

# Ispitivanje armiranobetonskih ploča pod dugotrajnim opterećenjem i rasterećenjem

Jure Radnić, Domagoj Matešan

## Ključne riječi

betonska ploča, eksperimentalno ispitivanje, dugotrajno opterećenje, rasterećenje, progibi, deformacije

## Key words

concrete slab, experimental testing, long-term load, release of load, deflections, deformations

## Mots clés

dalle en béton, essai expérimental, charge à long terme, relaxation de la charge, déflexions, déformations

## Ключевые слова

## Schlüsselworte

Betonplatte, experimentale Untersuchung, langdauernde Belastung, Entlastung, Durchbiegungen, Verformungen

J. Radnić, D. Matešan

Prethodno priopćenje

## Ispitivanje armiranobetonske ploče pod dugotrajnim opterećenjem i rasterećenjem

Prikazani su rezultati ispitivanja kvadratne armiranobetonske ploče pod kratkotrajnim i dugotrajnim opterećenjem i rasterećenjem. Ploča je armirana zavarenom mrežom gore i dolje različitom ploštinom armature u oba smjera, a oslonjena je samo u uglovima. Ploča je opterećena velikim stalnim opterećenjem u trajanju od godine dana. Nakon toga je rasterećena. Mjereni su progibi te deformacije betona i armature u odabranim točkama ploče kroz godinu i šest mjeseci od opterećivanja.

J. Radnić, D. Matešan

Preliminary note

## Testing a reinforced concrete slab subjected to long-term loading/unloading

Results obtained by testing a square-shaped reinforced-concrete slab, subjected to the short and long-term loading and unloading activity are presented. The slab is reinforced by welded wire mesh at its top and bottom parts, with different reinforcement area in both directions, and is supported in corners only. The slab was subjected to constant and high-intensity load during one year. The load was then released. Deflections and deformations to concrete and reinforcement were measured at selected points on the slab during one year and six months following the initial application of load.

J. Radnić, D. Matešan

Note préliminaire

## Analyse de la dalle en béton armé assujettie au chargement/déchargement à long terme

Les résultats obtenus par l'analyse de la dalle en béton armé de forme carrée, assujettie au chargement/déchargement à court et long terme, sont présentés. La dalle a été renforcée, en haut et en bas, par treillis soudé, avec les aires de renforcement différentes dans les deux sens, et a été soutenue uniquement dans les coins. La dalle a été assujettie au chargement constant et intense pendant une année. La charge a ensuite été enlevée. Les déflexions et les déformations enregistrées sur le béton et le renforcement ont été mesurées aux points définis de la dalle pendant une année et six mois après l'application initiale de la charge.

Предварительное сообщение

J. Radnić, D. Matešan

Vorherige Mitteilung

## Untersuchung der Stahlbetonplatte bei langdauernder Belastung und Entlastung

Dargestellt sind die Ergebnisse der Untersuchung einer quadratischen Stahlbetonplatte bei kurz- und langdauernder Belastung und Entlastung. Die Platte ist oben und unten mit verschieden starkem Geschweissgitter in beiden Richtungen bewehrt, dabei nur an den Ecken gelagert. Die Platte war mit grosser ständiger Belastung in der Zeitspanne von einem Jahr belastet, danach wurde sie entlastet. Anderthalb Jahre nach der Belastung sind in ausgewählten Punkten die Durchbiegungen sowie die Verformungen von Beton und Bewehrung gemessen worden.

Autori: Prof. dr. sc. **Jure Radnić**, dipl. ing. građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu; dr. sc. **Domagoj Matešan**, dipl. ing. građ., Institut građevinarstva Hrvatske - Zagreb, Poslovni centar Split

## 1 Uvod

Ekperimentalna ispitivanja armiranobetonskih konstrukcija pod dugotrajnim opterećenjem, uz poželjno praćenje njihova ponašanja i nakon rasterećenja, danas su možda manje interesantna radi utvrđivanja njihova ponašanja zbog utjecaja reoloških učinaka betona. Vjerojatno su ona više zanimljiva zbog stvaranja eksperimentalne baze za provjeru različitih numeričkih modela za njihovu vremensku analizu.

U radu su prikazani rezultati eksperimentalnog ispitivanja jedne uobičajeno armirane betonske ploče pod: (i) kratkotrajnim statičkim opterećenjem, (ii) dugotrajnim opterećenjem u trajanju od jedne godine, (iii) trenutačnim rasterećenjem i (iv) rasterećenjem tijekom idućih šest mjeseci. Primarna je svrha ovog eksperimenta provjera razvijenoga numeričkog modela za vremensku analizu betonskih ploča i ljusaka s uključivanjem pužanja, skupljanja i starenja betona, što je predmet posebnoga rada. Jedan je od ciljeva ovoga rada i doprinos boljem poznavanju ponašanja armiranobetonskih ploča izloženih visokoj razini dugotrajnog opterećenja, kao i praćenju njihovih progiba i deformacija nakon rasterećenja.

