

Primljen / Received: 17.10.2020.

Ispravljen / Corrected: 28.1.2021.

Prihvaćen / Accepted: 25.3.2021.

Dostupno online / Available online: 10.6.2021.

Pojednostavljen izraz procjene osnovnog perioda vibriranja AB građevina

Autori:



Mr.sc. **Abdullah Yiğit**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Van Yuzuncu Yil, Turska
Odjel za građevinarstvo
abdullahyigit6521@gmail.com



Izv.prof.dr.sc. **Barış Erdil**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Van Yuzuncu Yil, Turska
Odjel za građevinarstvo
bariserdil@yyu.edu.tr
Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **İsmail Akkaya**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Van Yuzuncu Yil, Turska
Odjel za geofiziku
iakkaya@yyu.edu.tr

Prethodno priopćenje

Abdullah Yiğit, Barış Erdil, İsmail Akkaya

Pojednostavljen izraz procjene osnovnog perioda vibriranja AB građevina

Uzimajući u obzir velike razlike u procijenjenim vrijednostima osnovnog perioda vibriranja i kompleksnost izraza procjene dostupnih u literaturi, ovaj rad usmjeren je na razvijanje pouzdanih izraza procjene koja uključuje parametre mase i krutosti konstrukcije. Uspoređene su vrijednosti osnovnog perioda vibriranja 23 armiranobetonske zgrade određene mjerenjem mikrotremora (ambijentalne vibracije) i dinamičkom analizom. Zatim su računalni modeli zgrada nadograđeni kako bi se obuhvatio efekt ispunskog žida. Nakon toga je provedena dinamička analiza prostornih modela 156 armiranobetonskih građevina, čiji su rezultati korišteni za podešavanje predloženog izraza procjene osnovnog perioda vibriranja.

Ključne riječi:

armiranobetonska građevina, krutost, osnovni period vibriranja, dinamička analiza

Research Paper

Abdullah Yiğit, Barış Erdil, İsmail Akkaya

A simplified fundamental period equation for RC buildings

Considering the huge differences in the prediction and organization of equations available in the literature, this paper aims at developing a reliable equation including mass and stiffness parameters. Microtremor (ambient vibration) measurements were taken from 23 RC buildings and their fundamental periods were compared to the dynamic analysis results. Building models were then calibrated to account for the infill wall effect. After that, 156 RC buildings were 3D modelled and their dynamic analysis results were used to calibrate the proposed fundamental period equation.

Key words:

reinforced-concrete building, stiffness, fundamental vibration period, dynamic analysis

Vorherige Mitteilung

Abdullah Yiğit, Barış Erdil, İsmail Akkaya

Vereinfachte Ausweisung der Einschätzung des Grundzeitraums des Vibrierens von Stahlbetongebäuden

Unter Berücksichtigung von großen Unterschieden in den eingeschätzten Werten des Grundzeitraums des Vibrierens, sowie unter Berücksichtigung der Komplexität der Ausdrücke im Hinblick auf die Einschätzung, welche in der Literatur zugänglich sind, ist diese Arbeit auf die Entwicklung von zuverlässigen Ausdrücken der Einschätzung ausgerichtet, welche die Parameter der Masse und der Steifigkeit der Konstruktion umfasst. Es wurden die Werte des Grundzeitraums des Vibrierens von 23 Stahlbetongebäuden verglichen, welche durch die Messung von Mikrovibrationen (Umgebungsvibrationen), sowie durch die dynamische Analyse festgelegt wurden. Danach wurden die Rechnermodelle von Gebäuden angebaut, damit der Effekt einer Ausfüllungswand umfasst werden kann. Danach wurde die dynamische Analyse von Raummodellen von 156 Stahlbetongebäuden durchgeführt, deren Ergebnisse für die Anpassung des vorgeschlagenen Ausdrucks der Einschätzung des Grundzeitraums des Vibrierens genutzt wurden.

Schlüsselwörter:

Stahlbetongebäude, Steifigkeit, Grundzeitraum des Vibrierens, dynamische Analyse

1. Uvod

Seizmička analiza započinje određivanjem pouzdane vrijednosti seizmičke sile na koju izravno utječe vrijednost osnovnog perioda vibriranja promatrane građevine. Osnovni period vibriranja, s druge strane, ovisi o vrijednostima mase i krutosti građevine. Stoga, može se reći da je seizmička analiza postupak temeljen na pokušajima i pogreškama (iteracijski postupak) kod kojeg interakcija između mase, krutosti i kapaciteta nosivosti građevine mora biti uspostavljena na način da rezultira prihvatljivim seizmičkim ponašanjem. S ciljem smanjenja broja iteracija, pojedine norme daju polazište uključujući veličinu elemenata, katnost i orijentaciju konstrukcije, svojstva materijala, itd. Uzimajući u obzir navedene parametre, norme predlažu i jednadžbu procjene prirodnog perioda vibriranja prilikom određivanja seizmičkog opterećenja. Smatra se da procijenjeni prirodni period predstavlja osnovni period vibriranja, čiji oblik uključuje velik udio mase. Iako su u normama dostupni složeni izrazi, potiče se primjena pojednostavljenih koji većinom sadrže visinu ili katnost građevine, a s ciljem pojednostavljenja procjene osnovnog perioda vibriranja. Dobro je poznato da svaka građevina ima više oblika vibriranja koji su izravno ovisni o broju nosivih i nenosivih elemenata, visini, katnosti, tlocrtnim dimenzijama građevine, čvrstoći primijenjenih materijala, itd. Navedeni parametri građevine izravno utječu na njezinu krutost i masu. Što je više nosivih i nenosivih elemenata, veća je krutost, a samim time i kraći period vibriranja. S druge strane, veća masa rezultira duljim periodima vibriranja. Izraz (1) prikazuje odnos između mase, krutosti i perioda vibriranja. Kao što se vidi, masa je proporcionalna, a krutost obrnuto proporcionalna periodu vibriranja.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (1)$$

Nekoliko istraživanja usredotočilo se na utjecaj konstrukcijskih i nekonstrukcijskih parametara na prirodni period armiranobetonskih građevina. Otkriveno je da visina građevine ili njezina katnost ima značajan utjecaj na vrijednost prirodnog perioda vibriranja (ili kraće: period). Što je veća visina ili katnost, dulji je period [1, 2]. Budući da su navedeni parametri najznačajniji, nekolicina normi sadrži izraz procjene osnovnog perioda vibriranja koje sadrži samo visinu građevine ili njezinu katnost [3-6].

Kako su posmični zidovi krući od stupova, građevine s posmičnim zidovima posjeduju veći kapacitet nosivosti usporedno s okvirnim građevinama, što rezultira smanjenjem perioda [7-8]. Navedeno smanjenje perioda uzrokovano je povećanjem horizontalne krutosti kod građevina s posmičnim zidovima uz neznatno povećanje mase. Iako se ispunsko žiđe smatra nenosivim elementom, njihov utjecaj na vrijednost prirodnih perioda građevine je značajan. Kako se prirodni periodi vibriranja određuju pri malim amplitudama vibracija, ispunsko žiđe je neoštećeno pri čemu njihova velika ravninska krutost doprinosi horizontalnoj krutosti građevine, što rezultira smanjenjem

perioda vibriranja. Iz navedenog razloga, a pri vibracijama malih amplituda, treba se uzeti u obzir doprinos ispunskog žiđa horizontalnoj krutosti građevine. Međutim, zbog krutosti zidanog ispuna pri povećanju amplituda vibriranja dolazi do pojave oštećenosti, čime se znatno smanjuje njihov doprinos krutosti građevine [9-11]. Osim toga, vrijednost prirodnog perioda vibriranja ovisi i o tlocrtnim dimenzijama građevine te o broju i duljini raspona, što izravno utječe na krutost građevine. Znanstvenici su ustanovili da povećanje raspona uzrokuje produljenje osnovnog perioda vibriranja. S druge strane, uočeno je da dolazi do skraćivanja prirodnog perioda vibriranja povećanjem broja raspona [2, 12].

Stupanj oštećenosti građevine utječe na vrijednost perioda vibriranja. Ako je građevina neoštećena i ako je amplituda vibriranja mala, tada se period takvog stanja zove elastični period. Međutim, prilikom djelovanja sila uzrokovanih vibracijama dolazi do pojave oštećenosti, pri čemu, a ovisno o stupnju oštećenosti, elastični period postaje neelastični period i dolazi do produljenja perioda [7]. Određivanje vrijednosti neelastičnog perioda u praksi predstavlja složen zadatak s obzirom na to da ovisi o stupnju oštećenosti i prigušenju, koji s druge strane ovisi o vrijednosti horizontalnog pomaka građevine uslijed djelovanja potresa. Norme eksplicitno zahtijevaju primjenu neelastičnog perioda u slučaju kada se seizmičko ponašanje građevine određuje nelinearnom analizom [6, 13, 14]. Ako se prilikom projektiranja ili procjene ponašanja građevina primjenjuje elastični spektar odziva, koji sadrži općenite informacije o seizmičnosti određene regije, tada koristimo elastični period na temelju kojeg se procjenjuju seizmičke sile. Radi jednostavnosti, norme preporučuju primjenu elastičnog perioda kod kojeg je na određeni način eksplicitno uključen utjecaj stupnja oštećenosti kroz redukciju krutosti nosivih elemenata građevine. Stoga treba imati na umu da prirodni period vibriranja nije elastični period te da je njegova procjena temeljena na određenim pretpostavkama i pod utjecajem određenih parametara.

Period vibriranja građevina se može odrediti direktno mjerenjem, primjenom određenih metoda. Prilikom ispitivanja prisilnim vibracijama opterećenje se prenosi na konstrukciju kao rezultat osciliranja mase uređaja, a regulirajuća ubrzanja, mjerena akcelerometrom, u korelaciji su s periodom vibriranja [15-19]. Alternativno, a s obzirom na složenost provedbe ispitivanja prisilnim vibracijama, moguća je primjena metode mjerenja mikrotremora. U tom slučaju mjere se ambijentalne vibracije malih amplituda na predodređenim etažama građevine koje se konvertiraju u frekvencije i periode. Zbog svoje jednostavnosti i ekonomske isplativosti, u literaturi postoje brojni primjeri primjene navedene metode ispitivanja frekventnog sastava građevina [16, 18-22].

