) флексибилном базом - тло типа С

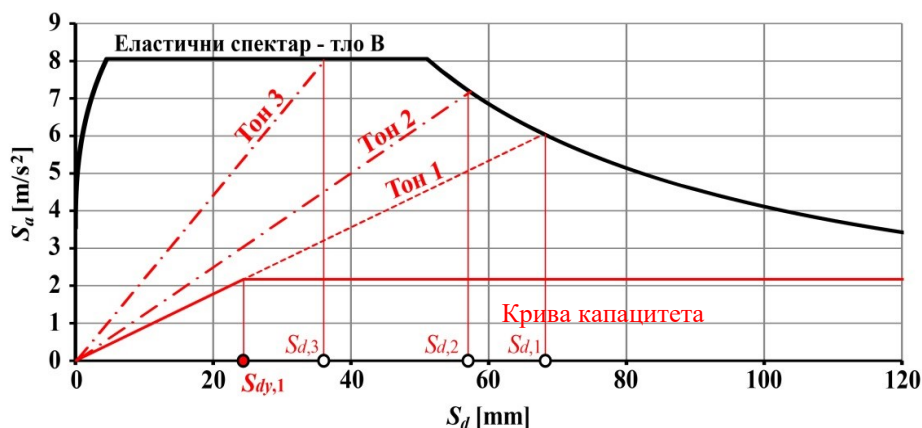
На сликама 8, 9 и 10 илустрована је процедура за одређивање захтева за нееластично померање у мултимодалној pushover анализи, за сва 3 разматрана случаја ослањања посебно. Сlike приказују еластични спектар одговора и криве капацитета за прва 3 тона осциловања у ADRS формату (тонови 4 и 5 су изостављени ради поједностављења цртежа).

У сва три случаја криве капацитета за више тонове остају линеарне ( $T^* < T_C$ ), што наводи на закључак да се мост понаша линеарно-еластично кад је оптерећење пропорционално вишим тоновима осциловања. У стварности, линеарно еластично се понаша стуб Р3, док се за крајње стубове, на основу облика оптерећења у вишим тоновима, може очекивати нелинеарно понашање. Зато рад [10] препоручује да се у сваком тону крива капацитета одређује за тачку: (1) на врху стуба са максималним померањем, (2) на оси моста са максималним померањем. Јасно је да се положај тих тачака мења у сваком тону, што компликује нумеричку анализу.

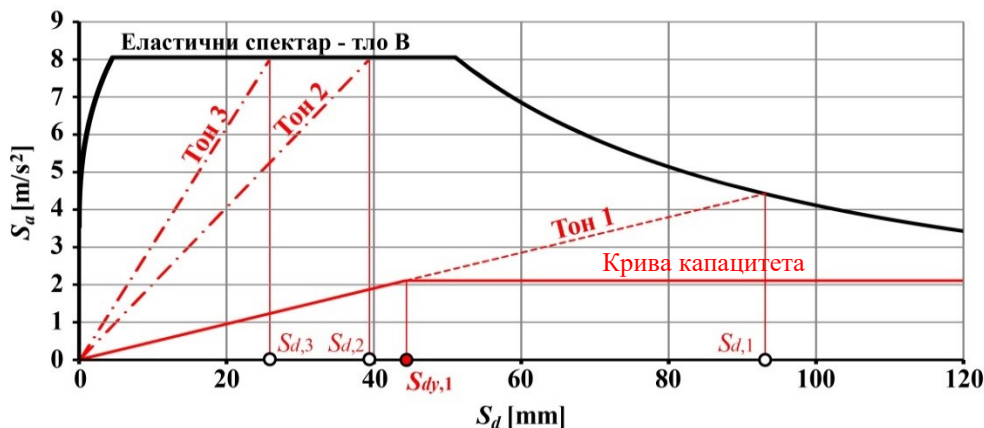
У свим анализираним случајевима, еластични период осциловања за први тон еквивалентног SDOF система,  $T^*$ , већи је од  $T_C$  ( $T^* > T_C$ ), што значи да важи правило једнаких померања [16], тј. да је  $S_{d,1} = S_{de,1}$  (слике 8, 9 и 10). Због тога није потребно одређивати нееластични спектар одговора. Ако се упореде вредности  $S_{d,1}$  за сва три случаја ослањања, види се да захтев за нееластичним померањем у првом, доминантном, тону расте са флексибилношћу ослањања, тј.  $S_{d,1}^1 < S_{d,1}^2 < S_{d,1}^3$  (редом за сценарије 1-3).

