

Primljen / Received: 10.1.2017.

Ispravljen / Corrected: 12.5.2019.

Prihvaćen / Accepted: 30.5.2019.

Dostupno online / Available online: 10.2.2020.

Utjecaj tarnog prigušivača na seizmički odziv konstrukcije s obzirom na međudjelovanje konstrukcije i tla

Autori:



Sanket S. Sanghai, dipl.ing.građ.
Tehnički fakultet G.H. Raisoni, Nagpur
Odjel za građevinarstvo
sanket.sanghai@raisoni.net
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Prashant Y. Pawade**, dipl.ing.građ.
Tehnički fakultet G.H. Raisoni, Nagpur
Odjel za građevinarstvo
prashant.pawade@raisoni.net

Prethodno priopćenje

Sanket S. Sanghai, Prashant Y. Pawade

Utjecaj tarnih prigušivača na seizmički odziv konstrukcije s obzirom na međudjelovanje konstrukcije i tla

U ovom se radu analizira utjecaj međudjelovanja konstrukcije i tla (SSI) na sustav s jednim stupnjem slobode, s tarnim prigušivačem i bez njega. Konstrukcija s različitim vrijednostima mase, krutosti i uvjeta tla pripremljena je i analizirana za deset različitih potresa. Na temelju nelinearnog proračuna s vremenskim zapisom, analiziran je odziv konstrukcije s jednim stupnjem slobode pri raznim vrijednostima kliznog opterećenja tarnog prigušivača. Utvrđeno je da parametri tla utječu na ponašanje tarnog prigušivača. Osim toga, uočeno je da se vrijednosti optimalnog kliznog opterećenja i krutosti ukruta mijenjaju ovisno o vrsti tla.

Ključne riječi:

tarni prigušivač, međudjelovanje tla i konstrukcije, klizno opterećenje

Research Paper

Sanket S. Sanghai, Prashant Y. Pawade

Effectiveness of friction dampers on seismic response of structure considering soil-structure interaction

The effect of soil structure interaction (SSI) on a single degree of freedom system with and without friction damper is analysed in the paper. The structure with different mass, stiffness and soil conditions was prepared and analysed for ten different earthquake records. Using the non-linear time history analysis, the structural response of a single degree of freedom structure with varying slip load of friction damper was studied. It was observed that the performance of friction dampers is influenced by soil parameters. Also, it was established that an optimum slip load and stiffness of brace changes with respect to the type of soil.

Key words:

friction damper, soil-structure interaction, slip load

Vorherige Mitteilung

Sanket S. Sanghai, Prashant Y. Pawade

Einfluss des Reibungsdämpfers auf das seismische Verhalten von Konstruktionen in Bezug auf das Zusammenspiel von Konstruktion und Boden

In dieser Abhandlung wird der Einfluss des Zusammenspiels von Konstruktion und Boden (SSI) auf einen einzelnen Freiheitsgrad analysiert, mit und ohne Reibungsdämpfer. Eine Konstruktion mit unterschiedlichen Werten für Masse, Steifigkeit und Bodenbedingungen wurde vorbereitet und für zehn verschiedene Erdbeben analysiert. Aufgrund der nicht linearen Berechnung mit Zeitprotokoll wurde das Verhalten der Konstruktion mit einem Freiheitswert bei unterschiedlichen Werten der Gleitlast des Reibungsdämpfers analysiert. Festgestellt wurde, dass die Bodenparameter Einfluss auf das Verhalten des Reibungsdämpfers haben. Außerdem wurde festgestellt, dass die Werte der optimalen Gleitlast und der steifen Festigkeit mit der Bodenart variieren.

Schlüsselwörter:

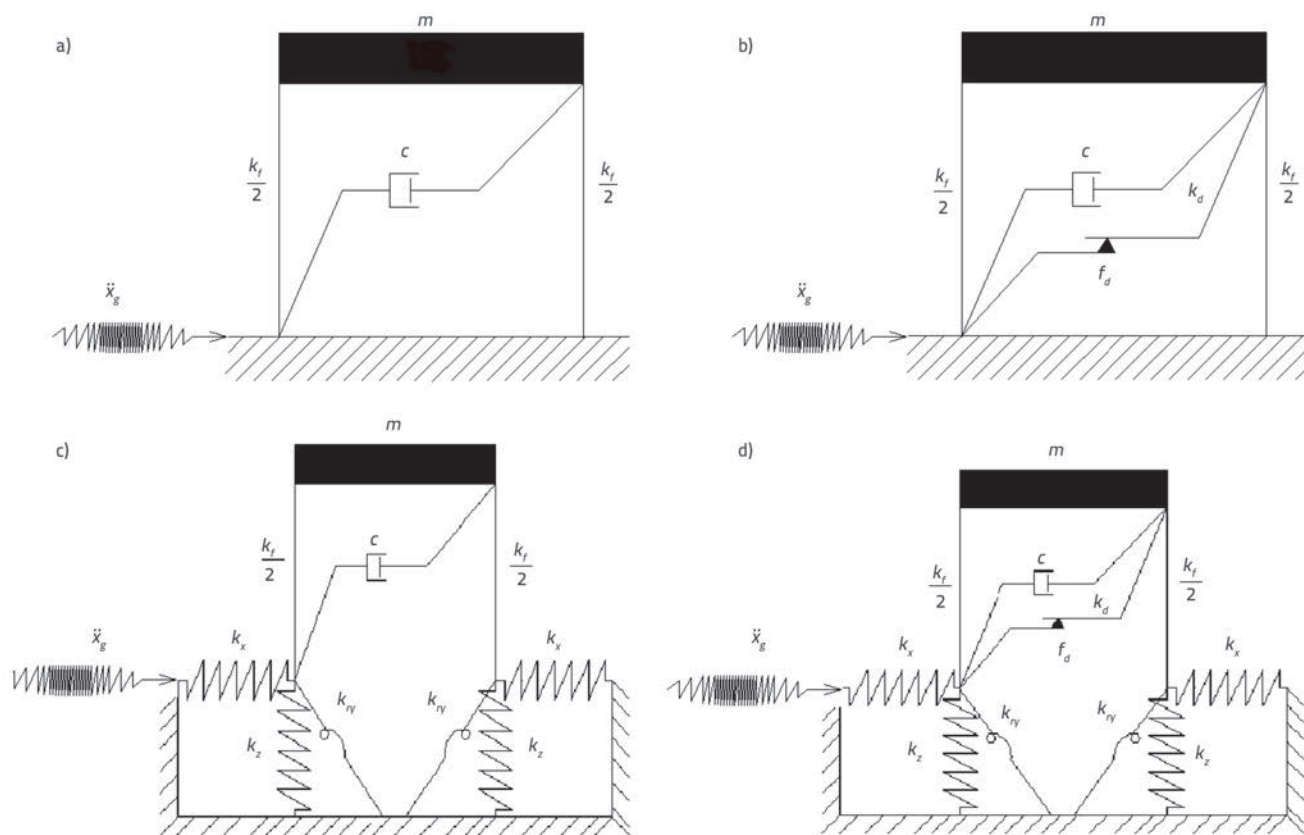
Reibungsdämpfer, Zusammenspiel von Boden und Konstruktion, Gleitlast

1. Uvod

U današnje se vrijeme za reguliranje seizmičkog odziva često koriste uređaji za pasivnu kontrolu. Jedan od uređaja za disipaciju energije je i tarni prigušivač (eng. *friction dampers* - FD) koji je neovisan o temperaturi. Pravokutne histerezne petlje uređaja te vrste omogućuju maksimalno disipaciju energije i po tome nadmašuju ostale uređaje. Do sada su provedene brojne studije o utjecaju tarnog prigušivača na kontrolu potresnih odziva raznih vrsta konstrukcija. Pall i Marsh [1] analizirali su postojeću devetokatnicu MRF (eng. *Moment Resisting Frame* - MRF) koja je modificirana ugradnjom podupora s tarnim prigušenjem. Uočeno je da se okvir s ugrađenim ukрутama s trenjem ponaša nelinearno izbjegavajući na taj način popuštanje elemenata okvira. Filiatrault i Cherry [2] ispitili su na potresnom stolu trokatnu okvirnu konstrukciju opremljenu tarnim prigušivačima. Kod tako opremljene konstrukcije nisu zabilježena nikakva oštećenja, pa čak ni kod primjene potresnog zapisa s vršnim ubrzanjem tla (eng. *peak ground acceleration* - PGA) od 0,9 g. Moreschi i Singh [3] analizirali su optimalno dimenzionirane tarne prigušivače. Nakon ispitivanja i analitičkih studija, uočeno je da učinkovitost takvih uređaja ovisi o optimalnim parametrima dimenzioniranja, tj. o razini kliznog opterećenja i o krutosti ukruta. Fallah i Honarparast [4] analizirali su optimalna klizna opterećenja tarnih prigušivača tipa Pall. Kako bi se ostvarili ciljevi, proveden je optimizacijski postupak baziran na algoritmu

NSGA-II. Naveet Kaur i dr. [5], Haider i Kim [6], Marianchik i dr. [7] i Min i dr. [8] istraživali su utjecaj tarnih prigušivača na seizmički odziv konstrukcija. Ustanovljeno je da klizno opterećenje značajno utječe na učinkovitost tarnih prigušivača.