U kontekstu navedenoga, provedeno istraživanje pokušava uspostaviti pouzdanu procjenu prirodnog perioda vibriranja za niske i srednje visoke armiranobetonske građevine, uzimajući u obzir glavne karakteristike kao što su visina i tlocrtna površina građevine, čvrstoća betona te količina nosivih i nenosivih elemenata. Uslijed složene prirode interakcije

utjecajnih parametara, osnovni cilj provedenog istraživanja je pojednostavljenje problema i složenosti interakcije parametara. Istraživanja provedena u ovom radu proizlaze iz sljedećih koraka:

- Izmjeren je mikrotremor na nekoliko armiranobetonskih građevina
- Napravljeni su prostorni računalni modeli istih građevina koristeći SAP2000 v.20 [23] ne uzimajući u obzir ispusno zide te su pomoću dinamičke analize određeni prirodni periodi vibriranja
- Zatim su nadograđeni računalni modeli na način da sadrže ispusno zide, a rezultati analize su uspoređeni s rezultatima mjerenja mikrotremora
- Provedeno je podešavanje računalnih modela uzimajući u obzir i ispusno zide
- Izvedeni je teorijski izraz procjene osnovnog perioda vibriranja
- Uspoređene su vrijednosti osnovnog perioda vibriranja određenog teorijskim izrazom procjene i na temelju računalnih modela
- Napravljeni su dodatni računalni modeli građevina, čiji su osnovni periodi vibriranja uspoređeni s vrijednostima dobivenim pomoću izraza procjene
- Provedeno je podešavanje predloženog izraza procjene osnovnog perioda vibriranja
- Napravljeni su dodatni, novi računalni modeli građevina, čiji su osnovni periodi vibriranja uspoređeni s vrijednostima dobivenim pomoću podešenog izraza procjene
- Izvršena je usporedba s postojećim istraživanjima.

2. Dostupni izrazi procjene osnovnog perioda

Kako nije uvijek moguće analizirati prostornu građevinu, a seizmička sila trebala bi biti poznata prije analize, potrebni su jednostavni izrazi kojima se procjenjuju prirodni periodi vibriranja. Nekoliko znanstvenika i normi zbog tog je problema predložilo pojednostavljene izraze procjene ili su dodatno pojednostavili postojeće. Slijedi pregled postojećih izraza procjene osnovnog perioda.

Pojedine norme smatraju da je visina građevine (H) osnovni parametar kojem pridružuju konstantu kako bi se razlikovao građevni materijal. Odnos između visine građevine i konstante rezlikuje se u normama. Primjerice, *The Building Standard Law of Japan* [3] predlaže primjenu izraza (2), pri čemu je vrijednost konstante α jednaka nuli "0" u slučaju armiranobetonskih te jedan "1" u slučaju čeličnih građevina. S druge strane, *Uniform Building Code* [5] i *TEC* [6] predlažu primjenu izraza (3) gdje se konstantom C_t razlikuje građevni materijal. Za čelične građevine *UBC* [5] predlaže vrijednost konstante C_t u iznosu od 0,0853, a *TEC* [6] predlaže vrijednost od 0,08. U slučaju armiranobetonskih građevina, C_t je jednak 0,0731 prema *UBC* [5] i 0,07 prema *TEC* [6].

$$T = (0,02 + 0,01\alpha)H \quad (2)$$

$$T = C_t H^{0,75} \quad (3)$$

Međutim, neke norme, poput *National Building Code of Canada* [4] dalje pojednostavljaju izraz procjene i uzimaju broj etaža građevine (N) kao osnovni parametar te predlažu primjenu izraza (4).

$$T = 0,1N \quad (4)$$

Uz prethodno navedene izraze, mnogi znanstvenici predlažu izraze kod kojih je visina građevine osnovni parametar, kao što je prikazano u tablici 1. Chopra i Goel [24] postavili su akcelerometre i zabilježili odziv odabranih građevina uzrokovan potresima u periodu od 1971. (San Fernando potres) do 1994. (Northridge potres) te su usporedili njihove periode s vrijednostima procijenjenim na temelju postojećih izraza. Uvidjevši značajne razlike između rezultata, predlažu novi izraz koji je prikazana u tablici 1. te je sličan izrazu (3), samo s različitim vrijednostima konstanti.

Hong i Hwang [25] analizirali su armiranobetonske okvirne građevine te na temelju regresijske analize predložili izraz koji također sadrži visinu građevine kao osnovni parametar, na način prikazan tablicom 1. Crowley i Pinho [26] analizirali su armiranobetonske građevine s ispusnim zidom primjenjujući analitičku ekvivalenciju i, na temelju dinamičke analize, predložili pojednostavljeni izraz procjene perioda. Guler i dr. [27] razvili su izraz perioda za armiranobetonske građevine s ispusnim zidom uz pomoć analitičkog i eksperimentalnog pristupa. Hatzigeorgiou i Kanapitsas [28] proveli su dinamičku analizu na 20 različitih armiranobetonskih građevina kako bi odredili njihove prirodne periode vibriranja. Imajući periode, proveli su regresijsku analizu kako bi pokazali odnos visine i perioda te su naposljetku završili s izrazom sličnim izrazu (3) kao što to prikazuje tablica 1.

Tablica 1. Izrazi prirodnih perioda njihjanja

Istraživanje	Izrazi perioda
Chopra i Goel [24]	$T = 0,067H^{0,9}$
Hong i Hwang [25]	$T = 0,0294H^{0,804}$
Crowley i Pinho [26]	$T = 0,055H$
Guler i dr. [27]	$T = 0,026H^{0,9}$
Hatzigeorgiou i Kanapitsas [28]	$T = 0,075H^{0,75}$

Osim navedenih, postoje izrazi koji zahtijevaju poznavanje nekoliko konstrukcijskih parametara građevine. Primjerice, prema *India Standard Criteria for Earthquake Resistant Design of Structures* [29], izraz procjene perioda sadržava visinu H i tlocrtnu duljinu građevine (L) kao što to prikazuje izraz (5).

$$T_i = 0,09 \frac{H}{\sqrt{L_i}} \quad (5)$$

Balkaya i Kalkan [30] analizirali su nekoliko građevina s posmičnim zidovima te su, uzevši u obzir konstrukcijske i prostorne

parametre, predložili izraz (6). U tom izrazu, je J polarni moment tromosti, I_{xx} je moment tromosti na x-osi, I_{yy} je moment tromosti na y-osi, β je omjer dulje i kraće tlocrtnne dimenzije, ρ_{as} je omjer površine posmičnih zidova u smjeru kraće tlocrtnne dimenzije i ukupne tlocrtnne površine, ρ_{ol} je omjer površine posmičnih zidova u smjeru dulje tlocrtnne dimenzije i ukupne tlocrtnne površine, ρ_{min} je omjer najmanje površine posmičnih zidova i ukupne tlocrtnne površine u ovisnosti o tlocrtnom obliku, $C, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$ su konstante dobivene regresijskom analizom.

$$T = CH^{b_1} \beta^{b_2} \rho_{as}^{b_3} \rho_{ol}^{b_4} \rho_{min}^{b_5} J^{b_6}, \quad J = I_{xx} + I_{yy} \quad (6)$$

Amanat i Hoque [12] modificirali su izraz (3) pomoću tri parametra: duljine raspona (A), broja raspona (B) i postotka ispunskog ziđa (D) i dobili (7):

$$T = ABCD_1 H^{3/4} \quad (7)$$

Kose [31] je proveo dinamičku analizu na prostornim modelima 189 armiranobetonskih okvirnih građevina kako bi odredio njihove prirodne periode vibriranja. Nakon analize, predložio je izraz koji se temelji na visini H , broju raspona (B), tipu okvira (F , za okvire s ispunskim ziđem $F = 1$, za okvire s mekom etažom $F = 2$ i za čiste okvire $F = 3$), omjer posmičnih zidova i ukupne tlocrtnne površine (S) izražen u postotku i omjer površine ispunskog ziđa i površine svih ispuna (I), izraz (8):

$$T = 0,0935 + 0,0301H + 0,0156B + 0,0039F - 0,1656S - 0,0232I \quad (8)$$

Nyarko i dr. [32] imaju drugačiji pristup u kojem važnu ulogu ima smjer koji se uzima u obzir. Na temelju analize 600 različitih armiranobetonskih građevina, primjenom nelinearne regresijske analize, predložen je izraz (9), gdje su C_1, C_2, C_3 i C_4 konstante koje ovise o smjeru koji se uzima u obzir, B_x je broj raspona u duljem, a B_y broj raspona u kraćem tlocrtnom smjeru:

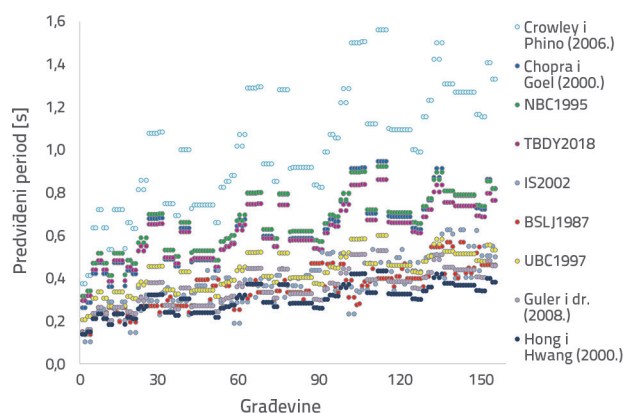
$$T = C_1 N^{C_2} + C_3 \left(\frac{B_x}{B_y} \right)^{C_4} \quad (9)$$

Asteris i dr. [2] istražili su utjecaj broja katova, broja raspona, duljine raspona, krutosti ispunskog ziđa (E_i) i postotka otvora (a_w) (za okvire bez zidanog ispuna iznosi 100 %, a za ispunsko ziđe bez otvora 0 %) na vrijednost prirodnog perioda vibriranja armiranobetonskih građevina. Na temelju rezultata dinamičke analize, proveli su regresijsku analizu i predložili izraz (10):

$$T = (0,55407 + 0,5679\sqrt{H} - 0,00048A - 0,00027a_w - 0,00425E_i + 0,0020\sqrt{HA} + 0,00016\sqrt{Ha_w} - 0,0032\sqrt{HE_i} + 0,00013Aa_w - 0,00017AE_i + 0,00010a_w E_i^5) \quad (10)$$

Može se uočiti da u literaturi postoji, od složenih do jednostavnih, nekoliko vrsta izraza procjene perioda armiranobetonskih

građevina koji procjenjuju period iste građevine s različitim vrijednostima. Na slici 1. prikazani su rezultati procjene osnovnog perioda vibriranja 156 armiranobetonskih građevina, pri čemu je uočljiva znatna razlika u procijenjenim vrijednostima za sve promatrane građevine. Primjerice, za 147. građevinu, IS2002 procjenjuje period u iznosu od 0,295 s, a Crowley i Pinho [26] daju procjenu vrijednosti perioda u iznosu od 1,5 s. Ostali izrazi procjenjuju vrijednost perioda unutar navedenih ekstrema. Stvarni prirodni period vibriranja te građevine iznosi 0,28 s. Uzimajući u obzir velike razlike u procijenjenim vrijednostima i organizaciji izraza koji su dostupni u literaturi, a koji se uglavnom temelje na regresijskoj analizi, cilj je ovoga rada razviti pouzdan izraz procjene koja uključuje parametre mase i krutosti na jednostavan način.



Slika 1. Procjena vrijednosti perioda prema izrazima dostupnim u literaturi

3. Podešavanje računalnih modela

Cilj je istraživanja izvesti pouzdani izraz procjene prirodnog perioda vibriranja niskih i srednje visokih armiranobetonskih građevina. U tablici 2. navodi se popis građevina koje su korištene pri podešavanju prostornih računalnih modela i izvođenju izraza procjene prirodnog perioda vibriranja. Na 23 građevine, navedene u tablici, provedeno je mjerenje mikrotremora (Mcr) pomoću kojih je proveden proces podešavanja računalnih modela. Preostalih 20 građevina je, uz prethodno navedene, korišteno prilikom podešavanja izraza procjene prirodnog perioda vibriranja. Slika 2. prikazuje građevine na kojima je provedeno mjerenje mikrotremora.

