

Primljen / Received: 13.5.2016.

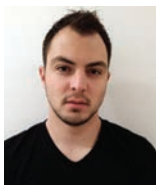
Ispravljen / Corrected: 7.12.2016.

Prihvaćen / Accepted: 15.12.2016.

Dostupno online / Available online: 10.1.2017.

Utjecaj nastavljanja armature na nosivost ab grede prethodno izložene djelovanju visokih temperatura

Autori:



Krešimir Ninčević, dipl.ing.građ.

University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU) Vienna
kresimir.nincevic@boku.ac.at



Prof.dr.sc. **Joško Ožbolt**, dipl.ing.građ.

Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen
ozbolt@iwb.uni-stuttgart.de



Prof.dr.sc. **Ivica Boko**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Splitu
 Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
ivica.boko@gradst.hr

Prethodno priopćenje

Krešimir Ninčević, Joško Ožbolt, Ivica Boko

Utjecaj nastavljanja armature na nosivost ab grede prethodno izložene djelovanju visokih temperatura

U radu je opisana izrada modela ab grede i istraživanje utjecaja preklapanja glavne uzdužne armature i utjecaj poprečne armature (spona) na nosivost ab nosive konstrukcije za više slučajeva opterećenja, s naglaskom na utjecaj djelovanja visokih temperatura. Napravljeno je više modela ab grede te su prikazani proračuni i rezultati iz kojih je vidljiv utjecaj načina armiranja na nosivost konstrukcije, odnosno nastavljanja glavne armature u odnosu na armaturu iz jednog dijela, kao i utjecaj poprečne armature (spona).

Ključne riječi:

ab gređa, nastavljanje glavne armature i preklapanje, oštećenje betona, pukotine, visoke temperature

Preliminary note

Krešimir Ninčević, Joško Ožbolt, Ivica Boko

The influence of continuing reinforcement on the load capacity of a RC beam previously exposed to high temperatures

The paper describes the RC beam model development and the influence exerted by the main longitudinal reinforcement overlapping and transverse reinforcement (ties) on the bearing capacity of a RC load bearing structure for several cases of load, with an emphasis on the influence of high temperatures. Several RC beam models are made and relevant calculations and results are presented, which show the influence of the reinforcement method on the bearing capacity of structures, i.e. of the main-reinforcement continuing as related to the one-part reinforcement, as well as the influence of transverse reinforcement (ties).

Key words:

RC beam, main reinforcement continuing and overlap, concrete damage, cracks, high temperatures

Vorherige Mitteilung

Krešimir Ninčević, Joško Ožbolt, Ivica Boko

Einfluss von Bewehrungsstößen auf die Tragfähigkeit von Stahlbetonbalken nach der Einwirkung hoher Temperaturen

In dieser Arbeit werden Modelle von Stahlbetonbalken und entsprechende Untersuchungen von Stößen der Hauptarmierung in Längsrichtung sowie der Einfluss der Querbewehrung (Bügel) auf die Tragfähigkeit von Stahlbetonkonstruktionen für mehrere Lastfälle beschrieben, wobei der Schwerpunkt auf Einwirkungen hoher Temperaturen gelegt wird. Es wurden mehrere Modelle erstellt und die Berechnungsvorgänge dargestellt. Aus den Resultaten ist der Einfluss der Bewehrungsführung, bzw. der Fortführung der Hauptarmierung, sowie der Querbewehrung (Bügel) auf die Tragfähigkeit der Konstruktion ersichtlich.

Schlüsselwörter:

Stahlbetonbalken, Bewehrungsführung, Bewehrungsstöße, Betonbeschädigung, Risse, hohe Temperaturen

1. Uvod

Ponašanje armiranobetonskih konstrukcija izloženih djelovanju požara i djelovanju visokih temperatura, kao i promatranje oštećenja i ocjena uporabljivosti konstrukcije za vrijeme i nakon djelovanja navedene vrste opterećenja, jedna je od glavnih i aktualnih tema istraživanja u svijetu. Razumijevanje ponašanja ab konstrukcija za vrijeme i nakon djelovanja požara te istovremeno djelovanje stalnog i pokretnog opterećenja imaju veliku važnost za sigurno i racionalno dimenzioniranje konstrukcija. Prije svega potrebno je razumijevati ponašanje i karakteristike pojedinačnih materijala koji čine nosivu konstrukciju (beton, čelik...), kao i interakciju materijala. Razvoj jednostavnih i učinkovitih numeričkih modela koji uključuju djelovanja visokih temperatura, prije svega ako su ti modeli potvrđeni eksperimentalnim ispitivanjima, čini osnovu za bolje upoznavanje stohastičkog procesa kao što je požar, posljedice njegova djelovanja na nosive konstrukcije te daljnje nadopunjavanje normi i propisa za učinkovitije i sigurnije projektiranje konstrukcija. Većina današnjih normi i propisa daje pojednostavljeni pristup i smjernice u vezi s dimenzioniranjem i otpornosti za požarno djelovanje. U ovom radu su korištene norme i propisi su navedeni u [2-4]. Treba uzeti u obzir da problem predstavlja ograničenje promatrane konstrukcije, jer je većina propisa temeljena na ponašanju jednostavnih statičkih sustava. U stvarnosti je takav jednostavni nosivi element dio kontinuiranog nosača i konstrukcije, što može uzrokovati neočekivano ponašanje i odgovor konstrukcije. Poznata su opsežna požarna ispitivanja 1995.-1996. godine [5] u kojima je pokazano da statički sustav može imati znatno veću požarnu otpornost kao dio nosive konstrukcije nego promatran kao zasebni statički sustav. Iako je poznato da prilikom djelovanja požara ili visokih temperatura armiranobetonske konstrukcije imaju relativno dobro ponašanje u usporedbi s drugim materijalima, ipak treba uzeti u obzir da nakon djelovanja ovakve vrste opterećenja dolazi do promjene početnih karakteristika materijala, odnosno do smanjenja vrijednosti značajnih svojstava materijala konstrukcije [6, 7]. Pojave navedenih mehanizama degradacije uzrokuju oštećenja nosive konstrukcije za vrijeme i nakon djelovanja požara, a posljedice su toga smanjenja nosivosti armiranobetonske konstrukcije [8] te mehanička i temperaturna oštećenja betona [9, 10].

U radu su prikazani rezultati numeričke analize ponašanja armiranobetonskog nosača pri djelovanju visokih temperatura, za različite načine opterećenja, odnosno za opterećenje nosača bez djelovanja požara i visokih temperatura te za opterećenje nosača nakon što je prethodno bio izložen djelovanju požara. Modeliranje i geometrijske karakteristike ab grede su temeljene na radu Ožbolt i sur. [7] u kojem je predmet istraživanja bio sličan statički model ab grede opterećen u četiri točke savijanjem. Za razliku od koncepta u radu [7], svrha je ovog rada istražiti utjecaj različitog načina armiranja na nosivost konstrukcije nakon prethodnog simuliranja djelovanja požara i degradacije materijala kao posljedice visokih temperatura.

Modeliranje svih modela armiranobetonske grede prikazanih u ovom radu, odnosno unošenje geometrije samih modela i opisivanje svojstava materijala te opterećivanje modela i njihovi proračuni, provedeni su pomoću računalnih programa FEMAP® i MASA (eng. *Macroscopic Space Analysis*) [11]. Računalni program konačnih elemenata MASA (MACROscopic Space Analysis) služi za nelinearne proračune i analizu trodimenzionalnih (3D) konačnih elemenata konstrukcije izrađene od kvaziskriptnih materijala kao što su beton, kamen, keramika i drugi. Iako se mogu različite vrste materijala analizirati, program je uglavnom namijenjen za nelinearnu analizu betona i armiranog betona (ab) u okviru teorije mehanike kontinuuma, uzimajući u obzir oštećenja materijala [7, 12, 13, 14], npr. pucanje betona odnosno tečenje armature. Program se može koristiti za analizu i rješavanje mehaničkih problema, kao što su statička i dinamička analiza nosive konstrukcije. Također, može služiti za rješavanje i nemehaničkih problema, kao što su analize transportnih procesa u poroznom mediju, analiza djelovanja korozije na armiranobetonsku konstrukciju ili pak za analizu pri djelovanju požara i izloženosti visokim temperaturama.