Međutim, većina prethodnih istraživanja provedena je pod pretpostavkom krutih temelja, pri čemu se zanemario utjecaj međudjelovanja tla i konstrukcije na seizmički odziv konstrukcija. Mnoge su građevine izvedene na tlima s vrlo nepovoljnim uvjetima, gdje se itekako dobro treba analizirati međudjelovanje tla i same konstrukcije. Farhang i dr. [9] razmatrali su učinkovit pristup za procjenu točnog sustava prigušenja za sustave međudjelovanja SSI, što je pomoglo u određivanju utjecaja tla. Datta i dr. [10] analizirali su fleksibilnost nosivog tla koje omogućuje pomicanje temelja. Chore i Ingle [11] analizirali su međudjelovanje konstrukcije i tla (eng. *soil structure interaction* - SSI) na okvirnim konstrukcijama, te moguće poteškoće u primjeni temeljenja na pilotima. Hosseinzadeh i dr. [12] analizirali su utjecaj dinamičkog međudjelovanja tla i konstrukcije na seizmički odziv građevinskih konstrukcija s površinskim i ukopanim plutajućim temeljima i u tu su svrhu provodili ispitivanja na potresnom stolu na modelima u umanjenom mjerilu. Mnogi autori razmatrali su utjecaj dinamičkog međudjelovanja tla i konstrukcije na ponašanje građevina [13-17]. Ta su istraživanja pokazala da zbog međudjelovanja SSI dolazi do promjene dinamičkih svojstava građevine, što uključuje promjenu frekvencija, prigušenja, modalnih oblika



Slika 1. Matematički modeli: a) ogoljeni okvir bez SSI; b) FD okvir bez SSI; c) ogoljeni okvir sa SSI; d) FD okvir sa SSI

itd. Dakle, međudjelovanje SSI utječe na ponašanje tarnih prigušivača. Zanemarivanje utjecaja međudjelovanja SSI dovodi do nepravilne primjene tarnih prigušivača, što bi moglo uzrokovati podcjenjivanje ili precjenjivanje odziva konstrukcije. Zato se u istraživanju ponašanja tarnih prigušivača treba uzeti u obzir međudjelovanje SSI. U ovom je radu za istraživanje učinkovitosti tarnih prigušivača u raznim uvjetima tla odabran sustav s jednim stupnjem slobode.

2. Definiranje problema

Jednadžbe gibanja konstrukcije s jednim stupnjem slobode opremljene pasivnim uređajima za disipaciju energije, za slučaj pobude tla do koje dolazi u podnožju građevine, mogu se iskazati kako slijedi:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + k_f x(t) + f_d \operatorname{sgn} \dot{x}(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

gdje su m , c , i k_f masa, koeficijent viskoznog prigušenja i krutost sustava; $x(t)$, $\dot{x}(t)$ i $\ddot{x}(t)$ su pomak, brzina i ubrzanje sustava; f_d i $m\ddot{x}_g(t)$ su sila trenja prigušivača i vanjsko opterećenje, $\operatorname{sgn}\dot{x}(t)$ je signum funkcija definirana kao -1 , 0 i 1 , za slučaj $\dot{x}(t) < 0$, $\dot{x}(t) = 0$ i $\dot{x}(t) > 0$ [8, 24]. Točno rješenje jednadžbe (1) ovisi o obliku vanjskog opterećenja. U ovom se radu analiziraju četiri vrste modela. Prva dva modela nemaju tarni prigušivač a imaju fiksne ukrute, dok je tlo modelirano u vidu opruga. Druga dva modela imaju tarni prigušivač i fiksne ukrute, a tlo je modelirano u obliku opruga, slika 1.

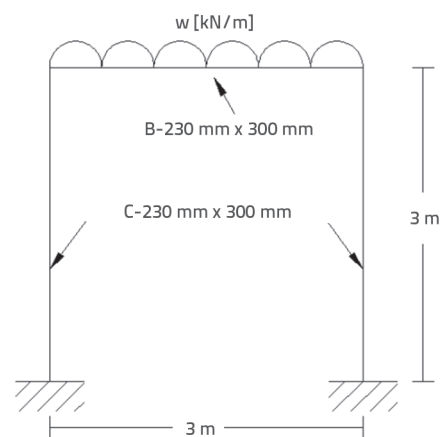
2.1. Idealizacija konstrukcije

U ovom se radu analizira jednorasponski jednokatni AB okvir koji je prikazan na slici 2. Okvir je pretvoren u sustav koncentriranih masa nakon izračunavanja krutosti i mase primjenom osnovnih postupaka iz dinamike konstrukcija. Modul elastičnosti izračunan je prema IS 456:2000 jer je korišten beton klase C 20/25. Usvojeno je da je vlastita težina greda i stupova jednaka nuli, a dodatno opterećenje da je izvor mase. Veličina grede i stupa iznosi 230 mm x 300 mm, a duljina raspona i visina kata 3 m. Za idealizaciju konstrukcije korišten je model krute dijafagme s jednim translacijskim stupnjem slobode. Masa sustava (m) koncentrirana je na razini kata. Poduporni stupovi osiguravaju krutost (k_f), a inherentno prigušenje (c) definirano je kao 5 %.

Tablica 2. Parametri tla odabrani iz literature [22, 23] i korišteni u drugim radovima [10, 20]

Vrsta tla	Vrijednost N	C [kN/m ²]	φ [°]	γ_{sat} [kN/m ³]	C_c	e_0
Žitko tlo	1	9,8	0,0	13,5	0,279	1,2
Gnječivo tlo	3	18,5	0,0	17,0	0,189	0,90
Srednje stišljivo tlo	6	36,8	0,0	18,5	0,135	0,72
Polučvrsto tlo	12	73,5	0,0	19,4	0,12	0,67

N - broj udara kod SPT pokusa, C - vrijednost kohezije, φ - kut unutarnjeg trenja, γ_{sat} - gustoća u zasićenom stanju, C_c - koeficijent stišljivosti, e_0 - početni koeficijent pora



Slika 2. AB okvir korišten u ovom istraživanju

Svojstva sustava s jednim stupnjem slobode, izračunana na temelju AB okvira, prikazana su u tablici 1.

Tablica 1. Svojstva sustava s jednim stupnjem slobode

Dodatno opterećenje kao UDL(w) [kN/m]	20	25	30
Masa sustava (m) [kNs ² /m]	6,116	7,648	9,174
Ekvivalentna krutost okvira (k_f) [kN/m]	16333,33		
Inherentno prigušenje (c)	5 % od kritičnog		

2.2. Idealizacija tla

Dimenzije temelja izračunane su iz sigurne nosivosti tla pomoću svojstava koja su prikazana u tablici 2. Tlo je modelirano pomoću tri translacijske opruge (k_x , k_y i k_z) i tri rotacijske opruge (k_{rx} , k_{ry} i k_{rz}) kako je to prikazano na slici 1. Provedena su brojna istraživanja [18, 19] kako bi se ocijenila krutost tih opruga. Izrazi za takvu krutost opruga, navedeni u literaturi [19], prikazani su u tablici 3. Pristup je isti kao i u drugim radovima [10, 20]. Za proračun modula posmika (G) primjenjuje se empirijski odnos $G = 12870 \cdot N^{0,8}$ kN/m² [10, 21], gdje je N broj udara u standardnom penetracijskom pokusu (eng. *standard penetration test* - SPT). Usvojeno je da Poissonov koeficijent iznosi 0,5 za sve uvjete tla.

Tablica 3. Izrazi za krutost ekvivalentnih opruga za razne stupnjeve slobode prikazani u literaturi [19] i korišteni u drugim radovima [10, 20]

Stupanj slobode	Krutost ekvivalentne opruge tla
Vertikalna	$[2GL/(1-v)](0,73+1,54\chi^{0,75})$ gdje je $\chi=A_b/4L^2$
Horizontalna (bočni smjer)	$[2GL/(2-v)](2+2,50\chi^{0,85})$ gdje je $\chi=A_b/4L^2$
Horizontalna (uzdužni smjer)	$[2GL/(2-v)](2+2,50\chi^{0,875})-[0,2/(0,75-v)]GL[1-(B/L)]$ gdje je $\chi=A_b/4L^2$
Njihanje (uzdužno)	$[G/(1-v)]I_{bx}^{0,75}(L/B)^{0,25}[2,4+0,5(B/L)]$
Njihanje (poprečno)	$[3G/(1-v)]I_{by}^{0,75}(L/B)^{0,15}$
Torzija	$3,5G_{bz}^{0,75}(B/L)^{0,4}(I_{bz}/B^4)^{0,2}$

A_b - površina analiziranog temelja; B i L - pola širine i pola dužine pravokutnih temelja; I_{bx} , I_{by} i I_{bz} - moment tromosti površine temelja u odnosu na uzdužnu, poprečnu i vertikalnu os

2.3. Idealizacija tarnih prigušivača

Tarni prigušivač (eng. *friction dampers* - FD) modeliran je prema pretpostavkama iz Coulombovog zakona trenja [24]. Wenov je model [25] korišten za modeliranje tarnih prigušivača, jer je ponašanje tarnih prigušivača u osnovi elastoplastično.

