

## USPOREDBA POTRESNOG ODZIVA ARMIRANOBETONSKIH ZGRADA OD NEKONVENCIONALNIH BETONA

Ivan Kraus

*Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, mag.ing.aedif.*

Dragan Morić

*Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, prof.dr.sc.*

Ivanka Netinger

*Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, doc.dr.sc.*

**Sažetak:** Članak istražuje ponašanje numeričkih modela armiranobetonskih zgrada sa zgurom u sastavu betona, podvrgnutih seizmičkoj proračunskoj kombinaciji djelovanja. Provedena su preliminarna numerička istraživanja te je utvrđeno da uporaba betona sa zgurom vodi ka smanjenju seizmičkih sila, te posljedično ka smanjenju dimenzija konstrukcijskih elemenata i/ili smanjenju potrebne količine armature. Rezultati ovih preliminarnih istraživanja govore u prilog mogućnosti uporabe zgure kao agregata u konstrukcijskom betonu, što bi predstavljalo doprinos kako području zaštite okoliša, tako i građevinskoj struci.

**Ključne riječi:** AB zgrada, zgura, modeliranje opterećenja, numerički model, seizmički proračun, euronorma

**Abstract:** This article investigates behavior of reinforced concrete structural models, made of concrete containing slag as an aggregate, subjected to seismic design situation. Preliminary numerical research was carried out and it was determined that the use of concrete containing slag as an aggregate leads to reduction of seismic forces, thus consequently to reduction in dimensions of structural elements and/ or reduction of the required amount of reinforcement. The results of these preliminary investigation indicates the possibility of using slag as an aggregate in structural concrete which makes contribution to environmental protection and construction industry.

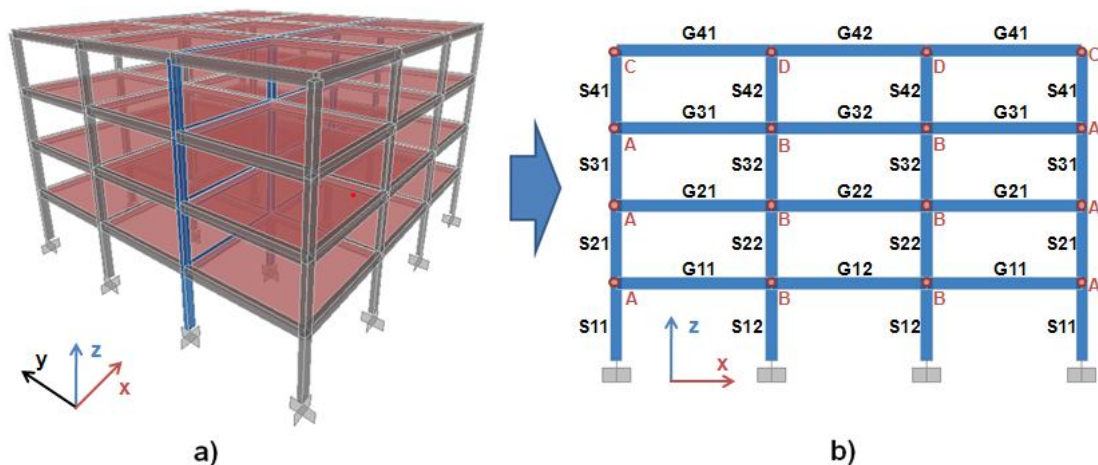
**Key words:** RC building, slag, load modeling, numerical model, seismic analysis, Eurocode

## 1 Uvod

Godine 2005. Vlada RH usvojila je Strategiju gospodarenja otpadom koja se temelji, između ostaloga, na smanjivanju volumena otpada izdvajanjem korisnog otpada te poticanju prerade izdvojenog otpada. Strategija je, kao i Plan gospodarenja otpadom Republike Hrvatske, sastavni dio Strategije zaštite okoliša Republike Hrvatske, u skladu sa Zakonom o otpadu iz 2004. godine. Hrvatsku na ovakvo djelovanje obvezuje i Bazelska konvencija te Kyoto Protocol. Međutim, iako Republika Hrvatska u svojim dokumentima jasno navodi da je vizija gospodarenja otpadom Republike Hrvatske tzv. bezdeponijska koncepcija kojoj se teži kao idealu, do danas ne postoji jasna ideja iskorištavanja otpadnog materijala. Znanan dio u ukupnoj količini otpadnog materijala na teritoriju Republike Hrvatske čini i zgura – otpadni materijal nastao pri proizvodnji čelika u domaćim željezarama. U Hrvatskoj postoje dvije deponije zgure, u blizini gradova Sisak i Split. Zgura deponirana blizu Siska rasprostranjena je na ukupno 25 ha, a količina odlaganog materijala na tom području procjenjuje se na 1,5 milijuna tona. Procijenjena količina zgure deponirane blizu Splita je 30 000 tona. Mogućnost primjene zgure kao agregata u portland cementnom betonu istražena je u okviru projekta „E!4166-EUREKABUILD FIRECON“. Rezultati projekta su afirmativni i govore u prilog mogućnosti primjene hrvatskih zgura kao zamjene dijela agregata u konstrukcijskom betonu [1-3]. Međutim, u navedenom je projektu prikladnost zgure procijenjena na razini betonskih mješavina. U ovom se članku istražuje ponašanje armiranobetonskih konstrukcijskih elemenata sa zgurom u sastavu betona zbog izloženosti uporabnim i izvanrednim djelovanjima, te je dan pregled i usporedba odziva konstrukcija izvedenih iz betona istog granulometrijskog sastava, ali različitih fizikalnih i mehaničkih svojstava. Provedena su preliminarna numerička istraživanja na modelima armiranobetonskih konstrukcija izvedenih iz konvencionalnog betona te betona koji sadrže zguru kao agregat.