Građevine, različitih karakteristika, koje su se koristile u procesu podešavanja računalnih modela nalaze se u Van Cityju u istočnoj Turskoj. One su 23. listopada 2011. doživjele potres magnitude $M_w = 7.1$, i 9. studenoga magnitude $M_w = 5.6$ [33, 34]. Promatrane građevine su dvokatne i peterokatne. Dodatno, čvrstoća betona (f_c) varira između 8 i 25 MPa, u prosjeku 11,9 MPa, što je dosta niže od minimalne vrijednosti f_c definirane u *Turkish Earthquake Codes* (TEC) (u TEC1975 i TEC1997 $f_{c,min} = 18$ MPa, u TEC2007 $f_{c,min} = 20$ MPa i u TEC2018 $f_{c,min} = 25$ MPa). Iako je većina građevina izgrađena nakon 1980., imaju manju tlačnu

Tablica 2. Karakteristike građevina korištenih pri podešavanju predloženog izraza procjene

Grad. Br.	H [m]	N	f_c [MPa]	L_x [m ²]	L_y [m ²]	A_{cx} [m ²]	A_{cy} [m ²]	A_{swx} [m ²]	A_{swy} [m ²]	A_{mwx} [m ²]	A_{mwy} [m ²]	Mcr.
A1	14,8	4	12	24,9	14,0	3,0	4,7	5,7	7,7	7,2	6,2	DA
A2	15,6	4	11	43,2	32,0	10,0	9,9	15,8	18,9	7,9	5,7	DA
A3	13,5	4	13	17,5	17,0	2,8	0,4	4,9	4,4	2,4	5,2	DA
A4	13,5	4	18	14,3	16,2	1,0	2,9	2,2	2,5	0,9	8,5	DA
A5	13,5	4	15	34,3	17,0	4,9	0,7	9,8	8,8	3,5	4,0	DA
A6	13,5	4	19	17,5	17,0	2,8	0,4	4,9	4,4	2,4	5,2	DA
A7	13,5	4	13	14,3	16,2	1,0	2,9	2,2	2,5	0,9	8,5	DA
A8	13,5	4	15	34,8	17,3	4,9	0,7	9,8	8,8	3,5	4,0	DA
A9	11,6	3	11	33,9	23,4	4,5	5,7	14,4	12,3	2,7	2,0	DA
A10	11,6	3	10	39,9	23,4	4,5	5,7	14,4	12,3	1,4	3,9	DA
A11	13,1	3	11	33,9	23,4	4,5	5,7	14,4	12,3	2,7	2,0	DA
A12	13,1	3	13	39,9	23,4	4,5	5,7	14,4	12,3	1,4	3,9	DA
A13	11,6	3	25	48,3	16,5	6,5	5,5	7,0	10,5	12,7	9,8	DA
A14	12,0	3	10	36,4	22,4	2,6	5,0	15,1	15,7	9,8	3,8	DA
A15	12,0	4	14	52,5	22,4	3,5	9,7	18,7	18,7	6,8	5,9	DA
A16	15,2	5	11	52,5	22,4	3,5	9,7	18,7	18,7	9,8	7,1	DA
A17	7,5	2	14	28,0	24,0	3,2	2,2	4,4	7,9	8,9	10,2	DA
A18	13,6	4	9	28,2	13,7	4,4	3,1	5,1	7,0	2,1	10,7	DA
A19	13,6	4	10	28,2	13,7	4,4	3,1	5,1	7,0	10,7	2,1	DA
A20	16,0	5	11	13,5	20,4	1,8	3,7	4,6	2,8	1,3	4,3	DA
A21	6,8	2	9	36,0	36,0	6,8	9,7	7,1	7,7	13,6	11,3	DA
A22	13,1	3	11	33,0	16,7	0,2	10,4	7,9	9,0	4,2	5,3	DA
A23	13,1	3	9	33,0	16,7	0,2	10,4	7,9	9,0	4,2	3,5	DA
A24	14,8	4	12	24,9	14,0	3,0	4,7	2,6	4,8	10,3	9,2	---
A25	15,6	4	11	43,2	32,0	5,0	6,6	4,2	8,7	13,9	8,8	---
A26	23,6	5	25	48,3	16,5	6,5	5,5	0,9	6,2	16,3	12,5	---
A27	13,5	4	18	14,3	16,2	1,0	2,9	0,0	1,3	1,8	9,1	---
A28	18,2	4	11	33,0	16,7	0,2	10,4	4,8	2,3	4,2	10,2	---
A29	18,2	4	9	33,0	16,7	0,2	10,4	4,8	2,3	4,2	10,2	---
A30	13,5	4	13	14,3	16,2	1,0	2,9	0,0	1,3	1,8	9,1	---
A31	12,0	4	10	36,4	22,4	2,6	5,0	12,2	9,7	12,7	11,1	---
A32	11,6	3	25	48,3	16,5	6,5	5,5	0,9	6,2	16,3	12,5	---
A33	12,0	3	10	36,4	22,4	2,6	5,0	12,2	9,7	12,7	11,1	---
A34	12,0	4	14	52,5	22,4	3,5	9,7	11,7	12,7	13,4	6,8	---
A35	15,2	5	11	52,5	22,4	3,5	9,7	11,7	12,7	16,4	8,0	---
A36	7,5	2	14	28,0	24,0	3,2	2,2	2,7	1,7	10,6	16,4	---
A37	13,6	4	9	28,2	13,7	4,4	3,1	1,6	3,0	3,9	14,0	---
A38	13,6	4	10	28,2	13,7	4,4	3,1	1,6	3,0	12,4	5,4	---
A39	9,8	3	8	31,2	19,5	2,9	2,7	0,8	4,1	7,8	12,7	---
A40	16,0	5	11	13,5	20,4	1,8	3,7	0,7	2,8	3,9	4,3	---
A41	6,8	2	9	36,0	36,0	6,8	9,7	3,7	4,7	13,6	12,3	---
A42	13,1	3	11	33,0	16,7	0,2	10,4	4,8	2,3	4,2	10,2	---
A43	13,1	3	9	33,0	16,7	0,2	10,4	4,8	2,3	4,2	10,2	---

čvrstoću betona od propisanih. Tlocrtne dimenzije (L_x i L_y , duža i kraća tlocrtna dimenzija) također su različite, a tlocrt varira od kvadrata do pravokutnika. Što se tiče vertikalnih nosivih elemenata, A_{cx} , A_{cy} predstavljaju ukupnu površinu stupova u prizemlju u smjeru x i y, A_{swx} , A_{swy} imaju ukupnu površinu posmičnih zidova u prizemlju u smjeru x i y, A_{mwx} , A_{mwy} imaju ukupnu površinu ispunskog ziđa u prizemlju u smjeru x i y.

Prilikom proračuna ukupne površine ispunskog ziđa oduzete su površine otvora za prozore i vrata. U tablici 2. prikazane su neto vrijednosti površine ispunskog ziđa. Sve građevine imaju stupove u smjeru x i y. Ipak, u pojedinim građevinama (A3, A4, A5, A6, A7, A8, A22, A23, A42, A43) većina je stupova orijentirana uglavnom u jednom smjeru. Negativan učinak takvog izbora orijentacije pokušao se nadoknaditi posmičnim



Slika 2. Građevine koje su se ispitale prilikom podešavanja modela

zidovima jer, općenito, građevine imaju poprilično veliku količinu posmičnih zidova u dva ortogonalna smjera, osim u slučaju A16, A27, A30, A32, A39 i A40.

Sve građevine iz tablice 2. bile su izložene potresu koji je zadesio grad Van 2011. godine i na svima su se dogodila manja oštećenosti konstrukcijskih i nekonstrukcijskih elemenata. Iako su uočena manja oštećenosti, većina se građevina ojačala na globalnoj i lokalnoj razini. U smislu globalnog ojačanja, dodani su posmični zidovi na određenim lokacijama. Što se pak tiče lokalnog ojačanja, betonske obloge primijenjene su na stupovima, a grede su ojačane uporabom FRP materijala. Vrijednosti mikrotremora izmjerene su, kao i svojstva prikazana u tablici nakon ojačavanja, osim čvrstoće betona, što pokazuje kvalitetu betona kojim se gradilo prije ojačanja. Budući da je količina dodatnih posmičnih zidova i betonskih obloga niska u usporedbi s dostupnim konstrukcijskim elementima, doprinos čvrstoće primijenjenog betona (25 MPa) ukupnoj krutosti građevina je zanemariv.

3.1. Računalni modeli bez ispunskog ziđa

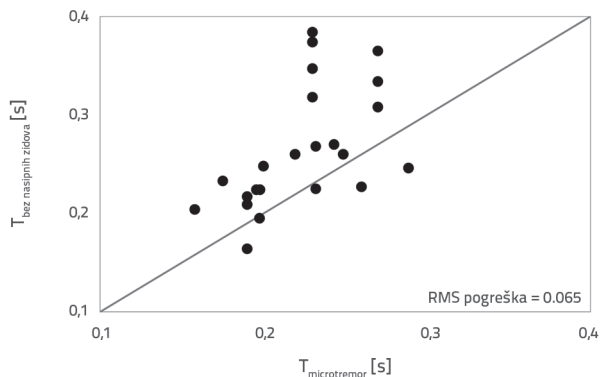
Kao što je prethodno navedeno, 23 građevine koristile su se u podešavanju modela jer su izmjerene vrijednosti mikrotremora samo s tih građevina. Uporabom SAP2000 v20 napravljen je prostorni model svih građevina. Stupovi i grede modelirani su pomoću grednih elemenata, a površinski elementi korišteni su pri modeliranju ploča i posmičnih zidova. Provedena je modifikacija krutosti elemenata u skladu s preporukama

TEC2018 [6], čime se u obzir uzima raspucavanje poprečnih presjeka pri djelovanju potresa. Savojna krutost stupova smanjila se za 30 %, a gređa za 65 %. Za ploče i posmične zidove pretpostavljena je efektivna savojna krutost u iznosu od 25 % početne vrijednosti.

Pretpostavilo se da su stupovi i posmični zidovi upeti u temelju. Masa se definirala kao zbroj stalnog i dijela korisnog opterećenja. U skladu s TEC2018 [6], za škole je uzeto 60 %, a za stambene zgrade 30 % korisnog opterećenja.

Ploče i posmični zidovi modelirani su s površinskim elementima veličine 1x1 m kako bi se osigurala raspodjela mase po površini elemenata. Vrijednosti stalnog i korisnog opterećenja preuzete su iz TS498 [35]. Krutost ispunskog ziđa nije se uzimala u obzir u ovom koraku. Umjesto toga, pretvoreno je u opterećenje raspodijeljeno po gredama, pritom uzimajući u obzir otvore.

