

Primljen / Received: 15.3.2015.

Ispravljen / Corrected: 9.7.2015.

Prihvaćen / Accepted: 25.7.2015.

Dostupno online / Available online: 10.12.2015.

Ocjena pouzdanosti i otpornosti ploča na proboj

Autori:



Kernou Nassim, dipl.ing.građ.
Sveučilište Béjaia, Alžir
Fakultet tehničkih znanosti
nassimkernougeniecivil@yahoo.fr



Prof.dr.sc. **Youcef Bouafia**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Mouloud Mammeri, Alžir
Građevinski fakultet
youcef.bouafia2012@yahoo.com



Izv.prof.dr.sc. **Belakhdar Khalil**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Centar u Tamanghassetu, Alžir
Fakultet tehničkih znanosti
be.khalil@gmail.com

Izvorni znanstveni rad

Kernou Nassim, Youcef Bouafia, Belakhdar Khalil

Ocjena pouzdanosti i otpornosti ploča na proboj u nelinearnom području

U radu se numerički ocjenjuje otpornost ploča na proboj te se prikazuje usporedba s predviđanjima utemeljenima na nekim propisima za projektiranje. Analizira se i interakcija glavnih parametara koji utječu na proboj i vrstu sloma ploča. Rezultati analize pouzdanosti prikazani su pomoću indeksa pouzdanosti za razne razine P_u/P_{flex} . Uz analizu pouzdanosti, provedena je i analiza osjetljivosti u smislu različitih razina opterećenja kako bi se na taj način istražio utjecaj osnovnih varijabli na rezultate.

Ključne riječi:

analiza pouzdanosti, armiranobetonske ploče, analiza osjetljivosti, površina odziva, otpornost na proboj posmikom

Original scientific paper

Kernou Nassim, Youcef Bouafia, Belakhdar Khalil

Reliability and punching shear resistance of slabs in non linear domain

In this paper, the punching shear resistance of slabs is numerically evaluated and compared to predictions specified in some design codes. The interaction of major parameters that affect the punching shear behaviour and failure mode of slabs is also studied. Reliability analysis results are presented in terms of the reliability index for various levels of P_u/P_{flex} . In addition to the reliability analysis, the sensitivity analysis is carried out in terms of different load levels so as to study the effect of main variables on the results.

Key words:

reliability analysis, reinforced-concrete slabs, sensitivity analysis, response surface, punching shear resistance

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Kernou Nassim, Youcef Bouafia, Belakhdar Khalil

Beurteilung der Zuverlässigkeit und des Durchstanzwiderstandes von Platten in nicht linearen Bereich

In dieser Arbeit wird der Durchstanzwiderstand von Platten numerisch beurteilt und ein Vergleich mit entsprechenden auf Normen für den Entwurf beruhenden Werten aufgestellt. Außerdem wird die Interaktion der wichtigsten Parameter, die das Durchstanzverhalten und die Versagensmechanismen von Platten beeinflussen, analysiert. Resultate der Zuverlässigkeitsanalyse werden mit Hilfe des Zuverlässigkeitsindex für verschiedene Stufen P_u/P_{flex} dargestellt. Außer der Zuverlässigkeitsanalyse wird auch eine Sensibilitätsanalyse für einzelne Laststufen durchgeführt, um den Einfluss der Hauptvariablen auf die Resultate zu untersuchen.

Schlüsselwörter:

Zuverlässigkeitsanalyse, Stahlbetonplatten, Sensibilitätsanalyse, Antwortfläche, Durchstanzwiderstand

1. Uvod

Vrste sloma armiranobetonskih ploča izravno oslonjenih na stupove mogu se klasificirati na sljedeći način: slom savijanjem, slom probojem i slom široke grede. Općenito uzevši, granična čvrstoća tih ploča često se određuje opterećenjem koje dovodi do proboja posmikom, a to je opterećenje uglavnom manje od opterećenja na slom savijanjem. Mehanizam proboja može se opisati kao iznenadni posmični slom koji se javlja na spoju ploče i stupa. Drugim riječima, mali dio ploče biva izbačen iz ploče kao cjeline, dok ostatak ploče zadržava svoju cjelovitost. U tom se slučaju smatra da je nastupio potpuni slom konstrukcije jer nakon proboja spoj gubi otpornost na posmik i savijanje. Većina istraživanja o otpornosti ploča na proboj bavi se prikupljanjem eksperimentalnih podataka o jednostavno oslonjenim pločama i razvojem odgovarajućih empirijskih jednadžbi. Razni istraživači predložili su nekoliko analitičkih studija utemeljenih na raznovrsnim modelima. Najpoznatije empirijske formule za predviđanje posmične čvrstoće ploča, bazirane na eksperimentalnim i analitičkim studijama, nalazimo u radovima koje potpisuju Staller [1], Salim i Sebastian [2], te u propisima ACI-318 [3]. Međutim, da bi se mogao ispuniti zahtjev glede uporabivosti ploča, treba predvidjeti pojavu pukotina i progib konstrukcije ploče uslijed uporabnog opterećenja. Da bi se ocijenila razina otpornosti ploče na slom, izuzetno je važna i što točnija procjena graničnog opterećenja, uz predviđanje opterećenja – deformacije ploče u čitavom području elastičnog i neelastičnog odziva. Marzouk i Hussein [4] eksperimentalno su istražili ponašanje ploča izrađenih od betona visoke čvrstoće. Ispitano je sedamnaest armiranobetonskih ploča da bi se odredila čvrstoća ploča od betona visoke čvrstoće na proboj posmikom. Kuang i Morley [5] analizirali su otpornost dvanaest pridržanih armiranobetonskih ploča na proboj posmikom, pri čemu su ploče bile oslonjene i pridržane na sva četiri ruba. Oni su ispitali utjecaj stupnja pridržanja na rubovima, koeficijenta armiranja, te odnosa između raspona i statičke visine, na ponašanje ploča i na njihovu otpornost na proboj posmikom. Uočili su da je otpornost na proboj posmikom mnogo veća od predviđanja koja su dobivena u skladu s Johnsonovom teorijom linija popuštanja, BS-8110 [6] i ACI-318 [3]. Zaključili su da je povećana otpornost na proboj posmikom rezultat djelovanja tlačne membrane koja je nastala pridržavanjem na rubovima ploče. Tomaszewicz [7] je ispitao devetnaest ravnih ploča u obliku kvadrata izrađenih od betona visoke čvrstoće s ortogonalnom ravnomjerno postavljenom savojnom armaturom, bez posmične armature. Ploče su bile pridržane na rubovima a u sredini je nanoseno koncentrirano opterećenje radi postizanja sloma probojem. Gardner i Shao [8] prikazali su eksperimentalni rad o probouju posmikom ravnih armiranobetonskih ploča s dva po dva polja. Rezultati su pokazali da je kod dobro projektiranih ravnih ploča s više polja spoj između unutarnjeg stupa i ploče kritičniji od spoja u slučaju rubnog stupa i stupa u kutu. Osman i dr. [9] proveli su eksperimentalni rad u svrhu istraživanja ponašanja ploča od lakog betona visoke čvrstoće pod utjecajem probojnog opterećenja. Ovo je istraživanje obavljeno da bi se analiziralo ponašanje kod

proboja posmikom, te da bi se istražili osnovni parametri materijala i geometrije koji bitno utječu na takvo ponašanje.

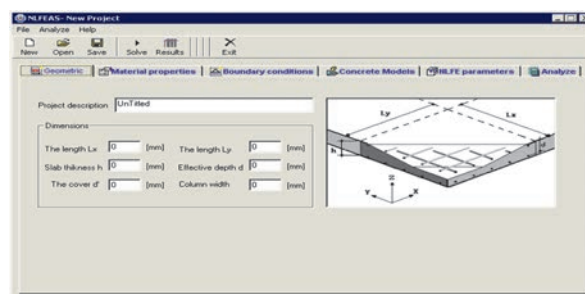
U stvarnim uvjetima, složeno ponašanje betonskih ploča dovodi do znatnih nesigurnosti povezanih sa svojstvima materijala ploča i uvjetima opterećenja. Te se nesigurnosti moraju uzeti u obzir u smjernicama za projektiranje takvih konstrukcija, naročito u slučajevima kada se konstrukcija potpuno ne uklapa u standarde u pogledu dimenzija, svojstava novih materijala, složenosti ili multidisciplinarnosti. U takvim se slučajevima može primijeniti probabilistička analiza jer se standardima za projektiranje ne mogu obuhvatiti sve primjene koje inženjeri mogu predvidjeti. U kontekstu armiranobetonskih konstrukcija, zanimljiva strategija je primjena pristupa odzivne površine u svrhu procjene analize pouzdanosti. Ta se strategija danas često koristi u slučajevima kada se odziv površine aproksimativno određuje analitičkom funkcijom, a pitanje analize pouzdanosti se rješava s obzirom na tu aproksimaciju.