## 2 Model konstrukcije

Za proračun je izdvojen ravninski okvir jedne manje armiranobetonske poslovne zgrade (slika 1). Zgrada je smještena u području i na tlu čije najveće ubrzanje iznosi  $a_g = 3 \text{ m/s}^2$  (što odgovara IX. potresnom području). Tlo je kategorije B. Zahtijeva se srednji razred duktilnosti (DCM) okvira.



Slika 1 - Proračunski model: a) 3D model, b) 2D model (izdvojeni okvirni sustav)

Sastav betonskih mješavina od kojih su okviri načinjeni prikazan je tablicom 1. U spomenutoj tablici B1 označava konvencionalni beton, dok B2 i B3 označavaju betone koji dijelom sadrže i zguru kao agregat.

Tablica 1 - Opis betonskih mješavina

Mješavina	Opis mješavine		
	Agregat	Vezivo	Superplastifikator
B1	dolomit: frakcije 0-4 mm (44 %), 4-8 mm (20 %), 8-16 mm (36 %)	CEM I 52,5N	0,8 % na masu cementa
B2	dolomit: frakcije 0-4 mm (43 %) zgura Sisak: frakcije 4-8 (21 %) mm, 8-16 mm (36 %)		
B3	dolomit: frakcije 0-4 mm (43 %) zgura Split: frakcije 4-8 (21 %) mm, 8-16 mm (36 %)		

## 2.1 Geometrija i materijalne karakteristike modela

Izvedena su tri modela čije su materijalne karakteristike prikazane tablicom 2. Rasponi svih greda jednaki su i iznose  $L = 6,00$  m, dok je visina kata  $h = 3,00$  m. Sve grede su poprečnog presjeka  $b_g/h_g = 45/50$  cm, dok su stupovi dimenzija  $b_s/h_s = 50/50$  cm. Radi lakšeg postavljanja armature u čvoru, stupovi okvira su 5 cm veći od širine grede (po 2,5 cm sa svake strane) [4]. Debljina ploče iznosi 18 cm.

Dimenzije stupa su izračunate u skladu sa zahtjevom [5], za DCM koristeći izraz:

$$A_c = b_s \times h_s \geq (1,35N_g + 1,50N_q) / (0,65 \times f_{cd}) = A_{c,req} \quad (1)$$

gdje je:

- $A_c$  - površina poprečnog presjeka betona
- $h_s$  - visina poprečnog presjeka betona
- $b_s$  - širina poprečnog presjeka betona
- 1,35 - faktor sigurnosti za stalno opterećenje
- 1,50 - faktor sigurnosti za uporabno opterećenje
- $N_g$  - vrijednost nefaktorizirane uzdužne sile od stalnog opterećenja
- $N_q$  - vrijednost nefaktorizirane uzdužne sile od uporabnog opterećenja
- 0,65 - koeficijent kojim je izražen srednji razred duktilnosti elementa (DCM)
- $f_{cd}$  - proračunska tlačna čvrstoća betona
- $A_{c,req}$  - potrebna površina poprečnog presjeka stupa.

Tablica 2 - Provjera dimenzija stupa za DCM

Model	$b_s/h_s$ [cm]	$A_c$ [cm <sup>2</sup> ]	$A_{c,req}$ [cm <sup>2</sup> ]	Usvojene dimenzije poprečnog presjeka stupa zadovoljavaju izraz (1)	Minimalne dopuštene dimenzije poprečnog presjeka stupa [cm]
M1	50/50	2500	1076,40	DA	33/33
M2	50/50	2500	1273,31	DA	36/36
M3	50/50	2500	1584,23	DA	40/40

Kako je to uobičajeno u praksi zbog jednostavnosti proračuna, a i izvedbe, za izračun površine poprečnog presjeka svih stupova okvira usvojena je najveća uzdužna sila dobivena osnovnom kombinacijom opterećenja za stup u prizemlju zgrade prema izrazu:

$$1,35G_k + 1,50Q_k, \quad (2)$$

gdje je:

- $G_k$  - karakteristična vrijednost stalnog djelovanja  
 $Q_k$  - karakteristična vrijednost uporabnog djelovanja.

Debljina ploče je prema [4] izračunata koristeći izraz:

$$d_{pl} = L_{pl} / 35, \quad (3)$$

gdje je:

- $d_{pl}$  - debljina ploče  
 $L_{pl}$  - dulji raspon ploče.

