

Primljen / Received: 27.3.2020.

Ispravljen / Corrected: 16.7.2020.

Prihvaćen / Accepted: 26.7.2020.

Dostupno online / Available online: 10.5.2021.

# Svojstva armature ugrađene u mortove sa zamjenom pijeska nakon izlaganja visokim temperaturama

## Autori:

<sup>1</sup>Prof.dr.sc.**Jeyaprabha Balasubramanian**

jeyaprabha@gmail.com

Autor za korespondenciju

<sup>2</sup>Izv.prof.dr.sc.**Elangovan Gopal**

gelangoki@gmail.com

<sup>1</sup>Doc.dr.sc.**Dhivyakamaraj**

dhivyakamarajcivil@gmail.com

<sup>3</sup>Sathish Kumar Ponnaiah

sciencesathish5@gmail.com

<sup>3</sup>Doc.dr.sc.**Prakash Periakaruppan**

kmpprakash@gmail.com

<sup>1</sup>Tehnološki institut Sethu, Indija  
Odjel za graditeljstvo<sup>2</sup>Visoka škola za tehničke znanosti, Indija  
Odjel za graditeljstvo<sup>3</sup>Visoka škola Thiagarajar, Indija  
Odjel za kemiju

Prethodno priopćenje

**Jeyaprabha Balasubramanian, Elangovan Gopal, Dhivyakamaraj, Sathish Kumar Ponnaiah, Prakash Periakaruppan**

## Svojstva armature ugrađene u mortove sa zamjenom pijeska nakon izlaganja visokim temperaturama

U ovom se radu istražuje utjecaj zagrijavanja, metoda hlađenja i debljine zaštitnog sloja na ponašanje (čvrstoću i duktilnost) rebraste armature promjera 12 mm ugrađene u mort u kojem je riječni pijesak zamijenjen granitnim prahom i proizvedenim pijeskom, pri čemu debljina zaštitnog sloja iznosi 30 i 50 mm. Na temperaturama iznad 500 °C, toplinsko naprezanje uzrokovalo je nasumično ljuštenje zaštitnog sloja, a vlačna ispitivanja upozorila su na smanjenje čvrstoće i povećanje duktilnosti armature pri hlađenju na zraku, dok je suprotna pojava uočena pri gašenju vodom.

### Ključne riječi:

svojstva armature, požar, materijali za zamjenu pijeska, debljina zaštitnog sloja, hlađenje na zraku, gašenje vodom

Research Paper

**Jeyaprabha Balasubramanian, Elangovan Gopal, Dhivyakamaraj, Sathish Kumar Ponnaiah, Prakash Periakaruppan**

## Rebar properties in sand-substitute mortars after exposure to high temperatures

This study investigates the effects of fire, cooling methods, and cover thickness, on the behaviour (strength and ductility) of 12-mm diameter rebars embedded in mortars with river sand (RS) substitutes such as granite powder and manufactured sand, with 30 and 50 mm cover thickness. Beyond 500 °C, thermal stress induced random spalling of mortar cover, and tension test results showed strength decrement and ductility increment of rebars for air cooling, while the vice versa was observed for water quenching.

### Key words:

rebar properties, fire, sand substitutes, cover thickness, air cooling, water quenching

Vorherige Mitteilung

**Jeyaprabha Balasubramanian, Elangovan Gopal, Dhivyakamaraj, Sathish Kumar Ponnaiah, Prakash Periakaruppan**

## Bewehrungseigenschaften in Sandersatzmörteln nach Einwirkung hoher Temperaturen

In dieser Arbeit wird der Einfluss der Erwärmung, die Methode der Kühlung und die Dicke der Schutzschicht auf das Verhalten (Festigkeit und Dehnbarkeit/Duktilität) der Rippenbewehrung mit dem Durchmesser von 12 mm geforscht, welche in den Mörtel eingebaut wurde, in welchem der Flusssand mit dem Granitpulver und dem hergestellten Sand ersetzt wurde, wobei die Dicke der Schutzschicht 30 und 50 mm beträgt. Auf den Temperaturen über 500 °C hat die Wärmespannung das teilweise Abschälen der Schutzschicht verursacht, und die Prüfungen der Zugspannung haben auf die Minderung der Festigkeit und die Erhöhung der Dehnbarkeit der Bewehrung bei der Kühlung an der Luft aufmerksam gemacht, während bei der Löschung mit dem Wasser eine Gegenerscheinung bemerkt wurde.

### Schlüsselwörter:

Eigenschaften der Bewehrung, Brand, Materialien für den Sandersatz, Dicke der Schutzschicht, Kühlung an der Luft, Löschung mit Wasser