Tablica 4. Svojstva tarnih prigušivača

Klizno opterećenje (f_d) [kN]	5	10	15	20	25	30
Krutost ukrute (k_d) [kN/m]	47140		64442		86550	
	(ISLC100)		(ISLC125)		(ISLC150)	
Koeficijent krutosti nakon popuštanja	0.0001					
Eksponent popuštanja	10					

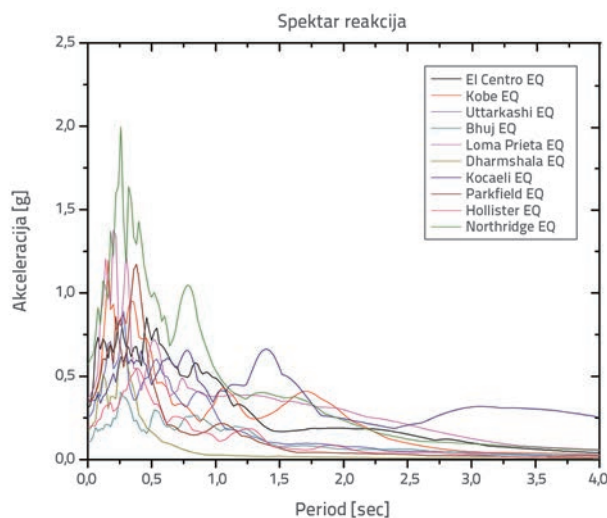
Tablica 5. Seizmički zapisi korišteni u proračunu

Red. br.	Potres	PGA	Trajanje	Red. br.	Potres	PGA	Trajanje
1.	El Centro EQ	0,313 g	40,00 s	6.	Dharmshala EQ	0,175 g	16,18 s
2.	Kobe EQ	0,344 g	40,90 s	7.	Kocaeli EQ	0,349 g	34,96 s
3.	Uttarkashi EQ	0,252 g	36,16 s	8.	Parkfield EQ	0,357 g	30,33 s
4.	Bhuj EQ	0,106 g	133,53 s	9.	Hollister EQ	0,198 g	39,93 s
5.	Loma Prieta EQ	0,367 g	39,90 s	10.	Northridge EQ	0,568 g	39,88 s

Razmatrana je samo nelinearnost tarnih prigušivača, a za ostale elemente sustava usvojeno je elastično ponašanje. Za modeliranje tarnih prigušivača usvojeno je klizno opterećenje (f_d) i krutost ukrute (k_d). Tarni prigušivači postavljeni su za tri vrste čeličnih profila: ISLC100, ISLC125 & ISLC 150. Krutost poprečnog presjeka ukrute izračunana je na temelju svojstava čeličnih profila prema indijskoj tablici čelika. Svojstva tarnog prigušivača korištenog u ovom radu prikazana su u tablici 4.

2.4. Analitička metoda

Provedena je modalna analiza kako bi se ustanovilo osnovno razdoblje sustava. Da bi se grafički iskazalo ponašanje tarnih prigušivača, primijenjena je metoda rješavanja vremenskom diskretizacijom. U nelinearnom su proračunu korišteni zapisi o gibanju tla tijekom deset potresa. Svojstva seizmičkih zapisa prikazana su u tablici 5., a spektri odziva na slici 3.



Slika 3. Spektri odziva razmatranih potresa

3. Rezultati i rasprava

Prethodne su studije pokazale da međudjelovanje tla i konstrukcije značajno utječe na seizmički odziv građevina. Stoga se ponašanje građevina tijekom potresa može potpuno krivo razumjeti ako se taj utjecaj izostavi iz analize.

Tablica 6. Osnovni vremenski period konstrukcije s jednim stupnjem slobode

	Masa [kNs ² /m]	Krutost [kN/m]	Osnovni vremenski period [s]				
			Bez SSI	Sa SSI			
				Polučvrsto tlo	Srednje stišljivo tlo	Gnječivo tlo	Žitko tlo
Goli okvir (okvir bez tarnog prigušivača)	6,116	16333,33	0,124	0,126	0,127	0,131	0,140
	7,648	16333,33	0,138	0,141	0,142	0,146	0,157
	9,174	16333,33	0,152	0,155	0,156	0,160	0,172
Okvir s tarnim prigušivačem	6,116	38290	0,079	0,084	0,087	0,093	0,109
	7,648	38290	0,089	0,094	0,097	0,104	0,122
	9,174	38290	0,097	0,103	0,107	0,114	0,133

Isto tako, tarni prigušivači često se koriste i dimenzioniraju za poboljšanje seizmičkog odziva a da se pritom ne uzima u obzir taj utjecaj. Stoga se u ovom radu uglavnom razmatraju tri parametra – vršna poprečna sila u podnožju zgrade, vršni pomak najgornjega kata i postotak disipacije energije – kako bi se odredio utjecaj međudjelovanja konstrukcije i tla na ponašanje tarnih prigušivača. Osnovni je cilj ovog istraživanja smanjiti vršnu poprečnu silu u podnožju zgrade i pomak uz istovremeno postizanje maksimalne disipacije energije. Kako bi se odredio optimalni raspon kliznog opterećenja i krutosti ukrute, razmatraju se sljedeće tri funkcije za razne uvjete tla:

$$f_1 = \text{minimize} \left(\frac{R_{\max,c}}{R_{\max,u}} \right) \quad (2)$$

$$f_2 = \text{minimize} \left(\frac{u_{\max,c}}{u_{\max,u}} \right)_{\text{top}} \quad (3)$$

$$f_3 = \text{minimize} \left(\frac{E_{\max,c}}{E_{\max,u}} \right) \quad (4)$$

gdje su $R_{\max,c}$, $u_{\max,c}$, i $E_{\max,c}$ vršna poprečna sila u podnožju građevine, vršni katni pomak i histerezna energija nakon postavljanja prigušivača, dok su $R_{\max,u}$ - vršna poprečna sila u podnožju građevine, $u_{\max,u}$ - vršni katni pomak i $E_{\max,u}$ - histerezna energija prije postavljanja prigušivača. Sličan pristup usvojili su Fallah i Honarparast [4], Vaseghi i dr. [26] te Lee i dr. [27].

3.1. Osnovni vremenski period

Provedena je modalna analiza kako bi se provjerio utjecaj međudjelovanja tla i konstrukcije (SSI) i tarnih prigušivača na osnovni vremenski period konstrukcija. Rezultati dobiveni tijekom te analize prikazani su u tablici 6. U njoj je iskazana masa i krutost sustava. Za osnovni je okvir krutost izračunana

na temelju stupova, dok je efektivna krutost okvira s tarnim prigušenjem izračunana na temelju stupova s dodanom krutosti od poprečnih presjeka ukruta.

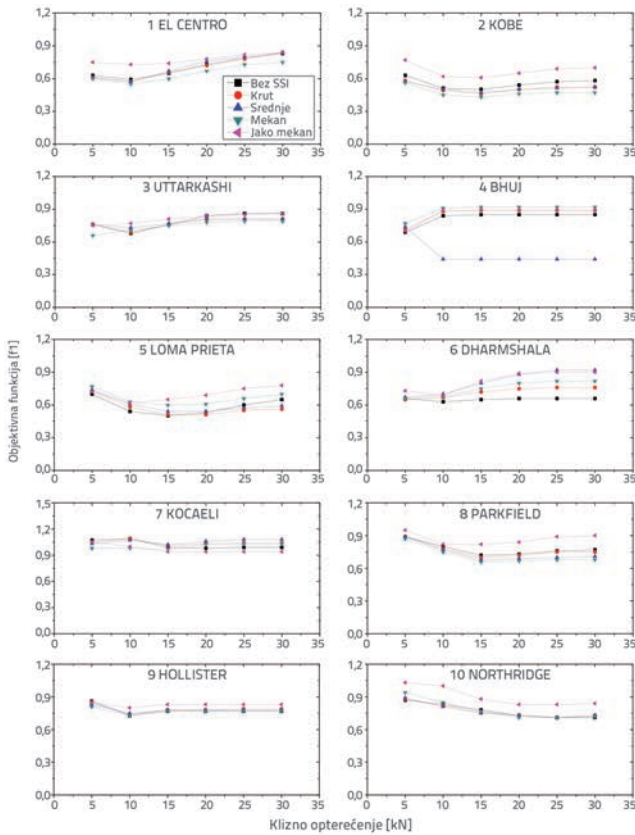
Osnovni period konstrukcije s jednim stupnjem slobode, s međudjelovanjem konstrukcije i tla i bez nje (sa SSI i bez SSI), prikazan je u tablici 6. Može se uočiti da se, u odnosu na osnovni okvir, vremenski period okvira s tarnim prigušivačem smanjuje s povećanjem krutosti ukruta. Također treba napomenuti da se vremenski period povećava s povećanjem mekoće tla ispod konstrukcije. To pokazuje da se dobro ponašanje ostvaruje i kod niske krutosti ukruta ako se ne uzme u obzir utjecaj međudjelovanja SSI. Međutim, ponašanje konstrukcije sigurno se mijenja kada se u analizu uključi utjecaj međudjelovanja SSI.