Kroz proračun se razmatra samo stalno opterećenje (vlastita težina konstrukcije, slojevi poda, pregradni zidovi, pročelje, izolacija ravnog krova), uporabno opterećenje te potresno opterećenje. Radi pojednostavljenja proračuna, sva ostala moguća djelovanja na zgradu su zanemarena (snijeg, vjetar, itd.). Karakteristike korištenih betona su prikazane tablicom 3.

**Tablica 3 - Karakteristike korištenih betona u projektu E!4166-EUREKABUILD FIRECON**

Model	Korišteni beton	$f_{ck}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{cd}^*$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\rho_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_c^{**}$ [kN/m <sup>3</sup> ]
<b>M1</b>	<b>B1</b>	77,90	51,93	49586,80	2530	25,80
<b>M2</b>	<b>B2</b>	67,00	44,67	38019,90	2643	26,91
<b>M3</b>	<b>B3</b>	53,30	35,53	33733,80	2574	26,23

gdje je:

- $f_{ck}$  - karakteristična tlačna čvrstoća betona  
 $f_{cd}$  - proračunska tlačna čvrstoća betona  
 $E$  - modul elastičnosti betona  
 $\rho_c$  - specifična gustoća betona  
 $\gamma_c$  - specifična težina betona

\*  $f_{cd} = f_{ck} / 1,50$ , gdje je 1,50 koeficijent sigurnosti za beton

\*\* Vrijednosti  $\gamma_c$  dobivene su koristeći izraz  $[(\rho_c + 100) \times 9,81] / 1000$ . Na vrijednost specifične težine betona izražene u [kg/m<sup>3</sup>] dodano je još po 100 kg/m<sup>3</sup>, jer se podrazumijeva ugradnja armature [7].

Armatura je usvojena prema zahtjevima iz [4], [6]. U proračunu je korištena rebrasta armatura B500B.

- Karakteristična granica popuštanja armature:  $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$   
 Karakteristična tlačna čvrstoća armature:  $f_{tk} = 540 \text{ N/mm}^2$   
 Srednja vrijednost modula elastičnosti:  $E_s = 210000 \text{ N/mm}^2$ .

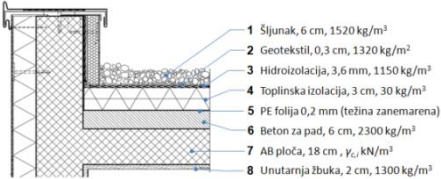

Usvojen je faktor sigurnosti za armaturu prema EN1992-1-1,  $\gamma_c = 1,15$ , te je izračunata proračunska granica popuštanja  $f_{yd} = 434,78 \text{ N/mm}^2$ .

### 3 Opterećenje

#### 3.1 Stalno i korisno opterećenje

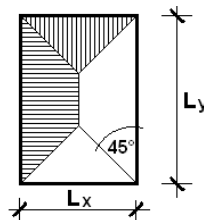
U stalno opterećenje ubrojena je vlastita težina elemenata konstrukcije (stupovi, grede, ploče), slojevi poda, odnosno slojevi izolacije krovne ploče, pregradni zidovi te pročelje zgrade. Težina slojeva ploča izračunata je i prikazana tablicom 2. Težina pregradnih zidova je usvojena prema [6] te iznosi  $G_{prz} = 2,10 \text{ kN/m}^2$ . Usvojena je i vertikalna projekcija težine pročelja  $G_{pro,vert} = 3,60 \text{ kN/m}^2$  [6], te je ta veličina težine rasprostrta jednoliko na sve ploče zgrade i iznosi  $G_{pro} = 2,40 \text{ kN/m}^2$ . Vlastitu težinu okvirne konstrukcije izračunava korišteni programski paket za statički i dinamički proračun konstrukcija, SAP2000. Uporabno opterećenje je odabrano ovisno o namjeni objekta, te je na sve stropne ploče rasprostrto opterećenje  $q_{k,strop} = 3,00 \text{ kN/m}^2$ . Pretpostavlja se neprohodan krov pa je za krovnu ploču prema [7] usvojeno uporabno opterećenje  $q_{k,krov} = 0,75 \text{ kN/m}^2$ .

Tablica 4 - Stalno opterećenje konstrukcije

	Slojevi ploča	$G_{sloj}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$G_{pl,M1}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$G_{pl,M2}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$G_{pl,M3}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$G_{prz}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$G_{pro}$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Krovna ploča		2,64	4,64	4,84	4,72	0,00	2,40
Stropna ploča		1,28	4,64	4,84	4,72	2,10	2,40
gdje je: $G_{sloj}$ - težina slojeva stropne/ krovne ploče, $G_{pl,Mi}$ - težina ploče modela $M_i$ . NAPOMENA: ovdje je usvojeno gravitacijsko ubrzanje $g = 10 \text{ m/s}^2$							

Plošno opterećenje (tablica 4) je svedeno na linijsko, kontinuirano, odnosno u koncentrirane sile, te postavljeno na grede okvira, odnosno u čvorove gdje se sastaju stupovi i grede.