## 1. Uvod

Riječni pijesak (eng. *river sand* - RS) je značajna komponenta običnog cementnog betona, armiranog cementnog betona, prednapetog betona, morta i betonskih blokova. U prirodi riječni pijesak nastaje u procesu koji traje i po nekoliko milijuna godina. S druge strane, potražnja za riječnim pijeskom svakodnevno raste velikom brzinom te su danas dostupne sve manje količine tog prirodnog resursa. Zbog toga se proizvedeni pijesak (eng. *manufactured sand* - MS) sve više koristi kao realna zamjena za riječni pijesak. U postrojenjima za preradu granita, goleme količine otpadnog granitnog praha (eng. *granite powder* - GP) generiraju se u postupku rezanja i poliranja, a njegovo se odlaganje smatra značajnim problemom zbog nepovoljnih utjecaja na okoliš. Naime, njegovim raspršivanjem zagađuje se zrak, voda i tlo. Taj otpadni materijal također se koristi u betonu kao zamjena za riječni pijesak [1]. Mnogi autori analizirali su karakteristike čvrstoće i trajnosti betona i morta izrađenih pomoću proizvedenog pijeska i granitnog praha. Primjena otpadnog granitnog praha dovodi do povećanja obujma hidratiziranog cementa te do poboljšanja karakteristika morta za zide [2]. Kada se s proizvedenim pijeskom koristi i vapneni prah, ovaj potonji zapunjava pore, ojačava kontaktnu prijelaznu zonu te ubrzava hidrataciju cementa [3]. Visoka površinska hrapavost i niska vrijednost drobljenja karakteristike su proizvedenog pijeska koje omogućuju poboljšanje otpornosti betona s proizvedenim pijeskom na habanje u slučaju ugradnje u kolničkim konstrukcijama [4]. Kada se u izradi proizvedenog pijeska primjeni odgovarajući proizvodni proces, tada se proizvedeni pijesak u betonu ponaša čak i bolje od riječnog pijeska [5]. Sitne čestice proizvedenog agregata utječu na reološka svojstva te dovode do potrebe za većom količinom vode [6]. Kao način poboljšanja volumenske stabilnosti i otpornosti na stvaranje pukotina betona s proizvedenim pijeskom, predlaže se projektiranje mješavina na bazi teorije minimalne kaše [7]. Odgovarajuća mješavina za betone ultravisoke čvrstoće koja sadrži proizvedeni pijesak omogućuje visoku gustoću zapunjavanja te manje i homogeno raspršivanje proizvoda hidratacije [8]. Armiranobetonske konstrukcije izložene su vrlo visokim temperaturama u slučaju požara. Visoke temperature nepovoljno utječu na mehanička svojstva svih uobičajenih građevnih materijala. Požar tako nepovoljno utječe na duktilnost, graničnu čvrstoću i granicu popuštanja čelične armature. Veličina takvog utjecaja ovisi o visini temperature, brzini zagrijavanja, vremenu izloženosti i brzini hlađenja. Pri hlađenju može doći do omekšavanja ili stvrdnjavanja, što ovisi o metodi hlađenja [9]. Kada se pristupa obnovi tako oštećenih građevina, potrebno je odrediti preostalu čvrstoću konstrukcije i njenih komponenata kao što su beton, armatura i mort. Općenito se može reći da zaštitni sloj štiti rebrastu armaturu od djelovanja požara. Opožarene građevine mogu se ponovo koristiti nakon odgovarajuće obnove i popravaka. Zato se u prvom koraku treba provesti detaljna analiza konstrukcije pa tek tada donijeti odluka ili o rušenju ili popravku građevine. Iako se iz dostupne literature može zaključiti da je do sada dosta toga poduzeto u području analize utjecaja

visokih temperatura - što uključuje i: utjecaj visokih temperatura na površinsku čvrstoću armiranobetonskih greda, utjecaj dužeg izlaganja visokim temperaturama i debljine zaštitnoga sloja na čvrstoću rebraste armature, utjecaj debljine zaštitnoga sloja rebraste armature izložene visokim temperaturama, posmične karakteristike armiranobetonskih greda izloženih visokim temperaturama, nelinearne analize armiranobetonskih stupova tijekom požara, ponašanje geopolimernog betona s dodatkom pepela pri visokim temperaturama, ljuskanje vlaknima ojačanog betona visoke čvrstoće pri visokim temperaturama, te propadanje betona sa zgurom pri visokim temperaturama [10-17], može se unatoč tomu reći da je tek manji broj studija izrađen u svrhu analize ponašanja pri visokim temperaturama morta i cementa u kojem se riječni pijesak zamjenjuje proizvedenim pijeskom i granitnim prahom. Kako bi se premostio ovaj jaz, u eksperimentalnom istraživanju koje je prikazano u ovom radu, ispituje se utjecaj visokih temperatura, metoda hlađenja i zaštitnog sloja, na mehanička svojstva armature u mortu koji umjesto riječnog pijeska sadrži zamjenske materijale. Eksperimentalni rezultati su pokazali da se za izloženost visokim temperaturama može odrediti gubitak čvrstoće, predvidjeti promjena duktilnosti armature te analizirati ljuskanje zaštitnog sloja s dodatkom materijala koji zamjenjuju riječni pijesak.

## 2. Materijali i metode

### 2.1. Materijali

Svojstva materijala korištenih u ovom ispitivanju, a to su normalni portlandski cement (OPC), RS, MS i GP, detaljno su opisana u našoj prethodnoj studiji [18]. Korišteni su materijali riječni pijesak i MS specifične gustoće 2,54 odnosno 2,57, koji prolaze kroz sito veličine 4,75 mm. Vodoupojnost je iznosila 0,032 % a udio praha 2 %. Vrijednosti specifične gustoće i specifične površine GP-a iznosile su 2,19 odnosno 333 m<sup>2</sup>/kg. U eksperimentu je korištena termomehanički tretirana čelična rebrasta armatura Fe 500 promjera 12 mm koja se obično koristi kao uzdužna armatura, a udovoljava uvjetima norme IS 1786: 2008 [19]. Rebrasta armatura ugrađena je u kontrolni uzorak morta s riječnim pijeskom (eng. *river sand mortar* - RSM), u mort koji sadrži 100 % proizvedenog pijeska (eng. *manufactured sand mortar* - MSM) te u mort s 15 % otpadnog granitnog praha (G15M) što je optimalni postotak zamjene RS-a s otpadnim GP-om [18]. Omjeri koji su korišteni u definiranju uzoraka i optimalne 15-postotne zamjene riječnog pijeska s otpadnim granitnim prahom opisani su u našem prethodnom radu [18, 20]. Prema specifikaciji proizvođača, sljedeći su elementi zastupljeni u kemijskom sastavu armaturnih šipaka: ugljik (0,300 ppm), fosfor (0,055 ppm), sumpor (0,055 ppm) i dušik (120 ppm).