U radu se analizira pouzdanost armiranobetonske ploče izrađene od betona visoke čvrstoće i običnog betona. Metoda odzivne površine primjenjuje se za procjenu eksplicitne polinomne funkcije drugog reda. Slučajni ulazni parametri su: čvrstoća betona, granica popuštanja čelika, koeficijent armiranja i nanoseno opterećenje. Pretpostavlja se da slom nastupa kada vrijednost pomaka prijeđe zadanu granicu. Analiziraju se dva slučaja: analiza pouzdanosti primjenom metode odzivne površine (eng. *Response Surface Method - RSM*) i Monte Carlo simulacije (eng. *Monte Carlo simulation - MCS*) te analiza osjetljivosti.

Metoda odzivne površine smatra se jednom od najraširenijih aproksimacijskih metoda, a uspješno se koristi u brojnim područjima [10]. U novije je vrijeme predloženo više MOP metoda [10, 11]. Da bi se postigli zacrtani ciljevi, razvijen je kombinirani pristup pouzdanost-mehaničko ponašanje kojim se želi postići spoj između nelinearnog proračuna ploča metodom konačnih elemenata i proračuna u kojima se za izračunavanje indeksa pouzdanosti koristi odzivna površina.

2. Program za nelinearnu analizu ploča pomoću metode konačnih elemenata

Za nelinearnu analizu betonskih ploča korišten je računalni program NLFEAS (nelinearna analiza ploča konačnim elementima, ili engl. *Non-Linear Finite Element Analysis of Slabs*). NLFEAS je razvijen u svrhu predviđanja i analiziranja ponašanja betona normalne i visoke čvrstoće [12, 13]. Programsko sučelje NLFEAS prikazano je na slici 1.



Slika 1. Programsko sučelje računalnog programa NLFEAS

Tablica 1. Usporedba rezultata proračuna i eksperimenta za ploču oznake ND 65-1-1

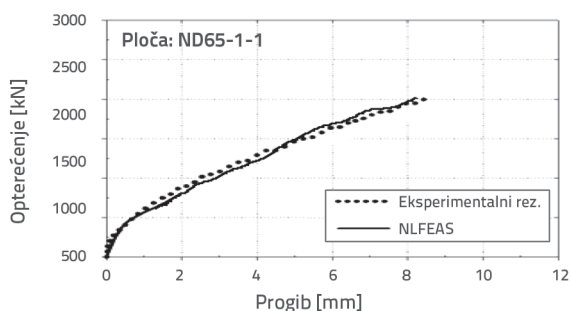
Eksperiment		Proračun		Proračun / Eksperiment	
Maksimalna sila P_u [kN]	Maksimalni progib D_u [mm]	Maksimalna sila P_u [kN]	Maksimalni progib D_u [mm]	P_u / P_u	D_u / D_u
2050	8,52	1920	8,57	0,937	1,006

Tablica 2. Svojstva odabranih ploča

Literatura	Oznaka ploče	Dužina L [mm]	Debljina d [mm]	Stup c [mm]	Čvrstoća betona f'_c [MPa]	Granica popuštanja čelika f_y [MPa]	Koeficijent armiranja ρ [%]
Tomaszewicz [7]	ND 65-1-1	2500	300	200	64,3	500	1,37
	ND 95-1-1	2500	300	200	83,7	500	1,37
	ND 95-1-3	2500	300	200	89,9	500	2,29
	ND115-1-1	2500	300	200	112	500	1,37
	ND 65-2-1	2200	220	150	70,2	500	1,56
	ND 95-2-1	2200	220	150	88,2	500	1,56
	ND 95-2-3	2200	220	150	89,5	500	2,33
	ND115-2-1	2200	220	150	119	500	1,56
	ND115-2-3	2200	220	150	108,1	500	2,33
	ND 95-3-1	1100	100	100	85,1	500	1,44
	ND95-2-3D	2200	220	150	80,3	500	2,33
Bani-Yasin [14]	H 1	1500	130	250	72,6	468	0,79
Marzouk i Hussein [4]	HS 3	1500	95	150	69	496	1,47
	HS 8	1500	120	150	69	420	1,11
	HS 9	1500	120	150	74	420	1,61
	HS 10	1500	120	150	80	420	2,33
	HS 13	1500	70	150	68	496	2,00
Elstner [15]	B 09	1828	114,3	254	43,9	341	2,00
	B 14	1828	114,3	254	50,5	325	3,00

2.1. Validacija programa NLFEM

Rezultati nelinearne analize ploča metodom konačnih elemenata, iskazani u svrhu utvrđivanja maksimalne sile, uspoređeni su s eksperimentalnim rezultatima, kao što je to prikazano u tablici 1. Krivulje opterećenje – progib ploča odabranih za ovu analizu konačnim elementima, isto kao i eksperimentalni rezultati, prikazani su na slici 2.



Slika 2. Usporedba rezultata proračuna i eksperimentalnih rezultata

Sa slike 1. te iz tablice 1. vidljivo je da se model konačnih elemenata ponaša na zadovoljavajući način, te da točno predviđa stvarno ponašanje ploča.

3. Usporedba eksperimentalnih predviđanja otpornosti na proboj

Iz dostupne je literature preuzeto devetnaest ploča, tj. ploče su odabrane na osnovi ispitivanja koja su proveli Tomaszewicz [7], Bani-Yasin [14], Marzouk i Hussein [4] te Elstner i Hognstad [15]. Treba napomenuti da su sve te ploče opterećene na proboj smicanjem. Ti su eksperimentalni rezultati korišteni u svrhu provjere valjanosti formule za otpornost na proboj smicanjem koja je definirana u odredbama Američkog instituta za beton (ACI-318-02) [3], Britanske norme (BS-8110-85) [6] i u kanadskom normativnom dokumentu (CSA-A23-94) [16], te da bi se provjerila valjanost računalnog programa prikazanog u ovom radu. Odabrane ploče su slobodno oslonjene ploče kvadratnog oblika s raznim čvrstoćama betona, koeficijentima armiranja i debljinama. Istraživanja u tim pločama objavljena su u raznim radovima kako je to iskazano u tablici 2.

Općenito se granična sila proboja smicanjem, za ploču bez posmične armature, može iskazati jednadžbom

$$\begin{aligned} V_u &= V_c \\ V_c &= v_c \cdot u \cdot d \end{aligned} \quad (1)$$

gdje je:

V_c - posmično naprezanje betona
 u - opseg kritičnog presjeka
 d - statička visina ploče.

Ukratko će se navesti propisi u kojima su iskazane jednadžbe za otpornost na proboj smicanjem. U dokumentu ACI-318-02 [3] definirana je otpornost betonskih ploča na smicanje kako slijedi:

$$V_c = \min \left\{ \begin{aligned} &\left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \frac{\sqrt{f_c}}{6} b_0 \cdot d \\ &\left(2 + \frac{\alpha_s \cdot d}{b_0}\right) \frac{\sqrt{f_c}}{12} b_0 \cdot d \\ &\frac{\sqrt{f_c}}{3} b_0 \cdot d \end{aligned} \right\} \quad [\text{N}] \quad (2)$$

gdje je

β_c - odnos minimalnih i maksimalnih dimenzija stranica stupa.
 b_0 - opseg kritičnog presjeka
 α_s - faktor mjerila baziran na lokaciji kritičnog presjeka $\alpha_s = \begin{cases} 4 \\ 3 \\ 2 \end{cases}$

tz. 4 za unutarnji stup, 3 za rubni stup i 2 za kutni stup.

Prema preporukama ACI-ja, kritični presjek nalazi se na pola promjera (0,5 d) računajući od lica stupa. Prema kanadskim odredbama (CSA-1994) [16], otpornost betona na proboj smicanjem izražava se kao najmanja od sljedeće tri granične vrijednosti:

$$V_c = \min \left\{ \begin{aligned} &0,2 \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \sqrt{f_c} b_0 \cdot d \\ &\left(2 + \frac{\alpha_s \cdot d}{b_0}\right) \sqrt{f_c} b_0 \cdot d \\ &0,4 \cdot \sqrt{f_c} b_0 \cdot d \end{aligned} \right\} \quad [\text{N}] \quad (3)$$

gdje je:

b_c - odnos minimalnih i maksimalnih bočnih dimenzija stupa
 b_0 - opseg kritičnog presjeka
 α_s - faktor mjerila baziran na lokaciji kritičnog presjeka; on je jednak faktoru iz propisa ACI.

Proboj posmikom kontrolira se na kritičnom presjeku koji se nalazi na pola promjera (0,5 d) računajući od lica stupa.