Provedena je dinamička analiza na 23 promatrane građevine te su određene vrijednosti prirodnog perioda vibriranja u smjeru glavnih osi. Odabrana je najveća vrijednost perioda koja je uspoređena s vrijednostima dobivenim mjerenjem mikrotremora, što je prikazano na slici 3. Kao što je prikazano, periodi dobiveni dinamičkom analizom dulji su u odnosu na mjerene vrijednosti. Kako je masa konstantna, razlike pokazuju da je krutost građevine nedostatna te da treba uzeti u obzir i krutost ispunskog ziđa jer građevine na kojima je mjereno mikrotremor sadržavaju ispunsko ziđe i ono pridonosi krutosti građevine u području vibracija s malim amplitudama. Stoga su nadograđeni računalni modeli građevina kako bi se obuhvatio utjecaj ispunskog ziđa.



Slika 3. Usporedba vrijednosti perioda određenih dinamičkom analizom i mjerenjem mikrotremora

3.2. Računalni modeli s ispunskim zidom

Ispunsko zide ima značajan utjecaj na ukupnu krutost građevina. Prilikom računalnog modeliranja ispunskog zida primjenjuje se postupak mikromodeliranja ili makromodeliranja. Mikromodeliranje se provodi primjenom metode konačnih elemenata, dok se kod makromodeliranja ispunsko zide zamjenjuje ekvivalentnim dijagonalama (slika 4.). Polyakov [36] je prvi predložio primjenu obostrano zglobnih ekvivalentnih dijagonala. Prilikom modeliranja ispunskog zida primijenjen je navedeni pristup. Osnovni parametar pritom je efektivna širina ispunskog zida (W_m). U literaturi se mogu pronaći različiti izrazi za određivanje efektivne širine ispunskog zida [37-46], pri čemu je odabrana preporuka Paulajya i Priestleyja prikazana izrazom (11).

$$W_m = 0,25D_m \text{ pri čemu je } D_m^2 = H_m^2 + L_m^2 \quad (11)$$

gdje je H_m visina, a L_m duljina ispunskog zida.

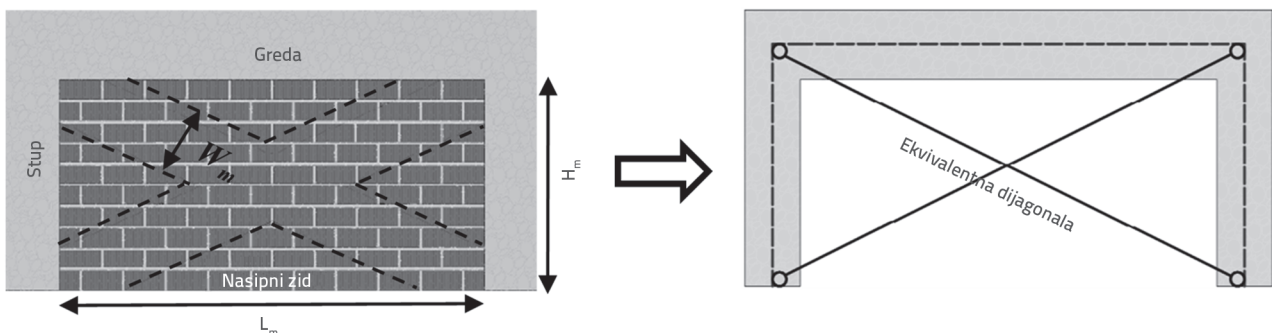
Drugi važan parametar koji utječe na krutost je modul elastičnosti (E_m) ispunskog zida. Prema FEMA 356 [13], uz pretpostavku tlačne čvrstoće ispunskog zida u iznosu od 4,13 MPa, modul elastičnosti određen je prema izrazu (12).

$$E_m = 550 f_m \quad (12)$$

Poznato je da otvori smanjuju krutost ispunskog zida. Bertoldi i dr. [47] predložili su primjenu koeficijenta redukcije koji sadrži omjer površine otvora i ispunskog zida (A_α) te omjer duljine otvora i ispunskog zida (A_e) (izraz (13)). Predloženi izraz su pojednostavili Crowley i Pinho [26], te se pokazalo da u slučaju s $A_\alpha = 20\%$ i $A_e = 25\%$, koeficijent redukcije (r_{ac}) iznosi približno 0,4.

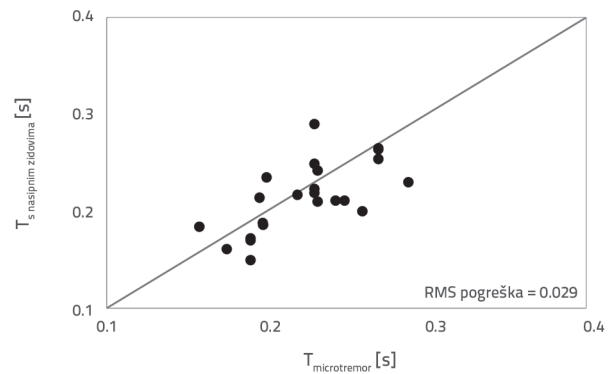
$$r_{ac} = 0,78e^{-0,322 \ln A_\alpha} + 0,93e^{-0,762 \ln A_e} \quad (13)$$

Prilikom modeliranja ispunskog zida ekvivalentnim dijagonalama potrebno je uzeti u obzir njihovu masu. Iz navedenih razloga, provedena je nadogradnja računalnih modela za 23 građevine na kojima je izmjeren mikrotremor na način da je ispunsko zide zamijenjeno ekvivalentnim dijagonalama pri čemu su otvori uzeti u obzir. Nakon provedene dinamičke analize, određeni



Slika 4. Modeliranje ispunskog zida ekvivalentnim dijagonalama

su prirodni periodi građevina te je provedena usporedba s periodima određenim na temelju izmjerenih mikrotremora, kao što je prikazano na slici 5. Uočeno je značajno smanjenje vrijednosti prirodnih perioda kao posljedica doprinosa ispunskog zida krutosti građevina, čime je postignuto približavanje vrijednostima koje su određene mjerenjem mikrotremora. Usporedbom slika 3. i 5. uočava se smanjenje maksimalne razlike ($T_{\text{mikrotremor}}/T_{\text{model}}$) s 40 % na 30 % kod modela sa zamjenskim dijagonalama (tablica 2.). Slično smanjenje uočava se također u RMS i MS pogreškama. Smanjenje RMS pogreške iznosi 55 %, dok to smanjenje iznosi 80 % u MS pogreški. Može se stoga reći da se krutost i masa ispunskog zida treba uzeti u obzir prilikom računalnog modeliranja građevina.



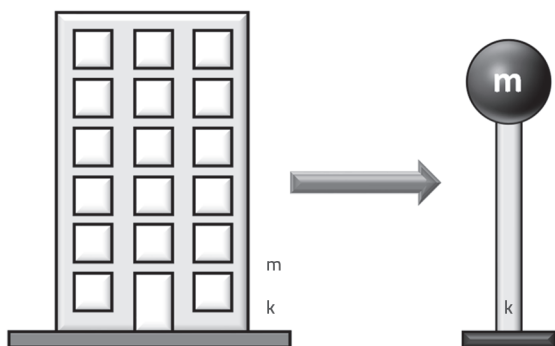
Slika 5. Usporedba vrijednosti perioda određenih mjerenjem mikrotremora i dinamičke analize građevina s ispunskim zidom

Tablica 3. Pogreške u modelima

Pogreške	RMS pogreška	MS pogreška	Maksimalna razlika	Standardno odstupanje
Modeli građevina bez ispunskog zida	0,0654	0,0034	40 %	16 %
Modeli građevina s ispunskim zidom	0,0292	0,0007	30 %	13 %

4. Definiranje izraza procjene prirodnog perioda vibriranja

Kao što je prethodno navedeno, poznato je da masa i krutost utječu na period građevina, što je iskazano izrazom (1). Taj izraz bit će ishodište ovog istraživanja. Ako su poznate masa (m) i krutost (k), armiranobetonska građevina može se prikazati kao SDOF sustav s ekvivalentnom masom (m) i ekvivalentnom krutosti (k) kao što to prikazuje slika 6.



Slika 6. Ekvivalentni konzolni stup

Ekvivalentna masa građevine, uključujući stalno i korisno opterećenje, može se odrediti pomoću izraza (14) kojim se pretpostavlja ukupna masa po etaži u iznosu od $1,2 \text{ t/m}^2$ [33]. U izrazu (14) N je broj etaža, a A_j je površina etaže.

$$m = 1,2NA_f \quad (14)$$

Nekoliko čimbenika utječe na oblik horizontalnog pomaka armiranobetonskih građevina: visina, elementi koji prenose horizontalno opterećenje, i tlocrtna površina. Metodom spektralnog kapaciteta koju navodi ATC40 [14], građevine se mogu svrstati u četiri kategorije prema obliku horizontalnog pomaka:

- građevine s posmičnim zidovima
- građevine ekvivalentne krutosti
- okvirne građevine
- građevine s mekom etažom.

Iako je najveći pomak na krovu građevina, najveće razlike su vidljive u pomacima nižih etaža: relativni međukatni pomak kod građevina s posmičnim zidovima je znatno manji od relativnih međukatnih pomaka građevina s mekom etažom.

U provedenom istraživanju pretpostavljeno je da se armiranobetonska građevina ponaša kao konzolni stup ekvivalentne krutosti (k) čiji oblik horizontalnog pomaka, prema ATC40 [14], odgovara građevini s posmičnim zidovima.

Za početak, pretpostavljeno je da se ekvivalentna krutost može odrediti izrazom (15). U izrazu (15) E je modul elastičnosti betona, I_j je moment tromosti nosivih elemenata, a H je ukupna visina građevine. Uvrštavajući ekvivalentnu masu i krutost, opći izraz poprima oblik izraza (16):

$$k = \frac{3EI}{H^3} \quad (15)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{1,2NA_f}{\frac{3EI}{H^3}}} \quad (16)$$

Većina armiranobetonskih građevina ne ponaša se kao konzolni stup, zato se njihova ekvivalentna krutost treba modificirati. Modifikacija krutosti se postiže pomoću redukcije momenta tromosti i visine građevine jer se svojstva materijala ne mogu promijeniti. Modul elastičnosti betona je pretpostavljen u iznosu od $5000\sqrt{f_c}$ (MEU Zakon br. 0:6306 [48]). Pretpostavljena je tlocrtna raspodjela seizmičkog opterećenja po visini građevina, gdje je težište opterećenja na $0,67H$ iznad tla. Ekvivalentna visina je pretpostavljena u iznosu od $0,7H$ s obzirom na to da se promatra samo prvi ton vibriranja, pri čemu je pretpostavljeno povećanje pomaka po visini građevine. U pogledu momenta tromosti, u početku je pretpostavljeno da građevina ima pravokutni presjek, nakon čega je provedena modifikacija pomoću omjera površine horizontalno nosivih elemenata (A_t) i površine etaže ($A_f = L_j L_i$), kao što je prikazano izrazom (17) gdje su i i j glavne osi građevine. U izrazu L_j je dulja, a L_i kraća tlocrtna duljina građevine [49]. A_{ti} je ukupna površina posmičnih zidova, (A_{swi}), ukupna površina stupova (A_{ci}) te (A_{wi}) 10% ukupne površine ispunskog ziđa bez otvora u prizemlju. Uvrštavajući navedene pretpostavke u izraz (18) slijedi izraz (19).