Poznavanje i razumijevanje takvih računalnih programa omogućuje izradu različitih modela i opterećenja, odnosno možemo predvidjeti ponašanje nosive konstrukcije i odgovor na stvarno opterećenje u realnom okruženju i vremenu. Ovakav način istraživanja još uvijek je mnogo jeftiniji nego sam proces stvaranja prototipova i obavljanja fizičkih testova i pokusa na stvarnim elementima. Analiza konačnih elemenata ima za cilj smanjiti vrijeme i troškove potrebne za razvoj i poboljšati.

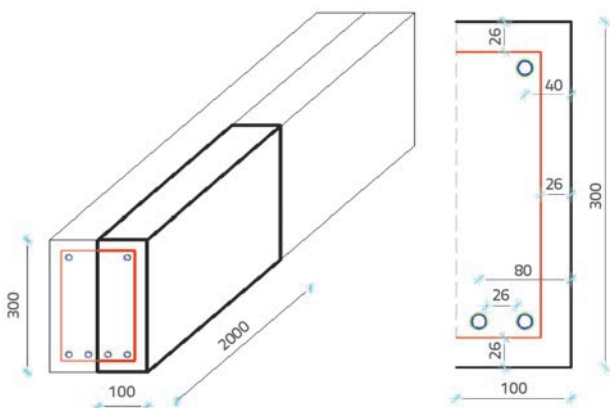
2. Modeliranje armiranobetonske grede

Radi ispitivanja izrađen je termomehanički model [7, 12, 15, 16] armiranobetonske grede opterećene na sredini raspona nosača, primjenom metode trodimenzionalnih (3D) konačnih elemenata. Termo-mehanički model potreban je kako bi se simulirao odgovor nosive konstrukcije nakon degradacije mehaničkih svojstava uslijed djelovanja visoke temperature. Detaljniji opis korištenog termo-mehaničkog modela navodi se u radu [7]. Takav model osigurava da mehanička svojstva materijala (betona) ovisi o temperaturi, ali o njima ne ovisi i temperaturna raspodjela. Beton je modeliran uporabom tzv. mikroravninskog modela [17], a za armaturu je služio plastični model uz primjenu von Misesovog kriterija tečenja [18]. Da bi se osigurala neovisnost rezultata o veličini konačnih elemenata, primijenjena je tzv. "crack band" metoda regularizacije [19].

Za pripremu ulaznih podataka, kao i za analizu rezultata konačnih elemenata poslije proračuna, upotrebljava se računalni program FEMAP®. Program nam omogućuje upotrebu metode konačnih elemenata, pomoću njega generiramo čvorove i povezujemo ih kako bismo stvorili mrežu konačnih elemenata, omogućuje nam zadavanje rubnih uvjeta modela, razne načine opterećivanja te zadavanje različitih materijala i njihovo opisivanje. Način zadavanja opterećenja je inkrementalne naravi, te je podijeljen u određeni broj koraka, ovisno o iznosu sile ili unaprijed određenog pomaka.

2.1. Geometrijske karakteristike konstrukcijskog elementa

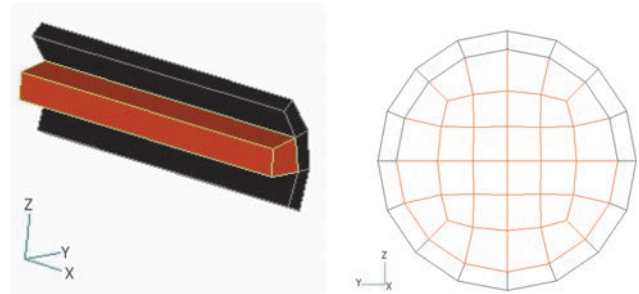
Armiranobetonska greda pravokutnog je poprečnog presjeka dimenzija $b/h = 200/300$ mm i ukupnog raspona 4,0 m. Armirana je u gornjoj i donjoj zoni šipkastom armaturom promjera 12 mm i to pomoću četiri šipke u donjoj zoni i pomoću dvije šipke u gornjoj zoni, te sponama promjera 10/200 mm. Zaštitni sloj betona je 26 mm. Zbog složenosti izrade modela i jednostavnijeg proračuna, a u svrhu smanjivanja ukupnog broja mreže konačnih elemenata (kraće vrijeme proračuna), napravljena je četvrtina modela zato što simetrija samog modela pruža takvu mogućnost. Model simulirane grede pravokutnog je poprečnog presjeka, dimenzija $b/h = 100/300$ mm i raspona 2,0 m, kao što je i prikazano na slici 1.



Slika 1. Model grede s pripadajućim poprečnim presjekom

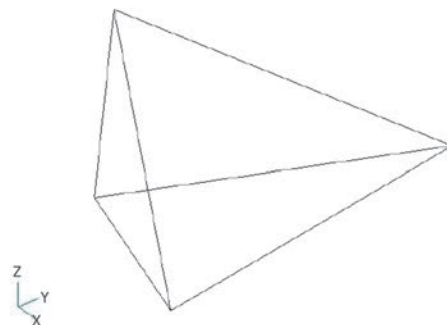
Glavna uzdužna armatura je modelirana kao čvrsto tijelo (solid) koje čine trodimenzionalni (3D) konačni elementi, a poprečna je armatura (spone) dimenzionirana kao jednodimenzionalni elementi (bar elementi). Za realno modeliranje detalja nastavka armature potrebno je šipke detaljno modelirati 3D konačnim elementima. 3D elementi omogućuju realni opis stanja naprezanja u zoni nastavka armature: bond, radialna i tangencijalna naprezanja u betonu oko armature. Korištenjem običnih štapnih elemenata nije moguće realno opisati takvo stanje naprezanja. Poprečnu armaturu (spone) moguće je modelirati korištenjem štapnih elemenata jer je to dovoljno za simulaciju lateralnog pridržanja betona koji spona osiguravaju. Vezu između spona i glavne armature nije realno modelirati fiksnom vezom jer u stvarnosti spona nisu zavarene na glavnu armaturu nego su samo pridržane, stoga su i u ovom radu modelirane tako da su odvojene od glavne armature. Na isti način modelirana je i glavna uzdužna armatura u zoni preklapanja. Sidrenje glavne armature (na kraju ab grede) modelirano je na način da su betonskim elementima na kraju armature zadana linearna svojstva, te kao takvi zapravo simuliraju kuke. Oko glavne uzdužne armature modeliran je jedan sloj elemenata debljine 1 mm koje nazivamo kontakt elementima. Kontakt elementi služe samo za modeliranje površinske zone između

betona i čelične armature, odnosno za simuliranje veze na dodiru dvaju materijala te mogu prenijeti samo posmična i tlačna naprezanja. Za prostornu diskretizaciju čelika (armature, kontakt elemenata i čeličnih pločica) upotrijebljeni su trodimenzijski elementi s osam čvorova i osam integracijskih točaka (heksaedarski trodimenzionalni (3D) konačni elementi-HexMesh solids), a poprečna je armatura (čelične spona) modelirana jednodimenzionalnim štapnim elementima.



Slika 2. Konačni element armature i kontakt element

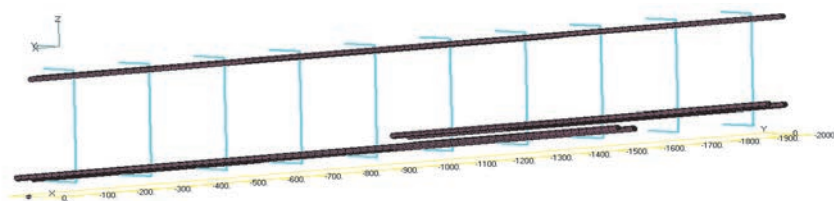
Prostornu diskretizaciju (mrežu) konačnih elemenata betona čine tetraedarski trodimenzionalni (3D) konačni elementi s 4 čvora i 4 integracijske točke, kao što je prikazano na slici 3.



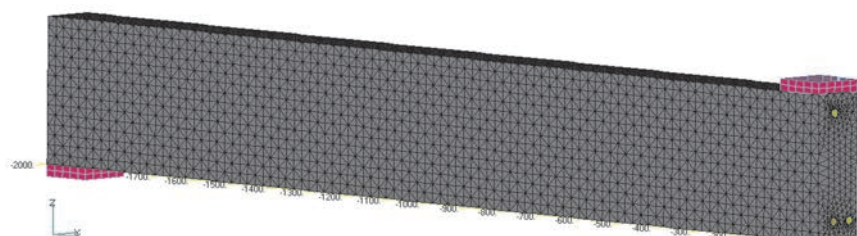
Slika 3. Tetraedarski konačni element betona (četveročvorni element)

Prilikom zadavanja broja elemenata po svakoj liniji geometrije modela, odnosno pri modeliranju mreže konačnih elemenata betona, definiran je najveći tetraedarski element betona veličine 20mm. Vrlo važno je posvetiti dovoljno vremena modeliranju takve mreže tetraedarskih i heksaedarskih trodimenzionalnih konačnih elemenata kako bi se izbjegle moguće pogreške i dobili što realniji rezultati. Da bi mreža konačnih elemenata bila uspješno napravljena, potrebno je kontrolirati da se svi konačni elementi (i tetraedarski i heksaedarski) međusobno spajaju (nastavljaju) isključivo u svojim čvorovima.