U britanskom standardu (BS-8110) [6] otpornost betona na proboj smicanjem zadaje se kako slijedi:

$$V_c = 0,79(100 \cdot \rho)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{400}{d}\right)^{\frac{1}{4}} \cdot b_0 \cdot d \quad [\text{N}] \quad (4)$$

gdje je:

f_{cu} - karakteristična čvrstoća kocke
 b_0 - opseg kritičnog presjeka.

Međutim, koriste se i sljedeća ograničenja:

$$\begin{aligned} \left(\frac{f_{cu}}{25}\right)^{\frac{1}{3}} &\geq 1 \\ 0,15 &\leq (100 \cdot \rho) \leq 3 \\ \left(\frac{400}{d}\right) &\geq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

$$V_c \leq \min(0,8\sqrt{f_{cu}}b_0 \cdot d, 5b_0 \cdot d)$$

Prema BS-8110 [6], kritični se presjek nalazi na jedan i pol promjera (1,5d) računajući od lica stupa.

Kako je prikazana u ovom poglavlju, kod svih je odabranih ploča nastupio proboj smicanjem. Dakle, ova analiza konačnih elemenata pokazuje da maksimalno opterećenje (P_d) dobiveno prikazanim računalnim programom odgovara sili proboja (V_d), jer program može predvidjeti način sloma pomoću odgovarajućeg postupka (koji se spominje u sljedećem poglavlju).

Usporedba rezultata dobivenih primjenom spomenutih propisa i pomoću ove analize konačnim elementima prikazana je u tablici 3. i na slici 3. (u obzir se ne uzimaju koeficijenti sigurnosti za djelovanja niti za svojstva materijala koji su određeni u spomenutim propisima). U tablici se daju eksperimentalni i predviđeni odnosi otpornosti na proboj za analizirane ploče. Najveća točnost postignuta je primjenom prikazanog modela konačnih elemenata i primjenom propisa BS-8110 [6], dok je točnost niža kod propisa ACI i CAN.

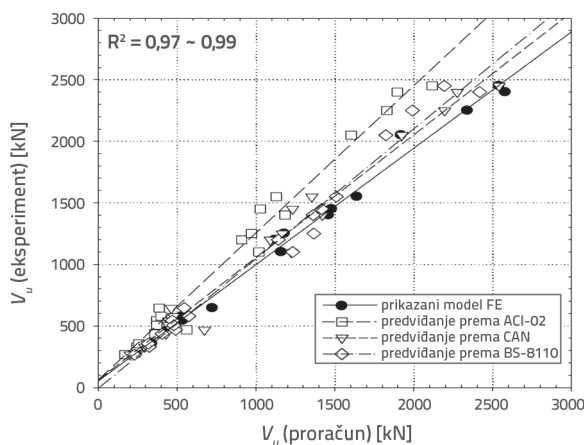
Vrijednosti dobivene primjenom propisa ACI u nekim su slučajevima precijenjene, kao na primjer u slučaju ploča HS9, HS10, HS13, B14. Treba međutim spomenuti da te ploče imaju visok udio armature. S druge strane, predviđanje na bazi propisa ACI je za proboj smicanjem konzervativnije od procjena koje se daju u drugim propisima, ali je za neke ploče ipak prilično nesigurno.

Da bi se provjerila točnost propisa kao sredstva za predviđanje otpornosti ploča na proboj smicanjem i to za slučaj ploča izrađenih od betona visokih čvrstoća, odnosi između proračunskih i eksperimentalnih rezultata prikazani su na temelju čvrstoće betona, uzimajući pritom u obzir činjenicu da čvrstoća betona kod odabranih ploča varira od 44 do 119 MPa, kao što se to može vidjeti na slici 4.

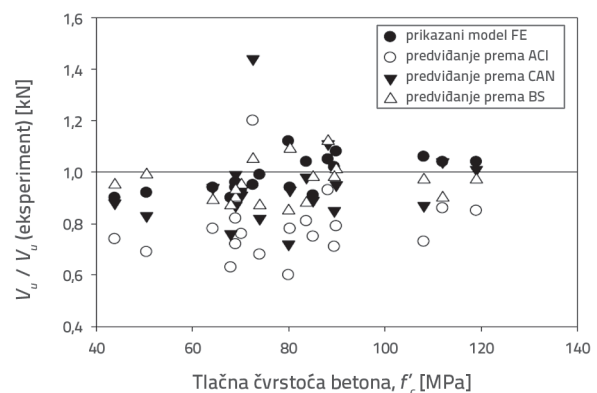
Na toj slici vidimo da je većina predviđenih rezultata ispod granice sigurnosti ($V_d/V_{exp} = 1$) i to za sve vrijednosti čvrstoće betona. Također se može zamijetiti da su rezultati dobiveni primjenom propisa ACI konzervativniji od ostalih, naročito u slučaju ploča HS10, HS13. S druge strane, prikazani model konačnih elemenata i BS-8110 na najboljoj su razini sigurnosti, uz donekle konzervativne rezultate za sve vrijednosti f_c . Stoga se može zaključiti da se svi spomenuti propisi, isto kao i prikazani model konačnih elemenata, mogu smatrati pogodnima za predviđanje otpornosti betona visoke čvrstoće na proboj, i to za vrijednosti do 110 MPa.

Tablica 3. Svojstva odabranih ploča

Provedene analize		Eksperimentalne vrijednosti	Program NLFEAS	Predviđanja na temelju propisa			Usporedba				
Analizirane ploče				$V_{u,exp}$ [kN]	V_u [kN]	ACI V_u [kN]	CAN V_u [kN]	BS-8110 V_u [kN]	Proračun $V_u/V_{u,exp}$	ACI $V_u/V_{u,exp}$	CAN $V_u/V_{u,exp}$
Literatura	Ploča	f'_c [MPa]									
Tomaszewicz [7]	ND 65-1-1	64,3	2050	1920	1603,75	1924,49	1823,43	0,94	0,78	0,94	0,89
	ND 95-1-1	83,7	2250	2340	1892,75	2195,7	1990,95	1,04	0,81	0,98	0,88
	ND 95-1-3	89,9	2400	2580	1896,31	2275,57	2417,44	1,08	0,79	0,95	1,01
	ND115-1-1	112	2450	2540	2116,6	2539,92	2193,94	1,04	0,86	1,04	0,90
	ND 65-2-1	70,2	1200	1120	909,35	1091,22	1142,34	0,93	0,76	0,91	0,95
	ND 95-2-1	88,2	1100	1160	1019,29	1223,15	1232,65	1,05	0,93	1,11	1,12
	ND 95-2-3	89,5	1450	1480	1026,77	1232,13	1416,81	1,02	0,71	0,85	0,98
	ND115-2-1	119	1400	1460	1183,96	1420,75	1362,07	1,04	0,85	1,01	0,97
	ND115-2-3	108,1	1550	1640	1183,96	1354,12	1508,85	1,06	0,73	0,87	0,97
	ND 95-3-1	85,1	330	300	1128,43		324,32	0,91	0,75	0,89	0,98
ND95-2-3D	80,3	1250	1180	246	1167,08	1366,5	0,94	0,78	0,93	1,09	
B-Yasin [14]	H 1	72,6	468	444	972,57	673,47	490,65	0,95	1,20	1,44	1,05
Marzouk i Hussein [4]	HS 3	69	356	340	561,22	309,34	318,97	0,96	0,72	0,87	0,90
	HS 8	69	436	412	257,78	430,62	405,6	0,94	0,82	0,99	0,93
	HS 9	74	543	536	358,85	445,94	469,91	0,99	0,68	0,82	0,87
	HS 10	80	645	724	371,62	463,67	545,64	1,12	0,60	0,72	0,85
	HS 13	68	267	240	169,32	203,19	231,34	0,90	0,63	0,76	0,87
Elstner [15]	B 09	43,9	504,9	456	371,89	446,27	478,87	0,90	0,74	0,88	0,95
	B 14	50,5	578,3	532	398,87	478,65	574,37	0,92	0,69	0,83	0,99
Prosječno								0,99	0,78	0,94	0,95
Standardna devijacija								0,07	0,13	0,15	0,07



Slika 3. Usporedba eksperimentalnih i proračunskih rezultata



Slika 4. Usporedba eksperimentalnih i proračunskih vrijednosti granične otpornosti na posmik prema čvrstoći betona

4. Predviđanje načina sloma

U analizi armiranobetonskih ploča velika se važnost pridaje načinu na koji dolazi do njihovog sloma. Općenito uzevši, do posmičnog sloma dolazi u slučaju proboja stupa kroz ploču, a slom savijanjem je slom do kojeg dolazi uslijed naglog porasta

vrijednosti progiba. Tako slom definiraju Elstner i Hognstad [15] te mnogi drugi istraživači [9, 12, 17]. Način sloma može se predvidjeti pomoću odnosa (ϕ_0), a radi se o odnosu između predviđene maksimalne sile (P_0) i proračunske otpornosti ploče na savijanje (P_{flex}), tj.