$$I_j = \frac{1}{12} [L_j L_i^3] \frac{A_t}{A_f} \quad (17)$$

$$A_{ti} = A_{ci} + A_{swi} + 0,1A_{wi} \quad (18)$$

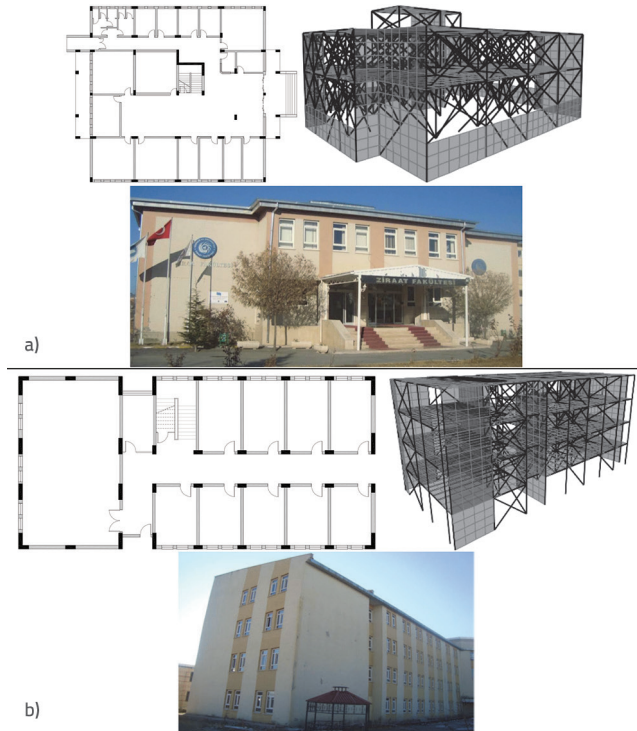
$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{1,2NL_i L_j}{3 * 5000\sqrt{f_c} \frac{1}{12} [L_j L_i^3] \frac{A_t}{L_i L_j} \frac{1}{(0,7H)^3}}} \quad (19)$$

Ponovnim uređenjem izraza (19) dobiva se izraz (20).

$$T_i = 0,114 \sqrt{\frac{NH^3 L_j}{A_t L_i \sqrt{f_c}}} \quad (20)$$

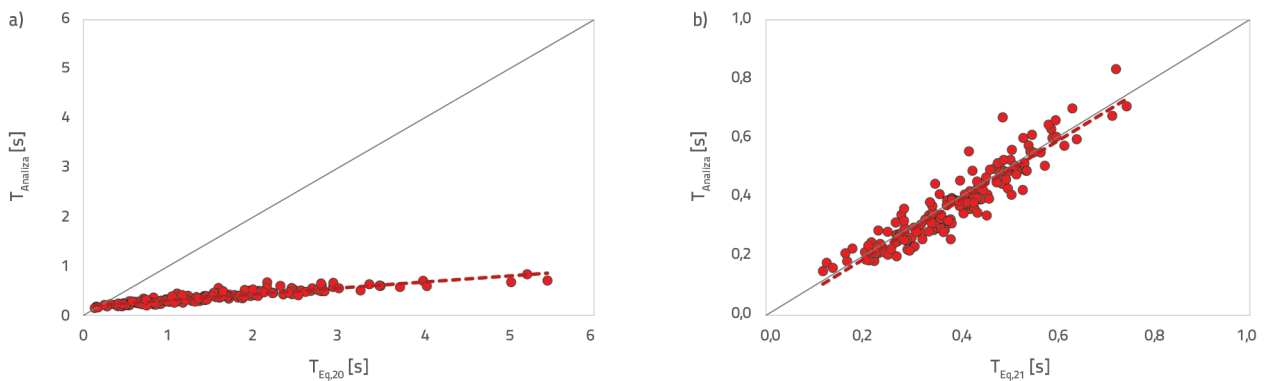
Izračunani su periodi građevina u smjeru glavnih osi te je izvršena usporedba s rezultatima dinamičke analize modela s ispunskim ziđem. Slika 7. prikazuje tlocrt i fotografije građevine te njihov prostorni računalni model s ispunskim ziđem. U skladu s prethodno opisanim postupkom podešavanja modela, 43 građevine modelirane su te se provela dinamička analiza. Te 43 građevine su replicirane uklanjajući zadnjeg kata kako bi imale manju katnost, ili dodavanjem jednog ili dva kata kako bi im se povećala katnost. Navedenim modifikacijama dobiveno je 156

građevina te je provedena verifikacija izraza (20) na temelju rezultata dinamičke analize.



Slika 7. Tipični tlocrti građevina i prostorni modeli: a) Građevina A17; b) Građevina A18

Slika 8.a prikazuje usporedbu između perioda dobivenih izrazom (20) i perioda dobivenih dinamičkom analizom. Kao što je vidljivo, izraz (20) precjenjuje periode uz RMS pogrešku od 1,50. Iz tog je razloga potrebno daljnje podešavanje izraza. Kako bi se dalje podesio izraz, kombinirali su se broj katova i visina građevina budući da su u uzajamnoj vezi, a konstanta izvan drugog korijena γ , te potencija korijena β smatraju se glavnim varijablama (izraz (21)). Provedbom regresijske analize konstanta γ iznosi 0,08, a β 0,25. Periodi koji su se izračunali s tim konstantama uspoređeni su s rezultatima dinamičke analize, kao što je prikazano na



Slika 8. Usporedba između perioda određenih izrazom procjene i dinamičkom analizom: a) $T_{Eq,20}$ u odnosu na $T_{Analiza}$ ($\gamma = 0,114$, $\beta = 0,5$); b) $T_{Eq,21}$ u odnosu na $T_{Analiza}$ ($\gamma = 0,08$, $\beta = 0,25$)

slici 8.b RMS pogreška u tom se slučaju smanjila na 0,048 te je vidljivo na slici da su se procijenjene vrijednosti perioda akumulirale oko linije simetrije. Tablica 3. sažeto prikazuje detaljan izračun grešaka. Uočava se da su se pogreške smanjile s novim konstantama, a rezultati dinamičke analize mogu se predvidjeti unutar prihvatljivog raspona grešaka.

$$T_i = \gamma H \left[\frac{L_j}{A_t L_i \sqrt{f_c}} \right]^\beta \quad (21)$$

Dobivena je završna inačica izraza u obliku izraza (22);

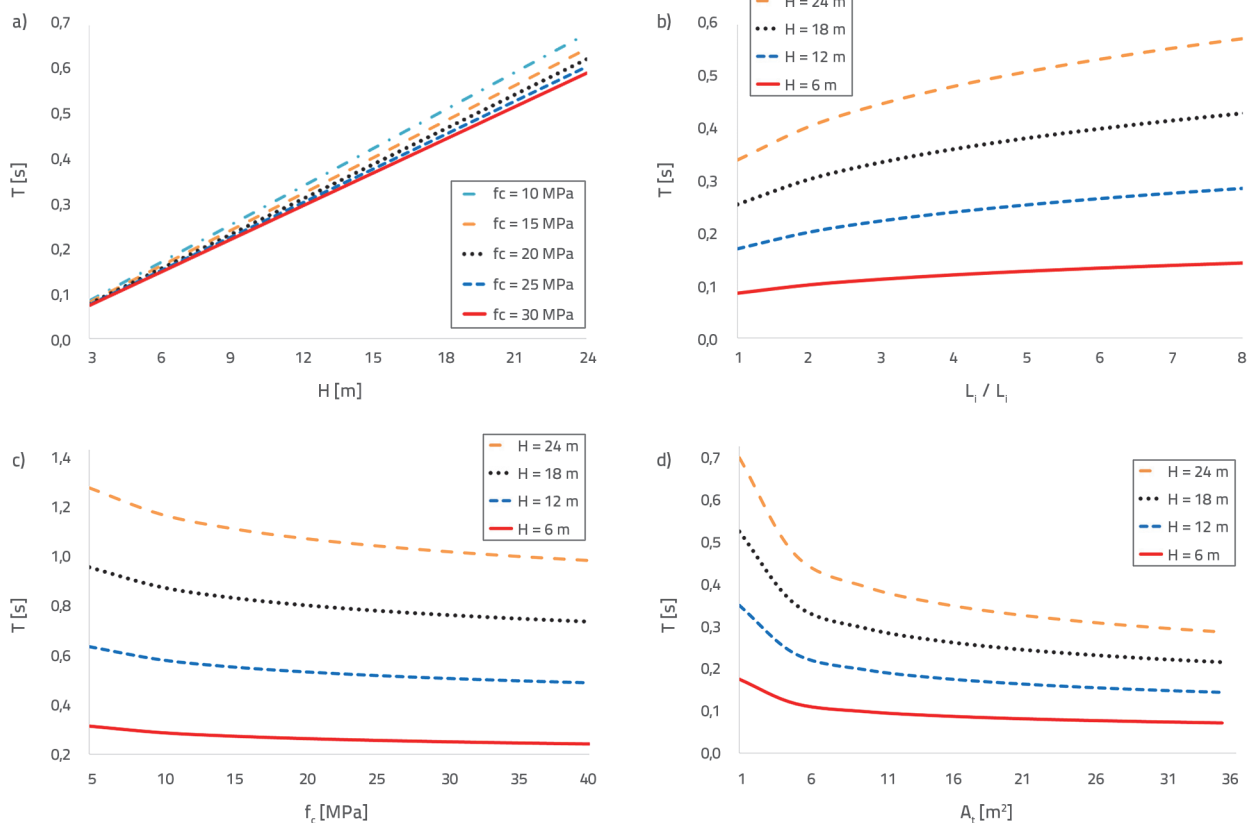
$$T_i = 0.08H \left[\frac{L_j}{A_t L_i \sqrt{f_c}} \right]^{0.25} \quad (22)$$

gdje su H (m), L_i (m), L_j (m), A_t (m²) i f_c (t/m²) jedine varijable.

Tablica 4. Pogreške u izrazima

	RMS pogreška	MS pogreška	Maksimalna razlika	Standardno odstupanje
$\gamma = 0,114$, $\beta = 0,5$	1,468	2,155	671 %	30 %
$\gamma = 0,084$, $\beta = 0,25$	0,049	0,002	48 %	14 %

Izraz (22) upućuje na to da je period linearno proporcionalan visini građevine (slika 9.a), nelinearno proporcionalan omjeru tlocrtne duljine građevine u smjeru okomito na promatrani smjer i tlocrtne duljine građevine u promatranom smjeru (slika 9.b), obrnuto nelinearno proporcionalna čvrstoći betona (slika 9.c) i površini vertikalnih nosivih elemenata (slika 9.d). Sa slika je jasno vidljivo da je H najutjecajniji parametar izraza (22) jer visina, zbog svoje kubične potencije, značajno utječe na krutost građevina. Nadalje, A_t također utječe na krutost konstrukcije, ali budući da se određuje na osnovi dimenzija poprečnog presjeka elemenata, taj utjecaj nije značajan kao utjecaj visine te se smanjuje smanjenjem visine. Iako f_c i L_j/L_i imaju mali utjecaj na period, porastom visine postaju utjecajniji.