## 2 Osnovni podaci o ploči

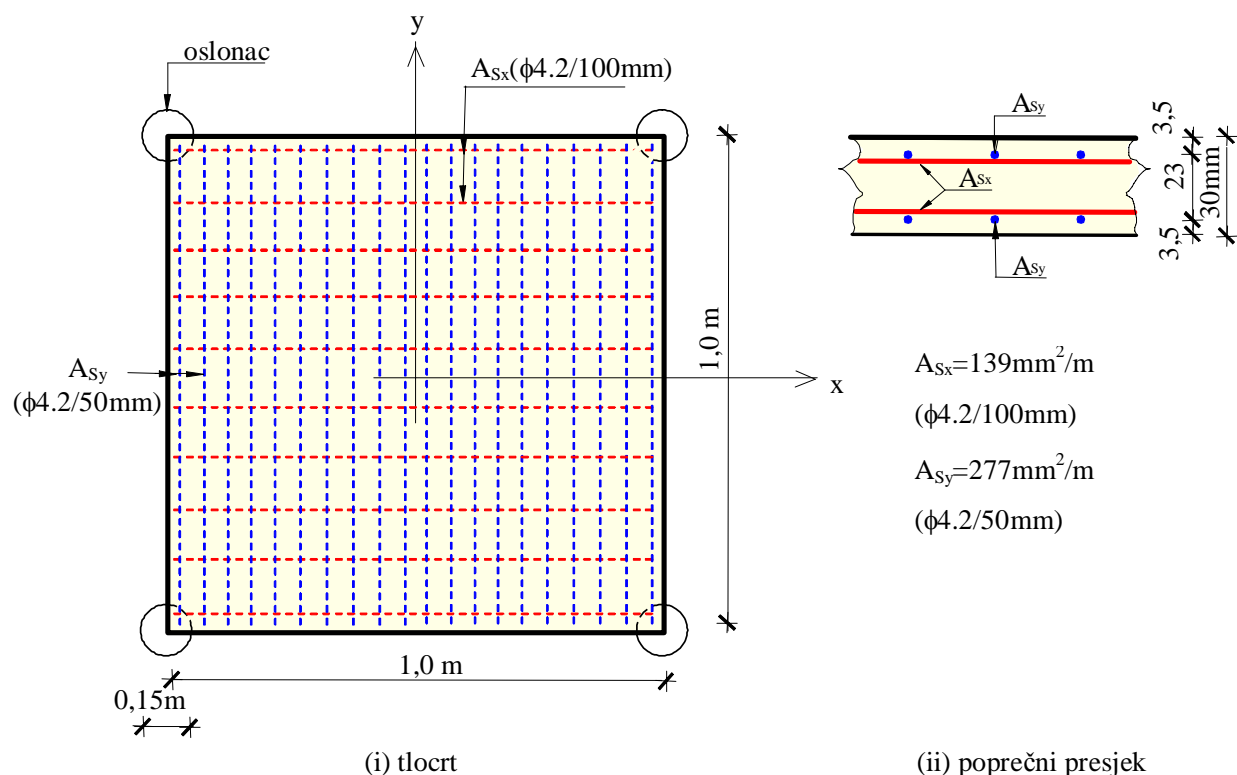
Osnovni geometrijski podaci, način oslanjanja i armatura ispitane ploče prikazani su na slici 1. Ploča je kva-

dratna, tlocrtnih dimenzija  $1 \times 1$  m, slobodno oslonjena u uglovima. Debela je 30 mm i obostrano je armirana nesimetričnom križnom armaturom iz zavarenih mreža. U smjeru x mreža ima šipke promjera 4,2 mm na osnom razmaku 100 mm, a u smjeru y šipke istog promjera na osnom razmaku 50 mm. Šipke su glatke, od čelika objavljene čvrstoće 560 MPa i granice razvlačenja 500 MPa.

Beton je pripremljen s portlandskim cementom i vapnenačkim agregatom najvećeg zrna 8 mm, bez dodataka. Ploča je betonirana na vibrostolu. Sve vrijeme prije i nakon opterećivanja ploča je bila u prostoriji s kontroliranom temperaturom i vlažnosti, kao i ispitni uzorci betona. Temperatura prostorije bila je između  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a vlažnost između 60 % i 65 %.