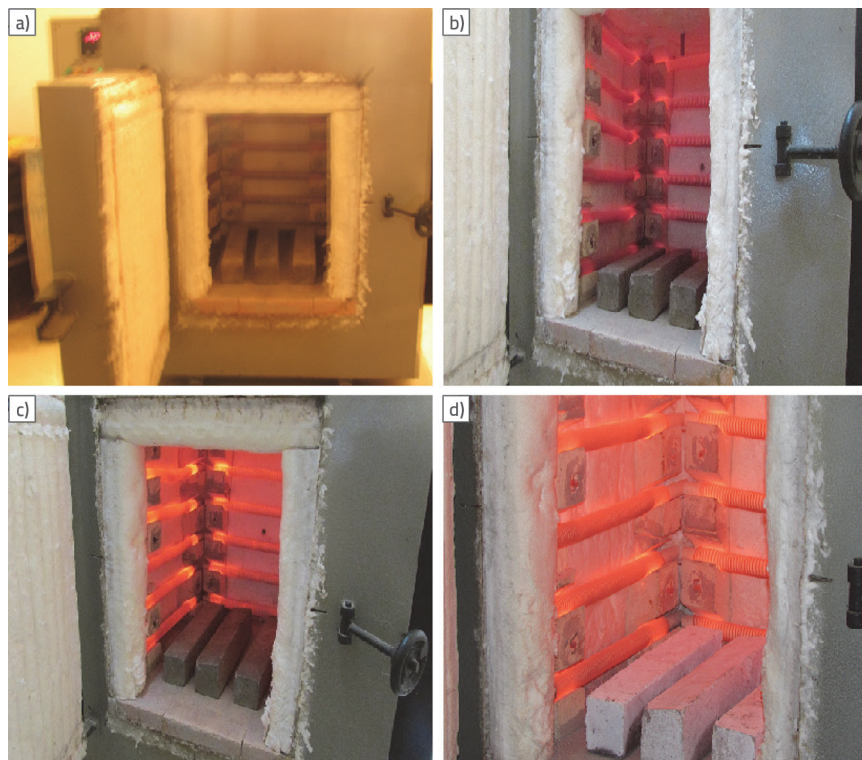
### 2.2. Pripremanje uzoraka

Omjer materijala u uzorcima morta iznosio je 1:3, a vodocementni faktor iznosio je 0,5. U eksperimentalnom su istraživanju

proizvedeni mortovi sa 100% riječni pijesak (RSM), 100 % MS (MSM) i 15 % GP + 85 % riječni pijesak (G15M). Udio vode je u svim mješavinama bio konstantan. Rebrasta armatura obložena je mješavinama RSM, MSM i G15M kako bi se analizirali utjecaji visokih temperatura, metoda hlađenja i debljine zaštitnoga sloja na čvrstoću i duktilnost elementa. Za zaštitni sloj debljine 30 i 50 mm korišteni su posebni obložni blokovi, što je uobičajena praksa za armaturu. Armaturne šipke stavljene su u sredinu kalupa dimenzija 72 x 72 x 400 mm, odnosno 112 x 112 x 400 mm. Kalupi su ispunjeni mortom u dva sloja i pritom je korištena vibracijska ploča kako bi se iz morta istisnule sve šupljine. Izliveno je sto osamdeset uzoraka (5 različitih temperatura x 2 različite debljine zaštitnoga sloja x 3 vrste mortova x 2 metode hlađenja x 3 uzorka) kako bi se u obzir uzele debljine zaštitnoga sloja (30 i 50 mm), razni mortovi (100 % RS, 100 % MS i 15 % GP + 85 % RS), različite temperature (sobna temperatura, 200 °C, 500 °C, 700 °C i 900 °C), i različite metode hlađenja (hlađenje na zraku u prirodnim uvjetima i brzo gašenje vodom). Uzorci su izvađeni iz kalupa nakon 24 sata te su zatim njegovani u vodi 28 dana. Nakon njege, uzorci su tri mjeseca sušeni na zraku u prirodnim uvjetima.

### 2.3. Toplinska obrada i metode

Po tri uzorka iz svake grupe istovremeno su, nakon postizanja zadane temperature, grijana tijekom tri sata u visokotemperaturnoj peći. Uzorci su polako grijani do zadanih visokih temperatura (dobivenim prema termogravimetrijskoj analizi (eng. *thermogravimetric analysis* - TGA), kao što je to prikazano u radu [18] a prema toplinskim uvjetima koji su iskazani u normi ISO), slika 1. Nakon toga je proveden postupak ručnog hlađenja; peć je ugašena, a uzorci su brzo ohlađeni uranjanjem u vodu, nakon čega su ostavljeni sa strane radi hlađenja na zraku sve do postizanja sobne temperature. Tada su iz uzoraka izvađene rebraste armaturne šipke razbijanjem morta ali bez oštećivanja. Zatim su uzorci označeni za potrebe ispitivanja: RSM, G15M i MSM označavaju redom mort s riječnim pijeskom, mort s otpadnim granitnim prahom (15 % GP + 85 % RS) i mort s proizvedenim pijeskom (100 % MS). Brojevi 3 i 5 označavaju zaštitni sloj od 30 tj. 50 mm, a slova A i W označavaju normalno hlađenje na zraku i brzo gašenje vodom. Oznaka PL koristi se za običnu čeličnu armaturu (koja nije obložena zaštitnim slojem). Vrijednosti granice popuštanja, granične čvrstoće i postotka produženja armature pri slomu dobivene su u skladu s normom IS1608:2005 [21], a u pokusima je korišten univerzalni uređaj



Slika 1. Uzorci s armaturom zagrijavani su u visokotemperaturnoj mufolnoj peći do: a) 200 °C; b) 500 °C; c) 700 °C; d) 900 °C

za provođenje ispitivanja. Armatura je također ispitana pri tim temperaturama i pod istim uvjetima kako bi se ispitala njena mehanička svojstva. Promjene u mikrostrukturi sitnih fragmenata uzoraka ohlađenih na zraku i postupkom gašenja vodom analizirane su pretražnim elektronskim mikroskopom tipa JEOL JSM6390.