$$\phi_0 = P_0 / P_{flex} \tag{6}$$

Ovaj postupak je prvi uveo Hognestad [15], a i danas ga primjenjuju mnogi istraživači [4, 5, 18]. U ovom se slučaju granična otpornost ploče na savijanje (P_{flex}) ocjenjuje pomoću teorije linije popuštanja, pri čemu se pretpostavlja da neće doći do posmičnog sloma. Kao rezultat, za slučaj $\phi_0 \leq 1$ do sloma dolazi posmikom, dok u slučaju $\phi_0 > 1$ do sloma dolazi savijanjem. Maksimalna sila potrebna za aktiviranje savojnog mehanizma može se odrediti pomoću sljedeće jednadžbe koja se temelji na virtualnom radu u analizi linije popuštanja:

$$P_{flex} = 8 \cdot M \cdot \left(\frac{L}{L-c} - 0,172 \right) \quad (7)$$

gdje je:

L - bočna dimenzija ploče kvadratnog oblika

c - bočna dimenzija kvadratnog stupa

M - granični moment savijanja po jedinici širine. Taj se moment može izračunati iz široko prihvaćene jednadžbe predložene u propisima ACI-318:

$$M = \rho \cdot f_y \cdot d^2 \left[1 - \frac{k_2}{k_1 k_3} \cdot \frac{\rho \cdot f_y}{f'_c} \right] \quad (8)$$

gdje je:

ρ - koeficijent armiranja

f_y - granica popuštanja čelika

f'_c - tlačna čvrstoća betona

d - statička visina ploče

k_1, k_2, k_3 - parametri blokova napreznja.

Kad je riječ o betonu normalne čvrstoće, često se smatra da je vrijednost ($k_2/k_1 k_3$) konstantna te da iznosi 0,59. Međutim, u ovom su istraživanju usvojeni modificirani parametri blokova napreznja prema radu Attarda i Stewarta [19]. Sljedeće se jednadžbe predlažu za ocjenu tih parametara za čvrstoće betona do 120 MPa:

$$k_2 = 1,0948(f'_c)^{-0,091} \geq 0,67$$

$$k_1 \cdot k_3 = \begin{cases} 1,2932(f'_c)^{-0,0992} \geq 0,71 \\ 0,647(f'_c)^{-0,0998} \geq 0,58 \end{cases} \quad (9)$$

Opisana metoda za predviđanje vrste sloma ploče unesena je u modificirani program (NLFES). Treba napomenuti da je usvojen parametar $k_1 k_3$ na bazi ispitivanja na uzorcima u obliku pseće kosti. Dobiveni rezultati uspoređeni su s eksperimentalnim rezultatima, kao što je to prikazano u tablici 4. Maksimalna sila, kako je predviđeno računalnim programom, jest opterećenje koje udovoljava kriterijima sloma (postiže se ekvivalentna granična deformacija).

Jasno se može vidjeti da se prikazani model konačnih elemenata može koristiti za vrlo točno predviđanje načina sloma ploče. Stoga se može reći da je primjena $\phi_0(P_u/P_{flex})$, koju predlaže Hognestad [15] za predviđanje načina sloma, istovremeno i praktična i pouzdana. Stoga, kada program

pokazuje da je do sloma ploče došlo zbog proboja posmikom, tada se veličina maksimalne sile (P_u) iskazane u programu u istom programu označava kao otpornost na proboj posmikom (V_u).

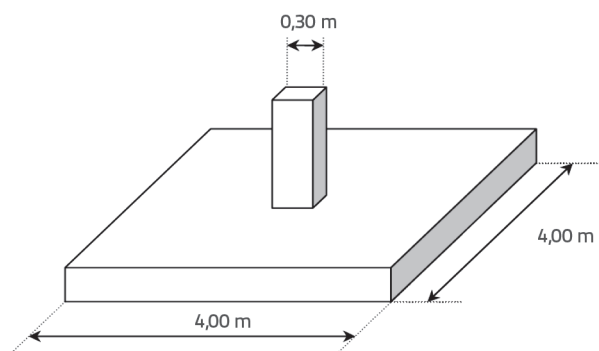
5. Glavni parametri koji bitno utječu na proboj ploča posmikom

Na osnovi parametarskih analiza geometrije i materijala koje su prikazane u prethodnom poglavlju, ustanovljeno je da ima i manje važnih parametara koji samo donekle utječu na ponašanje ploče ili koji utječu samo na maksimalnu silu, kao što je to kvaliteta čelika, raspored armature i rubni uvjeti [20]. S druge strane imamo vrlo važne parametre koji bitno utječu na ukupan odziv ploče, a to su čvrstoća betona, koeficijent armiranja i odnos raspona prema statičkoj visini. Zato se u ovom poglavlju provode analitička istraživanja na pretpostavljenoj ploči pune veličine da bi se istražio zajednički utjecaj tih važnih parametara na ponašanje ploče. Kako je utvrđeno da ovdje prikazani model konačnih elemenata može vrlo točno predvidjeti ponašanje ploče, tj. da se dobro podudara s eksperimentalnim rezultatima, obavljeno je istraživanje pretpostavljene ploče pune veličine, kvadratnog oblika i realnih dimenzija.

Dimenzije ploče prikazane su na slici 5. Ploča je analizirana uzimajući u obzir razne vrijednosti glavnih parametara i to kako slijedi:

- koeficijent armiranja (ρ) [0,5; 0,75; 1,00; 1,50; 2,00] %
- čvrstoća betona (f'_c) [30, 50, 110] MPa, i
- omjer raspona i statičke visine (s/d) pri čemu je korišteno nekoliko efektivnih visina (d) [80, 100, 150, 200, 250] mm i jedna duljina od 4,0 m.

Analiza je obavljena pomoću razvijenog programa NLFES i primjenom materijalnih parametara i modela koji su korišteni u prethodnom poglavlju. Dobiveni rezultati opisani su u poglavljima 5.1. i 5.2., tj. opisan je utjecaj na maksimalnu silu i način sloma pod utjecajem glavnih parametara kao što su udio armature, omjer duljine i visine te čvrstoća betona.



Slika 5. Dimenzije ploče

Tablica 4. Usporedba eksperimentalnih i proračunskih načina sloma

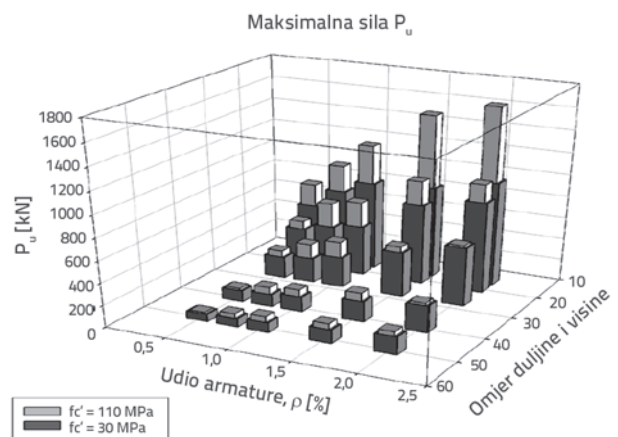
Usporedba rezultata eksperimenta i proračuna				Eksperiment		Proračun			
Analizirane ploče									
Literatura	Ploča	f'_c [MPa]	ρ [%]	Maksimalna sila P_u [kN]	Način sloma	P_u	P_{flex}	P_u/P_{flex}	Način sloma
Tomaszewicz [7]	ND 65-1-1	64,3	1,37	2050	Proboj	1920	4465,12	0,43	Proboj
	ND 95-1-1	83,7	1,37	2250	Proboj	2340	4178,57	0,56	Proboj
	ND 95-1-3	89,9	2,29	2400	Proboj	2580	6615,38	0,39	Proboj
	ND115-1-1	112	1,37	2450	Proboj	2540	4233,33	0,60	Proboj
	ND 65-2-1	70,2	1,56	1200	Proboj	1120	2434,78	0,46	Proboj
	ND 95-2-1	88,2	1,56	1100	Proboj	1160	2468,09	0,47	Proboj
	ND 95-2-3	89,5	2,33	1450	Proboj	1480	3609,76	0,41	Proboj
	ND115-2-1	119	1,56	1400	Proboj	1460	2561,40	0,57	Proboj
	ND115-2-3	108,1	2,33	1550	Proboj	1640	3727,27	0,44	Proboj
	ND 95-3-1	85,1	1,44	330	Proboj	300	491,80	0,61	Proboj
ND95-2-3D	80,3	2,33	1250	Proboj	1180	3575,76	0,33	Proboj	
B-Yasin [14]	H 1	72,6	0,79	468	Savijanje-proboj	444	493,33	0,90	Proboj
Marzouk i Hussein [4]	HS 3	69	1,47	356	Savijanje-proboj	340	478,87	0,71	Proboj
	HS 8	69	1,11	436	Proboj	412	490,48	0,84	Proboj
	HS 9	74	1,61	543	Proboj	536	687,18	0,78	Proboj
	HS 10	80	2,33	645	Proboj	724	1019,72	0,71	Proboj
	HS 13	68	2,00	267	Proboj	240	328,77	0,73	Proboj
Elstner i Hognestad [15]	B 01	14,2	0,50	178,3	Savijanje	172	160,75	1,07	Savijanje
	B 02	47,6	0,50	200,1	Savijanje	194	190,20	1,02	Savijanje
	B 04	47,7	1,00	333,6	Savijanje	300	297,03	1,01	Savijanje
	B 09	43,9	2,00	504,9	Proboj	456	608,00	0,75	Proboj
	B 14	50,5	3,00	578,3	Proboj	532	844,44	0,63	Proboj
Taylor	S1*	35	0,6	32	Savijanje	32,08	13,42	2,39	Savijanje
	S7*	38	0,8	31	Savijanje	30,52	11,74	2,60	Savijanje