Dimenzije armaturnih šipki glavne uzdužne armature su 2×1000 mm, te 2×1600 mm za raspon simulirane grede 2 m, slika 4. Sve šipke uzdužne armature su promjera 12 mm i spona 10 mm. Preklap glavne uzdužne armature u vlačnoj zoni iznosi 600 mm ($50 \times \varnothing$ [mm]). Minimalna duljina preklopa potrebna da se osigura prijenos sile s jedne na drugu šipku, propisana prema HRN EN 1992 ($l_0 = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_5 \alpha_6 l_{b,reqd} \geq l_{0,min}$), manja je 30 % nego



Slika 4. Uzdužna i poprečna armatura armiranobetonske grede



Slika 5. Mreže konačnih elemenata armiranobetonske grede (polovica raspona)

u ovom ispitivanju. Za simuliranje realnih uvjeta modelirane su dvije čelične pločice od kojih je jedna postavljena na dnu na samom početku grede, na mjestu ležaja, a druga na sredini

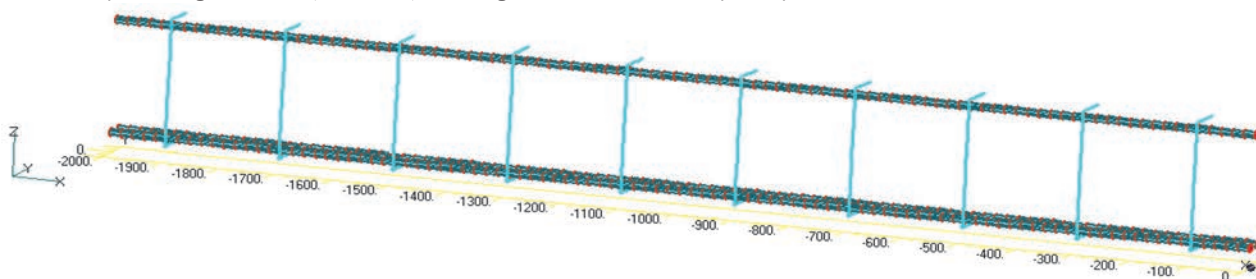
- ab greda s uzdužnom armaturom donje vlačne zone iz dva dijela (preklapanje armature) ali bez poprečne armature (spona) prikazana na slici 8.

grede te služi za bolji prihvat i prijenos opterećenja, ali i da bi se izbjegla moguća lokalna oštećenja u betonu tijekom nanošenja opterećenja, slika 5. Čelične pločice su dimenzija 100 / 100 / 25 mm.

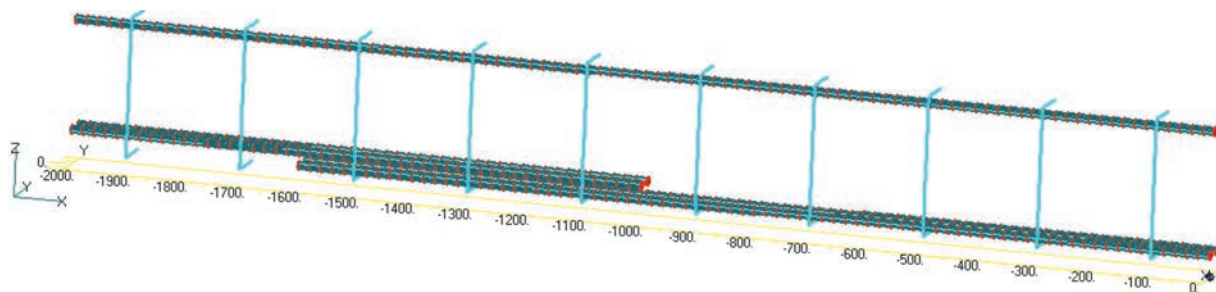
2.2. Prikaz modela armature

Analizirano je više različitih modela, jednakih geometrijskih karakteristika, različitih po načinu armiranja:

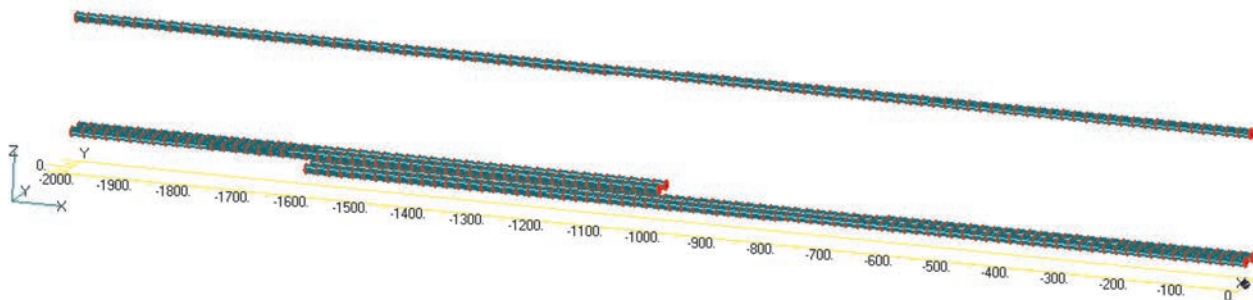
- ab greda s uzdužnom armaturom donje vlačne zone iz jednog dijela i s poprečnom armaturom (sponama) prikazana na slici 6.
- ab greda s uzdužnom armaturom donje vlačne zone iz dva dijela (preklapanje armature) i poprečnom armaturom (sponama) prikazana na slici 7.



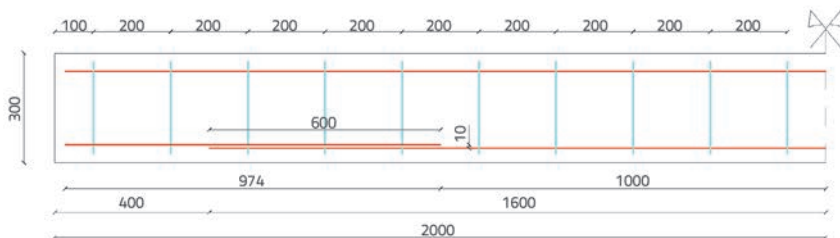
Slika 6. Armatura prvog modela



Slika 7. Armatura drugog modela



Slika 8. Armatura trećeg modela



Slika 9. Skica armaturnog plana

Radi jednostavnosti, prikazat će se samo detaljni rezultati za model armiranobetonske grede s uzdužnom armaturom donje vlačne zone iz dva dijela (preklapanje armature) i poprečnom armaturom (sponama), a u zaključku će tablično biti prikazani rezultati proračuna za sve modele.

Napomena: Raspored spona jednak je u prvom i drugom modelu, kao i glavna uzdužna armatura u vlačnoj zoni u drugom i trećem modelu. Glavna uzdužna armatura u tlačnoj zoni jednaka je za sve modele, slika 9.