## 3. Rezultati i analiza

Naš tim je već objavio podatke o čvrstoći i mikrostrukturi RSM-a, GP15M-a i MSM-a pri sobnoj temperaturi i na visokim temperaturama, pri raznim režimima hlađenja, tj. hlađenjem na zraku i brzim gašenjem vodom [18, 20, 22].

### 3.1. Mehanička svojstva rebraste armature ugrađene u termički obrađen i na zraku hlađeni mort

#### 3.1.1. Granica popuštanja

Rezultati prikazani na slici 3. prosječne su vrijednosti dobivene na tri uzorka. Promjene granice popuštanja za nizove RSM3A, G15M3A i MSM3A i RSM5A, G15M5A i MSM5A prikazane su na slikama 2.a i 2.b. Granice popuštanja svih armaturnih šipki smanjuju se s povećanjem temperature. Smanjenje granice popuštanja je zanemarivo do temperature od 500 °C, ali se nakon te temperature bilježi znatno smanjenje čvrstoće, što je također uočeno i u prethodnim studijama [23, 24]. Pad čvrstoće ogoljenih

armaturnih šipki izračunan je uspoređivanjem čvrstoće armature pri temperaturi okoline. Pad granice popuštanja pri 700 °C varira od 8,29 % do 12,65 % za armaturu obloženu mortom debljine 30 mm tj. 16,45 % za običnu armaturu koja nije obložena zaštitnim slijem pri temperaturi okoline (PLA). Iako su granice popuštanja pri 900 °C za šipke RSM3A, G15M3A i MSM3A u užem području, uočava se značajna varijacija u granici popuštanja PLA. Pad čvrstoće varira od 22,28 % do 27,32 % za RSM3A, G15M3A, MSM3A i 38 % za PLA pri temperaturi od 900 °C. Na slici 2.a vidimo da se granice popuštanja armaturnih šipki u RSM3A, G15M3A i MSM3A bolje mogu usporediti nego kod PLA. U skladu s tim rezultatima, može se utvrditi da zaštitni sloj debljine 30 mm štiti armaturu od visokih temperatura kada se hlađenje provodi na zraku. Granice popuštanja svih šipki obloženih mortom debljine 50 mm također padaju s temperaturom kao što se može vidjeti na slici 3.b. Na slikama 3.a i 3.b vidimo da PLA i armatura ugrađena u mort iskazuju iste vrijednosti granice popuštanja pri temperaturi od 500 °C. Pad granice popuštanja za RSM5A, G15M5A i MSM5A pri 700 °C iznosi otprilike 6 %, a pri 900 °C varira od 6 do 12 %. Prema tim se rezultatima može zaključiti da zaštitni sloj od 50 m smanjuje pad granice popuštanja više od zaštitnoga sloja debljine 30 mm i PLA i to za 6,65 % tj. 10,45 % nakon izlaganja temperaturi od 700 °C. Na temperaturi od 900 °C, kod zaštitnoga sloja debljine 50 mm smanjuje se pad čvrstoće za 26 % u odnosu na PLA. Zaštitni sloj ipak štiti armature šipke jer ne dopušta potpuni prijelaz visokih temperatura koje se bilježe na površini uzoraka [25, 26]. Ponašanje zaštitnoga sloja RS, G15 i MS pri visokim temperaturama nije značajno.

### 3.1.2. Granična čvrstoća

Utjecaj visokih temperatura na graničnu čvrstoću rebraste armature ugrađene u mort sa zaštitnim slojem od 30 mm i 50 mm nakon hlađenja na zraku prikazan je na slikama 2.c i 2.d. Bitno smanjenje ne uočava se do temperature od 500 °C, tj. smanjenje se može registrirati iznad te temperature. Za rebrastu armaturu sa zaštitnim slojem od 30 mm, pad granične čvrstoće pri temperaturi od 700 °C varira od 7,74 % do 12,9 %, dok je taj pad zanemariv u slučaju armature sa zaštitnim slojem od 50 mm. Pri temperaturi od 900 °C, pad granične čvrstoće armature kod RSM3A, G15M3A i MSM3A i RSM5A, G15M5A i MSM5A varira od 22,53 % do 25,43 %, tj. od 8,5 % do 15,6 %. Veće smanjenje granične čvrstoće od otprilike 17,4 % i 31,8 % uočava se kod PLA pri temperaturi od 700 °C tj. 900 °C. Ti rezultati pokazuju da je zaštita u slučaju zaštitnog sloja od 50 mm za 16,2 % veća nego kod PLA. Kod armature sa zaštitnim slojem, velik pad čvrstoće pri temperaturama većim od 500 °C uzrokovan je pretvaranjem kalcijevog hidroksida u živo vapno. Osim toga, zbog naknadne pojave brojnih pukotina u mortu smanjuje se zaštitna sposobnost morta, pa tako armatura gubi čvrstoću na visokim temperaturama [27]. I ovdje zaštitni sloj štiti ugrađenu armaturu od izravnog izlaganja visokim temperaturama, ali je utjecaj mortova u kojima se umjesto riječni pijesak koristi zamjenski materijal beznačajan.