*Ravnomjerno opterećene ploče

5.1. Utjecaj glavnih parametara na maksimalnu silu

Kao što se može vidjeti na slici 6., maksimalna sila razlikuje se u svakom smjeru i na svakoj razini, ovisno o koeficijentu armiranja, odnosu između raspona i statičke visine te o čvrstoći betona. Pri niskoj vrijednosti ρ (0,50 %), maksimalna sila P_u povećava se na 670 % i 828 % pri povećanju statičke visine ploče d od 80 do 250 mm za $f'_c = 30$ i 110 MPa. Pri visokoj vrijednosti ρ (2,0 %), P_u se povećava u odgovarajućim postocima 485 % i 707 %, za $f'_c = 30$ i 110 MPa, te za istu promjenu vrijednosti (d).

Ustanovljeno je da je utjecaj razreda betona na maksimalnu silu nizak pri niskom udjelu armature ($\rho = 0,5$ %) i kod male debljine ploče ($d = 80$ mm). Međutim, nosivost se povećava za 14,7 % kada čvrstoća betona poraste s 30 na 110 MPa. Pri visokoj vrijednosti ρ (2,00 %), te za debljinu ploče od $d = 250$

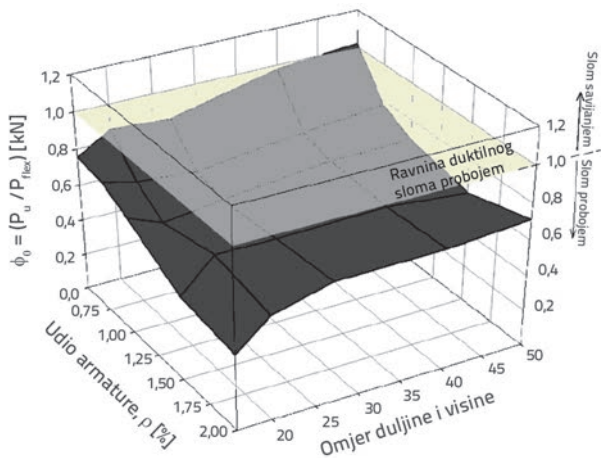


Slika 6. Utjecaj čvrstoće betona na graničnu nosivost ploče

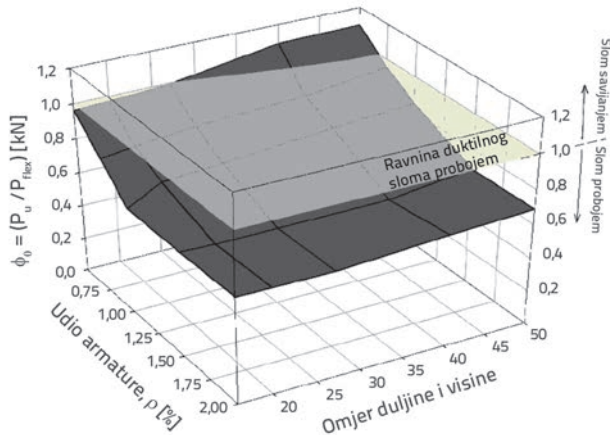
mm, granična se vrijednost povećava za 70 % kod iste promjene čvrstoće betona. Stoga se može zaključiti da se nosivost ploče usporedno s povećanjem čvrstoće betona najviše povećava kod ploča velike debljine s velikim udjelom armature (nizak omjer između raspona i statičke visine). Potrebno je ipak napomenuti da nema koristi od povećanja čvrstoće betona primjenom betona visoke čvrstoće u slučajevima kada se radi o tankim pločama s malim udjelom armature.

5.2. Utjecaj glavnih parametara na vrstu sloma

Opisana metoda primjenjuje se za određivanje vrste sloma, a rezultati ovdje prikazane analize konačnih elemenata iskazani su na slikama 7., 8. i 9. za vrijednosti $f'_c = 30, 50, 100$ MPa. Te slike pokazuju da se slom uslijed proboja posmikom može očekivati kod ploča s niskim omjerom raspona i statičke visine i s visokim udjelom armature i to za sve razine čvrstoće betona, a naročito za beton niske čvrstoće. Također je ustanovljeno da do duktilno-savojnog sloma dolazi kod niskog udjela armature $\rho < 1\%$ za sve ploče izvedene od betona visoke čvrstoće.



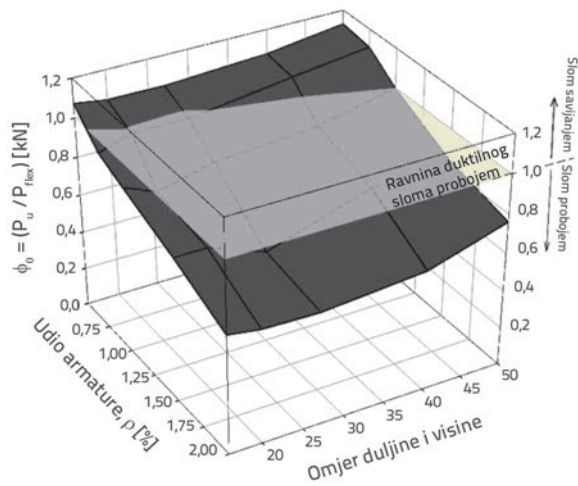
Slika 7. Predviđanje vrste sloma za $f'_c = 30$ MPa



Slika 8. Predviđanje vrste sloma za $f'_c = 50$ MPa

Statička visina ili omjer raspona i statičke visine malo utječu na vrstu sloma u slučaju visokog udjela armature. Međutim, taj omjer

može utjecati na vrstu sloma kod niskog udjela armature, naročito kod betona niske i srednje čvrstoće. Osim toga, slike 7. do 9. pokazuju da u slučaju $f'_c = 30, 50$ i 110 MPa, do sloma posmikom dolazi kod $\rho > 0,3\%, 0,6\%,$ i $1,00\%$. Stoga možemo zaključiti da su ploče izrađene od betona niske i srednje čvrstoće uglavnom podložnije proboju posmikom negoli ploče izrađene od betona visoke čvrstoće, naročito u slučaju visokog udjela armature.



Slika 9. Predviđanje vrste sloma za $f'_c = 110$ MPa

6. Analiza pouzdanosti ploče

6.1. Funkcija ponašanja

Funkcijom ponašanja, koja je poznata i kao granično stanje, prostor podataka se dijeli u dva područja: sigurno područje i područje sloma. Rezultati simulacije omogućuju razvoj funkcije umjetnog ponašanja (površine odziva), koja približno opisuje stanje ploče u odnosu na prevenciju sloma. Postupak se sastoji od provedbe polinomne regresije na nizu rezultata koji su iskazani prema punoj faktorskoj tablici. U našem se slučaju za interpoliranje dobivenog maksimalnog progiba koristi kvadratna regresija, pri čemu se za svaki faktor razmatra nekoliko razina: otpornost betona, granica popuštanja armature, statička visina i koeficijent armiranja.

Za metode pouzdanosti s konačnim elementima karakteristične su količine odziva iz rješenja konačnih elemenata koje se uvodi u funkciju ponašanja. Na primjer, jednostavna funkcija graničnog ponašanja glasi:

$G = \text{prag} - \text{količina odziva}.$

Uzimajući u obzir granično stanje progiba, funkcija sloma izražava se kako slijedi:

$$G(f'_c, f_y, d, \rho) = (L/500) - g(f'_c, f_y, d, \rho) \tag{10}$$

gdje je:
 $L/500$ - kritičan progib prema EC 02 [21].