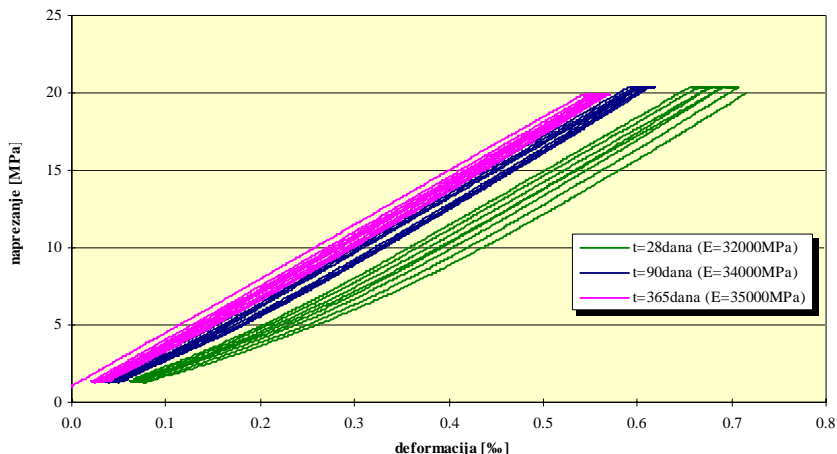
Jednoosna tlačna čvrstoća betona ispitivana je normiranim postupkom (HRV EN 12390-3) na valjku promjera 150 mm i visine 300 mm, u vremenu:  $t = 28$  dana,  $t = 92$  dana i  $t = 360$  dana. Prosječna tlačna čvrstoća betona na tri ispitna uzorka iznosila je:  $f_c = 55$  MPa za  $t = 28$  dana,  $f_c = 57$  MPa za  $t = 92$  dana i  $f_c = 60$  MPa za  $t = 360$  dana.

Vlačna čvrstoća betona određena je cijepanjem valjka, također normiranim postupkom (HRV EN 12390-5), u isto vrijeme kad i tlačna čvrstoća. Prosječna je vlačna čvrstoća, određena na tri ispitna uzorka za svako promatrano vrijeme, iznosila:  $f_{ct} = 7,3$  MPa za  $t = 28$  dana,  $f_{ct} = 7,6$  MPa za  $t = 92$  dana i  $f_{ct} = 8,0$  MPa za  $t = 360$  dana.

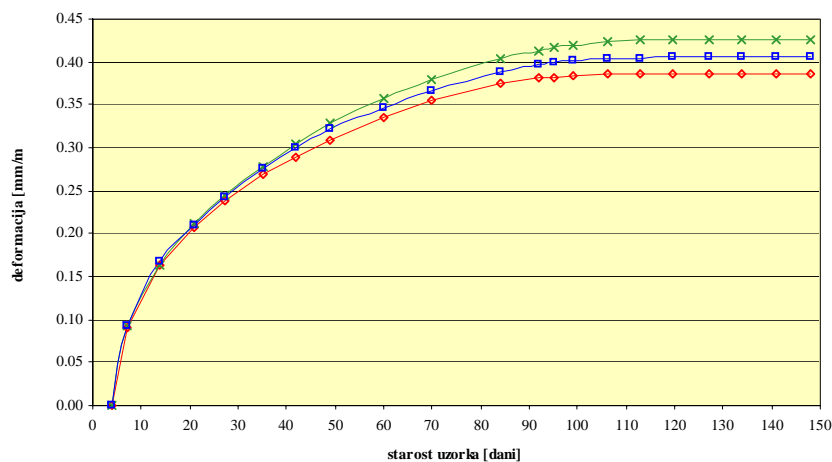


Slika 1. Osnovni podaci ploče

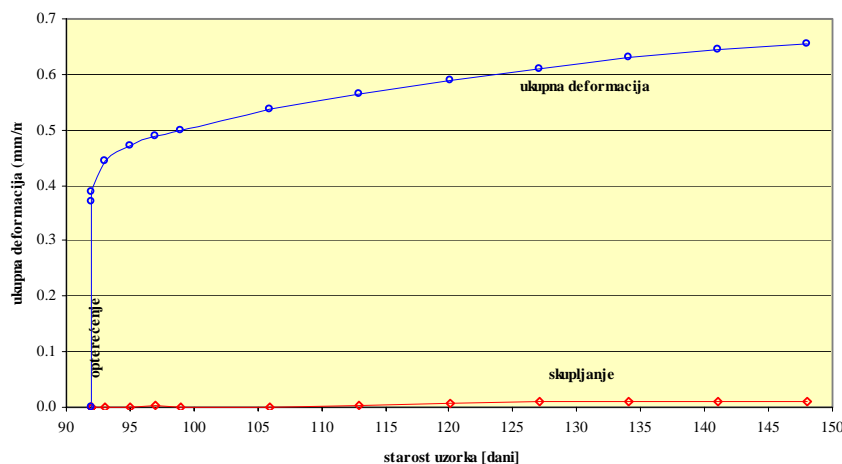
Modul elastičnosti betona također je ispitivan normiranim postupkom (HRN U.M1.025) na betonskim ispitnim uzorcima, za:  $t = 28$  dana,  $t = 92$  dana i  $t = 360$  dana. Uzorci su opterećeni na tlak do razine naprezanja od 20 MPa. Dobiveni prosječni rezultati modula elastičnosti betona prikazani su na slici 2.