Померања тачака дуж осе моста добијају се конвертовањем нееластичног захтева  $S_{d,n}$  за тон  $n$ , из нееластичног SDOF система у MDOF систем:  $u_{i,n} = S_{d,n} \Gamma_n \phi_{i,n}$ , а укупно померање у тачки  $i$ , као и силе смицања у бази, се добијају применом SRSS правила  $u_i = \left( \sum_n u_{i,n}^2 \right)^{1/2}$ .

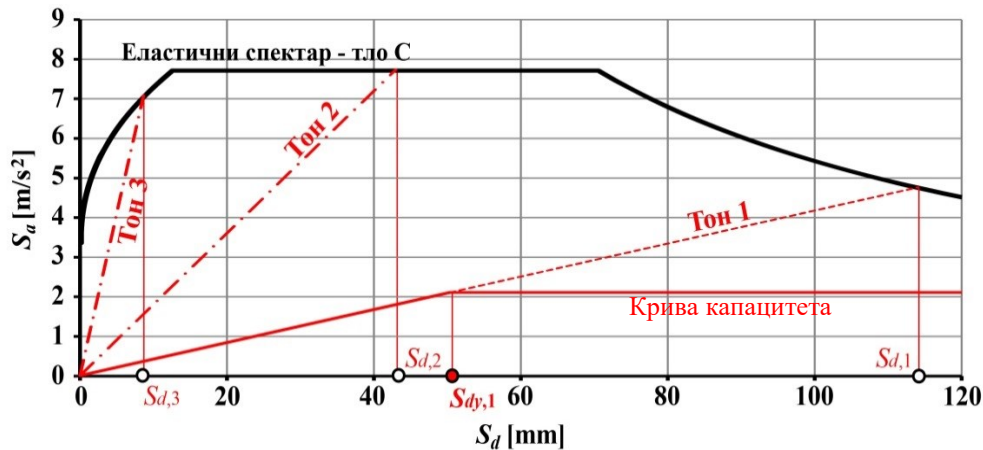
Циљно померање у референтној тачки и силе смицања у бази моста  $V_b$ , за сва три сценарија дате су у Табели 5.



Слика 8. Спектар одговора за тло В и криве капацитета за прва три тона, сценарио 1 - крута база



Слика 9. Спектар одговора и криве капацитета за прва три тона, сценарио 2 - флексибилна база, тло типа В



Слика 10. Спектар одговора и криве капацитета за прва три тона, сценарио 3 - флексибилна база, тло типа С

Табела 5. Померање референтне тачке  $u_r$  и силе смицања у бази  $V_b$ , са релативним разликама у односу на сценарио 1 – крута база

Сценарио	Тип тла	$u_r$ [mm]	$\Delta u$ [%]	$V_b$	$\Delta V_b$ [%]
1	В	133.4	-	25624	-
2	В	173.5	30.1	25538	-0.3
3	С	212.8	59.5	25439	-0.7