Identificirane površine odziva za ploče od betona visoke čvrstoće (HSC - *high strength concrete*) i od običnog betona (OC - *ordinary concrete*) mogu se izravno dobiti pomoću tablice

6. kako slijedi u izrazima (11) i (12). Sažeti prikaz slučajnih varijabli, s raspodjelama vjerojatnosti i parametrima, daje se u tablici 5.

$$g(f'_c, f_y, \rho, d) = (-0,00122500120038601 \cdot f_c^2 + 0,00267246465142617 \cdot f'_c \cdot f_y - 0,0284541275397354 \cdot f'_c \cdot \rho - 0,00239308507731399 \cdot f'_c \cdot d - 0,402347866577491 \cdot f'_c - 0,00160494157962584 \cdot f_y^2 + 0,00306486937542444 \cdot f_y \cdot \rho + 0,0115083956160873 \cdot f_y \cdot d + 0,896029536088040 \cdot f_y + 1,062341704809601 \cdot \rho^2 + 0,0484911191408620 \cdot d \cdot \rho - 16,0222314506990 \cdot \rho - 0,00199483323484406 \cdot d^2 + 0,374175860582561 \cdot d - 186,471678670218) \quad (11)$$

$$g(f'_c, f_y, \rho, d) = (-0,00807625426347610 \cdot f_c^2 - 0,00656764689271723 \cdot f'_c \cdot f_y + 0,0277941806483146 \cdot f'_c \cdot \rho + 0,00753561317629636 \cdot f'_c \cdot d + 0,5908996314087630f'_c - 0,00208879872667190 \cdot f_y^2 + 0,14063829984904 \cdot f_y \cdot \rho - 0,00252944665820754 \cdot f_y \cdot d + 2,14914137789604 \cdot f_y + 2,15727734249363 \cdot \rho^2 - 0,0740173083144320 \cdot d \cdot \rho - 51,1372641994972 \cdot \rho + 0,00172138023115786 \cdot d^2 + 0,196570690049373 \cdot d - 410,91915000937) \quad (12)$$

Tablica 5. Probabilistički modeli slučajnih varijabli

Varijabla	Raspodjela	Srednja vrijednost	Standardno odstupanje	Literatura
f'_c	Normalna	27.5 (OC) / 62.5 to (HSC)	0,11	[22]
f_y	Normalna	405	0,08	[22]
ρ	Normalna	1.75	0,024	[23]
d	Normalna	205	0,03	[24]

Tablica 6. Rezultati analize pouzdanosti

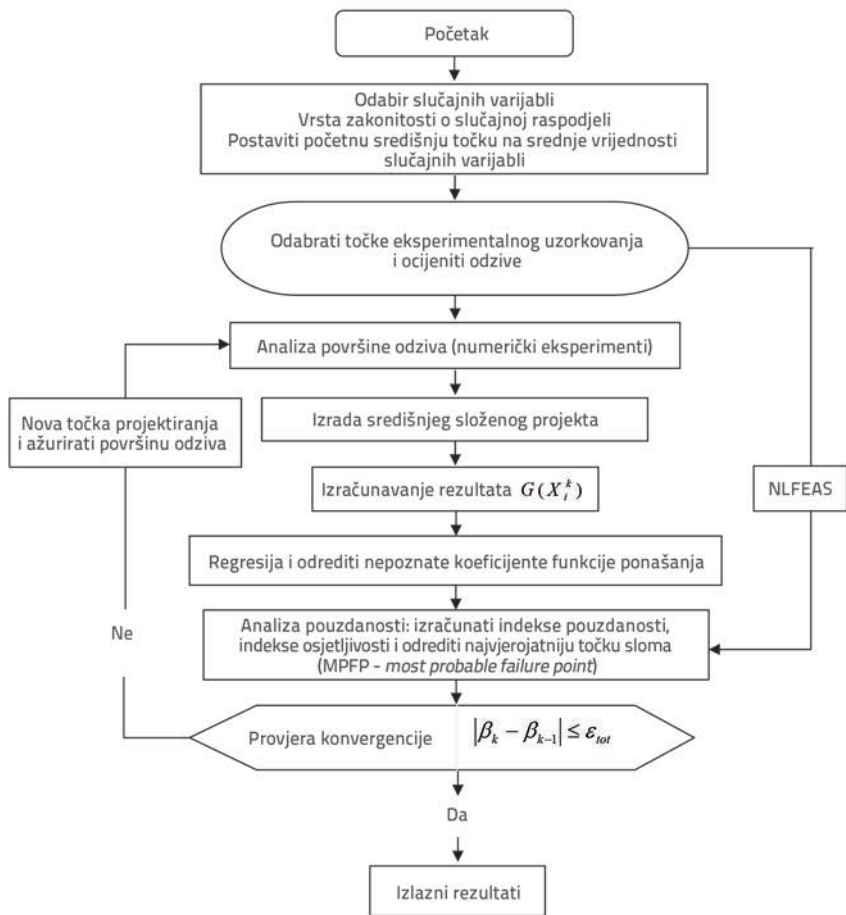
Simulacija	f'_c [MPa]		f_y [MPa]	ρ [%]	d [mm]	OC				HSC			
	OC	HSC				D [mm]	P_u / P_f	β RSM	β MCS	D [mm]	P_u / P_f	β RSM	β MCS
	f'_c [MPa]	f'_c [MPa]											
S1	25	60	400	1,5	200	3,533	0,266	3,12	3,14	2,587	0,231	3,78	3,79
S2	25,5	60,5	410	1,8	210	2,530	0,208	3,64	3,71	1,763	0,174	4,26	4,31
S3	25,5	60,5	410	1,75	210	2,598	0,212	3,6	3,64	1,825	0,178	4,22	4,29
S4	26	61	405	2	205	2,725	0,204	3,69	3,85	1,960	0,168	4,35	4,41
S5	26	61	410	1,65	205	2,939	0,230	3,42	3,43	2,142	0,197	4,07	4,05
S6	25,75	60,75	405	1,5	202	3,390	0,257	3,2	3,21	2,489	0,223	3,86	3,88
S7	25,25	60,25	402	1,6	205	3,092	0,240	3,34	3,34	2,208	0,206	4,01	4,00
S8	25	60	407	1,5	204	3,302	0,253	3,27	3,33	2,399	0,218	3,91	3,94
S9	25,25	60,25	406	1,55	203	3,258	0,249	3,31	3,32	2,367	0,215	3,94	3,96
S10	25,75	60,75	403	1,525	200	3,479	0,259	3,18	3,19	2,546	0,226	3,83	3,85
S11	25,5	60,5	401	1,9	201	2,809	0,222	3,5	3,55	2,023	0,185	4,18	4,24
S12	26	61	408	1,7	206	2,828	0,224	3,48	3,49	2,044	0,191	4,11	4,14
S13	27	62	409	1,85	207	2,592	0,206	3,67	3,74	1,838	0,175	4,25	4,3
S14	27	62	405	1,725	208	2,699	0,216	3,57	3,62	1,924	0,186	4,17	4,22
S15	30	65	410	2	210	2,249	0,185	3,87	3,9	1,543	0,159	4,48	4,55
S16	28	63	404	1,575	204	2,997	0,238	3,36	3,38	2,292	0,209	3,98	3,98
S17	29	64	403	1,6	202	3,049	0,238	3,36	3,41	2,337	0,211	3,96	3,95
S18	29	64	407	1,65	205	2,839	0,224	3,48	3,43	2,139	0,197	4,07	4,01
S19	30	65	410	1,8	200	2,864	0,218	3,55	3,58	2,113	0,190	4,14	4,13
S20	30	65	400	1,5	200	3,307	0,255	3,25	3,3	2,522	0,229	3,8	3,81
S21	30	65	402	1,75	202	2,836	0,221	3,51	3,57	2,082	0,195	4,09	4,07
S22	28,5	63,5	400	2	202	2,553	0,205	3,68	3,73	1,898	0,174	4,26	4,31
S23	27,5	62,5	401	1,5	204	3,281	0,249	3,13	3,16	2,388	0,220	3,89	3,93
S24	29,5	64,5	400	1,85	205	2,584	0,208	3,64	3,66	1,834	0,181	4,22	4,28
S25	25	60	402	1,55	201	3,385	0,256	3,23	3,25	2,470	0,221	3,88	3,91

* $L_{slabs} = 2,5$ m, $E = 200000$ [MPa], OC - obični beton (eng. *ordinary concrete*), HSC - beton visoke čvrstoće (eng. *high strength concrete*), RSM - metoda odzivne plohe (eng. *response surface method*), MCS - Monte Carlo metoda, beta - indeks pouzdanosti

Trajna opterećenja su $G =$ vlastita težina ploče, a promjenljiva opterećenja su $Q = 5 \text{ kN/m}^2$. Aktivna gravitacijska opterećenja izračunavaju se usvajanjem sljedeće kombinacije $P_u = 1,35 \cdot G + 1,5Q = 24,375 \cdot 4 = 97,5 \text{ kN}$. Funkcija polinomnog odziva određuje se pomoću glavnoga kompozitnog plana pokusa. U ovom slučaju koristi se $2^n + 2n + 1$. Da bi se preciznije odredila nelinearnost točnog graničnog stanja, u sljedeći kvadratni polinom mogu se uključiti miješani članovi.