Slika 2. Modul elastičnosti betona



Slika 3. Skupljanje uzoraka betona



Slika 4 Prosječna ukupna vremenska deformacija uzoraka betona pod opterećenjem nanesenim  $t = 92$  dana poslije betoniranja

Deformacije skupljanja i puzanja betona također su izmjerene normiranim postupcima na betonskim uzorcima (HRN U.M1.029 i HRN U.M1.027). Rezultati ispitivanja skupljanja betona na tri ispitna uzorka prikazani su na slici 3. Prosječna ukupna vremenska deformacija na pet uzoraka pod dugotrajnim opterećenjem prikazana je na slici 4., a prosječni koeficijent puzanja betona na slici 5. Pri tome je puzanje ispitivano od starosti betona  $t = 92$  dana, kada je opterećena i ploča, uz relativno malo konstantno tlačno naprezanje od 13 MPa. Vremenske deformacije betona na uzorcima mjerene su samo do  $t = 150$  dana nakon betoniranja (nažalost, opremu je bilo nužno upotrijebili za druge potrebe).

Veza naprezanje-deformacija za armaturu prikazana je na slici 6. Početni modul elastičnosti čelika je 200 GPa (HRN EN ISO 15630-2).

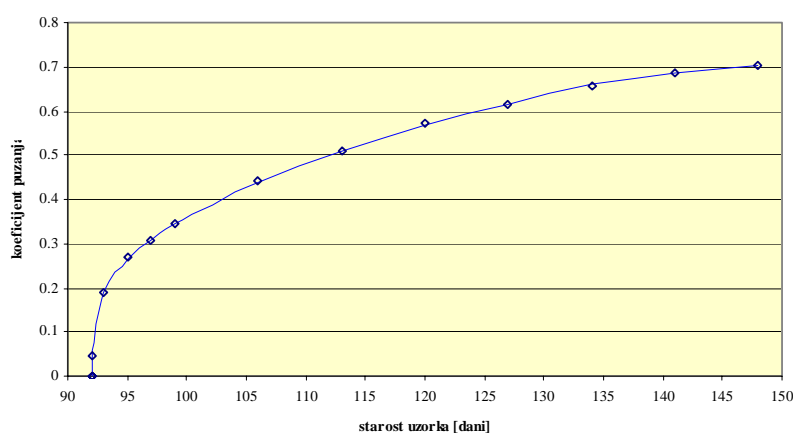
Veza naprezanje-deformacija za armaturu prikazana je na slici 6. Početni modul elastičnosti čelika je 200 GPa (HRN EN ISO 15630-2).

### 3 Ponašanje ploče pod kratkotrajnim statičkim opterećenjem

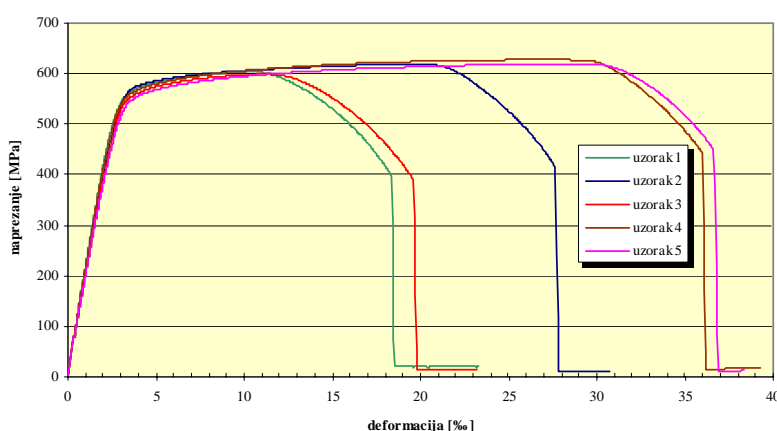
Nakon  $t = 92$  dana od betoniranja, ploča je opterećena vlastitom težinom i silom  $P = 10$  kN. Sila je jednoliko raspoređena na srednjoj ploštini ploče  $0,9 \text{ m} \times 0,9 \text{ m}$  i nanijeta je u pet jednakih prirasta od po 2,0 kN. Za opterećenje su uzete betonske kocke mase 8,0 kg. Mjereni su progibi ploče, deformacije betona i deformacije vlačne armature u odabranim točkama za svaki prirast sile.

Izmjereni progibi ploče prikazani su na slici 7., iz koje se vidi linearno ponašanje ploče do nanošenja drugog prirasta sile. Nakon njegova nanošenja došlo je do otvaranja prvih pukotina u betonu u donjem vlačnom području ploče, koje su se dalje širile nakon nanošenja trećeg prirasta sile. To je dovelo do znatnoga pada krutosti ploče.