Slika 9. Utjecaj na period: a) H ; b) L_j/L_i ; c) f_c ; d) A_t

5. Rasprava

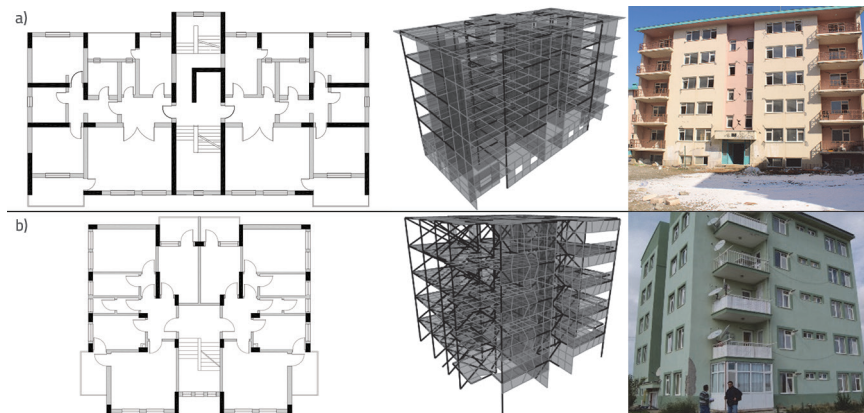
5.1. Verifikacija izraza procjene perioda

Ocjena pouzdanosti predloženog izraza (izraz (22)) provedena je pomoću 15 građevina (tablica 5.). Građevine su smještene

na različitim lokacijama u Turskoj: Van, Bingöl i Afyon [33, 50]. Osam je građevina iz tablice doživjelo potres magnitude $M_w = 6.4$ iz Bingöla 1. svibnja 2003. Osim njih, dvije građevine u Afyonu je pogodio potres magnitude $M_w = 6.2$ 3. veljače 2002. Preostalih pet građevina je u Van Cityju. Neke od građevina iz tablice su reproducirane dodavanjem ili uklanjanjem jedne

Tablica 5. Karakteristike građevina korištenih pri verifikaciji predloženog izraza

Građ. br.	H [m]	N	f_c [MPa]	L_x [m²]	L_v [m²]	A_{cx} [m²]	A_{cy} [m²]	A_{swx} [m²]	A_{swy} [m²]	A_{mwx} [m²]	A_{mwy} [m²]
B1	13,8	5	13	24,3	13,2	1,3	3,0	4,0	8,2	3,2	12,8
B2	23,3	8	16	21,4	16,9	1,6	4,5	0,4	2,9	4,0	6,8
B3	21,5	7	6	21,0	13,7	0,3	7,8	0,3	0,6	3,9	9,0
B4	21,0	7	8	22,4	26,9	3,5	4,7	0,4	1,0	6,2	14,4
B5	14,0	5	12	14,9	14,3	1,3	3,3	4,4	4,0	4,3	1,8
B6	13,8	5	10	23,1	25,1	6,5	1,4	0,0	2,8	8,9	6,0
B7	15,0	5	10	20,7	10,6	2,1	3,1	0,0	6,6	3,7	3,2
B8	20,4	6	10	37,7	16,8	0,0	5,3	1,4	0,7	0,0	8,0
B9	13,6	4	10	34,5	14,1	0,7	5,1	0,0	0,0	0,0	13,2
B10	13,6	4	15	15,9	12,5	1,9	1,4	3,8	1,2	0,0	1,5
B11	14,0	5	13	21,0	20,0	3,9	4,6	0,0	0,0	2,9	6,1
B12	14,0	5	12	20,6	21,5	2,5	2,6	0,0	1,1	6,1	8,2
B13	11,8	4	15	22,2	23,3	2,4	4,5	0,0	0,0	3,3	14,9
B14	11,9	4	11	29,7	23,7	0,4	10,1	0,0	0,0	1,2	11,5
B15	19,2	6	12	25,2	31,3	1,3	12,7	0,0	0,0	4,7	16,7

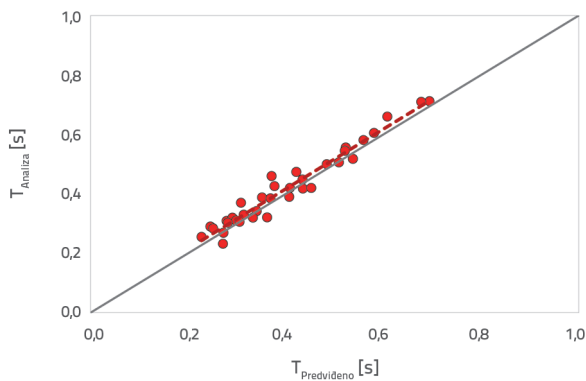


Slika 10. Representativne fotografije, tlocrti i prostorni računalni modeli građevina prikazanih u tablici 4.: a) Građevina B1; b) Građevina B5

etaže. Zbog nepovoljnog utjecaja dodane etaže na nosive elemente, pojedine građevine nisu reproducirane. U konačnici je reproducirano dodatnih dvadeset građevina, i ukupno 35 građevina je korišteno u procesu ocjene pouzdanosti.

Najveći broj etaža je zadržan na 8, a tlačna čvrstoća betona je varirana u intervalu između 6 i 16 MPa. Neke od građevina nemaju posmične zidove ni u jednom smjeru. Napravljen je prostorni računalni model svih građevina uzimajući u obzir utjecaj ispunskog ziđa na način kao što je prethodno opisano. Representativni primjeri računalnih modela prikazani su na slici 10.

Usporedba perioda određenih predloženim izrazom procjene i dinamičkom analizom prikazana je na slici 11. Kao što se vidi, korelacija rezultata je velika, pogreška je mala, a RMS pogreška iznosi 0,033. Jednako tako, očito je da su svi rezultati akumulirani oko linije simetrije. Stoga se može reći da predloženi izraz dobro procjenjuje periode građevina u tablici 4.

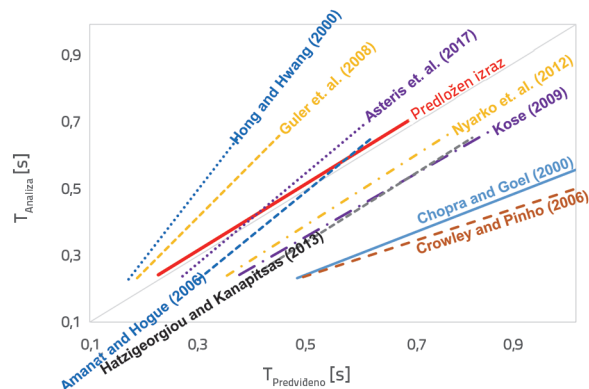


Slika 11. Tiz izraza (22) ($T_{\text{PREDVIDENO}}$ u odnosu na T_{ANALIZA})

5.2. Usporedba s rezultatima procjene perioda postojećim izrazima u literaturi

Rezultati analize 35 građevina, dobivenih pomoću 15 građevina prikazanih u tablici 4., uspoređeni su s rezultatima procjene perioda izrazima dostupnim u literaturi [2, 12, 24-28, 31, 32]

(slika 12.). Kako bi se pojednostavila slika, prikazane su samo linije trenda. Sa slike je vidljiva razlika u procijenjenim vrijednostima perioda postojećim izrazima, što se pripisuje različitim pristupima prilikom izvođenja izraza. Osim toga, pojedine izraze [2, 12, 25, 27] procjenjuju kraće, a pojedine dulje periode u odnosu na rezultate provedene analize. Većinom su procijenjene vrijednosti u blizini linije simetrije kod niskih vrijednosti perioda, a veća odstupanja od linije simetrije nastaju porastom vrijednosti perioda. Linije trenda izraza procjene koje predlažu Amanat i Hoque [12] te Asteris i dr. [2] razlikuju se od ostalih jer obje prelaze preko i u blizini su linije simetrije. S druge strane, čini se da predloženi izraz daje najtočnije procjene jer je njegova linija trenda gotovo na liniji simetrije.



Slika 12. Usporedba perioda određenih provedenom analizom i izrazima dostupnim u literaturi

Kako bi se dodatno istražila učinkovitost izrazu, izračunane su statističke pogreške prikazane u tablici 5. U tablici RMS i MS pogreške pokazuju kumulativne pogreške, a standardno odstupanje pokazuje kako su procijenjene vrijednosti akumulirane oko linije trenda. Iz tablice je vidljivo da predloženi izraz procjene ima najniže vrijednosti RMS i MS pogreške. Osim toga, uočljiva je najmanja maksimalna razlika i standardno odstupanje. Slijedi izraz koju su predložili Asteris i dr. [2]. Međutim, u promatranom slučaju, RMS pogreška je gotovo dva puta, a MS pogreška četiri puta veća nego kod predloženog izraza. Izraz koji su predložili Amanat i Hoque [12] ima slične vrijednosti statističkih pogrešaka. Budući da navedene izraza uključuju duljinu i broj raspona kao i utjecaj ispunskog ziđa, procijenjene vrijednosti perioda su bliske rezultatima analize. S druge strane, izrazi procjene perioda temeljeni samo na visini građevine daju velike statističke pogreške. Iako Kose [31] te Nyarko i dr. [32] uzimaju u obzir slične parametre kao Amanat i Hoque [12] te Asteris i dr. [2], odnos između odabranih parametara i svojstava građevina prikazanih u tablici 4. je slab.

Tablica 6. Pogreške i razlike u rezultatima izraza procjene perioda iz literature

Izrazi procjene perioda	Pogreške i razlike	RMS pogreška	MS pogreška	Maksimalna razlika [%]	Standardno odstupanje [%]
Predloženi izraz		0,033	0,001	19,4	7,8
Asteris i dr. [2]		0,063	0,004	28,5	13,2
Amanat i Hoque [12]		0,067	0,004	42,2	16,2
Nyarko i dr. [32]		0,128	0,016	70,1	22,2
Guler i dr. [27]		0,137	0,019	43,6	9,8
Kose [31]		0,155	0,024	73,8	18,1
Hatzigeorgiou i Kanapitsas [28]		0,166	0,028	84,5	21,0
Hong i Hwang [25]		0,177	0,031	51,3	9,1
Chopra i Goel [24]		0,368	0,136	133,5	25,3
Crowley i Pinho [26]		0,437	0,191	145,4	26,2

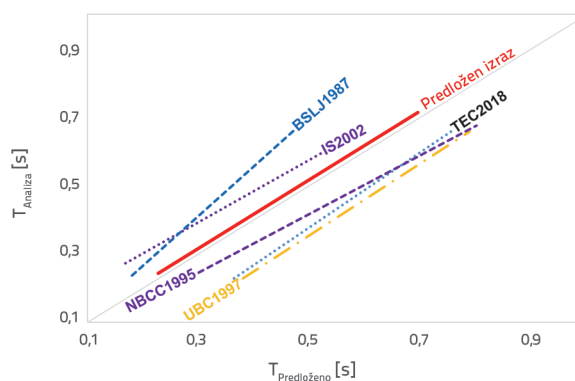
Uzimajući u obzir podatke prikazane u tablici 5., može se reći da izrazi procjene perioda koji se temelje samo na visini ili broju etaža rezultiraju velikim pogreškama.

predloženi izrazi trebaju rezultirati manjim pogreškama i manjim rasapom rezultata.