6.2. Razni stadiji izračuna indeksa pouzdanosti pomoću metode odzivne površine

Najprije treba pretpostaviti da se početna središnja točka sastoji od srednjih vrijednosti slučajnih varijabli za prvu iteraciju. Odzivi se izračunavaju provedbom nelinearne analize konačnim elementima za ploče (NLFEAS) na točkama eksperimentalnog uzorkovanja, za razmatrani model površine odziva. Na taj način dobivena je funkcija graničnog stanja u obliku osnovnih slučajnih varijabli k . Za svaku slučajnu varijablu dobiven je indeks pouzdanosti β i odgovarajuće koordinate kontrolne točke i direkcijski kosinusi, i to pomoću izraza za funkciju graničnog stanja i FORM-a. Linearnom interpolacijom određene su koordinate nove središnje točke.



Slika 10. Dijagramski prikaz predloženog pristupa

Ažuriranje lokacije središnje točke se nastavlja sve do konvergencije na unaprijed određenoj razini tolerancije. U konačnoj se iteraciji koristi informacija o vremenski najbližoj središnjoj točki za formuliranje konačne površine odziva. Zatim se koristi FORM i SORM za izračunavanje indeksa pouzdanosti i odgovarajućih koordinata najvjerojatnije točke sloma. Pojedinačni koraci postupka prikazani su dijagramom na slici 10.

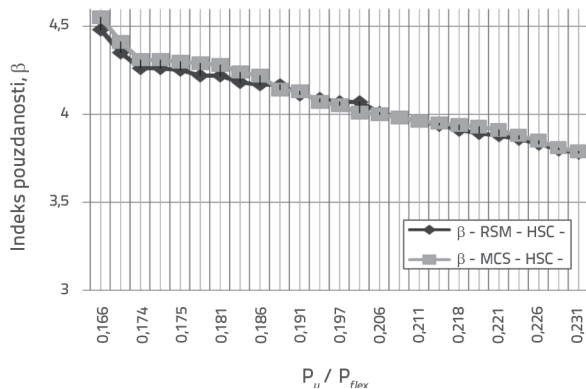
6.3. Prvi slučaj: usporedba metoda pouzdanosti

U ovom prvom slučaju uspoređuju se sljedeće metode pouzdanosti: RSM - metoda odzivne plohe (eng. *response surface method*) [25] i Monte Carlo. Varijacije indeksa pouzdanosti β u odnosu na omjer P_u/P_{flex} prikazane su na slikama 11. i 12. za razne metode pouzdanosti. Primjenom predloženog pristupa dobivaju se vrijednosti indeksa pouzdanosti koje su slične rezultatima metode Monte Carlo. Međutim, broj potrebnih iteracija iznosi $Ne = 1.000.000$ (indikator vremena pridružen proračunskoj metodi), dok se u predloženom pristupu koristi samo 13 iteracija. Dakle, novorazvijena metoda donosi i uštede u vremenu računanja.

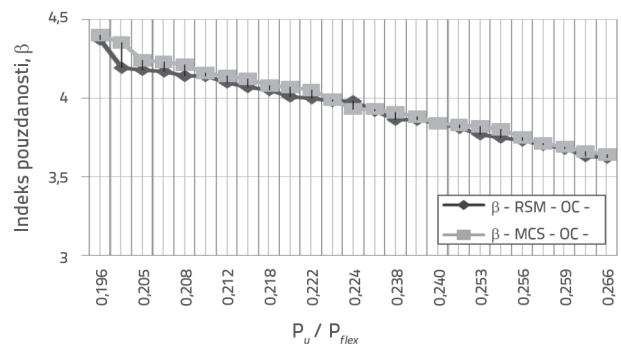
Indeks pouzdanosti određuje se za razne vrijednosti P_u/P_{flex} . Rezultati su iskazani u tablici 6., a njihov grafički prikaz daje se na slikama 11 i 12. Rezultati pokazuju da pouzdanost presjeka u velikoj mjeri ovisi o odnosu P_u/P_{flex} i o raznim razinama svakog pojedinog faktora, a to su: otpornost betona, granica popuštanja čelika, statička visina i koeficijent armiranja. Kod jednostruko armiranih presjeka, indeks pouzdanosti β_{RSM} pada sa 4,48 na 3,78 ako P_u/P_{flex} raste od 0,159 na 0,231. Pouzdanost presjeka povećava se u slučaju značajnih vrijednosti tlačne čvrstoće, naročito za ovu vrstu ploča od betona visoke čvrstoće. Međutim, indeks pouzdanosti β_{RSM} pada s 3,87 na 3,12 ako se P_u/P_{flex} poveća s 0,185 na 0,266. Tlačna čvrstoća doprinosi pouzdanosti presjeka, naročito kada je $P_u/P_{flex} = 0,222$. Ipak, doprinos svih parametara izuzetno je važan za sve vrste ploča u smislu postizanja željene razine pouzdanosti.

6.4. Drugi slučaj: analiza osjetljivosti

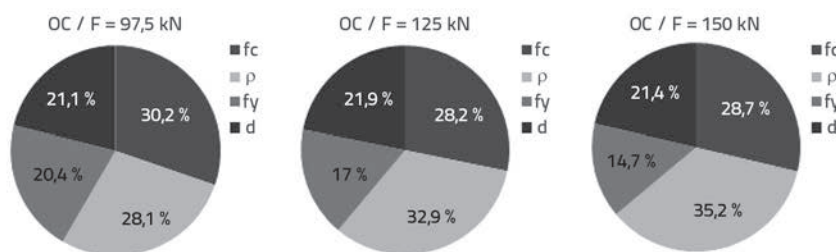
U ovom drugom slučaju, analiza osjetljivosti provodi se da bi se ispitao utjecaj ulaznih parametara na nelinearnu analizu ploča. Ispitane su tri vrijednosti F da bi se istražila varijabilnost osjetljivosti ovisno o razini vrijednosti F . Vrijednosti F iznose: 97,5 kN, 125 kN i 150 kN. U okviru ove analize želi se ispitati varijabilnost osjetljivosti kada se opterećenje približi



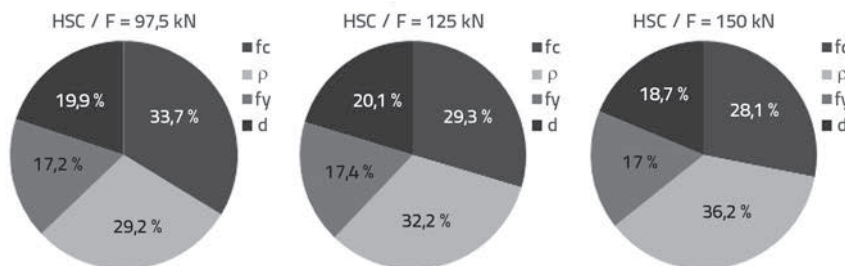
Slika 11. Indeks pouzdanosti ploče od betona visoke čvrstoće (HSC) u odnosu na omjer P_u/P_{flex}



Slika 12. Indeks pouzdanosti ploče od običnog betona (OC) u odnosu na omjer P_u/P_{flex}



Slika 13. Osjetljivost parametara na variranje opterećenja kod ploča od običnog betona



Slika 14. Osjetljivost parametara na variranje opterećenja kod ploča od betona visoke čvrstoće

graničnom savojnom opterećenju analizirane ploče. Rezultati su prikazani na slikama 13. i 14. Sa slika je vidljivo da osjetljivost ulaznih varijabli varira ovisno o razini opterećenja.

Može se uočiti da osjetljivost koeficijenta armiranja raste usporedno s konvergencijom nanesenog opterećenja ka sili koja uzrokuje popuštanje armature ($F = 150$ kN). Dakle, kod $F = 97,5$ kN osjetljivost je iznosila 29,2 % dok je kod $F = 150$ kN osjetljivost p iznosila 36,2 % za ploču od betona visoke čvrstoće, a pri $F = 97,5$ kN osjetljivost p iznosila je 28,1 %. Pri $F = 150$ kN osjetljivost p iznosila je 35,2 % za ploču od betona srednje čvrstoće. Može se uočiti da na ponašanje ploče najviše utječe koeficijent armiranja zato što čvrstoća tako tankih konstrukcija uvelike ovisi o količini armature.