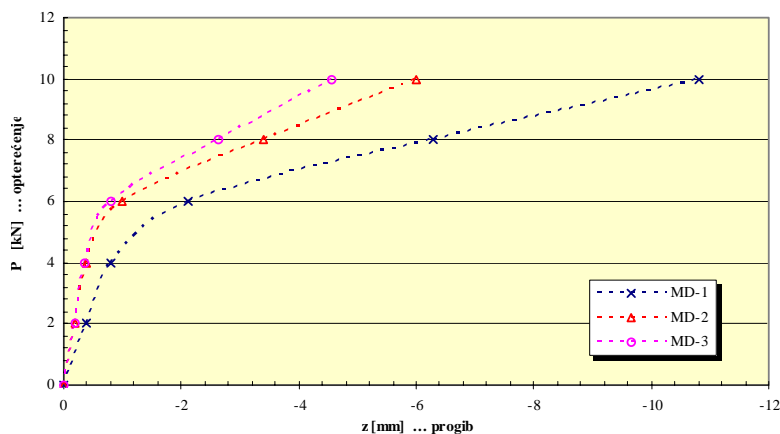
Izmjerene deformacije donje vlačne armature po sredini visine šipki prikazane su na slici 8. Nagli prirast deformacija (naprezanja) u armaturi pri nanošenju drugoga i trećega prirasta sile karakteriziran je pojavom pukotina u betonu u tom području. Uočljivo je da je jače naprezana rjeđa



Slika 5. Prosječni koeficijent puzanja betona za opterećenje nakon  $t = 92$  dana poslije betoniranja



Slika 6. Veza naprezanje-deformacija za armaturu



Slika 7. Progibi ploče za kratkotrajno opterećenje

armatura u smjeru osi  $x$  ( $\phi$  4,2/100 mm) od niže i gušće armature u smjeru osi  $y$  ( $\phi$  4,2/50 mm). Pritom su više naprezane rubne šipke od središnjih. Za puno opterećenje  $P = 10$  kN, najveća deformacija u rubnoj armaturnoj šipki u smjeru osi  $x$  iznosila je oko 2,4 ‰. Za tu su deformaciju vlačna naprezanja armature blizu čvrstoće čelika.

Izmjerene tlačne deformacije betona gornjeg pojasa ploče prikazane su na slici 9. Prirast tlačnih deformacija u betonu povezan je s prirastom vlačnih deformacija u vlačnoj armaturi u promatranom poprečnom presjeku. Također se može uočiti da su tlačne deformacije betona na mjernim mjestima za puno opterećenje vrlo velike, odnosno da su računski tlačna naprezanja blizu tlačne čvrstoće betona.

Dakle, ploča je namjerno tako opterećena da razina vlačnih naprezanja armature i tlačnih naprezanja betona u najjače naprežanim presjecima bude velika i blizu graničnih vrijednosti.

#### 4 Ponašanje ploče tijekom vremena

Nakon što je nanosena puna sila  $P = 10$  kN ostavljena je da djeluje 360 dana. Nakon 3, 7, 14, 28, 90, 180 i 360 dana od nanošenja punog opterećenja, mjereni su pomaci i deformacije u istim mjernim točkama kao i za kratkotrajno opterećenje. Nakon 360 dana djelovanja, uklonjena je puna sila  $P = 10$  kN. Nakon toga praćeno je ponašanje ploče još 180 dana. Ponovno je slijedilo mjerenje pomaka i deformacija za 3, 7, 14, 28, 90 i 180 dana nakon rasterećenja ploče. Progibi ploče prikazani su na slici 10., deformacije vlačne armature na slici 11., a deformacije tlačnog betona na slici 12. Uz pretpostavku ravnih presjeka, te da nema proklizavanja armature u odnosu na okolni beton, na slici 13. prikazana je ravna deformacija u nekim točkama ploče za  $t = 0$  (nakon nanošenja punog opterećenja), za  $t = 360$  dana (neposredno prije uklanjanja sile  $P$  te neposredno nakon njezina uklanjanja) i za  $t = 540$  dana (180 dana poslije rasterećenja).

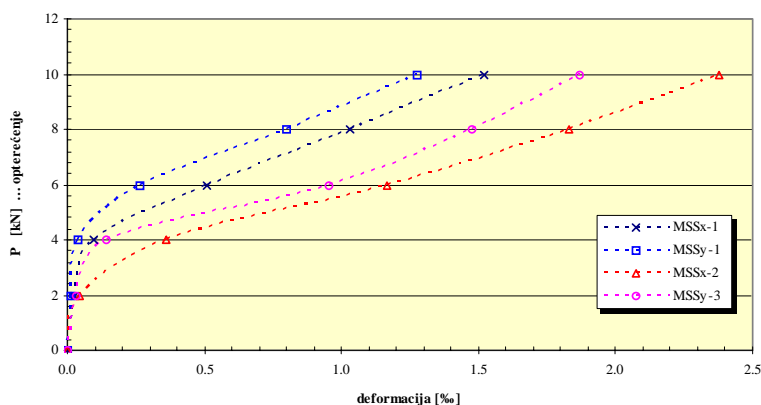
Na slici 10. vidi se znatno povećanje progiba ploče tijekom vremena nakon nanošenja pune sile  $P$ , iako je u trenutku nanošenja opterećenja beton bio prilično star. Tome su vjerojatno najviše pridonijela velika naprezanja u ploči, odnosno utjecaj nelinearnog puzanja i daljnje širenje pukotina u vlačnom području betona.