5.3. Usporedba s rezultatima procjene perioda izrazima u normama

Prethodno procijenjene vrijednosti perioda građevina uspoređene su s procjenama izrazu predloženih u normama (slika 13.). Kao što se vidi na slici 13., vrijednosti perioda određene izrazima iz normi nemaju tendenciju akumulacije oko linije simetrije. BSLJ1987 [3] i IS2002 [29] predviđaju kraće vrijednosti, dok su NBCC1995 [4], UBC1997 [5] i TEC2018 [6] dulje vrijednosti perioda u usporedbi s rezultatima analize. Budući da je u normama osnovni parametar procjene perioda građevine njezina visina H (osim IS2002 [29], gdje se koriste i tlocrtna dimenzije), predloženi izrazi su jednostavni. Međutim, usporedno s rezultatima prikazanim u tablici 4. ti izrazi rezultiraju velikim pogreškama, kao što je prikazano u tablici 6. NBCC1995 [4] daje najtočniju procjenu perioda uz prihvatljive pogreške. Ponovno, predloženi izraz daje najtočniju procjenu uz najmanje pogreške.

Osim pogrešaka, potrebno je promotriti i rasap rezultata procjene perioda. Rasap rezultata, prikazan u tablici 6. izražava se pomoću standardnog odstupanja. Kao što je vidljivo, predloženi izraz ima najmanji rasap rezultata oko linije trenda prikazane na slici 13. Slijedi BSLJ1987 [3], koji, unatoč malom rasapu rezultata, ima veliku pogrešku. Ostale četiri norme daju procjene s 20-postotnim rasapom rezultata oko linija trenda. Kako bi se ostvarila pouzdanija i točnija procjena perioda,



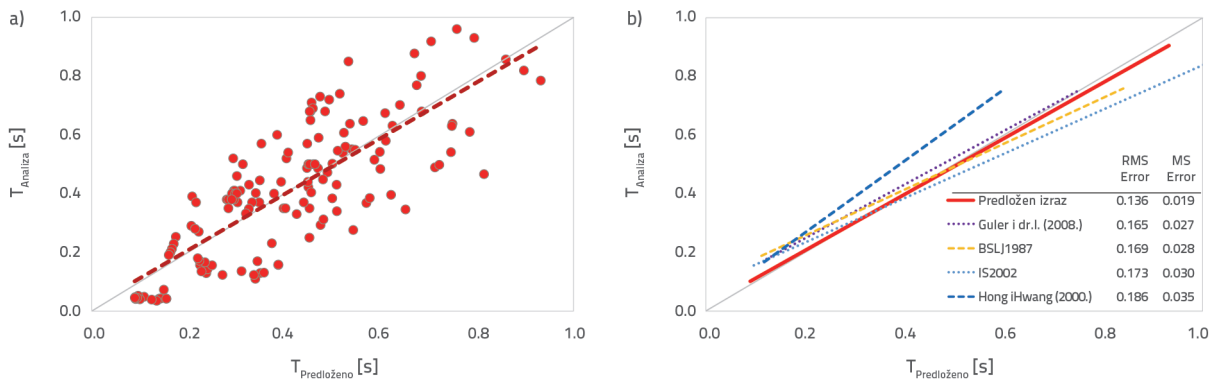
Slika 13. Usporedba vrijednosti perioda određenih pomoću provedenih analiza i izraza predloženih u normama

5.4. Usporedba u odnosu na karakteristike građevina i rezultate analiza dostupnih u literaturi

U ovom koraku provedena je usporedba rezultata procjene perioda s rezultatima dostupnim u literaturi. Sastavljena je baza podataka koja uključuje karakteristike i rezultate dinamičke analize 144 građevine [28, 30, 51-58]. Broj etaža građevina varira između 2 i 14, a tip između okvirne i građevine s posmičnim zidovima. Kako bi se shvatilo ograničenje predloženog izraza, odabrane su karakteristike građevina posve drugačije od onih koje su se prethodno koristile u postupku podešavanja predloženog

Tablica 7. Pogreške i razlike u rezultatima izraza procjene perioda iz normi

Izrazi procjene perioda	Pogreške i razlike	RMS pogreška	MS pogreška	Maksimalna razlika [%]	Standardno odstupanje [%]
Predloženi izraz		0,033	0,001	19,4	7,8
NBCC1995 [4]		0,110	0,012	61,8	19,9
IS2002 [29]		0,129	0,017	47,5	20,1
BSLJ1987 [3]		0,131	0,017	43,2	9,5
TEC2018 [6]		0,131	0,017	72,2	19,6
UBC1997 [5]		0,153	0,023	79,8	20,5

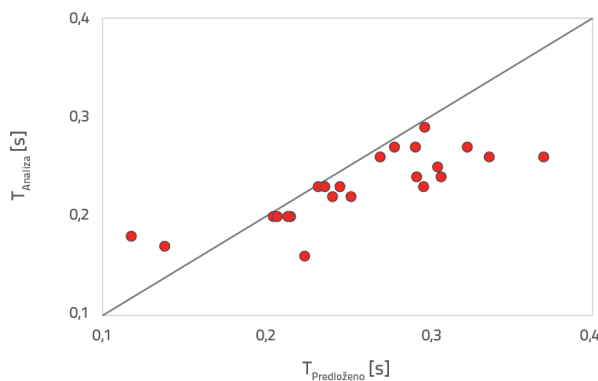


Slika 14. Usporedba vrijednosti perioda preuzetih iz literature: a) predloženi izrazi procjene i b) izrazi procjene dostupni u normama i literaturi

izraza procjene. Rezultati analize uzeti su takvi kakvi jesu, drugim riječima, nije se provela nikakva dodatna promjena niti dinamička analiza, te su vrijednosti perioda preuzete izravno iz literature. Slika 14.a prikazuje usporedbu između perioda izračunanih koristeći izraz (22) i onih koji su se preuzeli izravno iz literature kao $T_{ANALIZA}$. Vidi se da je linija trenda gotovo na liniji simetrije, uz prihvatljiv rasap rezultata. Druga usporedba, prikazana slikom 14.b., provedena je u odnosu na najbolje procjene. Iako su u obzir uzeti svi prethodno navedeni izrazi procjene, radi pojednostavljenja su prikazani rezultati izraza s najtočnijom procjenom. Izrazi procjene Guler i dr. [27], BSL1987 [3], IS2002 [29], Honga i Hwanga [25] imaju RMS pogrešku manju od 0,2. Iako navedeni izrazi daju prihvatljivu procjenu perioda, RMS pogreška kod predloženog izraza je najmanja.

5.5. Usporedba s vrijednostima izmjerenima mikrotremorom

Na slici 15. prikazana je usporedba rezultata perioda određenih pomoću izraza (22) i izmjerenog mikrotremora, tablica 1. Predloženi izraz procjenjuje dulje periode, međutim, većina rezultata je akumulirana oko linije simetrije. Vrijednost RMS pogreške iznosi 0,045, a MS pogreške 0,002. Vrijednosti pogreški su i dalje prihvatljive, a procijenjene vrijednosti perioda bliske su vrijednostima koje su određene mjerenjem mikrotremora.



Slika 15. Usporedba perioda određenih mjerenjem mikrotremora i predloženim izrazom procjene

6. Zaključak

U literaturi se može pronaći niz izraza procjene prirodnog perioda vibriranja građevina, različite kompleksnosti, koji daju različite vrijednosti procjena. Uzimajući u obzir velike razlike u procijenjenim vrijednostima perioda te složenost izraza dostupnih u literaturi, koje su većinom temeljene na regresijskoj analizi, provedeno istraživanje usmjereno je prema definiranju pouzdanih izraza procjene koji bi uključivali parametre mase i krutosti.

Kako bi se ostvarile točnije procjene perioda, najprije su izmjerene vibracije uzrokovane mikrotremorom na 23 armiranobetonske građevine te je provedena usporedba vrijednosti osnovnih perioda s rezultatima dinamičke analize prostornih računalnih modela. U procesu podešavanja uočeno je da se prilikom računalnog modeliranja mora u obzir uzeti doprinos krutosti ispunskim židom. Prilikom modeliranja ispunskog žida zamjenskim dijagonalama u obzir treba uzeti utjecaj otvora i vlastite težine. Ustanovljeno je da se vrijednosti prirodnih perioda građevina smanjuju, uslijed doprinosa krutosti ispunskim židom, čime je ostvarena bolja podudarnost s vrijednostima određenim na temelju mjerenja mikrotremora.

Na temelju rezultata dinamičke analize prostornih računalnih modela 156 građevina provedeno je podešavanje predloženog izraza procjene perioda. Konačna inačica izraza uzima u obzir visinu, tlocrtnu dimenziju, vertikalne nosive elemente na kritičnoj etaži te tlačnu čvrstoću betona. Predloženi izraz upućuje na to da je period linearno proporcionalan visini građevine, nelinearno proporcionalan omjeru tlocrtna duljine građevine u smjeru okomito na promatrani smjer i tlocrtna duljine građevine u promatranom smjeru, i obrnuto nelinearno proporcionalna čvrstoći betona i površini vertikalnih nosivih elemenata. Visina H je najutjecajniji parametar izraza koji zbog svoje kubične potencije značajno utječe na krutost građevine. Osim navedenog, A_t također utječe na krutost građevine, ali kako se određuje na temelju dimenzija poprečnog presjeka elemenata, njezin utjecaj nije izražen kao u slučaju visine H . Iako f_c i L_j/L , jako malo utječu na vrijednost perioda, povećanjem visine, njihov utjecaj postaje značajniji.

Uz navedenih 156 građevina, u procesu verifikacije predloženog izraza procjene perioda korišteno je dodatnih 35 različitih građevina. Uočeno je da, u odnosu na postojeće izraze procjene perioda u literaturi, predloženi izraz daje najmanje pogreške. Osim toga, uočena je i mala vrijednost rasapa rezultata procjena. Maksimalna razlika kod predloženog izraza manja je od 20 %.

S ciljem provjere pouzdanosti predloženog izraza procjene perioda, prikupljeni su podaci iz literature o 144 armiranobetonske građevine, uključujući njihove karakteristike i rezultate dinamičkih analiza te je izvršena usporedba. Pokazalo se da predloženi izraz procjene perioda ima najnižu vrijednost statističkih pogrešaka.

Budući da predloženi izraz u odnosu na izraze dostupne u literaturi točnije procjenjuje vrijednosti perioda, može se pouzdano primijeniti prilikom procjene prirodnog perioda vibriranja građevina. Predloženim se izrazom može procijeniti

period u smjeru objiju glavnih osi građevina. Iako je izraz izvedena za armiranobetonske građevine s najviše 8 etaža, zaključilo se da se također može primijeniti i kod građevina s 14 etaža. S obzirom na to da predloženi izraz sadrži utjecaj tlačne čvrstoće betona i površine nosivih elemenata u promatranom smjeru građevine, može se primijeniti kod okvirnih građevina i građevina s posmičnim zidovima. Međutim, predloženi izraz procjene ne uključuje vertikalne i tlocrtne nepravilnosti. Stoga postoji mogućnost dodatnog uključivanja utjecaja nepravilnosti u izraz prikupljanjem podataka o nepravilnim građevinama.