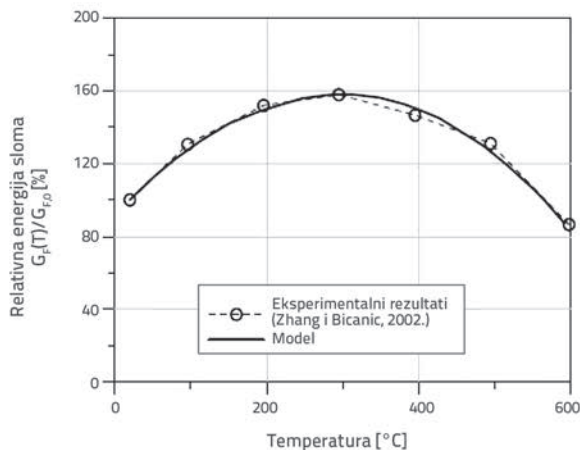
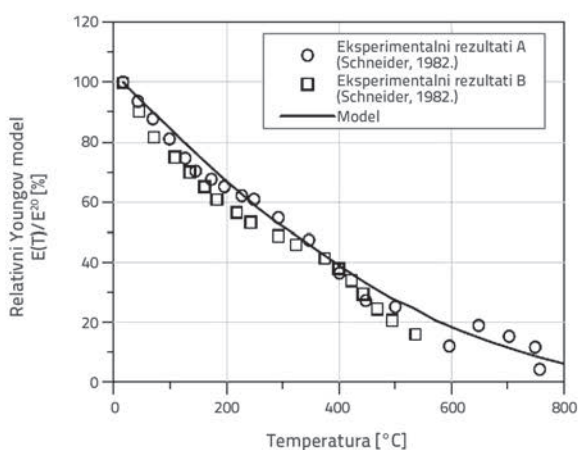
2.3. Materijalne karakteristike armiranobetonske grede

Temperaturna ovisnost mikroravninskog modela opisana je tako da su makroskopska svojstva betona (Youngov modul, tlačna i vlačna čvrstoća i prijeloma energije) promjenjiva zbog povišenih temperatura, prema dostupnim eksperimentalnim podacima [7, 13, 14], slike 10., 11. i 12.

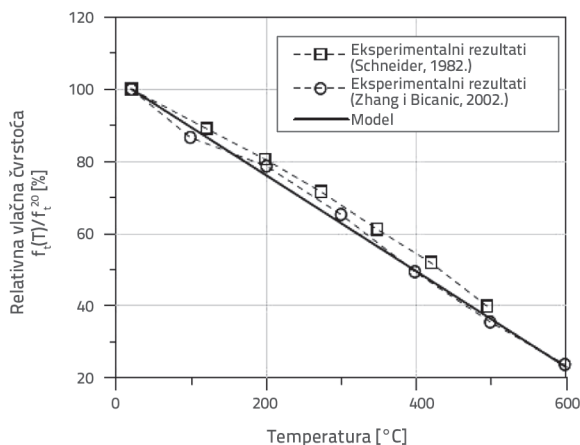
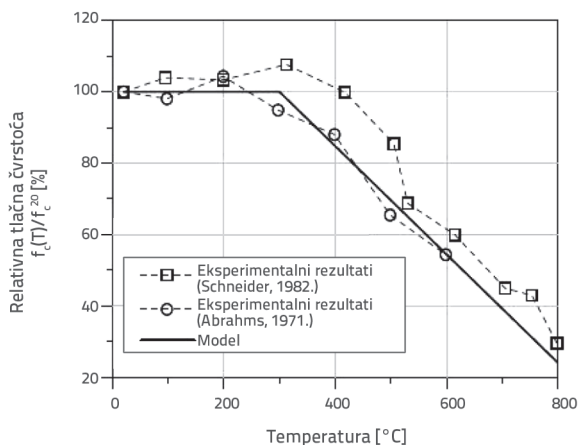
Analizirana je armiranobetonska greda sljedećih materijalnih karakteristika betona:

- karakteristična tlačna čvrstoća $f_{ck} = 25,0$ MPa
- vlačna čvrstoća $f_t = 2,0$ MPa
- Youngov modul elastičnosti $E_c = 28000$ MPa
- Poissonov koeficijent $\nu = 0,18$
- energija sloma $G_F = 0,08$ N/mm.

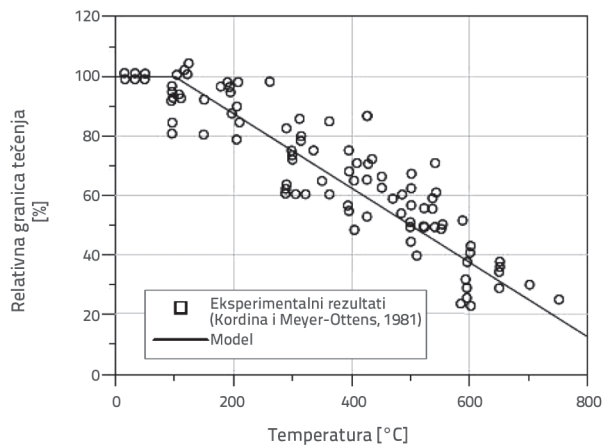
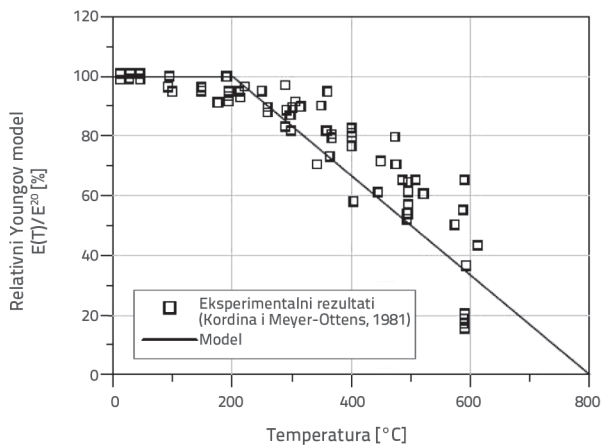
Eksperimenti pokazuju da se mehanička svojstva čelika mijenjaju i da su podložna promjenama pri povišenim temperaturama [20]. U modelu je takav fenomen uzet u



Slika 10. Youngov modul i energije sloma betona u ovisnosti o temperaturi [7, 13, 14]



Slika 11. Tlačna i vlačna čvrstoća betona u ovisnosti o temperaturi [7, 13, 14]



Slika 12. Youngov modul elastičnosti i granica tečenja čelika u ovisnosti o temperaturi [7, 13, 14]

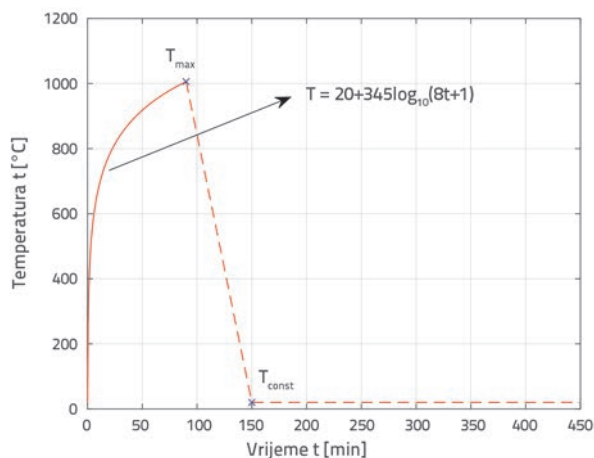
obzir primjenom reduciranih dijagrama za granicu tečenja čelika i Youngov modul elastičnosti, kao što je prikazano na slici 12. Iako dolazi do smanjenja tih dvaju svojstava zbog visoke temperature, pokusi pokazuju da kod čelika može doći do obnavljanja granice tečenja, za razliku od betona kod kojeg dolazi do nepovratne degradacije materijala [21]. Uzdužna i poprečna armatura ima sljedeće materijalne karakteristike:

- granica popuštanja $f_v = 480$ MPa
- vlačna čvrstoća $f_u = 580$ MPa
- Youngov modul elastičnosti $E = 210000$ MPa
- Poissonov koeficijent $\nu = 0,33$.

3. Opterećenja na modelu

Prilikom analize armiranobetonskih greda primijenjena su dva osnovna načina opterećivanja:

- opterećenje kontroliranim pomakom zadano na sredini grede (inkrementni postupak)
- opterećenje visokim temperaturama i simuliranje požara (greda grijana s tri strane).



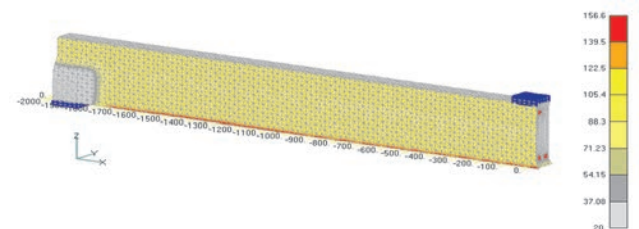
Slika 13. Prikaz korištenog protokola grijanja (prema ETK krivulji) i hlađenja

Modeli su opterećivani na način da su napravljene dvije skupine testiranja modela, odnosno prva skupina predstavlja opterećivanje modela samo pomakom te promatranje nosivosti do sloma, a druga skupina predstavlja kombinaciju dvaju navedenih opterećenja, što znači da su svi modeli prvotno bili izloženi djelovanju visokih temperatura i simulaciji požara, hlađeni određeno vrijeme prema zadanom protokolu grijanja i hlađenja do željene temperature, te nakon toga opterećivani pomakom za analizu novosti (slika 13.).