Trenutačni povratni progibi ploče nakon uklanjanja sile  $P$  znatno su manji od progiba za početno kratkotrajno opterećenje, što pokazuje visok stupanj nelinearnog ponašanja ploče. Šest mjeseci nakon rasterećenja ploče mogu se primijetiti relativno mali povratni vremenski progibi. Ploča ima znatne zaostale progibe koji su

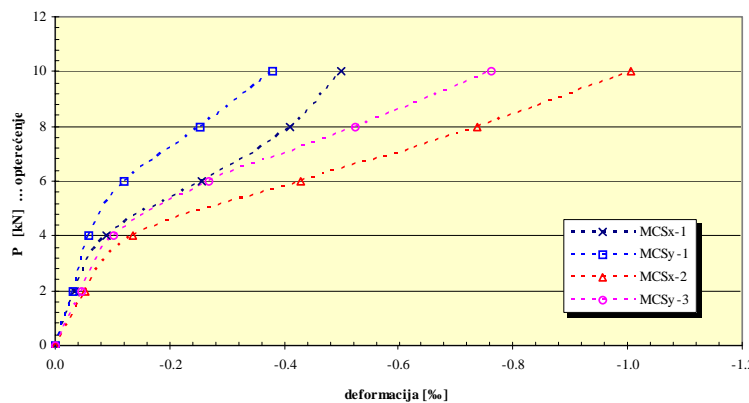
posljedica njezina vrlo izraženog nelinearnoga ponašanja.

Na slici 11. vidi se da nakon nanošenja pune sile  $P$  tijekom vremena nije došlo do značajnije promjene u deformacijama (napreznjima) vlačne armature. Pritom su tijekom vremena deformacije vlačne armature u smjeru  $x$  ponešto rasle, a u smjeru  $y$  ponešto padale. Trenutačne povratne deformacije armature nakon uklanjanja sile  $P$  mnogo su manje od početnih trenutačnih deformacija. Vremenske povratne deformacije također su relativno male. Relativno velike zaostale deformacije u armaturi posljedica su njezina velikog napreznja i nelinearnih učinaka u betonu.

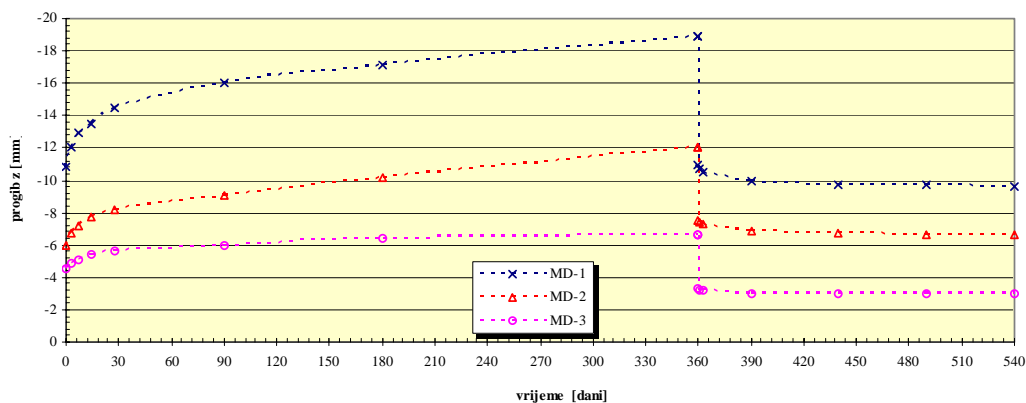
Promjena tlačnih deformacija u betonu tijekom vremena (slika 12.) slična je promjeni progiba. Povećane deformacije puzanja pod dugotrajnim stalnim opterećenjem posljedica su utjecaja velikog napreznja i nelinearnih učinaka puzanja betona. Trenutačne povratne deformacije betona pri rasterećenju također su znatno manje od trenutačnih deformacija betona pri opterećenju. Također su relativno male dugotrajne povratne deformacije i prilično velike zaostale deformacije betona, što je također