3.2. Vrijednosti objektivne funkcije

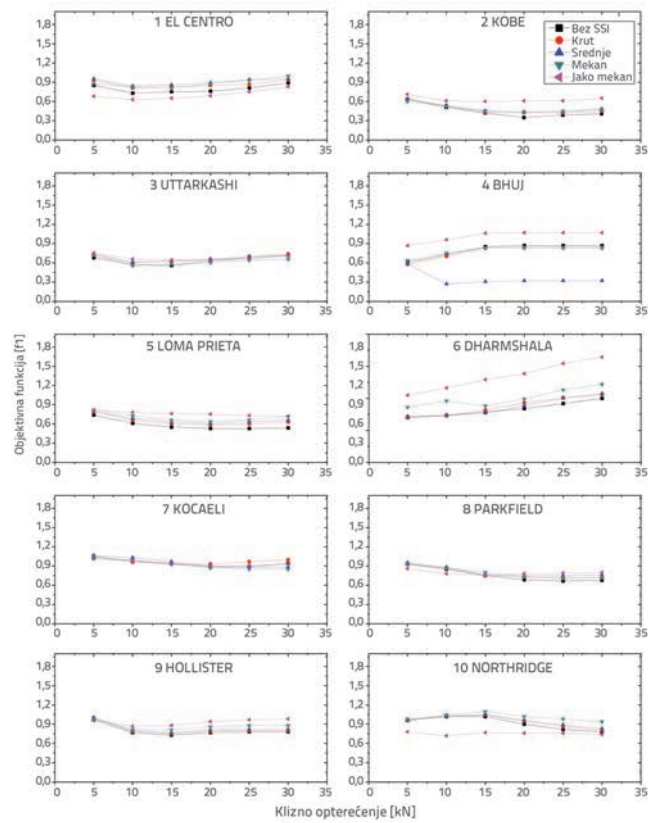
3.2.1. Odnos objektivne funkcije i vršne sile smicanja u bazi

Zadatak je objektivne funkcije f_1 smanjiti na minimum vrijednosti vršne poprečne sile u podnožju građevine. Rezultati koji se odnose na vršnu poprečnu silu u podnožju građevine prikazani su na slikama 4. do 6. za sustav s raznim vrijednostima mase: 6,116 kNs²/m, 7,648 kNs²/m, i 9,174 kNs²/m. Međutim, krutost ostaje konstantna i iznosi 38290 kN/m.

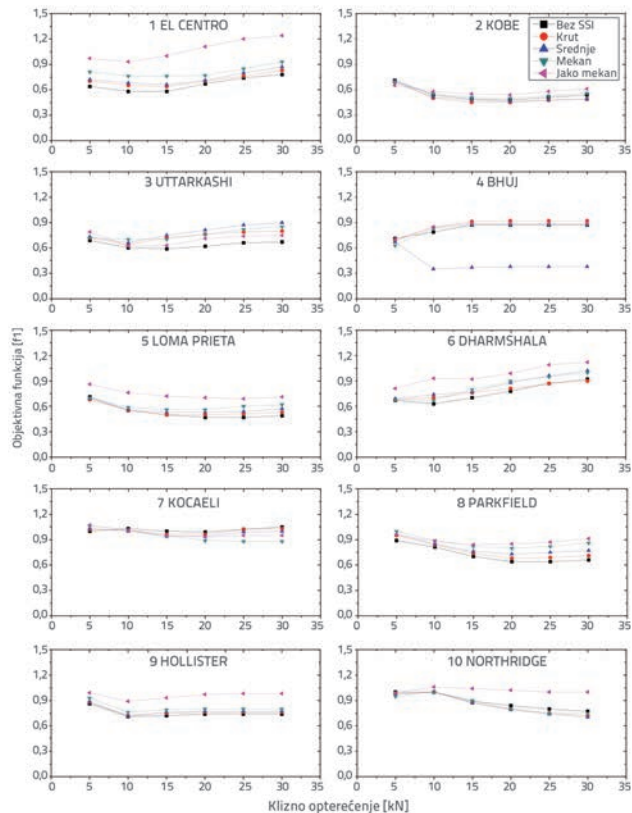
Vrijednosti objektivne funkcije (f_1) kojom se želi na minimum svesti vršna poprečna sila u podnožju građevine prikazane su na slikama od 4. do 6. Rezultati pokazuju da se minimalna vrijednost objektivne funkcije nalazi između kliznog opterećenja od 10 kN i 15 kN. Međutim, kod potresa s većim vršnim ubrzanjem tla, vrijednost kliznog opterećenja doseže i do 25 kN. Stoga se može reći da se optimalni raspon donekle mijenja ovisno o intenzitetu potresa i promjeni mase. Ipak, znatna promjena nastaje kada se u obzir uzme međudjelovanje SSI. Kako tlo postaje mekše, smanjuje se učinkovitost tarnih prigušivača pri optimalnom kliznom opterećenju. To ukazuje na potrebu vrednovanja utjecaja tla pri dimenzioniranju tarnih prigušivača.



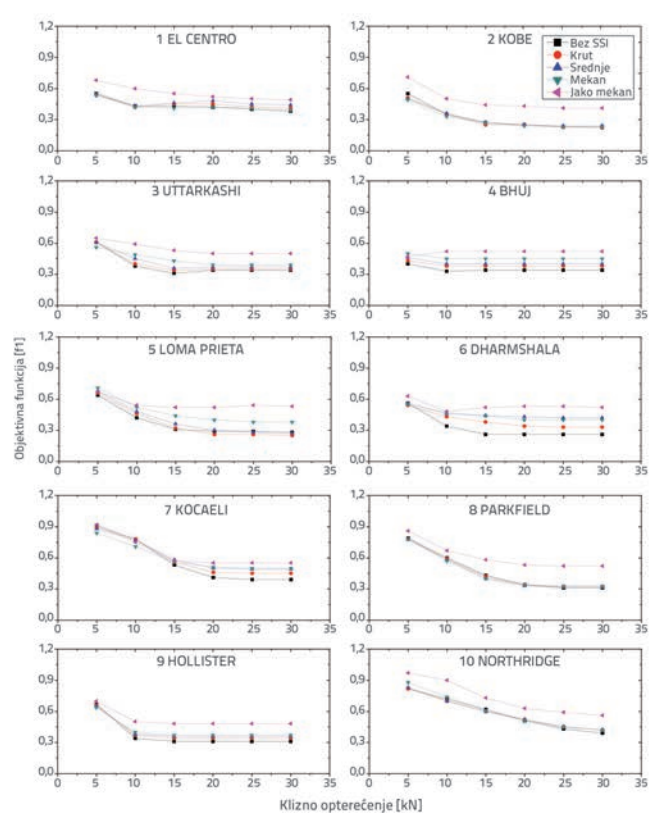
Slika 4. Objektivna funkcija (f_1): $m = 6,116 \text{ kNs}^2/\text{m}$, $k = 38290 \text{ kN/m}$



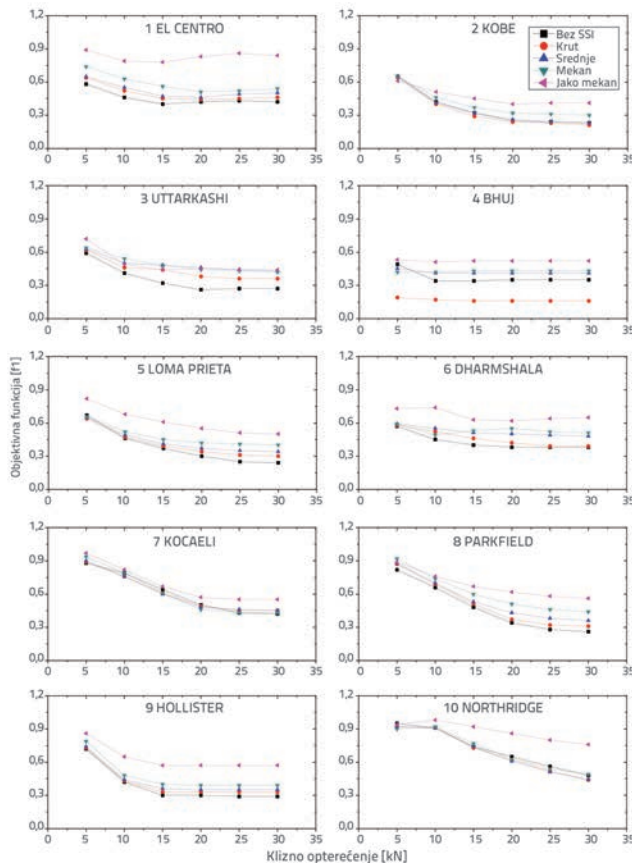
Slika 6. Objektivna funkcija (f_1): $m = 9,174 \text{ kNs}^2/\text{m}$, $k = 38290 \text{ kN/m}$



Slika 5. Objektivna funkcija (f_1): $m = 7,648 \text{ kNs}^2/\text{m}$, $k = 38290 \text{ kN/m}$