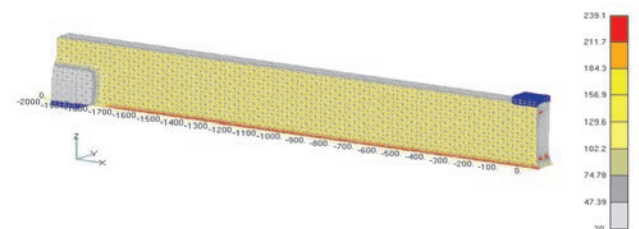
Kao temperaturno opterećenje uzeta je ISO - 834 krivulja (krivulja standardnog požara) [4]. Temperature opožarenog prostora za prvih 30 minuta rastu do 850 °C, a za daljnjih 90 minuta, do približno 1050 °C.

4. Temperaturna raspodjela ab grede

Radi jednostavnosti i vrlo sličnih rezultata raspodjele temperature u armiranobetonskim gredama, na slikama od 14. do 21. je prikazana temperaturna analiza samo jednog modela armiranobetonske grede, i to onoga s nastavljenom uzdužnom armaturom donje vlačne zone (preklapanje armature) i poprečnom armaturom (sponama).

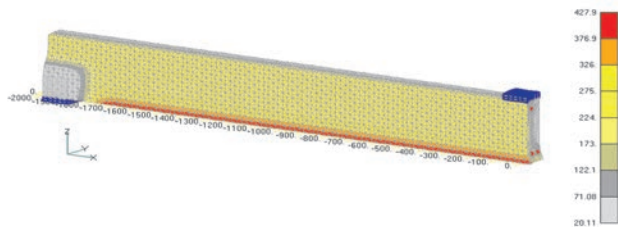


Slika 14. Temperaturna raspodjela u ab gredi nakon 5 minuta

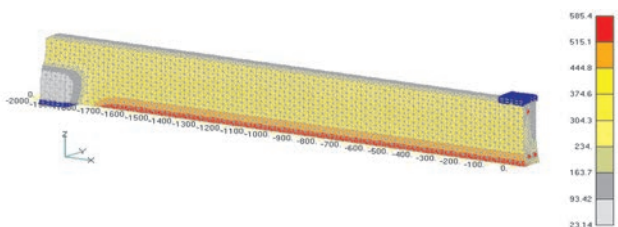


Slika 15. Temperaturna raspodjela u ab gredi nakon 10 minuta

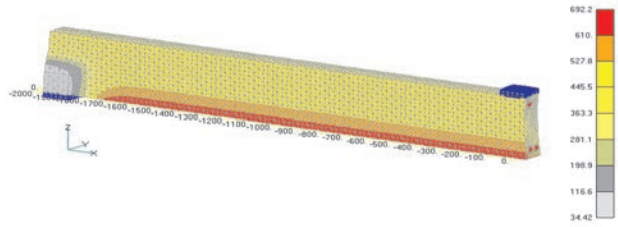
Analizom temperaturnog polja u gredi vidljivo je da nakon 5 minuta, odnosno u vremenskom intervalu od 5 do 10 minuta postoji značajan porast temperature na rubnim elementima grede, a pogotovo na donjem rubu grede (greda je grijana s vanjske i donje strane).



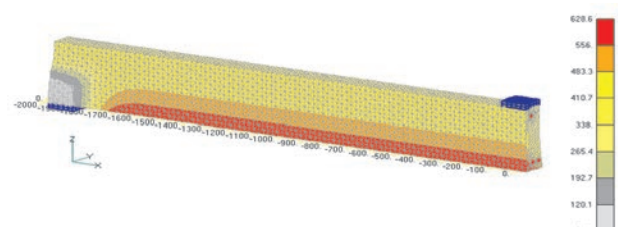
Slika 16. Temperaturna raspodjela u ab gredi nakon 30 minuta



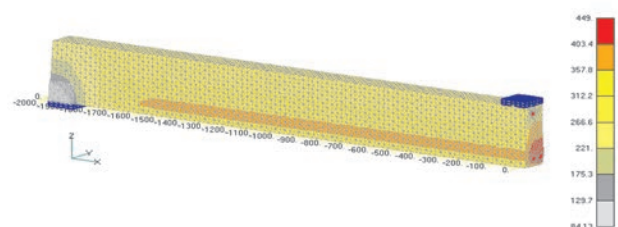
Slika 17. Temperaturna raspodjela u ab gredi nakon 60 minuta



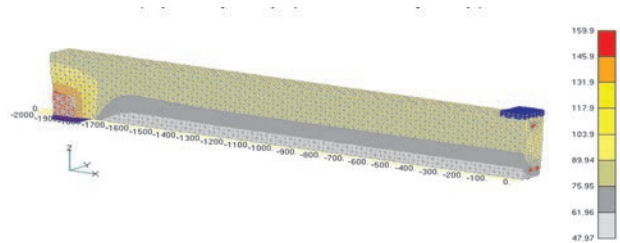
Slika 18. Temperaturna raspodjela u ab gredi nakon 90 minuta (kraj zagrijavanja i početak hlađenja)



Slika 19. Temperaturna raspodjela u ab gredi nakon 110 minuta

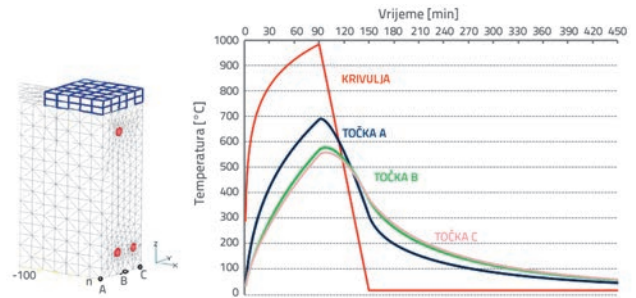


Slika 20. Temperaturna raspodjela u ab gredi nakon 150 minuta (kraj linearnog hlađenja i početak konstantnog hlađenja)



Slika 21. Temperaturna raspodjela u ab gredi nakon 450 minuta (kraj procesa hlađenja)

Slika 22. prikazuje temperaturnu raspodjelu u ab gredi nakon završenog zagrijavanja i hlađenja te stanje grede neposredno prije opterećivanja pomakom do sloma. Vidljiv je temperaturni gradijent ab grede, odnosno 300 minuta hlađenja nije dovoljno za postizanje sobne temperature kroz cijeli poprečni presjek grede. Koncentracija povišene temperature na lijevom dijelu grede nad osloncem može biti objašnjena kao posljedica akumulacije topline i modeliranja sidrenja, jer betonski elementi nad osloncem su modelirani kao elastični elementi, te nisu bili izloženi grijanju i hlađenju. Temperaturna raspodjela za različite vremenske intervale je realno očekivanih vrijednosti, što pokazuju i druga slična istraživanja [5, 6, 7, 20].



Slika 22. Prikaz promatranih točaka korištenih za distribuciju temperature i krivulje grijanja i hlađenja

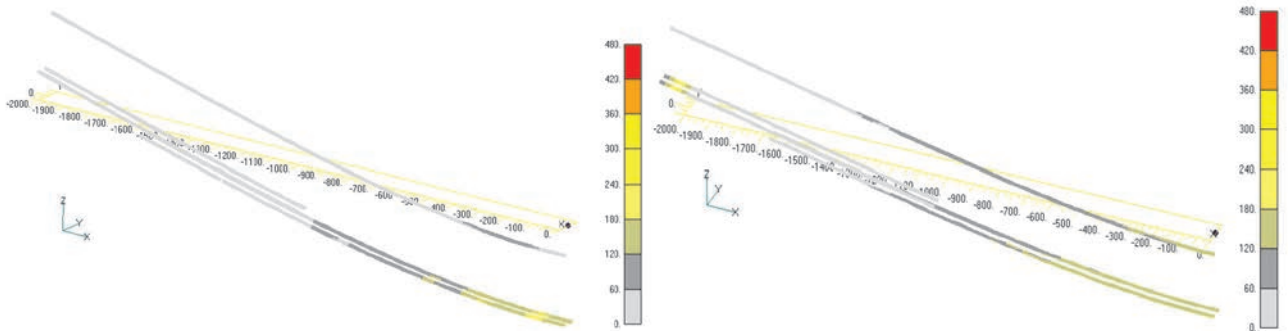
5. Prikaz i usporedba rezultata

Modeli su opterećivani na način da su napravljene dvije skupine testiranja modela, odnosno prva skupina predstavlja opterećivanje modela samo pomakom te promatranje nosivosti do sloma, dok druga skupina predstavlja kombinaciju dvaju navedenih opterećenja, što znači da su svi modeli prvotno bili izloženi djelovanju visokih temperatura i simulaciji požara, hlađeni određeno vrijeme prema zadanom protokolu grijanja i hlađenja do željene temperature te nakon toga opterećivani pomakom i promatrane novosti. Stoga će svi rezultati navedenih testiranja i proračuna te njihove usporedbe biti prikazani u zaključku. Na slikama od 23. do 27. prikazani su detaljni rezultati naprezanja armature i oštećenja betona za samo jedan model armiranobetonske grede, i to onaj s uzdužnom armaturom donje vlačne zone iz dva dijela (preklapanje armature) i poprečnom armaturom (sponama).