Osim toga, nanescena sila (F) i čvrstoća betona bitno utječu na ponašanje ploče, dok je utjecaj popuštanja armature f_y i statičke visine (d) slab u odnosu na druge parametre.

Do ovog variranja osjetljivosti dolazi zato što u stadiju popuštanja ploče udio armature bitno utječe na pomak ploče koji je značajan u tom stadiju.

S druge strane, variranje osjetljivosti čvrstoće betona, tj. granica popuštanja armature zbog variranja opterećenja, gotovo da je manje od variranja u koeficijentu armiranja, te na njega ne utječu promjene u razini opterećenja.

7. Zaključak

Zaključci izvedeni na temelju ovog istraživanja podijeljeni su u dvije kategorije u skladu s glavnim ciljevima istraživanja:

- analiza otpornosti ploča na proboj smicanjem, i
- analiza pouzdanosti i osjetljivosti betonskih ploča pomoću metode odzivne površine (RSM).

Osim toga, na stvarnoj ploči pune veličine analizirano je ponašanje ploče na proboj smicanjem, isto kao i ostali često korišteni parametri koji bitno utječu na otpornost ploča na proboj smicanjem. Analizirani su i međusobni utjecaji tih parametara, te su pritom prikupljeni raznovrsni podaci.

Može se zaključiti da je koeficijent armiranja prvi faktor koji može utjecati na način sloma. Isto tako, analitička istraživanja pokazuju da do sloma posmikom dolazi kod otprilike $p > 0,3; 0,6; i 1,00$ % pri čvrstoći betona od $f'_c = 30, 50 i 110$ MPa. To znači da su ploče izrađene od betona niske i normalne čvrstoće općenito osjetljivije na proboj smicanjem negoli ploče od betona visoke čvrstoće, naročito u slučaju visokog udjela armature.

U radu je prikazana i analiza pouzdanosti armiranobetonske ploče. Primijenjena je metoda odzivne površine i analizirana je eksplicitna polinomna funkcija ponašanja drugog reda. Pretpostavljeno je da do sloma dolazi kada vrijednosti pomaka postanu veće od zadane vrijednosti. Provedene su dvije analize: analiza pouzdanosti pomoću metode RSM i Monte Carlo za P_u/P_{flex} te analiza osjetljivosti na razinu opterećenja. Izvedeni su sljedeći zaključci:

Predložena metoda bazira se na odzivu fizikalnog modela duž površine odziva. Površina odziva je u potpunosti kvadratnog oblika. Primjenom ovog postupka, predloženom se metodom mogu smanjiti troškovi proračuna, pri čemu se zadržava prihvatljiva točnost rezultata. Metoda Monte Carlo koristi se za kontrolu valjanosti rezultata ali može vrlo dugo trajati, što ovisi o razini vjerojatnosti sloma koja se želi postići.

Analiza osjetljivosti je pokazala da je koeficijent armiranja parametar koji najviše utječe na ponašanje ploče. To je sasvim logično jer čvrstoća tako tankih konstrukcija uvelike ovisi o količini ugrađene armature. Osim toga, nanescena sila bitno utječe na ponašanje ploče dok je utjecaj čvrstoće betone f_c i popuštanja ploče f_v manji od utjecaja ostalih parametara.

Također je utvrđeno da osjetljivost ulaznih varijabli varira u ovisnosti o razini opterećenja, ali u različitoj mjeri. Uočeno je da se osjetljivost koeficijenta armiranja povećava usporedno s približavanjem sile opterećenja granici popuštanja (što se može i očekivati zbog primjene analize konačnih elemenata). Do te promjene u osjetljivosti dolazi zato što koeficijent armiranja bitno utječe na pomak ploče u stadiju popuštanja ploče jer tada, uslijed popuštanja armature, dolazi do velikih pomaka.

S druge strane, variranje osjetljivosti čvrstoće betona, tj. granice popuštanja armature zbog variranja vrijednosti opterećenja, gotovo da je manje od variranja u koeficijentu armiranja, te na njega ne djeluju varijacije u razini opterećenja.

LITERATURA

- [1] Staller, D.: Analytical Studies and Numerical Analysis of Punching Shear Failure in Reinforced Concrete Slabs. TRITA- BKN, Bulletin 57, 2000: 8.
- [2] Salim, W., Sebastian, W.: Plasticity Model for Predicting Punching Shear Strengths of Reinforced Concrete Slabs. ACI Structural Journal November-December 2002., 99(6), pp. 827-835.
- [3] ACI 318-2002, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary, 2002.
- [4] Marzouk, H., Hussein, A.: Experimental Investigation on the Behaviour of High Strength Concrete Slabs. ACI structural journal November-December 1991; 88(6), pp. 701-513.
- [5] Kuang, J.S., Morley, C.T.: Punching Shear Behaviour of Restrained Reinforced concrete Slabs. ACI structural journal January-February 1992; 89(1), pp. 13-19.
- [6] BS-8110, Structural Use of Concrete, Part 1: Code Practice For Design and Construction, British Standards Institution, London, 1985.
- [7] Tomaszewicz, A.: High-strength Concrete SP2 (Plates and Shells). Report 2.3, Punching Shear Capacity of Reinforced Concrete Slabs, Report No. STF70A93082) SINTEF, Trondheim, 1993:36.
- [8] Gardner, N.J., Shao, X.: Punching Shear of Continuous Flat Reinforced Concrete Slabs. ACI structural journal March-April 1996; 93(2), pp. 218-228.
- [9] Osman, M., Marzouk, H., Helmy, S.: Behaviour of High-Strength Lightweight Concrete Slabs under Punching Loads. ACI structural journal May-June 2000; 97(3), pp. 492-498.
- [10] Kang, S.C., Koh, H.M., Choo, J.F.: An efficient response surface method using moving least squares approximation for structural reliability analysis, Probabilistic Engineering Mechanics, 25(4), pp. 365-371, 2010., <http://dx.doi.org/10.1016/j.probgemch.2010.04.002>
- [11] Kernou, N., Bouafia, Y., Belakhdar K.: Adaptive response surface by kriging using pilot points for structural reliability analysis, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, Volume 9, Issue 5 (Nov. - Dec. 2013), pp. 74-87.
- [12] Smadi, M.M., Belakhdar, K.A.: Development of Finite Element Code for Analysis of Reinforced Concrete Slabs, Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 1, No. 2, 2007.
- [13] Smadi, M.M., Belakhdar, K.A.: Nonlinear finite element analysis of high strength concrete slabs, Computers and Concrete, Vol. 4, No. 3, pp. 187-206, 2007., <http://dx.doi.org/10.12989/cac.2007.4.3.187>
- [14] Bani-Yacin, I.S.: Performance of High Strength Fibrous Concrete Slab-column Connections Under Lateral Loads, M.SC thesis, Faculty of graduate studies, Jordan University of Science and Technology, Irbid, Jordan; May 2004.
- [15] Elstner, R.C.: Hognestad E. Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs, ACI Journal July 1956; 53(1), pp. 29-58.
- [16] CSA, Design of concrete structures for buildings, Standard A23.3-94, Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, 2004.
- [17] Rezik, E., Marzouk, H., Hussein, A.: Punching shear of thick plates with and without shear reinforcement, ACI Structural Journal, V.108, No.05, September, October 2011.
- [18] Marzouk, H., Osman, M., Hussein, A.: Cyclic Loading of High Strength Lightweight Concrete Slabs. ACI structural journal March-April 2001; 98(2), pp. 207-214.
- [19] Attard, M.M., Stewart, M.G.: A Two Parameter Stress Block for High-Strength Concrete, ACI structural journal May-June 1998; 95(3), pp. 305-317.
- [20] Dilger, W.H.: Flat Slab-Column Connections, Master. Structural Engineering:University of Calgary; 2000.
- [21] Eurocode 2. Design of Concrete Structures, European Standard ENV 1992-1-1: General rules and rules for buildings, CEN, European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium, 2004.
- [22] Hsin, Y.L., Hong, H.: Reliability analysis of reinforced concrete slabs under explosive loading, Structural safety 23(2001), pp. 157-178, [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-4730\(01\)00011-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-4730(01)00011-X)
- [23] Luo, Y.H., Durrani, A., Conte, J.: Seismic reliability assessment of existing R/S flat-slab buildings. *Journal of structural engineering*. Vol 121., No. 10. October 1995., [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1995\)121:10\(1522\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:10(1522))
- [24] Hsin, Y.L., Hong, H.: Reliability analysis of direct shear and flexural modes of RC slabs under explosive loading, Engineering Structures 24(2002), pp. 189-198, [http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00087-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00087-6)
- [25] Hong, S.L., Zhen, Z.L., Hong, W.Q.: A new high-order response surface method for structural reliability analysis, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 34, No. 6, 2010.