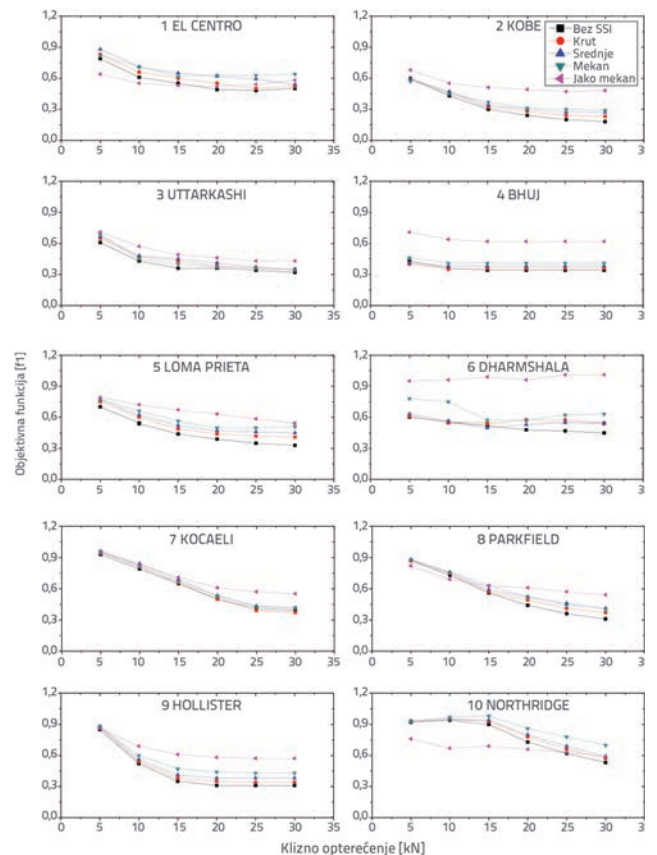
Slika 7. Objektivna funkcija (f_2): $m = 6,116 \text{ kNs}^2/\text{m}$, $k = 38290 \text{ kN/m}$

Slika 8. Objektivna funkcija (f_2): $m = 7,648 \text{ kNs}^2/\text{m}$, $k = 38290 \text{ kN/m}$

3.2.2. Odnos objektivne funkcije i vršnog katnog pomaka

Zadatak objektivne funkcije f_2 je svođenje vrijednosti vršnog katnog pomaka na minimum. Za analizu tog parametra proučava se sustav s jednim stupnjem slobode s vrijednostima mase 6,116 kNs²/m, 7,648 kNs²/m i 9.174 kNs²/m, te s konstantnom krutošću od 38290 kN/m. Varijacije objektivne funkcije prikazane su na slikama od 7. do 9.

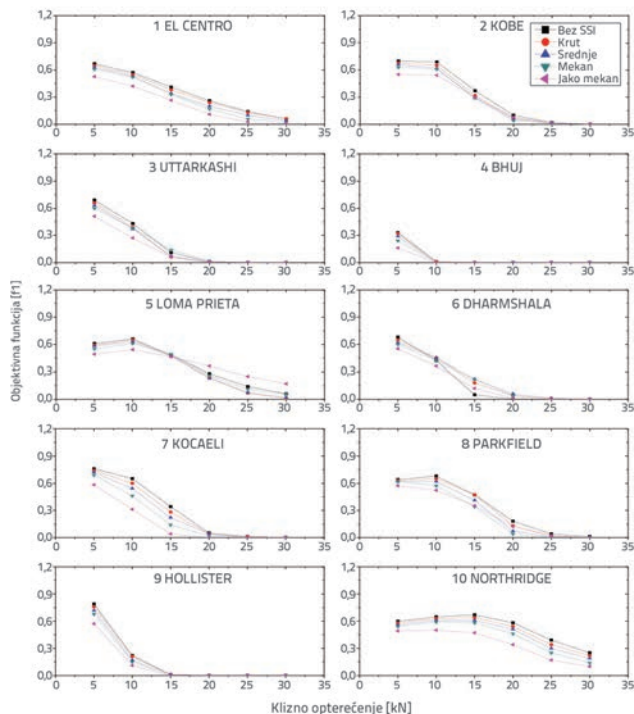
Vrijednosti objektivne funkcije f_2 kojom se želi na minimum svesti vršni pomak najgornjega kata prikazane su na slikama od 7. do 9. Vrijednost funkcije smanjuje se s povećanjem kliznog opterećenja tarnih prigušivača. Jasno je da se vrijednost funkcije smanjuje s porastom kliznog opterećenja i to zato što konstrukcija postaje kruća. Raspon optimalnog kliznog opterećenja za ovaj parametar varira od 10 kN do 15 kN, jer tarni prigušivač ne klizi kod kasnijih kliznih opterećenja. Kako aksijalna sila u tarnom prigušivaču ne prelazi vrijednost kliznog opterećenja, prigušivač djeluje kao poduporni element. To se može povezati s povećanjem vršne poprečne sile u podnožju građevine nakon optimalnog raspona kliznog opterećenja. Još jednom možemo vidjeti da se vrijednost funkcije povećava s povećanjem mekoće tla u svakom slučaju kod istog kliznog opterećenja. To svakako potvrđuje da tlo utječe na ponašanje tarnih prigušivača.

Slika 9. Objektivna funkcija (f_2): $m = 9,174 \text{ kNs}^2/\text{m}$, $k = 38290 \text{ kN/m}$

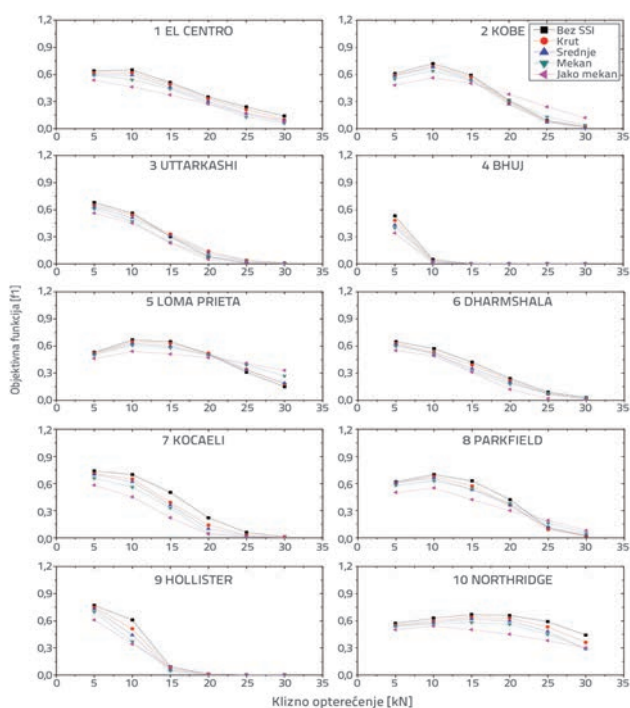
3.2.3. Odnos objektivne funkcije i disipacije energije

Zadatak objektivne funkcije f_3 je maksimalno povećanje postotka disipacije energije. I ovdje se za analizu parametra primjenjuje sustav s jednim stupnjem slobode s vrijednostima mase od 6,116 kNs²/m, 7,648 kNs²/m i 9,174 kNs²/m, te s konstantnom krutošću od 38290 kN/m. Varijacije objektivne funkcije f_3 prikazane su na slikama od 10. do 12.

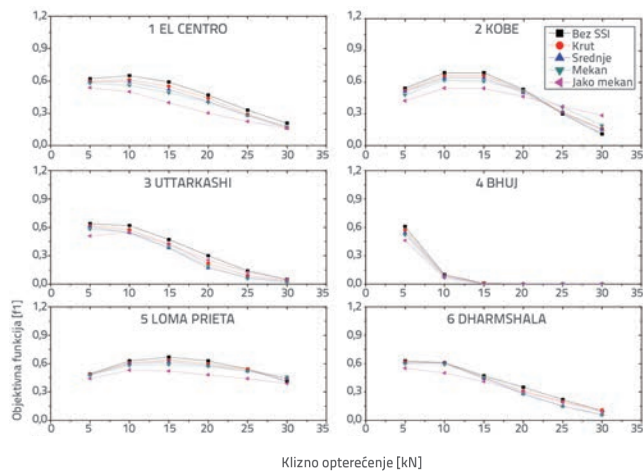
Potresne sile uvode ulaznu energiju u konstrukciju koja tu energiju treba raspršiti kroz modove. Međutim, zbog dodatnog prigušenja koje generira tarni prigušivač, glavina ulazne energije disipira se upravo pomoću trenja. Disipacija ulazne energije pomoću tarnih prigušivača prikazana je na slikama 10. do 12. Rezultati pokazuju da je disipacija energije postignuta pomoću tarnih prigušivača veća u optimalnom rasponu kliznih opterećenja, kod kojih je vršna energija smicanja na podnožju građevine minimalna. Optimalni raspon kliznih opterećenja za tarni prigušivač i ovdje varira od 10 kN do 15 kN. Osim toga, krutost je ukruta vrlo značajna za disipaciju. Može se uočiti da potresi različitih intenziteta u konstrukciju uvode različite vrijednosti ulazne energije, pa se tako isti tarni prigušivač može u svakom pojedinom slučaju ponašati drugačije. Osim toga, primijećeno je da primjena parametara tla bitno utječe na disipaciju energije pomoću tarnih prigušivača. Dakle, međudjelovanje tla i konstrukcije utječe na djelotvornost tarnih prigušivača.