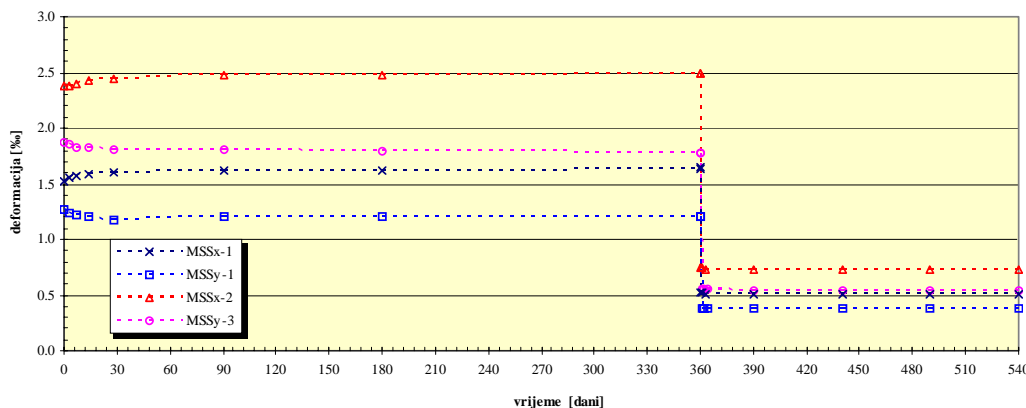
Slika 8. Deformacije vlačne armature za kratkotrajno opterećenje



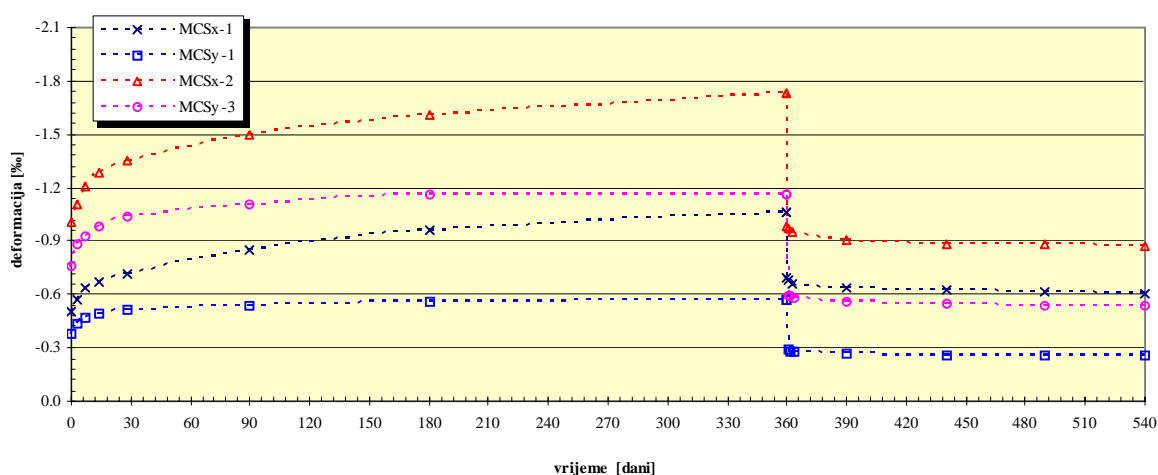
Slika 9. Deformacije tlačnog betona za kratkotrajno opterećenje