Iz činjenice da je model konstrukcije ravninski, sva plošna opterećenja svedena su na linijska kontinuirana opterećenja. Ležajni pritisak pravokutnih ploča na grede kontinuirano je promjenjiv (parabola), no za potrebe prakse dovoljno je točno ako se uz dulju stranu ploče taj isti pritisak zamijeni trapeznim opterećenjem, odnosno, ako se uz kraću stranu zamijeni trokutastim opterećenjem kako je prikazano slikom 2.



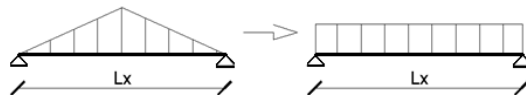
Slika 2 - Raspodjela opterećenja s ploče na okolne grede

Kako su ploče kvadratnog oblika, opterećenje na sve podvlake je trokutno, te se za takav oblik opterećenja radi pojednostavljenja proračuna traži zamjenjujuće jednoliko kontinuirano opterećenje (slika 3) prema izrazu:

$$p_1 = (5 / 16) \times p \times L_x \quad (4)$$

gdje je:

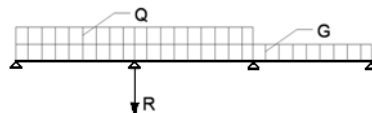
- $p_1$  - zamjenjujuće kontinuirano jednoliko opterećenje na podvlake
- $p$  - plošno opterećenje ploča (G ili Q)
- $L_x$  - kraća stranica ploče.



**Slika 3 - Zamjenjujuće jednoliko, kontinuirano opterećenje na grede okvira**

Treba zamijetiti da je na grede okvira (slika 1) nužno postaviti dvostruku veličinu vrijednosti linijskog kontinuiranog opterećenja  $p_1$ , budući da se ploča nalazi sa svake strane grede.

Koncentrirano opterećenje smješteno u čvorove okvira proračunato je za opterećenje kontinuiranog nosača kako je prikazano slikom 4.



**Slika 4 - Reakcije iz greda okomitih na ravninu razmatranog okvira**

Opterećenje u obliku koncentrirane sile, smješteno u čvorove koji nose oznaku A, odnosno C, računato je prema sljedećem izrazu:

$$R_{G,A(C)} = 1,100 \times g_l \times L \quad (\text{za stalno opterećenje}) \quad (5)$$

$$R_{Q,A(C)} = 1,200 \times q_l \times L \quad (\text{za uporabno opterećenje}) \quad (6)$$

dok su koncentrirane sile smješteno u čvorove B i D izračunate koristeći izraz:

$$R_{G,B(D)} = 1,100 \times (2 \times g_l) \times L \quad (\text{za stalno opterećenje}) \quad (7)$$

$$R_{Q,B(D)} = 1,200 \times (2 \times q_l) \times L \quad (\text{za uporabno opterećenje}). \quad (8)$$

**Tablica 5 - Opterećenje tri razmatrana modela konstrukcije**

Model	Stalno opterećenje				Uporabno opterećenje				
	$G_{uk}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$g_{uk}$ [kN/m]	$R_{G,C}$ [kN]	$R_{G,D}$ [kN]	$Q_{uk}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$q_{uk}$ [kN/m]	$R_{Q,C}$ [kN]	$R_{Q,D}$ [kN]	
Opterećenje na razini +12,00 m	M1	9,68	36,30	119,79	239,58	0,75	2,81	10,12	20,23
	M2	9,88	37,05	122,27	244,53				
	M3	9,76	36,60	120,78	241,56				
Opterećenje na razinama +3,00, +6,00 i +9,00 m	M1	10,42	39,08	128,96	257,93	3,00	11,25	40,50	81,00
	M2	10,62	39,83	131,44	262,88				
	M3	10,50	39,38	129,95	259,91				

### 3.2 Potresno opterećenje

Budući da je model konstrukcije prikazan ravninskim okvirnim sustavom, korištena je samo jedna horizontalna komponenta potresnog djelovanja i to ona paralelna sa smjerom protezanja okvira. Zbog tog razloga nije potrebno kombinirati smjerove potresnog djelovanja. Opterećenje potresom je prikazano funkcijom proračunskog spektra odziva prema [5]. Za izračun spektra odziva korišteni su parametri tla kategorije B, prikazani tablicom 6.

**Tablica 6 - Parametri tla za spektar odziva tipa 1\***

Kategorija tla	S	$T_B$ (s)	$T_C$ (s)	$T_D$ (s)
<b>B</b>	1,20	0,15	0,50	2,00

\* izrađen je spektar odziva tipa 1 s pretpostavkom da se očekuje potres magnitude  $M_s > 5,5$ , [5]

Usvojeno je prigušenje sustava konstrukcije  $\xi = 5\%$ .

Za izračun potresnih sila, primijenjen je višemodalni proračun odziva gdje je zbroj efektivnih masa konstrukcije za razmatrane oblike vibracija veći od 90% ukupne mase konstrukcije [5]. Zbog djelovanja potresnog opterećenja na konstrukciju, inercijske sile su dobivene iz efektivne mase proračunate prema izrazu:

$$\Sigma G_{k,j} "+" \Sigma \psi_{E,i} \times Q_{k,i}, \quad (9)$$

gdje je:

$\Sigma \psi_{E,i}$  - faktor kombinacije za korisna djelovanja.