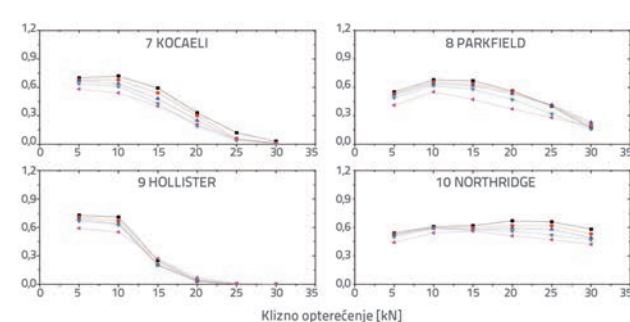
Slika 10. Objektivna funkcija (f_3): $m = 6,116 \text{ kNs}^2/\text{m}$, $k = 38290 \text{ kN/m}$



Slika 11. Objektivna funkcija (f_3): $m = 7,648 \text{ kNs}^2/\text{m}$, $k = 38290 \text{ kN/m}$



Slika 12. Objektivna funkcija (f_3): $m = 9,174 \text{ kNs}^2/\text{m}$, $k = 38290 \text{ kN/m}$



3.3. Usporedba odziva variranjem krutosti podupora

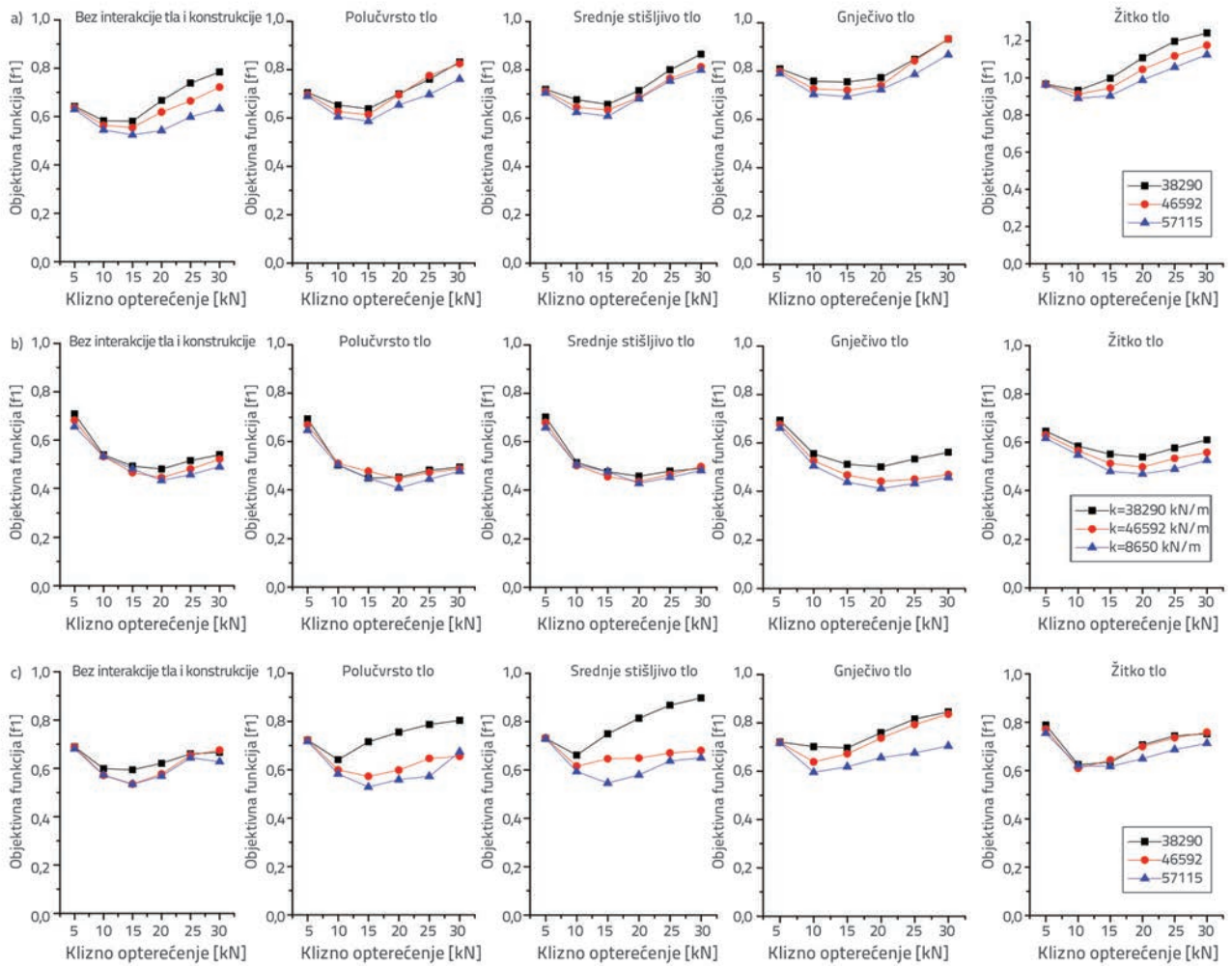
Za ukućivanje konstrukcije korištene su tri vrste profila kako bi se omogućila usporedba utjecaja krutosti. Analiziran je utjecaj na vršnu poprečnu silu u podnožju građevine, na vršni katni pomak te na učinkovitost disipacije energije pomoću tarnih prigušivača. Analiza je provedena za tri različite krutosti ukruta i za tri različite mase i to pomoću deset različitih seizmičkih zapisa. Odgovarajuće vrijednosti krutosti prikazane su na slikama od 13. do 15. za $m = 7,648 \text{ kNs}^2/\text{m}$.

Na slici 13. prikazana je vrijednost funkcije za vršnu poprečnu silu u podnožju građevine pri čemu su mijenjane krutosti ukruta.

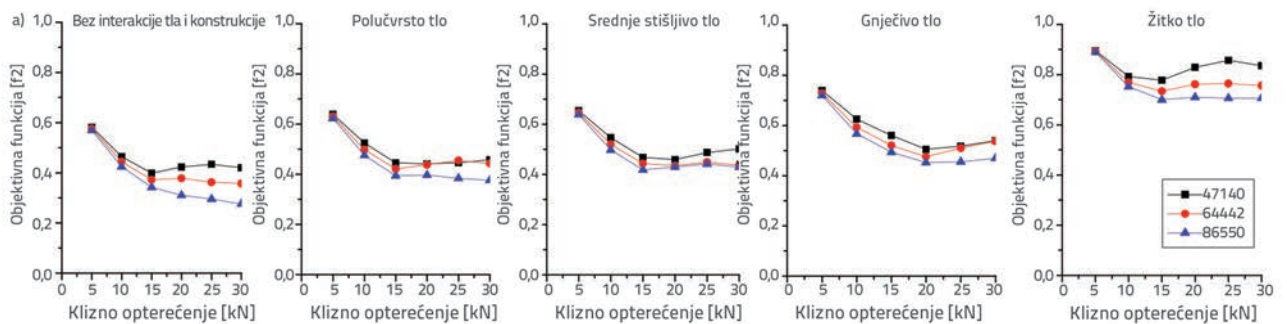
Cilj ovog istraživanja jest provjeriti utjecaj krutosti ukruta na odziv konstrukcija. Dijagrami pokazuju da promjena krutosti ukruta bitno utječe na odziv konstrukcije ako se u obzir uzima utjecaj međudjelovanja SSI.

Na slici 14. prikazana je vrijednost funkcije za vršni katni pomak pri čemu su mijenjane krutosti ukruta. Krutost konstrukcije raste s povećanjem krutosti ukruta. Stoga će se na taj način svakako smanjiti katni pomak. To se smanjenje jasno može uočiti na prikazanim dijagramima. Razlika se također smanjuje s povećanjem mekoće tla.

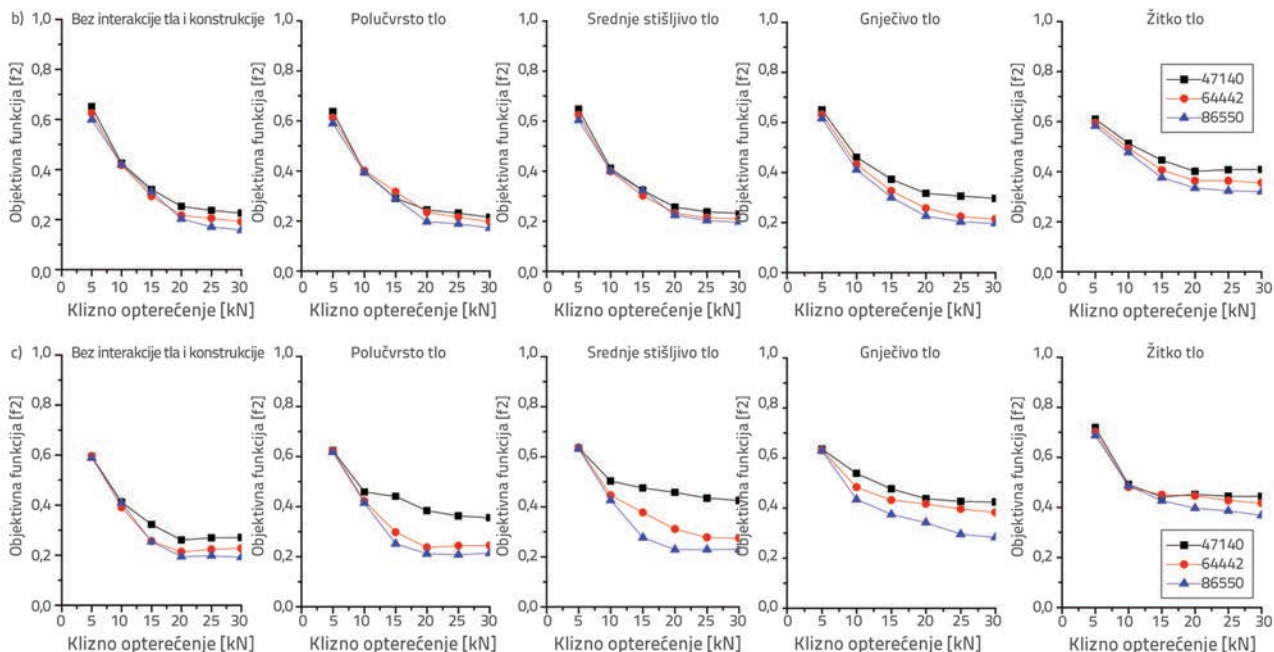
Na slici 15. prikazana je vrijednost funkcije za disipaciju energije pri čemu su mijenjane krutosti ukruta. Kako je