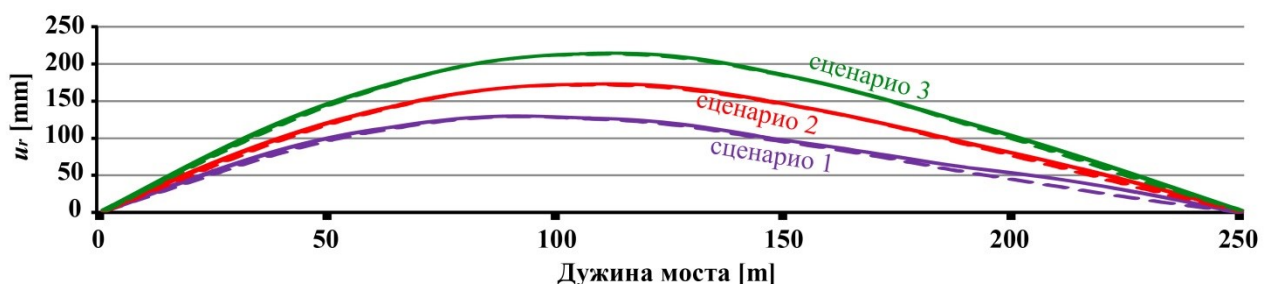
На слици 11 приказани су дијаграми резултујућег нееластичног померања моста  $u$ , за сва три сценарија (пуне линије), заједно са дијаграмима померања добијеним узимањем у обзир само првог тона (испрекидане линије). Очигледно је да је удео првог тона у укупном одговору конструкције доминантан, и да мала нерегуларност у геометрији моста нема утицаја, тј. да виши тонови немају значајну улогу у одређивању нелинеарног капацитета конструкције моста.

Померања конструкције за случајеве флексибилног ослањања су већа него у случају круто укљештених стубова, што је последица ротације темеља фундираних на еластичној подлози. Померање референтне тачке за сценарио 2 је за 30.1%, а за сценарио 3 је за 59.5%, веће од

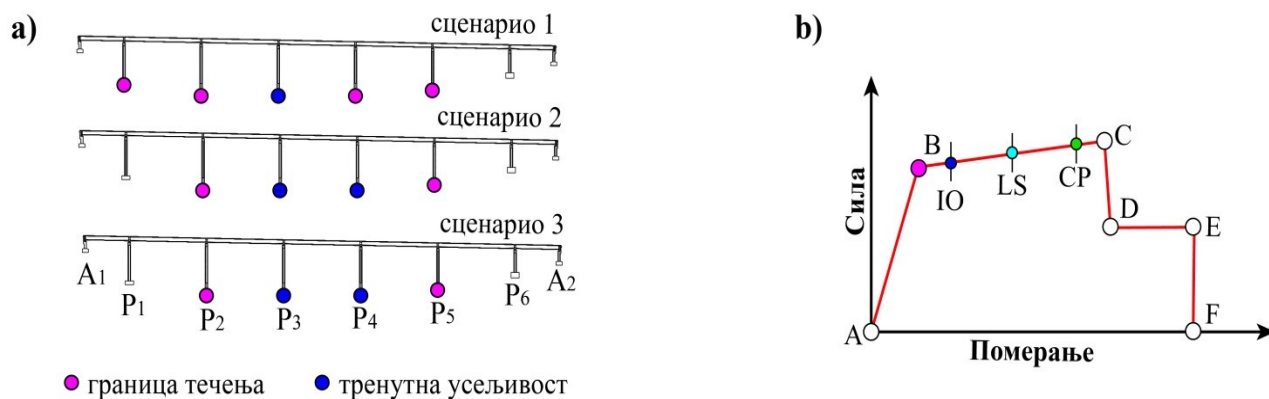
померања референтне тачке за круто укљештену конструкцију, Табела 5.

Распоред пластичних зглобова у стубовима је добијена оптерећивањем моста попречним силама које су пропорционалне првом тону осциловања, до максималног померања контролне тачке у првом тону  $u_{MP,i}$  у сваком сценарију  $i$ . На слици 12 приказан је распоред пластичних зглобова добијених у SAP2000.