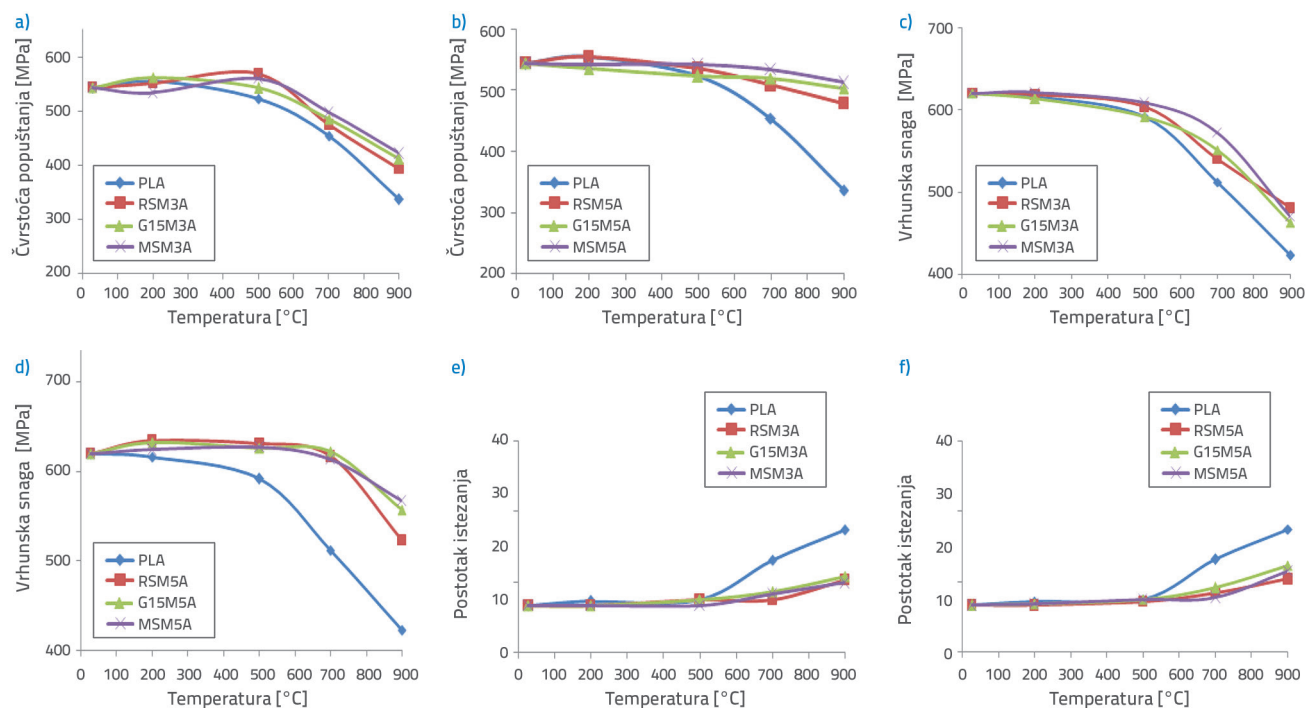
### 3.1.3. Postotak produženja

Odnosi između postotka produženja (eng. *percentage elongation* - PE) i temperature za RSM3A, G15M3A i MSM3A te za RSM5A, G15M5A i MSM5A prikazani su na slikama 2.e i 2.f. Progib armanobetonkih (RCC) elemenata u najvećoj mjeri ovisi o duktilnosti čelika. Duktilnost čelika raste nakon izlaganja visokim temperaturama i hlađenja na zraku, što dovodi do povećanog ugiba elementa. Nema promjene u postotku produženja (PE) obložene i ogoljene armature izložene temperaturama nižima od 500 °C. Porast vrijednosti PE bilježi se u rasponu od 19,16 % do 24,73 % pri temperaturi od 700 °C, te od 45,51 % do 49,70 % pri temperaturi od 900 °C za armaturu sa zaštitnim slojem od 30 mm. Porast vrijednosti PE izračunan je uspoređivanjem s vrijednosti PE armature pri okolnoj temperaturi. Za armaturu sa zaštitnim slojem od 50 mm, vrijednost PE raste od 10,4 % do 14,8 % pri temperaturi od 700 °C, te od 22,2 % do 33,5 % pri temperaturi od 900 °C. Vrijednost PE iznosi otprilike 38 % pri temperaturi od 700 °C tj. 64 % pri temperaturi od 900 °C za PLA. Pad zaštitne sposobnosti morta iznad 500 °C uzrokovan je pretvaranjem  $\text{Ca(OH)}_2$  u slobodno vapno (CaO) te širenjem pukotina i propadanjem morta. Kada su uzorci izloženi temperaturi od 900 °C, dolazi do razgradnje hidratacijskih proizvoda te do njihovog pretvaranja u kalcit i kalcijev silikat [28, 29], što dovodi do otvaranja pukotina, kao što se to vidi na slici 3. Svi se mortovi ponašaju slično pri visokim temperaturama.