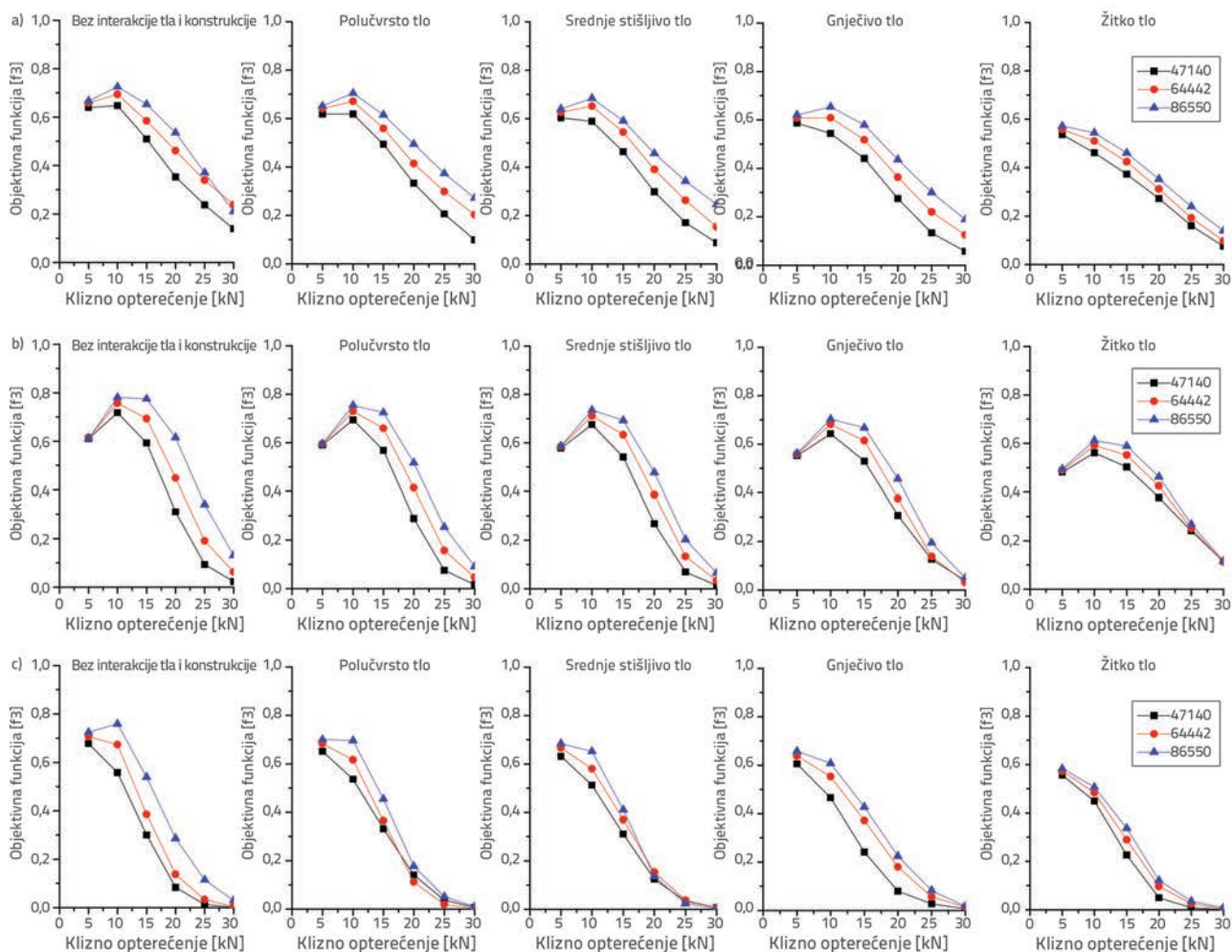
Slika 13. Vrijednost funkcije vršne poprečne sile u podnožju građevine za seizmičke zapise: a) El Centro; b) Kobe; c) Uttarkashi, za $m = 7,648 \text{ kNs}^2/\text{m}$



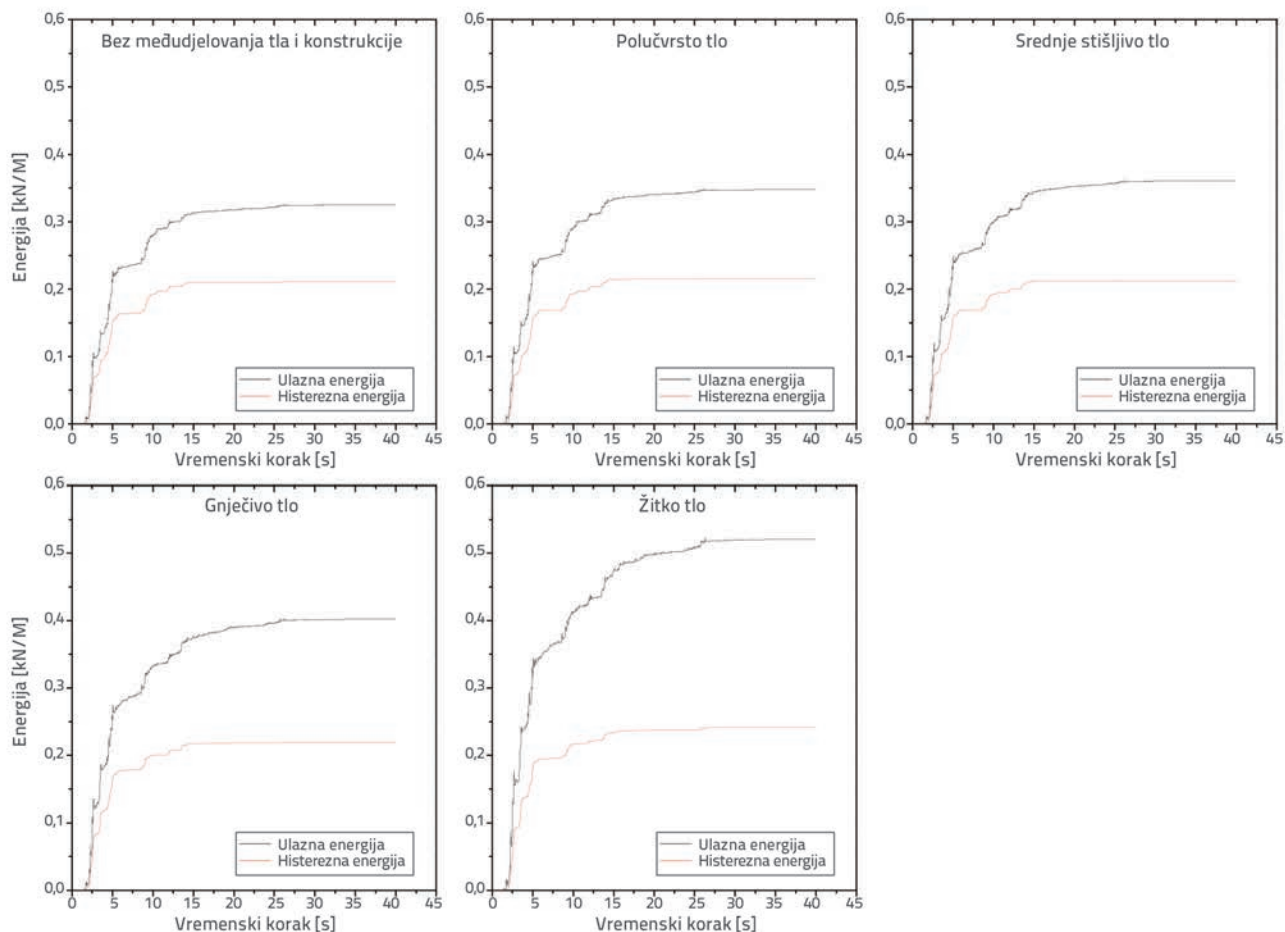
Slika 14. Vrijednost funkcije vršnog katnog pomaka za seizmičke zapise: a) El Centro; b) Kobe; c) Uttarkashi, za $m = 7,648 \text{ kNs}^2/\text{m}$



Slika 14 (nastavak). Vrijednost funkcije vršnog katnog pomaka za seizmičke zapise: a) El Centro; b) Kobe; c) Uttarkashi, za $m = 7,648 \text{ kNs}^2/\text{m}$



Slika 15. Vrijednost funkcije disipacije energije za potresne zapise: a) El Centro; b) Kobe; c) Uttarkashi, za $m = 7,648 \text{ kN s}^2/\text{m}$



Slika 16. Usporedba ulazne i histerezne energije tarnih prigušivača s kliznim opterećenjem od 10 kN, sa $m = 7,648 \text{ kNs}^2/\text{m}$, $k = 38290 \text{ kN/m}$, s međudjelovanjem i bez međudjelovanja konstrukcije i tla

disipacija energije osnovni kriterij za korištenje prigušivača u konstrukciji, obavezno se treba provjeriti utjecaj promjene krutosti ukruta. Rezultati pokazuju da promjena krutosti ukruta ne utječe bitno na učinkovitost disipacije energije tarnim prigušivačima.