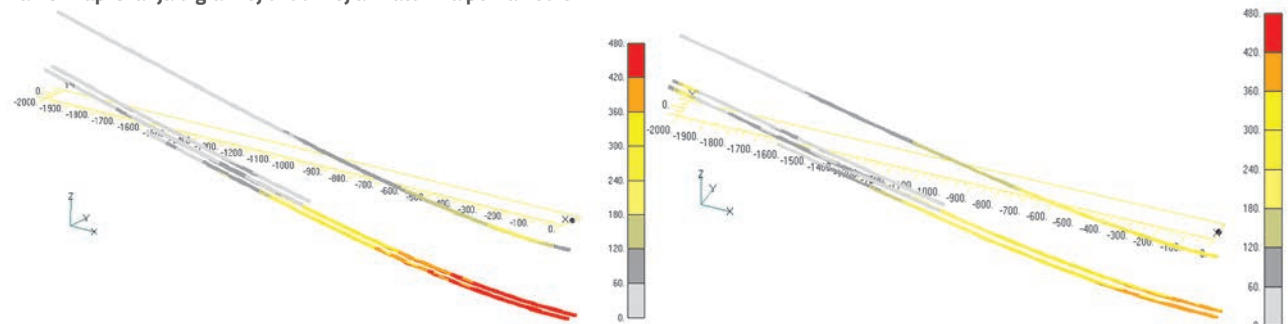
Napomena za slike 23. do 30.:

LIJEVA STRANA - modeli opterećivani samo pomakom;
 DESNA STRANA - modeli opterećivani pomakom nakon djelovanja visokih temperatura i hlađenja
 Raspon prikazanih naprezanja u armaturi može biti od 0 do 480 N/mm², a glavna vlačna naprezanja (pukotine) u betonu

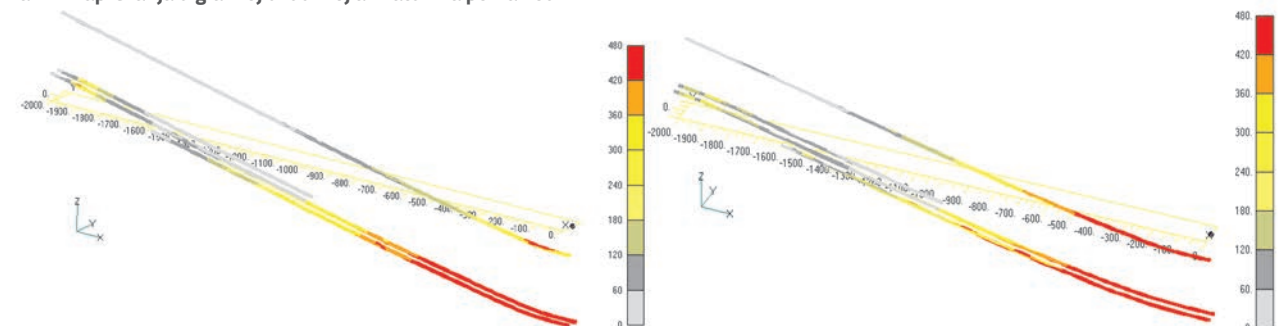
prikazana su relativnim deformacijama u rasponu od 0,0 do 0,10, gdje deformacija od 0,01 odgovara pukotini širine 0,2 mm za prosječnu duljinu konačnog elementa od 20 mm. Pukotine koje nastaju u betonu su posljedica prekoračenja vlačne čvrstoće. Prema граничном stanju pukotina za ab konstrukcije kritična širina pukotina je $w_g = 0,3$ mm.



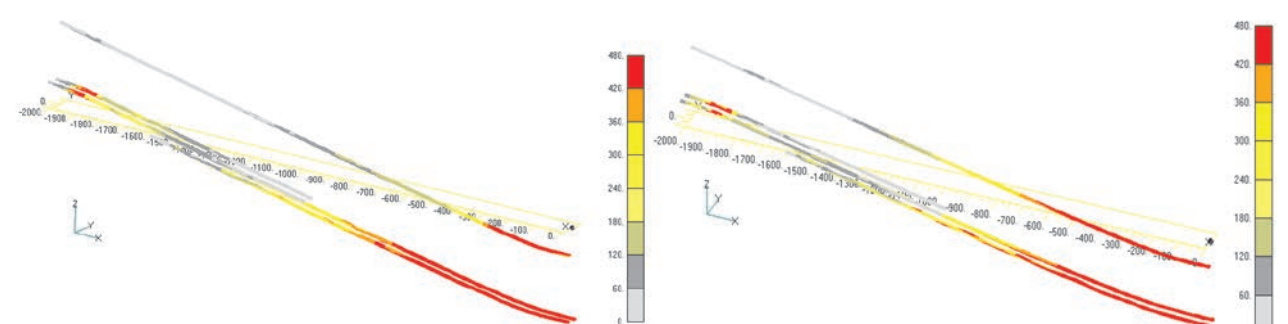
Slika 23. Naprezanja u glavnoj uzdužnoj armaturi za pomak od 6 mm



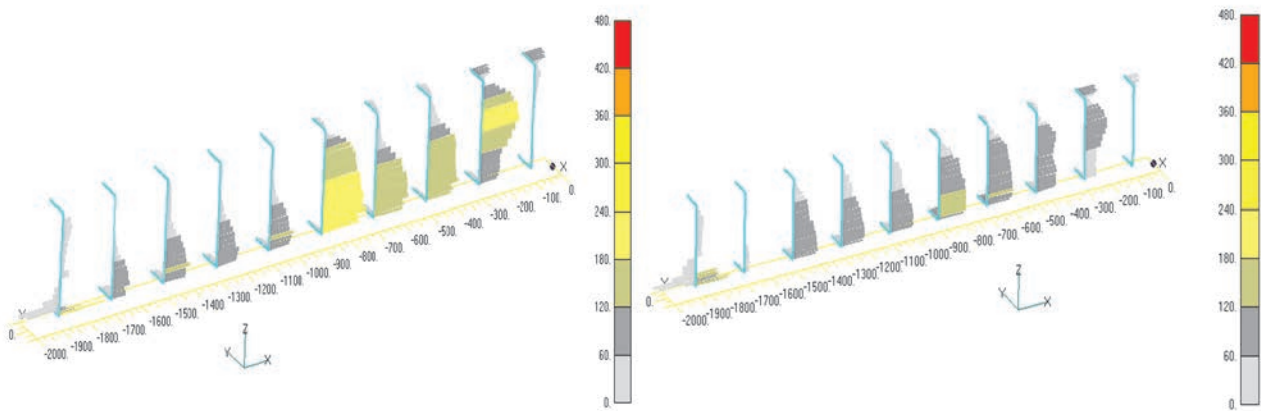
Slika 24. Naprezanja u glavnoj uzdužnoj armaturi za pomak od 21 mm