Koeficijent kombinacije  $\psi_{E,i}$  izračunat je koristeći izraz:

$$\psi_{E,i} = \psi_{2,i} \times \varphi, \quad (10)$$

gdje je:

$\psi_{2,i}$  - koeficijent kombinacije za kvazi-stalna djelovanja.

Prema [5], koeficijent  $\varphi$  za krovove iznosi 1,00, dok za zavisno okupirane stropne ploče poslovnih objekata ima vrijednost od 0,80. Koeficijent kombinacije  $\psi_2$  prema [8] iznosi 0,30 za sve površine poslovnih objekata namijenjene okupljanju ljudi. Za krovove je koeficijent kombinacije  $\psi_2 = 0,00$ . Tako je koeficijent kombinacije za korisno opterećenje:

$$\text{za stropne ploče: } \psi_{E,i} = 0,30 \times 0,80 = 0,24 \quad (11)$$

$$\text{za krovnu ploču: } \psi_{E,i} = 0,00 \times 1,00 = 0,00 \quad (12)$$

Masa za proračun inercijskih sila zbog potresnog djelovanja dobivena je kombinacijom:

$$1,00 \times G "+" 0,24 \times Q \quad (13)$$

gdje je:

G stalno opterećenje zbog vlastite težine konstrukcijskih elemenata konstrukcije te zbog dodatnog opterećenja (slojevi poda stropnih ploča, te slojevi izolacije krovne ploče, težina pročelja i pregradnih zidova)

Q korisno opterećenje stropnih ploča (bez korisnog opterećenja krovne ploče).

Kako bi se izbjegao nelinearan proračun konstrukcije, primijenjen je faktor ponašanja. Primjenom faktora ponašanja umanjuju se rezne sile sustava dobivene linearnim proračunom, a time se ujedno u obzir uzeo i nelinearan odziv konstrukcije koji je u vezi s gradivom, konstrukcijskim sustavom i postupkom proračuna. Faktor ponašanja odražava duktilnost konstrukcije, odnosno sposobnost konstrukcije da prihvati reducirane seizmičke sile bez krhkih lomova u postelastičnom području.

Faktor ponašanja je izračunat koristeći izraz:

$$q = q_0 \times k_w \geq 1,5, \quad (14)$$

gdje je:

- $q_0$  - osnovna vrijednost faktora ponašanja; ovisi o tipu sustava konstrukcije i o pravilnosti konstrukcije po visini
- $k_w$  - faktor koji se odnosi na prevladavajući oblik sloma konstrukcijskog sustava sa zidovima.

Za okvirni sustav s više etaža i brodova, koji se ujedno i ovdje proučava, usvojen je osnovni faktor ponašanja za srednji duktilitet sustava (DCM) koji iznosi:

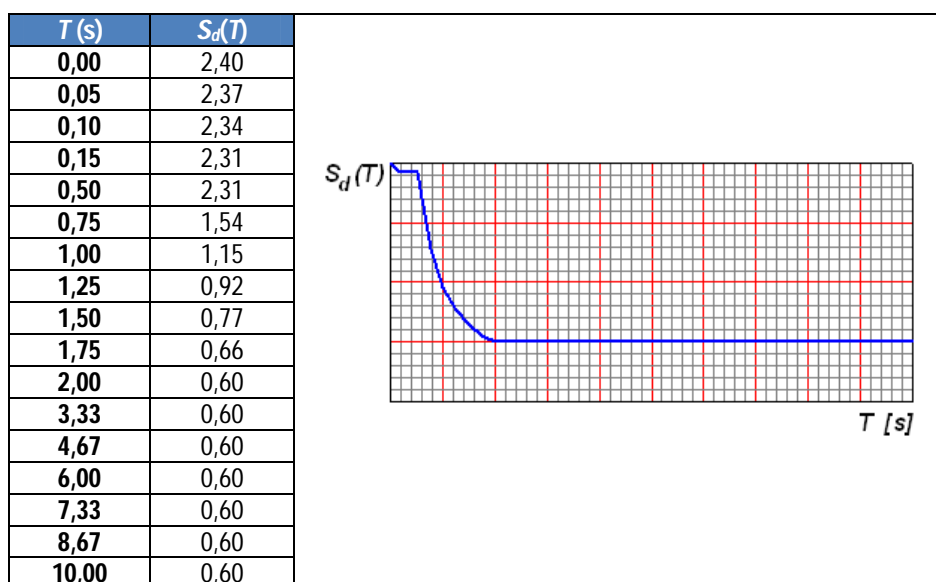
$$q_0 = 3,0 \times (\alpha_u / \alpha_1) = 3,0 \times 1,30 = 3,90. \quad (15)$$

Za okvirne konstrukcije usvojen je faktor  $k_w = 1,00$ , te tako faktor ponašanja ovdje razmatranog modela konstrukcije iznosi:

$$q = 3,90 \times 1,00 = 3,90.$$

Akceleracija temeljnog tla za IX. potresnu zonu iznosi  $a_g = 3,0 \text{ m/s}^2$ . Za izračun proračunskog spektra odziva (tablica 7) korišteni su izrazi definirani prema [5].