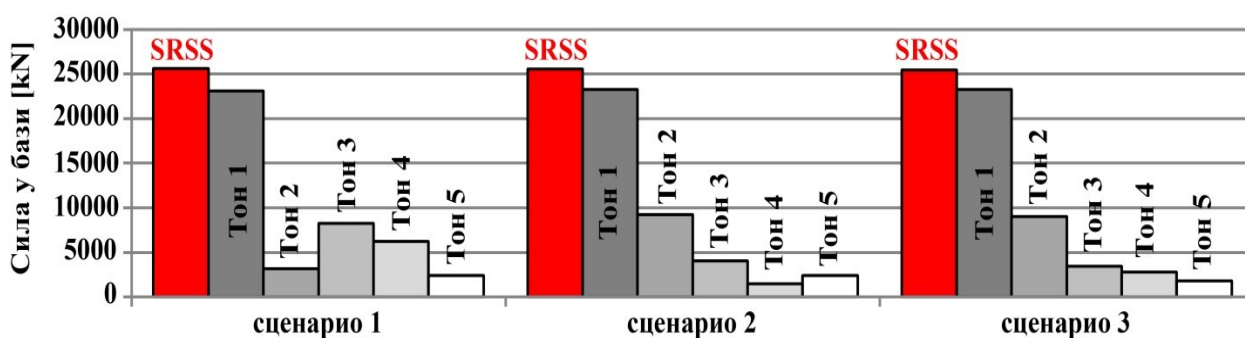
Код модела са крутом базом пластични зглобови се формирају у стубовима S1-S5, док се код модела са флексибилном базом пластични зглобови јављају у стубовима S2-S5. Ни у једном случају није исцрпљен гранични капацитет стубова, тачка С на слици 12b. Стубови су достигли гранично стање, тачка В, тј. стање тренутне употребљивости, тачка ЈО, слика 12b.



Слика 11. Дијаграм нееластичних попречних померања за сва три сценарија: пуна линија – сви тонови (MPA), испрекидана линија – први тон (SPA)



Слика 12. а) Распоред пластичних зглобова за сва три сценарија; б) различита стања деформације у пластичним зглобовима [14]



Слика 13. Силе смицања у бази по тоновима и укупна вредност добијена SRSS комбинацијом, за сва три разматрана сценарија

Дакле, иако је конструкција у случајевима са флексибилном базом нагуравана до знатно већег циљног померања, пластични зглобови су се формирали у мањем броју стубова. Оба крајња стуба нису претрпела пластичне деформације, што значи да SSI има извесан позитиван ефекат на одговор конструкције.

На слици 13 приказана је расподела силе смицања у основи моста по тоновима, као и укупна сила добијена применом SRSS правила. Сила смицања у основи моста услед SSI је 0.3% односно 0.7% мања у односу на силу смицања која се добија за круту базу (Табела 5), тако да се може рећи да је утицај интеракције тла и објекта на силу смицања у бази, у овом случају занемарљив.

### 7. ЗАКЉУЧАК

У раду су приказани резултати мултимодалне pushover анализе (МРА) АБ моста на реци Нишави. Утицај интеракције тла и конструкције фундиране на плитким темељима је узет у обзир. Разматрана су 3 могућа случаја ослањања: (1) крута база на тлу типа В, (2) флексибилна

база, тло типа В и (3) флексибилна база, тло типа С. За хоризонталну компоненту сеизмичког дејства одабрани су еластични спектри Типа 2 за тло типа В (сценарио 1 и 2), односно за тло типа С, сценарио 3, према EN1998-1. Конструкција је изложена убрзању у попречном правцу које је три пута веће од пројектног ( $a_g=0.3g$ ). На основу прелиминарне SPA анализе за круто укљештену конструкцију, положај резултанте модалног оптерећења у првом тону осциловања је усвојен за контролну тачку. Сеизмички захтев (циљно померање и сила смицања у бази) је одређен применом МРА узимајући у обзир пет тонова осциловања у попречном правцу, за које је укупни фактор модалне партиципације већи од 80%. Распоред пластичних зглобова је одређен за добијено циљно померање применом расподеле оптерећења која је пропорционална првом тону осциловања.

На основу спроведене студије изведени су следећи закључци:

1. Основни тон осциловања има највећи допринос у одговору конструкције – померање и силу смицања у бази, тако да је SPA анализа у овом случају оправдана;

2. Ефекат тла повећава циљно померање за 30% (сценарио 2), односно 59.5% (сценарио 3);
3. Ефекат SSI на силу смицања у бази је занемарљив;
4. Код модела са крутом базом пластични зглобови се јављају у основи стубова P1-P5, док се код флексибилног ослањања пластични зглобови јављају у стубовима P2-P5, што указује на позитиван ефекат интеракције тла и конструкције;
5. Констатује се да је приликом пројектовања применом парцијалних коефицијената сигурности, минималних процената армирања и конзервативних захтева везаних за извијање подужних шипки арматуре, према тада важећим српским стандардима, постигнут велики коефицијент сигурности на дејство земљотреса.
6. Иако је конструкција изложена три пута већем сеизмичком дејству није достигнут гранични капацитет конструкције, тј. не долази до појаве лома, ни локалног, ни глобалног.