Slika 25. Naprezanja u glavnoj uzdužnoj armaturi za pomak od 81 mm



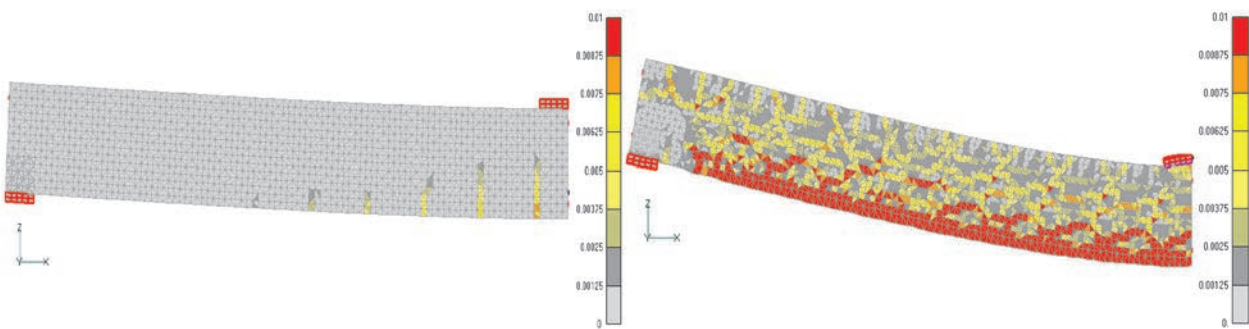
Slika 26. Naprezanja u glavnoj uzdužnoj armaturi neposredno prije otkazivanja nosivosti (lijevo pomak od 154 mm, desno pomak od 144 mm)



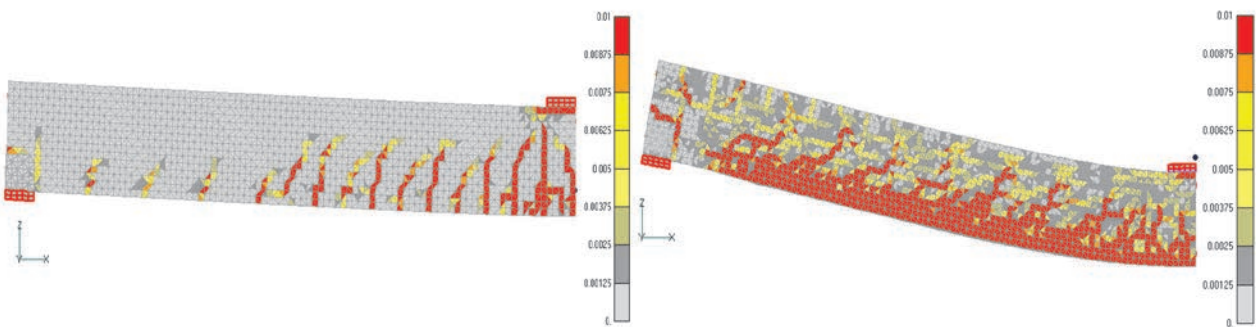
Slika 27. Naprezanja u sponama neposredno prije otkazivanja nosivosti (lijevo pomak od 154 mm, desno pomak od 144 mm)

Iz prikaza stanja naprezanja u sponama armiranobetonske grede vidljivo je da nije došlo do tečenja armature i prekoračenja

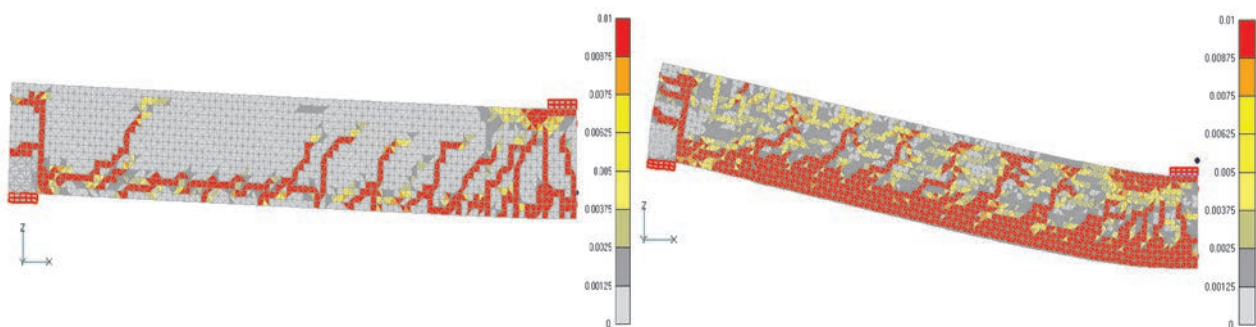
maksimalne čvrstoće čak niti neposredno prije loma i otkaza nosivosti konstrukcijskog elementa.



Slika 28. Oštećenje betona i pukotine za pomak od 6 mm



Slika 29. Oštećenje betona i pukotine za pomak od 51 mm

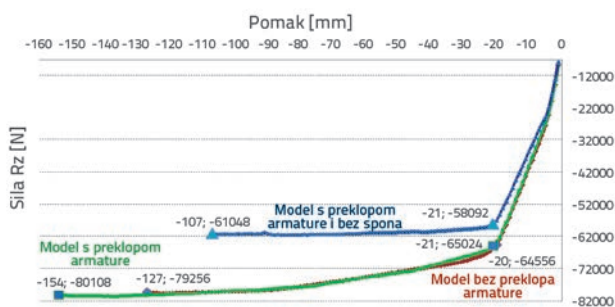


Slika 30. Oštećenje betona i pukotine neposredno prije otkaza nosivosti (lijevo pomak od 154mm, desno pomak od 144 mm)

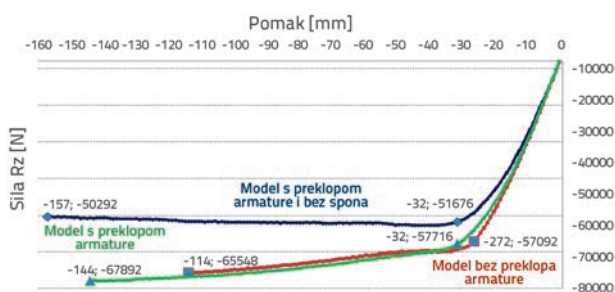
Zbog zagrijavanja i hlađenja armiranobetonske grede, dolazi do ljuštenja zaštitnog sloja betona što je vidljivo sa slika 28. do 30. desno, a potvrđeno je i u drugim istraživanjima [6, 7]. Zbog nejednolikosti stupnja zagrijanosti i temperaturnog gradijenta kroz poprečni presjek ab elementa, javljaju se temperaturne deformacije i naprezanja koja dovode do ljuštenja i oštećenja betona. Veća izloženost djelovanju visokih temperatura uzrokuje znatnija oštećenja betona, kao i dodatna oštećenja tijekom hlađenja. Slobodna voda koja se nalazi u betonu pri temperaturi 105 °C počinje mijenjati agregatno stanje. Daljnji porast temperature uzrokuje dehidraciju cementa i pri temperaturama između 800-900 °C dolazi do uništenja cementnog gela. Ponašanje betona pri djelovanju visokih temperatura ovisi i o vrsti i mineraloškom sastavu agregata, jer može doći do gubitka vode u agregatu i promjeni svojstva.

6. Usporedbe rezultata svih modela

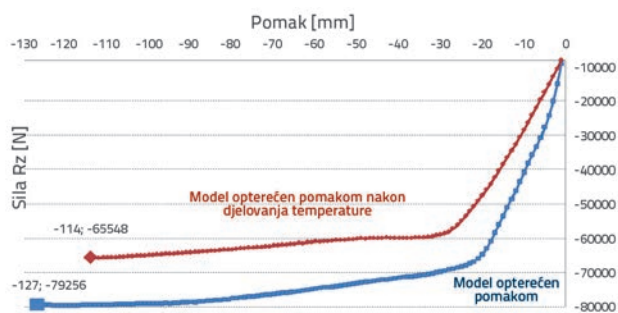
Slike 31. do 35. prikazuju sve oblike nosivosti ab greda. Kao što je vidljivo iz slika 31. do 35., sila nosivosti armiranobetonske grede za model koji je prije opterećivanja pomakom bio izložen djelovanju visokih temperatura očekivano je manja kao posljedica oštećenja betona pri djelovanju požara. Međutim, pomak neposredno prije otkaza ab grede u tom je slučaju znatno veći. To se može protumačiti time što se unutar armiranobetonske grede uslijed grijanja generiraju i tlačna naprezanja, npr. u smjeru uzdužne osi grede, koja utječu na energiju sloma betona koja raste i tako pridonosi povećanju duktilnosti grede.