**Tablica 7 - Spektar odziva**





### 3.3 Kombinacije djelovanja

Izrađene su dvije kombinacije djelovanja, osnovna i seizmička. Prilikom izrade kombinacija djelovanja korišteno je *stalno opterećenje*; od vlastite težine konstrukcije, pročelja, pregradnih zidova, te težina slojeva poda i krova, *korisno opterećenje* stropnih ploča i krovne ploče, te *potresno opterećenje* definirano spektrom odgovora za horizontalni smjer. Kombinacije djelovanja izračunate su prema [8].

Za osnovnu kombinaciju opterećenja definiran je izraz:

$$\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}, \quad (16)$$

gdje je:

- $\gamma_G$  - parcijalni faktor sigurnosti za stalno opterećenje
- $G_k$  - karakteristična vrijednost stalnog opterećenja
- $\gamma_Q$  - parcijalni faktor sigurnosti za korisno opterećenje
- $Q_k$  - karakteristična vrijednost korisnog opterećenja
- $\psi_{0,i}$  - koeficijent kombinacije za korisno opterećenje,

no kako imamo samo jedno korisno opterećenje, izraz (16) postaje:

$$\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}, \quad (17)$$

a za uvrštene vrijednosti parcijalnih faktora izraz (17) postaje:

$$1,35 \times G + 1,50 \times Q. \quad (18)$$

Za seizmičku kombinaciju korišten je izraz:

$$\sum G_{k,j} + A_{Ed} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i}, \quad (19)$$

gdje je:

- $A_{Ed}$  - proračunska vrijednost potresnog opterećenja

te za uvrštene parcijalne faktore sigurnosti za opterećenja i za koeficijent kombinacije, izraz (19) postaje:

$$G + A_{Ed} + (0,30 \times Q_{strop} + 0,00 \times Q_{krov}). \quad (20)$$

## 4 Rezultati proračuna i rasprava

Rezne sile, točnije uzdužne sile stupova u prizemlju dobivene iz osnovne kombinacije opterećenja, korištene su samo kako bi se provjerile dimenzije stupa (vidi izraz (1)). Ostale rezne sile, kao i odgovor konstrukcije u obliku pomaka i/ili progiba za osnovnu kombinaciju opterećenja, ovdje nisu prikazani budući da se proračun okvira ovdje razmatrane konstrukcije radio s naglaskom na utjecaj potresnog djelovanja. Osim toga, sve konstrukcije danas moraju (ili bi se trebale) provjeravati na djelovanje potresa pa će ovdje biti dan pregled i usporedba odziva konstrukcija izvedenih iz betona istog granulometrijskog sastava, ali različitih fizikalnih i mehaničkih svojstava, samo za seizmičku kombinaciju djelovanja.

Ovdje je bitno napomenuti da su rezultati dobiveni temeljem linearno-elastične analize, a isto tako je bitno naglasiti i da ovdje nisu korišteni principi kapacitativnog dimenzioniranja.

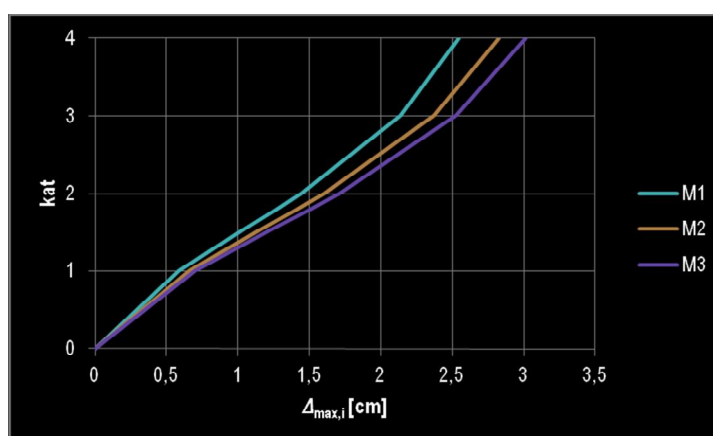
U tablici 8 može se vidjeti usporedba perioda prva tri oblika osciliranja, usporedba ukupne potresne poprečne sile u podnožju zgrade, te maksimalni vršni pomak zgrade za sva tri modela. Zanimljivo je uočiti da veća ukupna potresna poprečna sila prati manji vršni pomak zgrade i obrnuto, da manja ukupna potresna poprečna sila prati veći vršni pomak zgrade. Na slici 5 se može vidjeti usporedba maksimalnih katnih pomaka zgrade  $\Delta_{\max,i}$ , gdje  $i$  označava kat zgrade.