### 3.2. Mehanička svojstva rebraste armature ugrađene u termički obrađen i vodom gašeni mort

#### 3.2.1. Granica popuštanja

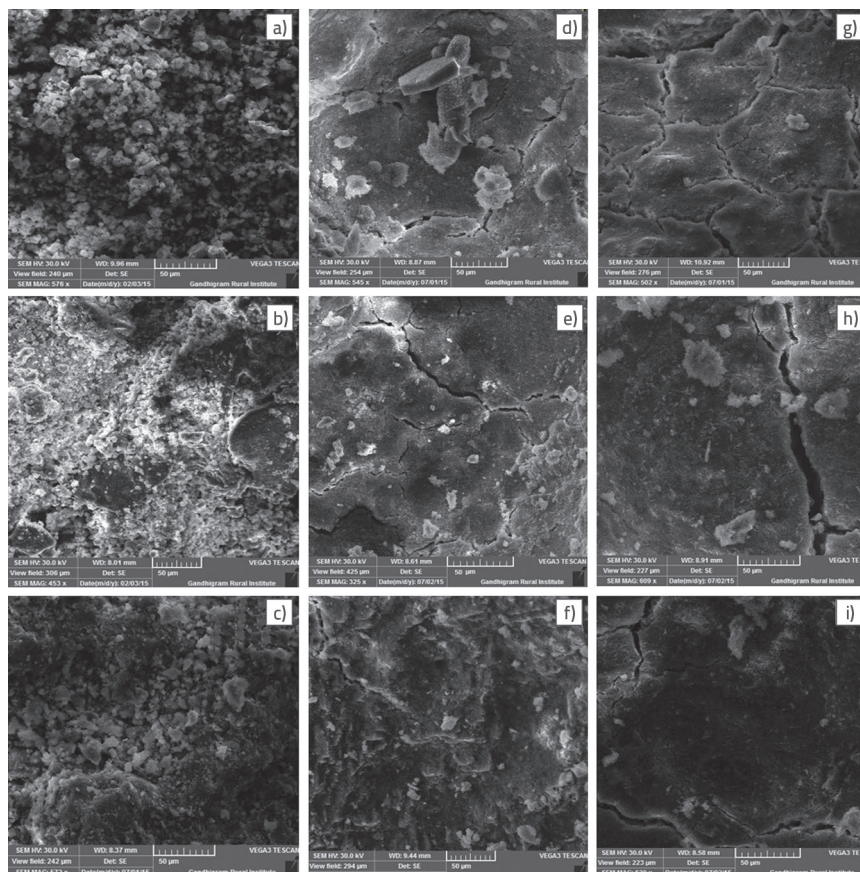
Granica popuštanja svih rebrastih armatura raste s povećanjem temperature, a nakon gašenja vodom, kao što se to može vidjeti na slici 4.a i 4.b. Ovdje se može uočiti da bitnog povećanja nema do 500 °C za RSM3W, G15M3W i MSM3W te za RSM5W, G15M5W i MSM5W. Pri temperaturi od 700 °C, granica popuštanja povećava se od 13,08 do 18,29 % za armaturu sa zaštitnim slojem debljine 30 mm, te za 23,33 % za PLW. Pri temperaturi od 900 °C, granica popuštanja je gotovo u uskom rasponu za RSM3W, G15M3W i MSM3W. Porast granice popuštanja armature varira od 8,8 do 14,2 % za RSM5W, G15M5W i MSM5W pri temperaturi od 700 °C. Taj porast čvrstoće dodatno raste do 28,2 %, tj. 37,02 % za armaturu ugrađenu u mort sa zaštitnim slojem od 50 mm i za PLW pri temperaturi od 900 °C. Brzo hlađenje dovodi do povećanja čvrstoće ali i do niske duktilnosti [24]. Konstrukcijski čelik treba posjedovati odgovarajuću duktilnost kako bi se ostvarilo prikladno ponašanje konstrukcije. Na temelju tih rezultata može se zaključiti da je kod debljine zaštitnoga sloja od 50 mm zaštita od visokih temperatura s brzim hlađenjem za najviše 9,13 % veća u odnosu na PLA, s tim da je utjecaj mortova sa zamjenom riječnog pijeska neznatan.



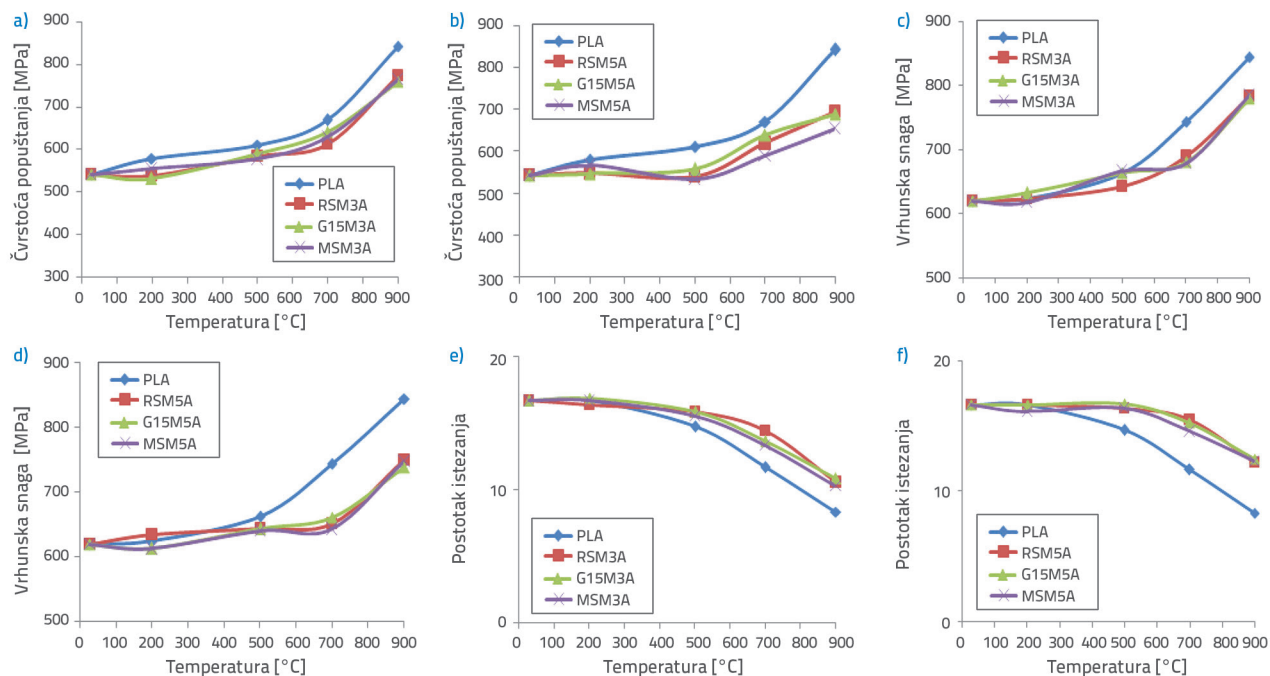
Slika 2. Utjecaj visokih temperatura na granicu popuštanja (a, b), graničnu čvrstoću (c, d) i postotak produženja (e, f) rebraste armature ugrađene u mort debljine 30 i 50 mm, nakon hlađenja zrakom