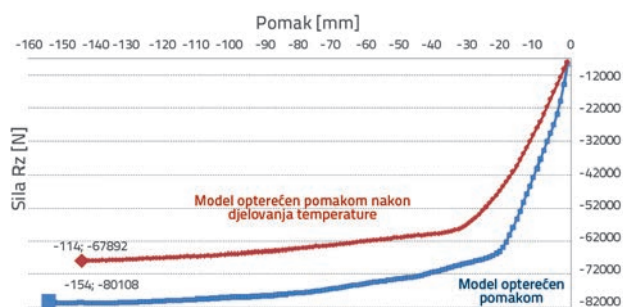
Slika 31. Dijagrami nosivosti (pomak-sila) armiranobetonskih greda opterećenih samo pomakom



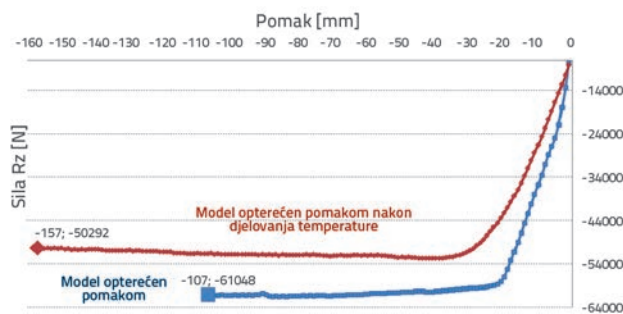
Slika 32. Dijagrami nosivosti (pomak-sila) armiranobetonskih greda opterećenih pomakom nakon djelovanja visokih temperatura i hlađenja



Slika 33. Dijagrami nosivosti (pomak-sila) ab grede s uzdužnom armaturom iz jednog dijela



Slika 34. Dijagrami nosivosti (pomak-sila) ab grede s preklapljenom uzdužnom armaturom



Slika 35. Dijagrami nosivosti (pomak-sila) ab grede s preklapljenom uzdužnom armaturom, bez poprečne armature (spona)

Napomena: Iz eksperimenata na betonskim gredicama poznato je da s povećanjem temperature energija sloma najprije raste, a nakon temperature od približno 400 °C počinje padati, što potvrđuje i navedene pojave i razloge.

Tablica 1. Pregled rezultata ispitivanja zadanih modela

MODEL	REZULTATI ISPITIVANJA		
	Opterećenje pomakom	Temperatura + opterećenje pomakom	
	pomak [mm] / sila (N)	pomak [mm] / sila (N)	pad sile [%]
1. MODEL	127 / 79256	114 / 65548	17,3
2. MODEL	154 / 80108	144 / 67892	15,2
3. MODEL	107 / 61048	157 / 50292	17,6

7. Zaključak

Na temelju provedenih ispitivanja i prikazanih rezultata proračuna vidljivo je očekivano oštećenje i degradacija materijala armiranobetonske grede uzrokovani djelovanjem visoke temperature i simulacije požara te značajan pad nosivosti.

U usporedbi prvog i drugog modela vidljiv je utjecaj različitog načina armiranja uzdužnom armaturom donje vlačne zone. Model s glavnom uzdužnom preklapljenom armaturom ima znatno veći pomak neposredno prije otkaza nosivosti u numeričkom modelu, dok je konačna sila neznatno veća. Razlog neznatnog porasta sile može se protumačiti time što je mjesto preklapanja armature bliže ležaju nego utjecaju maksimalnih momenata. Posljedica preklapanja armature je povećanje udjela čelika u ab gredi i povećanje koeficijenta armiranja te zbog toga dolazi do povećanja duktilnosti (žilavosti) konstrukcijskog elemenata što rezultira većim pomakom. Duktilnost konstrukcije je važna da se

izbjegne naglo rušenje građevine uslijed djelovanja opterećenja koja se očekuju za tijekom trajanja i uporabljivosti konstrukcije. Veća duktilnost znači i veću sposobnost deformiranja u nelinearnom području. Ispitivanjima je prikazan i utjecaj poprečne armature, tj. vidljiv je znatan pad sile nosivosti za model bez poprečne armature (spona). Takav ishod je ujedno i očekivani rezultat jer je promatrani model statički određeni sustav, odnosno prosta greda slobodno oslonjena, opterećena vertikalnim pomakom.

Sva opisana ispitivanja provedena su na prikazanim numeričkim modelima, a njihovi rezultati služe za predviđanje ponašanja i odgovora nosive konstrukcije ili konstrukcijskog elementa na ispitivana opterećenja u realnom vremenu i okruženju. Međutim, takvih i sličnih eksperimentalnih ispitivanja, ponajviše zbog otežanih uvjeta rada i mjerenja pri djelovanju visokih temperatura te troškova ispitivanja, još uvijek nedostaje da bi usporedbe rezultata bile pouzdane i točnije.

LITERATURA

- [1] Ninčević, K.: Utjecaj nastavljanja armature na nosivost i oštećenje betona armiranobetonske grede prethodno izložene djelovanju visokih temperatura, diplomski rad, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, 2014.
- [2] EN 1992-1-2:2010. Part 1.2 design of concrete structures. Structural fire design.
- [3] IS 456:2000. Indian standard plain and reinforced concrete – code of practice. Bureau of Indian Standards, New Delhi; 2000.
- [4] CEB-FIP bulletin 46. Fire design of concrete structures—structural behaviour and assessment. Federation internationale du beton (fib); 2008.
- [5] Swinden Technology Centre, The Behaviour of multi-storey steel-framed buildings in fire: A European joint research programme, British Steel plc, Rotherham, UK, 1999.
- [6] Sharma, A., Bošnjak, J., Ožbolt, J., Hofmann, J.: Numerical modeling of reinforcement pull-out and cover splitting in fire-exposed beam-end specimens, *Engineering Structures*, 111 (2016), pp. 217–232, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.12.017>
- [7] Ožbolt, J., Bošnjak, J., Periškić, G., Sharma, A.: 3D numerical analysis of reinforced concrete beams exposed to elevated temperature, *Engineering Structures*, 58 (2014), pp. 166–174, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.11.030>
- [8] Albrifkani, S., Wang, Y.C.: Explicit modelling of large deflection behaviour of restrained reinforced concrete beams in fire, *Engineering Structures*, 121 (2016), pp. 97–119, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.04.032>
- [9] Kodur, V.K.R., Agrawal, A.: An approach for evaluating residual capacity of reinforced concrete beams exposed to fire, *Engineering Structures*, 110 (2016), pp. 293–306, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.11.047>
- [10] Hakan, E.: Predicting the moment capacity of RC beams exposed to fire using ANNs, *Construction and Building Materials*, 101 (2015) 1, pp. 30–38, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.049>
- [11] Ožbolt, J.: *MASA-Macroscopic Space Analysis*, User Manual, Internal Report, Inst. of Constr. Mat., University of Stuttgart, Germany, 1998.
- [12] Ožbolt, J., Kožar, I., Eligehausen, R., Periškić, G.: Instationares 3D thermomechanisches modell fur Beton, *Beton Stahlbetonbau*, 100 (2005) 1, in German, <https://doi.org/10.1002/best.200590006>
- [13] Schneider, U.: Properties of materials at high temperatures, concrete. 2nd ed. RILEM technical committee 44-PHT. Kassel: Technical University of Kassel, 1986.
- [14] Zhang, B., Bičanić, N.: Residual fracture toughness of normal- and high-strength gravel concrete after heating to 600 °C. *ACI Mater*, 99 (2000), pp. 217–26.

- [15] Borst, R., Peeters, P.P.J.M.: Analysis of concrete structures under thermal loading. *Comput Method Appl Mech*, 77 (1989) 3, pp. 293–310, [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(89\)90079-0](https://doi.org/10.1016/0045-7825(89)90079-0)
- [16] Luccioni, B.M., Figueroa, M.I., Danesi, R.F.: Thermo-mechanic model for concrete exposed to elevated temperatures. *Eng Struct*, 25 (2003), pp. 729–742, [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00209-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00209-2)
- [17] Ožbolt, J., Li, Y.J., Kožar, I.: Microplane model for concrete with relaxed kinematic constraint. *Int J Solids Struct*, 8 (2001), pp. 2683–2711, [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(00\)00177-3](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(00)00177-3)
- [18] Von Mises, R.: *Mechanik der festen Körper im plastisch deformablen Zustand*, Göttin. Nachr. Math. Phys., 1 (1913), pp. 582–592.
- [19] Bažant, Z.P., Oh, B.H.: Crack band theory for fracture of concrete. *RILEM*, 983 (2016) 93, pp.155–77.
- [20] Kordina, K., Meyer-Ottens, C.: *Beton brandschutz handbuch*, Dusseldorf, Verlag Bau+Technik, 1981.
- [21] Takeuchi, M., Hiramoto, M., Kumagai, N., Yamazaki, N., Kodaira, A., Sugiyama, K.: Material properties of concrete and steel bars at elevated temperatures. In: *SMIRT 12*; 1993.