3.4. Usporedba energije s tarnim prigušivačem

Uspoređene sve tri objektivne funkcije pokazuju da su vrijednosti poprečne sile u podnožju građevine i katnog pomaka povezane s disipacijom energije tarnim prigušivačima. Učinkovitost disipacije energije tarnim prigušivačima ovisi o histereznoj energiji. Na slici 16. prikazana je ulazna i histerezna energija za tarni prigušivač s kliznim opterećenjem od 10 kN na sustavu s jednim stupnjem slobode, s masom od 7,648 kN. s²/m te s krutošću od 38290 kN/m, za potres El Centro.

Disipacija energije koja se postiže pomoću tarnih prigušivača ovisi o površini histerezne petlje. Stoga, kako bi se provjerila ulazna energija i energija disipirana pomoću tarnih prigušivača, razmotren je slučaj s tarnim prigušivačem koji ima klizno opterećenje 10 kN te s $m = 7,648 \text{ kNs}^2/\text{m}$, $k = 38290 \text{ kN/m}$, s

međudjelovanjem i bez međudjelovanja SSI, kako je to prikazano na slici 16. Na toj se slici vidi da ulazna energija bitno varira u odnosu na stupanj mekoće tla, pri čemu energija disipirana pomoću tarnih prigušivača ostaje gotovo nepromijenjena. Dakle, učinkovitost tarnog prigušivača se smanjuje jer ne može udovoljiti seizmičkim zahtjevima konstrukcije kada se u obzir uzme međudjelovanje tla i konstrukcije.

4. Zaključak

Istraživanje o ponašanju tarnih prigušivača provedeno je uzimajući u obzir međudjelovanje tla i konstrukcije. Pritom su mijenjane vrijednosti mase, krutosti, kliznog opterećenja i uvjeta tla i to za deset različitih potresnih zapisa. Utvrđeno je da međudjelovanje tla i konstrukcije utječe na odziv tarnih prigušivača. Na temelju rezultata istraživanja, izvedeni su sljedeći zaključci:

- Osnovni period konstrukcije raste s porastom mekoće tla koje se nalazi ispod konstrukcije.
- Učinkovitost tarnih prigušivača pri kontroli perioda konstrukcije također se smanjuje zbog međudjelovanja SSI.

- Na temelju objektivnih funkcija vršne poprečne sile u podnožju građevine, vršnog katnog pomaka i disipacije energije može se zaključiti da se tarnim prigušivačem ne postiže očekivani odziv pri povećanoj mekoći tla.
- Optimalni raspon kliznog opterećenja mijenja se usporedo s promjenom vrste tla.
- Utjecaj krutosti ukruta na disipaciju energije nije izrazito značajan. Međutim, ipak se treba osigurati njihova optimalna krutost kako bi se spriječilo popuštanje ukruta tijekom potresa.

LITERATURA

- [1] Pall, A.S., Marsh, C.: Response of Friction Damped Braced Frames, *Journal of the Structural Division, American Society of Civil Engineers*, 108 (1982) ST6.
- [2] Filiatrault, A., Cherry, S.: Performance Evaluation of Friction Damped Braced Steel Frames under Earthquake Loads, *Earthquake Spectra*, 3 (1987) 1, pp. 57-78.
- [3] Moreschi, L.M., Singh, M.P.: Design of Yielding and Friction Dampers for Optimal Seismic Performance, *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 32 (2003), pp. 1291-1311.
- [4] Fallah, N., Honarparast, S.: NSGA-II based multi-objective optimization in design of Pall friction dampers *Journal of Constructional Steel Research*, 89 (2013), pp. 75-85.
- [5] Kaur, N., Matsagar V.A., Nagpal, A.K.: Earthquake Response of Mid-rise to High-rise Buildings with Friction Dampers, *International Journal of High-Rise Buildings*, 1 (2012) 4, pp. 311-332.
- [6] Haider, J.R., Kim, U.: A Parametric Approach for the Optimization of Passive Friction Dampers, *Structures Congress 2012* © ASCE 2012, pp. 1673-1684, 2012.
- [7] Marianchik, E., Levy, R., Rutenberg, A., Segal, F.: Optimal Seismic Design of Friction Damped Braced Frames Based on Existing Earthquake Records, *12WCEE*, 1-8, 2000.
- [8] Kyung-Won, M., Seong, J.Y., Kim, J.: Simple design procedure of a friction damper for reducing seismic responses of a single-story structure' *Engineering Structures*, 32 (2010), pp. 3539-3547.
- [9] Ostadan, F., Deng, N., Roesset, J.M.: Estimating Total System Damping for Soil-Structure Interaction Systems, *Proceedings Third UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction*, Menlo Park, California, USA, 2004.
- [10] Dutta, S.C.; Bhattacharyya, K., Roy, R.: Response of low-rise buildings under seismic ground excitation incorporating soil-structure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24 (2004), pp. 893-914.
- [11] Chore, H.S., Ingle, R.K.: Interaction analysis of building frame supported on pile group, *Indian Geotech. J.*, 38 (2008) 4, pp. 483-501.
- [12] Hosseinzadeh, N., Davoodi, M., Roknabadi, E.R.: Comparison of Soil-Structure Interaction Effects between Building Code Requirements and Shake Table Study, *JSEE, Spring*, 11 (2009) 1.
- [13] Petronijević, M., Nefovska Danilović, M., Radišić, M.: Analysis of frame structure vibrations induced by traffic, *GRAĐEVINAR*, 65 (2013) 9, pp. 811-824.
- [14] Penava, D., Kraus, I., Petronijević, M., Schmid, G.: Dynamic soil-structure analysis of tower-like structures using spectral elements, *Tehnički vjesnik*, 25 (2018) 3, pp. 738-747
- [15] Dominguez, J.: *Boundary elements in dynamics*. Wit Press, 1993.
- [16] Çelebi, E., Fırat, S., Çankaya, I.: The evaluation of impedance functions in the analysis of foundation vibrations using boundary element method. *Applied Mathematics and Computation*, 173 (2006) 1, pp. 636-667.
- [17] Pitilakis, D., Moderessi-Farahmand-Razavi, A., Clouteau, D.: Equivalent-linear dynamic impedance functions of surface foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139 (2013) 7, pp. 1130-1139, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000829](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000829) ."
- [18] Dobry, R., Gazetas, G.: Dynamic response of arbitrarily shaped foundations, *J GeotechEng, ASCE*, 112 (1986) 2, pp. 109-35.
- [19] Gazetas, G.: Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations, *J GeotechEng, ASCE*, 117 (1991) 9, pp. 1363-81.
- [20] Sekhar, C.D., Roy, R., Prithwish, K.D., Raghupati, R., Reddy, G.R.: Seismic safety of structures: Influence of soil-flexibility, asymmetry and ground motion characteristics, *Journal of Sound and Vibration*, 307 (2007), pp. 452-480.
- [21] Ohsaki, Y., Iwasaki, R.: On dynamic shear moduli and Poisson's ratio of soil deposits, *Soils Found*, 13 (1973) 4, pp. 61-73.
- [22] Bhattacharya, K., Dutta, S.C.: Assessing lateral period of building frames incorporating soil-flexibility, *Journal of Sound & Vibrations*, 269 (2004) 3-5, pp. 795-821.
- [23] Bhattacharya, K., Dutta, S.C., Dasgupta, S.: Effect of soil-flexibility on dynamic behaviour of building frames on raft foundation, *Journal of Sound & Vibrations*, 274 (2004), pp. 111-135.
- [24] Chopra, A.K.: *Dynamics of Structure*, Fourth Edition, Pearson Education, Inc.
- [25] *Software Verification Manual for SAP2000*, Computer Structures. Inc.
- [26] Vaseghi, J., Navaei, S., Navayinia, B., Roshantabari, F.: A Parametric Assessment of Friction Damper in Eccentric Braced Frame, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 58 (2009).
- [27] Sang-Hyun Lee, S.H., Parkb, J.H., Lee, S.K., Min, K.W.: Allocation and slip load of friction dampers for a seismically excited building structure based on storey shear force distribution, *Engineering Structures*, 30 (2008), pp. 930-940.