Мост на Нишави, иако у кривини, је мостовска конструкција са распоредом стубова и понашањем при нелинеарној статичкој анализи које се може окарактерисати као регуларно, тако да је SPA била довољна за процену понашања на дејство земљотреса. Међутим, примена SPA код мостова сложеније конфигурације захтева пажљиву процену. Поређењем резултата добијених нелинеарном статичком анализом са резултатима добијеним нелинеарном динамичком анализом за мостове различите конфигурације, Fischinger, Isakovic и Kante [17] дошли су до закључка да поред регуларности мостова, и интензитет земљотресног оптерећења, као и крутости стубова утичу на облик померања и положај контролне тачке, а самим тим и на резултате pushover, односно, N2 анализе.

Фундирање на плитким темељима, као и релативно мала висина стубова, учинили су ефекте интеракције тла и конструкције, у овом случају, занемарљивим. Међутим, у случају вијадуката са високим и витким стубовима, фундарања на дубоким темељима у меком тлу, треба бити крајње обазрив и утицај SSI узети у обзир.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] EN 1998-1 - Design of structures for earth-quake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. CEN, Brussels, Belgium, 2006.
- [2] EN 1998-2 - Design of structures for earthquake resistance - Part 2: Bridges. CEN, Brussels, Belgium, 2006.
- [3] S.A. Freeman. Review of the development of the capacity spectrum method, ISET Journal of Earthquake Technology, 41, 2004, 1-13.
- [4] P.Fajfar. Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, 1999, 979-992.
- [5] G. Mylonakis, G. Gazetas. Seismic soil-structure-interaction: beneficial or detri-mental?, *Journal of Earthquake Engineering*, 4, 2000, 277-301.
- [6] R. Pinho, C. Casatotti, S. Antoniou. A compa-ri-son of single-run pushover analysis techni-ques for seismic assessment of bridges, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36, 2007, 1347-1326.
- [7] T.S. Paraskeva, A.J. Kappos, A.G. Sextos. Extension of modal pushover analysis to seismic assessment of bridges, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35, 2006, 1269-1293.
- [8] A.K. Chopra, R.K. Goel. A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 2002, 561-582.
- [9] T. Isakovic, M. Fischinger. Higher modes in simplified inelastic analysis of single column bent viaducts, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35, 2006, 95-114
- [10] T.S. Paraskeva, A.J. Kappos. Further development of a multimodal pushover analysis procedure for seismic assessment of bridges, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39, 2010, 211-222.
- [11] Ž.Ličina, Z.Kovrljija. Main Design of Nišava Bridge. Institute of Transportation CIP, Belgrade, Serbia, 2010.
- [12] NIST GCR 12-917-21: Soil-Structure Intera-ction for Building Structures, Report of the National Institute of Standards and Technology (NIST) under the National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP), U.S. Department of Commerce, 2012.
- [13] FEMA 440: Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA, 2005.
- [14] FEMA 356: Prestandard and commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA, 2000.

- [15] M. Petronijević, M. Marjanović, D. Milojević. Pushover analysis for seismic assessment of RC Nišava bridge. 16th European Conference on Earthquake Engineering – 16ECEE, Thessaloniki, Greece, 2018, paper 10906.
- [16] P. Fajfar, P. Gašperšič, D. Drobnič. A simplified nonlinear method for seismic damage analysis of structures. International Workshop: Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes, Bled, Slovenia, 1997, 183–194.
- [17] M. Fischinger, T. Isakovic, P. Kante. Application of the simplified nonlinear - N2 method for some common types of RC structures, *Skopje Earthquake - 40 Years Of European Earthquake Engineering*, SE-40EEE, Ohrid, Macedonia, 2003.