**Tablica 8 - Odgovor konstrukcije na potresno djelovanje**

Model	$T_1$ [s]	$T_2$ [s]	$T_3$ [s]	$F_b$ [kN]	$\Delta_{top}$ [cm]
M1	0,648	0,201	0,110	1200,32	2,5
M2	0,748	0,232	0,127	1030,03	2,8
M3	0,789	0,245	0,134	975,55	3,0

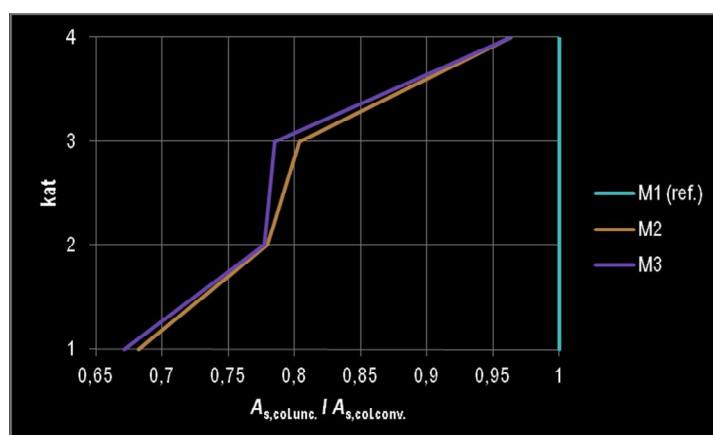
gdje je:

- $T_i$  - period vibriranja  $i$ -tog oblika zgrade,
- $F_b$  - ukupna potresna poprečna sila u podnožju zgrade (base shear force),
- $\Delta_{top}$  - horizontalni pomak vršnog čvora zgrade.



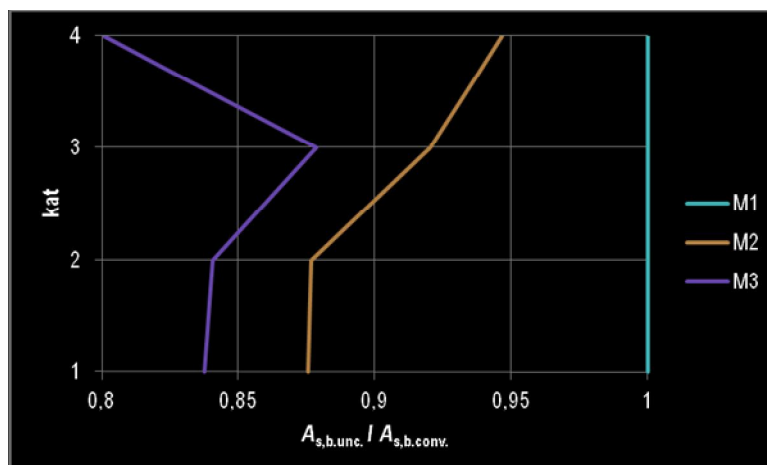
**Slika 5 - Maksimalni katni pomak**

Promotrimo li sliku 6 i sliku 7 može se uočiti da zgrade od nekonvencionalnih betona zahtijevaju ugradnju manje količine armature u odnosu na zgradu izvedenu od konvencionalnog betona. Na slici 6 se može uočiti da je potrebna količina armature za ugradnju u stupove zgrade od nekonvencionalnih betona  $A_{s,col,unc.}$  i do 67% količine potrebne za ugradnju u stupove zgrade od konvencionalnog betona  $A_{s,col,conv.}$ .



**Slika 6 - Omjer količine armature stupova zgrade od nekonvencionalnog i konvencionalnog betona**

Na slici 7 se može uočiti da je potrebna količina armature za ugradnju u grede zgrade od nekonvencionalnog betona  $A_{s,b,unc.}$  i do 80% količine potrebne za ugradnju u stupove zgrade od konvencionalnog betona  $A_{s,col,conv.}$ .



**Slika 7 - Omjer količine armature grede zgrade od nekonvencionalnog i konvencionalnog betona**

„Zašto konstrukcija, odnosno model konstrukcije s betonom veće specifične težine ima manje rezne sile u stupu, odnosno gredi?“

Modeli M2 i M3 su izvedeni iz betona gdje je prirodni agregat dijelom zamijenjen zgurom. Ti betoni imaju veću specifičnu težinu, ali i manji modul elastičnosti u usporedbi s modelom M1 koji je izveden iz standardnog betona.

Zaključak je započeo pitanjem koje ste si sigurno i sami postavili za vrijeme čitanja ovog članka. Odgovor leži u sljedeća dva izraza:

$$1. \quad T = 2\pi \times (M / K)^{1/2} \quad (21)$$

gdje je:

- $T$  - osnovni period vibriranja zgrade
- $M$  - ukupna masa konstrukcije
- $K$  - ukupna krutost konstrukcije.

$$2. \quad F_b = S_d(T_1) \times M \times \lambda \quad (22)$$

gdje je:

- $F_b$  - ukupna potresna poprečna sila u podnožju zgrade (eng. base shear force)
- $S_d(T_1)$  - ordinata spektra odziva za osnovni period vibriranja konstrukcijskog sustava
- $M$  - ukupna masa konstrukcije
- $\lambda$  - korekcijski koeficijent (za detaljnije vidjeti [5]).