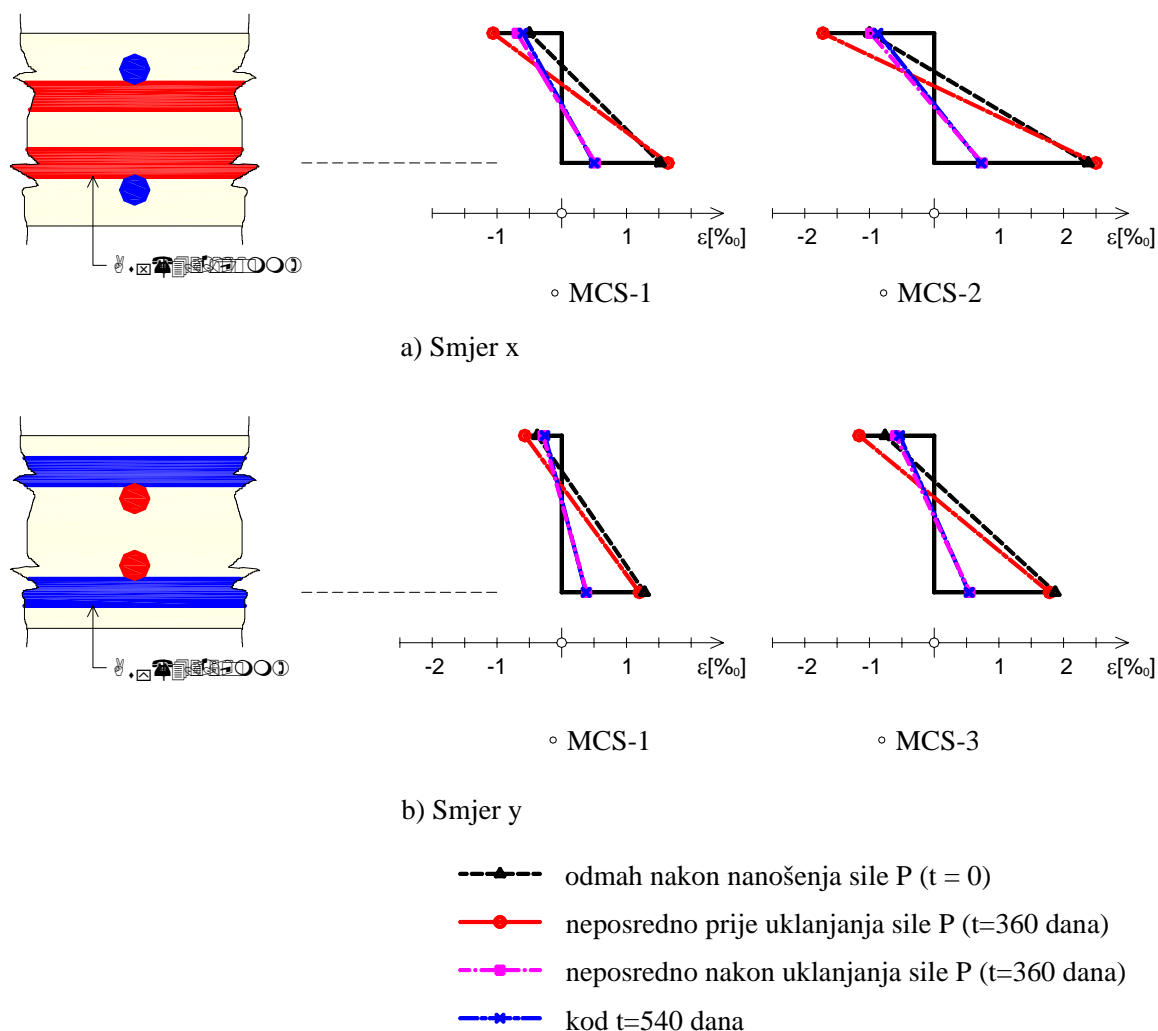
Slika 10. Progibi ploče tijekom vremena



Slika 11. Deformacije vlačne armature tijekom vremena



Slika 12. Deformacije tlačnog betona tijekom vremena



Slika 13. Ravnina deformacije u nekim točkama ploče

posljedica velikih napreznja ploče. Iz izmjerenih rubnih deformacija betona i armature, a uz pretpostavku ravnih presjeka i kompatibilnosti pomaka armature i

okolnog betona, na slici 13. vidi se znatno spuštanje neutralne osi u promatranim točkama ploče pod dugotrajnim stalnim napreznjem.

## 5 Zaključak

Rezultati provedenih ispitivanja potvrđuju dosadašnje spoznaje o ponašanju armiranobetonskih ploča pod dugotrajnim stalnim opterećenjem i nakon rasterećenja. Specifičnost su eksperimenta prosječno velika napreza-

nja armature i betona u odnosu na njihovu čvrstoću, što izaziva nelinearno puzanje betona. Izražava se nada da provedeni i detaljno opisani eksperiment može korisno poslužiti za provjeru numeričkih modela za analizu armiranobetonskih ploča s uključivanjem reoloških osobina betona pri dugotrajnom opterećenju i rasterećenju.

## LITERATURA

- [1] Taylor R.; Hayes B.: *Some tests on the effect of edge restrains on punching shear in reinforced concrete slabs*, Magazine of Concrete Research, (1965), 17, 39-44.
- [2] Taylor R.; Maher D.R.H.; Hayes B.: *Effect of the arrangement of reinforcement on the behaviour of reinforced concrete slabs*, Magazine of Concrete Research, (1966), 187, 85-94.
- [3] Taylor P. J.: *Initial and Long-Term Deflections of a Reinforced Concrete Flat Plate Structure*, Civil Engineering Transactions (Sydney), V. CE12, (1970), 1, 14-20.
- [4] Scanlon A.; Murray D.W.: *Time-dependent reinforced concrete slab deflection*, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, (1974), 100, 1911-1924.
- [5] Ritz P.; Marti P.; Thürlimann B.: *Versuche über das Biegeverhalten von Vorgespannten Platten ohne Verbund*, Institut für Baustatik und Konstruktion, Zurich, Report No. 7305-1, 1975.
- [6] Regan P. E.: *Symmetric punching of reinforced concrete slabs*, Magazine of Concrete Research, (1986), 38, 115-128.
- [7] Gardner N. J.; Fu H. C.: *Effect of high construction loads on the long-term deflections of flat slabs*, ACI Structural Journal, (1987), 84, 349-360.
- [8] Falamaki M.; Loo Y.C.: *Punching shear tests of half-scale reinforced concrete flat plate models with spandrel beams*, ACI Structural Journal, (1992), 89, 263-271.
- [9] Taylor P. J.: *The Initial and Long-Term Deflections of Normally Reinforced Concrete Flat Slabs and Plates*, A special projects report for the ACSE, 1997.
- [10] Baskaran K.; Morley C. T.: *A new approach to testing reinforced concrete flat slabs*, Magazine of Concrete Research, (2004), 56, 367-374.