### 3.2.2. Granična čvrstoća

Granična čvrstoća armaturnih šipki ugrađenih u mort nakon tretmana pri različitim temperaturama te nakon gašenja vodom prikazana je na slikama 4.c i 4.d. Tu se može vidjeti da vrijednosti granične čvrstoće rastu usporedo s povećanjem temperature. Kada se koristi zaštitni sloj od 30 mm, povećanje je neznatno do temperature od 500 °C. Pri temperaturi od 700 °C i 900 °C, registrirano je povećanje čvrstoće otprilike od 9,52 do 11,13 % tj. 26 %. Pri tim temperaturama za PLW se bilježi porast čvrstoće od 20 % tj. 36 %. Kod uzoraka sa zaštitnim slojem debljine 50 mm, porast granične čvrstoće pri temperaturama od 700 °C i 900 °C iznosi 7 % tj. 21 %. Na temelju rezultata granice popuštanja i granične čvrstoće može se zaključiti da se pri debljini zaštitnoga sloja od 50 mm ostvaruje zaštita od visokih temperatura popraćenih brzim gašenjem vodom koja je za najviše 15 % bolja u odnosu na PLA.



Slika 3. SEM prikazi uzoraka RSM, G15M i MSM na sobnoj temperaturi (a, b, c), nakon hlađenja zrakom (d, e, f) i gašenja vodom nakon termičkog tretmana na 900 °C (g, h, i)



Slika 4. Utjecaj visokih temperatura na granicu popuštanja (a, b), graničnu čvrstoću (c, d) i postotak produženja (e, f) rebraste armature ugrađene u mort debljine 30 i 50 mm, nakon gašenja vodom

### 3.2.3. Postotak produženja (PE)

Na slikama 4.e i 4.f vidi se utjecaj temperature na vrijednost PE armaturnih šipki obloženih mortom debljine 30 i 50 mm, a nakon gašenja vodom. Očito je da se vrijednost PE svih armaturnih šipki smanjuje s povećanjem temperature, a nakon gašenja vodom. Smanjenje vrijednosti PE varira od 35% do 38% za RSM3W, G15M3W i MSM3W te od 25% do 27% za RSM5W, G15M5W i MSM5W pri temperaturi od 900 °C. Pedesetpostotno smanjenje vrijednosti PE zabilježeno je za PLW pri temperaturi od 900 °C. Brzim se hlađenjem postiže visoka čvrstoća ali i niska duktilnost. Ugib konstrukcijskih elemenata uglavnom ovisi o duktilnosti armaturnih šipaka [30]. Armature šipke postaju krte nakon smanjenja vrijednosti produženja, a takvo ponašanje nije poželjno u AB konstrukcijama. Iznad vrijednosti od 500 °C, kalcijev se hidroksid pretvara u živo vapno uz gubitak vode. Kada se uzorci gase vodom, živo vapno se pretvara u kalcijev hidroksid, a pritom dolazi do povećanja obujma [31, 32]. Osim toga, nakon brzog gašenja vodom, mort gubi čvrstoću zbog velikog toplinskog gradijenta u uzorcima morta te zbog povećanja stupnja zasićenosti vodom. Te dvije pojave dovode do formiranja mikropukotina, kao što se to vidi na slici 3.