Razmotrimo li izraze (21) i (22), možemo vidjeti da omjer mase i krutosti uvelike utječe na period vibriranja konstrukcijskog sustava, a time i na ukupnu potresnu poprečnu silu u podnožju zgrade. Ako se sada vratimo na tablicu 7, može se vidjeti da s povećanjem perioda vibriranja konstrukcijskog sustava dobivamo manju ordinatu spektra odziva, što opet daje manju ukupnu potresnu poprečnu silu u podnožju zgrade (izraz (22)) koja se raspodjeljuje na sve konstrukcijske elemente sustava.

„No, ako su rezne sile modela M2 i M3 manje u usporedbi s modelom M1, zašto je pomak vršnog čvora modela M2 i M3 nešto veći od pomaka vršnog čvora modela M1?“

Promotrimo li izraz:

$$\Delta = (F \times h) / (12 \times E \times I) + (1,2 \times F \times h) / (G \times A) \quad (23)$$

gdje je:

- $\Delta$  - pomak čvora elementa (ili konstrukcije)
- $F$  - sila za koju očitavamo pomak (jednaka 1, ako razmatramo pomak po jedinici sile)
- $h$  - visina razmatranog konstrukcijskog elementa (ili konstrukcije)
- $E$  - modul elastičnosti
- $I$  - moment tromosti poprečnog presjeka
- $G$  - modul posmika ( $G = E / (2 + 2\nu)$ )
- $A$  - površina poprečnog presjeka
- $\nu$  - Poisson-ov koeficijent.

Može se uočiti da je modul elastičnosti veličina koja ima utjecaj na različit odziv 3 modela konstrukcije. Podsjetimo se ovdje da betoni korišteni za modele M2 i M3 imaju manji modul elastičnosti  $E$  u odnosu na referentni beton korišten za model M1. Poprečni presjeci konstrukcijskih elemenata svih modela su isti, tako su  $h$ ,  $I$  i  $A$  za sve modele konstantni, dok je modul posmika  $G$  u direktnoj svezi s modulom elastičnosti  $E$ . Tako smanjenjem modula elastičnosti  $E$  pada i vrijednost modula posmika  $G$  pa za manje vrijednosti modula dobivamo veće vrijednosti pomaka čvorova konstrukcije, što potvrđuje veće pomake vršnih čvorova modela M2 i M3 od onih pomaka u usporedbi s modelom M1.

## 5 Zaključak

U članku je istraženo ponašanje numeričkih modela armiranobetonskih zgrada sa zgurom u sastavu betona, podvrgnutih seizmičkoj proračunskoj kombinaciji djelovanja. Na temelju dobivenih rezultata, može se zaključiti da teže konstrukcije, izvedene od relativno težih nekonvencionalnih betona, nemaju nužno i nepovoljniji odziv u usporedbi s onim lakšim konstrukcijama, izvedenim od konvencionalnih betona, ako se razmatraju s gledišta potresne otpornosti. Sudeći prema ovdje opisanom preliminarnom istraživanju, u zgradu izvedenu od nekonvencionalnog betona moguće je ugraditi i do 67% potrebne količine armature koju bi nužno trebalo ugraditi u zgradu iste geometrije i namjene, ali izvedenu od konvencionalnog betona. Prema tome, nema zapreka za uporabu zgre kao zamjene dijelu agregata u betonu namijenjenom ugradnji u armiranobetonske konstrukcije. Ipak, kako bi sa sigurnošću mogli reći da se ovdje proučavani betoni mogu primijeniti kao konstrukcijski materijali, nužno je provesti dodatna istraživanja. Osim ekonomskog aspekta, uporaba zgre u konstrukcijama imala bi i ekološki aspekt. S obzirom da se radi o industrijskom otpadu, ovakav bi materijal trebao i cijenom biti povoljniji od materijala iz prirodnih izvora, što bi u konačnici rezultiralo isplativijom građevinom. U tom smislu, primjena zgre u konstrukcijskom betonu dala bi doprinos kako području zaštite okoliša, tako i građevinskoj struci.

## Literatura

- [1] Netinger, I.; Jelčić Rukavina, M.; Bjegović, D.: Mogućnost primjene domaće zgre kao agregata u betonu, Građevinar, 62 (2010); 35-43
- [2] Netinger, I.; Bjegović, D.; Varevac, D.; Morić, D.: Primjena zgre iz čeličana kao agregata u betonu, Građevinar, 63 (2011); 169-175
- [3] Netinger, I.; Bjegović, D.; Vrhovac, G.: Utilisation of steel slag as an aggregate in concrete, Materials and Structures, In Press

- 
- [4] Radić J. i suradnici, 2006., Betonske konstrukcije 2 – riješeni primjeri, Hrvatska sveučilišna naklada, Sveučilište u Zagrebu – Građevinski fakultet, Secon HDGK, Andris, Zagreb
  - [5] CEN – European Committee for Standardization, 2004. Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings
  - [6] Konstantinidis, A., 2008. Earthquake resistant buildings from reinforced concrete, Volume A – The art of construction and the detailing. Athens, dostupno na: <http://www.pi.gr> (pregledano 14.04.2011.)
  - [7] CEN – European Committee for Standardization, 2002. Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings
  - [8] CEN – European Committee for Standardization, 2002. Eurocode 0 – Basis of structural design