Zahvala

Znanstvenici iskreno zahvaljuju Sveučilištu Van Yuzuncu Yil (BAP- FYL-2019-8644) zbog financiranja ovog znanstvenog programa.

LITERATURA

- [1] Saatcioglu, M., Humar, J.: Dynamic analysis of buildings for earthquake resistant design. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 22 (2003), pp. 338-359.
- [2] Asteris, P.G., Repapis, C.C., Repapi, E.V., Cavaleri, L.: Fundamental period of infilled reinforced concrete frame structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 7 (2017), pp. 929-941.
- [3] BSLJ1987.: The Building Standard Law of Japan (BSLJ). Ministry of Construction, Japan, 1987.
- [4] NBCC1995.: National Building Code of Canada. National Research Council of Canada, Canadian Commission on Building and Fire Codes, Canada, 1995.
- [5] UBC97.: Uniform Building Code. Structural Engineering Design Provisions, International Conference of Building Officials. Volume 2. California, 1997.
- [6] TEC2018.: Turkish Earthquake Code. Ministry of Environment and Urbanization, Ankara, Turkey, 2018 (in Turkish)
- [7] Goel, R.K., Chopra, A.K.: Period formulas for moment-resisting frame buildings. *Journal of Structural Engineering*, 123 (1997), pp. 1454-1461.
- [8] Goel, R.K., Chopra, A.K.: Period formulas for shear wall buildings. *Journal of Structural Engineering*, 124 (1998), pp. 426-433.
- [9] Govindan, P., Lakshmi, M., Santhakumar, A.R.: Ductility of infilled frames. *Journal of American Concrete Institute*, 83 (1986), pp. 567-576.
- [10] Dowrick, D.J.: Earthquake Resistant Design for Engineers and Architects. Second edition. John Wiley & Sons, New York, 1987.
- [11] Negro, P., Verzeletti, G.: Effect of infills on the global behaviour of R/C frames energy considerations from pseudo-dynamic Tests. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25 (1996), pp. 753-773.
- [12] Amanat, K.M., Hoque, E.: A rationale for determining the natural period of R.C. building frames having infill. *Engineering Structures*, 28 (2006), pp. 495-502.
- [13] FEMA356.: Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. American Society of Civil Engineers (ASCE), Federal Emergency Management Agency, Washington DC, 2000.
- [14] ATC-40.: Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Applied Technology Council, Redwood City, 1996.
- [15] Englekirk, R.E., Matthesen, R.B.: Forced vibration of an eight-story reinforced concrete building. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 57 (1967) 3, pp. 421-436.
- [16] Trifunac, M.D.: Comparisons between ambient and forced vibration experiments. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1 (1972) 2, pp. 133-150.
- [17] Yu, E., Skolnik, D., Whang, D.H., Wallace, J.W.: Forced vibration testing of a four-story reinforced concrete building utilizing the nees@UCLA mobile field laboratory. *Earthquake Spectra*, 24 (2008) 4, pp. 969-995.
- [18] Beskhyroun, S., Wotherspoon, L., Ma, Q., Popli, B.: Ambient and forced vibration testing of a 13-story reinforced concrete building. In *Proceedings of the New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference (NZSEE)*, 2013.
- [19] Soyoz, S., Taciroglu, E., Orakcal, K., Nigbor, R., Skolnik, D., Lus, H., Safak, E.: Ambient and forced vibration testing of a reinforced concrete building before and after its seismic retrofitting. *Journal of Structural Engineering*, 139 (2013) 10, pp. 1741-1752.
- [20] Erdil, B., Tapan, M., Akkaya, İ., Korkut, F.: Effects of Structural Parameters on Seismic Behaviour of Historical Masonry Minaret, *Periodica Polytechnica-Civil Engineering*, 62 (2018), pp. 148-161.
- [21] Akkaya, İ., Özvan, A.: Site characterization in the Van settlement (Eastern Turkey) using surface waves and HVSR microtremor methods, *Journal of Applied Geophysics*, 160 (2019), pp. 157-170.
- [22] Akkaya, İ.: Availability of seismic vulnerability index (K-g) in the assessment of building damage in Van, Eastern Turkey, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 19 (2020), pp. 89-204.

- [23] SAP2000.: Structural Analysis Program-2000, Computers and Structures, Inc., v.20.0.0, Berkeley, CA, USA, 2019.
- [24] Chopra, A.K., Goel, R.K.: Building period formulas for estimating seismic displacements. *Earthquake Spectra*, 16 (2000), pp. 33–536.
- [25] Hong, L.L., Hwang, W.L.: Empirical formula for fundamental vibration periods of reinforced concrete buildings in Taiwan. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29 (2000), pp. 327–337.
- [26] Crowley, H., Pinho, R.: Simplified equations for estimating the period of vibration of existing buildings. In *First European Conference on Earthquake Engineering and Sismology*, Geneva, Switzerland, 3–8 September 2006, 1122.
- [27] Guler, K., Yuksel, E., Kocak, A.: Estimation of the fundamental vibration period of existing RC buildings in Turkey Utilizing Ambient Vibration Records, *Journal of Earthquake Engineering*, 12 (2008), pp. 140–150.
- [28] Hatzigeorgiou, G.D., Kanapitsas, G.: Evaluation of fundamental period of low-rise and mid-rise reinforced concrete buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 42 (2013), pp. 1599–1616.
- [29] IS2002.: Indian Standard Criteria for Earthquake Resistant Design of Structures Part 1 General Provisions and Buildings (Fifth Revision), Bureau of Indian Standards, New Delhi, 2002.
- [30] Balkaya, C., Kalkan, E.: Estimation of fundamental periods of shear wall dominant building structure. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32 (2003), pp. 985–998.
- [31] Kose, M.M.: Parameters affecting the fundamental period of RC frame with infill walls. *Engineering Structures*, 39 (2009), pp. 93–102.
- [32] Nyarko, H.M., Moric, D., Draganic, H.: New direction based (fundamental) periods of RC frames using genetic algorithms. *15th World Conference on Earthquake Engineering (15 WCEE)*, Lisbon, 24–28 September 2012.
- [33] Erdil, B., Ceylan, H.: MVP Interaction Based Seismic Vulnerability Assessment of RC Buildings. *Građevinar* 71 (2019), pp. 489–503.
- [34] Yigit, A.: Elastic Period Calculation Using Structural System Parameters for Low and Medium Height Reinforced Concrete Buildings, Master's Thesis, Van Yuzuncu Yil University, Turkey, 2020 (in Turkish)
- [35] TS498.: Design Load For Buildings, Turkish Standard Institute, Ankara, Turkey, 1987 (in Turkish)
- [36] Polyakov, S.V.: On the interaction between masonry filler walls and enclosing frame when loading in the plane of the wall. Translation in earthquake engineering, *Earthquake Engineering Research Institute (EERI)*, San Francisco, 1960.
- [37] Holmes, M.: Steel frames with brickwork and concrete infilling. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 19 (1961), pp. 473–478.
- [38] Smith, S.B., Carter, C.: A method of analysis for infill frames. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 44 (1969), pp. 31–48.
- [39] Mainstone, R.J.: On the stiffness and strength of infilled frames. In *Proceeding of the Institution of Civil Engineers*, 4 (1971), pp. 57–90.
- [40] Mainstone, R.J., Weeks, G.A.: The influence of bounding frame on the racking stiffness and strength of brick walls. In *Proceedings of the 2nd International Brick Masonry Conference*, Building Research Establishment. Watford, England, (1974), pp. 165–171.
- [41] Bazan, B., Meli, R.: Seismic analysis of structures with masonry walls. In *7th World Conference on Earthquake Engineering*, International Association of Earthquake Engineering (IAEE), Tokyo, 5 (1980), pp. 633–640.
- [42] Liauw, T.C., Kwan, K.H.: Nonlinear behavior of non-integral infilled frames. *Computers and Structures*, 18 (1984), pp. 551–560.
- [43] Paulay, T., Priestley, M.: Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. John Wiley and Sons, New York, 1992
- [44] Durrani, A.J., Luo, Y.H.: Seismic retrofit of flat-slab buildings with masonry infills. *NCEER Workshop on Seismic Response of Masonry Infills*, San Francisco, California, 4–5 February 1994, pp. 1–8.
- [45] Hendry, A.W.: *Structural Masonry*. Second edition. Macmillan Press, London, 1998.
- [46] Papia, M., Amato, G., Cavalieri, L., Fossetti, M.: Infilled frames influence of vertical load on the equivalent diagonal strut model. In the *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 12–17 October 2008, pp. 479–501.
- [47] Bertoldi, S.H., Decanini, L.D., Santini, S., Via, G.: Analytical models in infilled frames. *Proceedings of the 10th European Conference in Earthquake Engineering*, Vienna, 28 August–2 September 1994, pp. 1533–1538.
- [48] Ministry of Environment and Urbanization (MEU): The Urban Renewal Law for Regions under Disaster Risk, Law No: 6306, *Official Gazette*, 28309, 52 (2012) (in Turkish).
- [49] Ceylan, H.: Moment, Shear Force and Axial Force (MVP) Interaction Based New Method for Seismic Performance Evaluation of Existing Reinforced Concrete Buildings, Master's Thesis, Van Yuzuncu Yil University, Turkey, 2018 (in Turkish)
- [50] SERU (Structural Engineering Research Unit): Archival Material from Afyon and Bingol Earthquake Database, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, August 23, 2017.
- [51] Jennings, P.C., Kuroiwa, J.H.: Vibration and soil-structure interaction tests of a nine-story reinforced concrete building. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58 (1968) 3, pp. 891–916.
- [52] Sozen, M.A.: Lateral drift of reinforced concrete structures subjected to strong ground motion. *Univ. Illinois, Urbana, US*, 1983.
- [53] Elnashai, A.S., Mwafy, A.M.: Overstrength and force reduction factors of multistorey reinforced-concrete buildings. *The Structural Design of Tall Buildings*, 11 (2002) 5, pp. 329–351.
- [54] Burak, B., Comlekoglu, H.G.: Effect of shear wall area to floor area ratio on the seismic behavior of reinforced concrete buildings, *Journal of Structural Engineering*, 139 (2013) 11, pp. 1928–1937.
- [55] Massumi, A., Moshtagh, E.: A new damage index for RC buildings based on variations of nonlinear fundamental period. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22 (2013) 1, pp. 50–61.
- [56] Al-Nimry, H., Resheidat, M., Al-Jamal, M.: Ambient vibration testing of low and medium rise infilled RC frame buildings in Jordan. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 59 (2014), pp. 21–29.
- [57] Koçak, A.: Prediction of the Fundamental Periods for Infilled RC Frame Buildings. *Karaelmas Science and Engineering Journal*, 7 (2017) 2.
- [58] Aras, F.: Betonarme Binalarda Bölme Duvar Etkilerinin Tam Ölçekli Deneylemlerle Araştırılması. *Teknik Dergi*, 29 (2018) 5, pp. 8651–8668. (in Turkish)