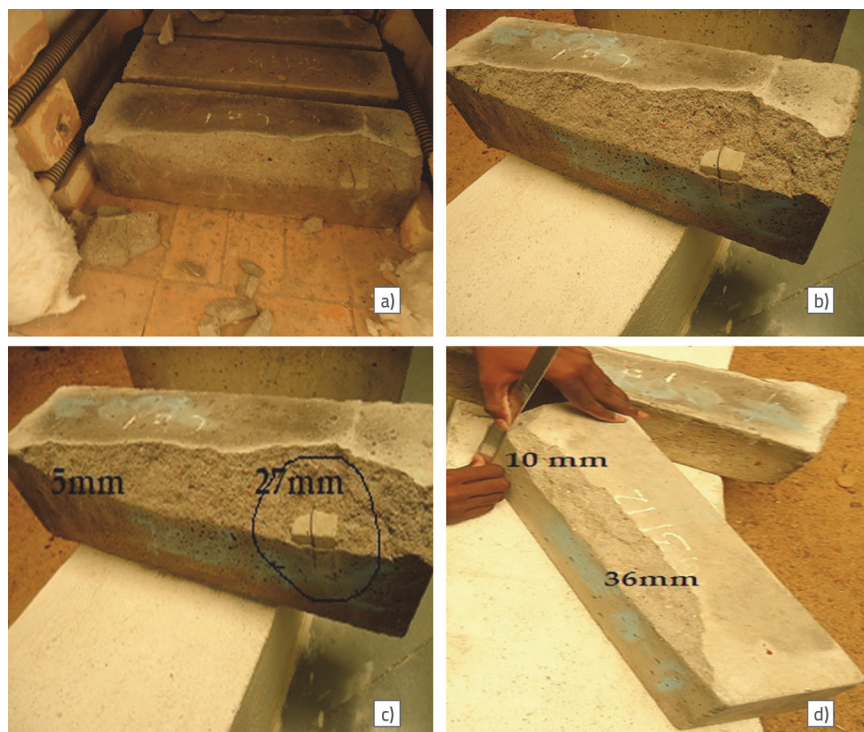
### 3.3. Promjena boje uzoraka morta

Pri termičkoj obradi uzoraka na raznim temperaturama, promjena boje nije zabilježena u temperaturnom rasponu do 500 °C. Iznad te temperature, siva boja blijedi i postaje bjelkasto siva na temperaturi od 900 °C, kao što je i zabilježeno u prethodnoj studiji [33], a i vidi se na slici 1.

### 3.4. Ljuskanje zaštitnog sloja od morta

Ljuskanje je fizikalni proces razgradnje zaštitnog sloja. Do ljuškanja dolazi pri visokim temperaturama ili kao posljedica promjene tlaka. Ljuskanje se javlja zbog tlaka koji nastaje uslijed brze promjene temperature tijekom hlađenja vodom za vrijeme gašenja požara. Ako je beton ojačan rebrastom armaturom, tada može postati osjetljiviji na ljuškanje, jer se nanosena toplina ne apsorbira jednakom brzinom u armaturu i okolni beton [34-36]. U ovom istraživanju, pojava ljuškanja nije zabilježena ni na jednom uzorku u temperaturnom intervalu do 500 °C.

Iznad te temperature, kod nekih je uzoraka iz iste skupine, ispitivanih pod istim uvjetima, dolazilo do ljuškanja dok kod drugih uzoraka iz iste skupine ljuškanje nije zabilježeno. Istovjetan nalaz objavljen je i u studiji [37]. Iznad temperature od 500 °C, termičko naprezanje uzrokovalo je ljuškanje na oblozi od morta (slika 5.a), a na većini uzoraka ta je pojava zabilježena duž obložnih blokova, kao što je to prikazano na slikama 5.a i 5.b. Zvuk kontinuiranog ljuškanja površine sličan je zvuku koji se javlja pri pečenju kokica, ali je nešto izrazitiji. Minimalno i maksimalno ljuškanje od 5 tj. 27 mm zabilježeno je na G15M (slika 5.c), dok je to iznosilo 10 i 36 mm kod RSM, a sličnu su pojavu zabilježili i drugi autori [38] (slika 5.d). Na MSM-u su pri 700 °C zabilježene samo pukotine. Kod svih je mortova izrazito ljuškanje zabilježeno pri temperaturi od 900 °C (fotografija nije prikazana). Kako je zabilježeno ljuškanje nasumičnog karaktera, bit će potrebno provesti dodatne analize.



Slika 5. a) Nasumično ljuškanje; b) ljuškanje duž zaštitnoga sloja; c) ljuškanje G15M; d) ljuškanje RSM

#### 4. Zaključak

U okviru ovog rada provedeni su odgovarajući eksperimenti kako bi se istražio utjecaj visokih temperatura na mehanička svojstva rebraste armature ugrađene u mortove izvedene sa zamjenskim materijalima umjesto riječnog pijeska, pri čemu su u obzir uzete različite debljine zaštitnoga sloja i režimi hlađenja. Izvedeni su sljedeći zaključci:

- Promjene granice popuštanja, granične čvrstoće i postotka produženja za armaturne šipke TMT (Fe 500, promjera 12 mm) ugrađene u mort i za ogoljelu armaturu su slične, pri čemu su postignute bliske vrijednosti za hlađenje na zraku i brzo hlađenje vodom za temperature do 500 °C.

- Utvrđeno je da je 500 °C za armaturne šipke granična temperatura iznad koje se bilježe znatna oštećenja u smislu granične čvrstoće, granice popuštanja i postotka produženja.
- Pri temperaturama od 700 °C i 900 °C, granična čvrstoća i granica popuštanja smanjuju se za armaturu ugrađenu u sve mortove, a postotak se produženja povećava nakon hlađenja na zraku. Pri maksimalnoj temperaturi od 900 °C, rebrasta armatura bez zaštitnoga sloja gubi u prosjeku 35 % svoje čvrstoće u usporedbi s 26-postotnim gubitkom zabilježenim kod armature sa zaštitnim slojem od 300 mm, tj. gubitkom od 13,8 % za zaštitni sloj od 50 mm. Postotak produženja pri slomu iznosi 64 % (maksimalna vrijednost) za nezaštićenu rebrastu armaturu.
- Granična čvrstoća i granica popuštanja armature ugrađene u sve mortove povećava se, a postotak produljivanja se smanjuje pri temperaturama od 700 °C i 900 °C nakon brzog hlađenja vodom (gašenja vodom).

Kod zaštićenih čeličnih armaturnih šipki maksimalni porast čvrstoće iznosi otprilike 26 % pri temperaturi od 900 °C, a postotak produljenja smanjuje se za 38 %.

- Utvrđeno je da zaštitni sloj od 30 i 50 mm štiti armaturu samo do temperature od 500 °C; te su debljine spomenutih zaštitnih slojeva nedovoljne kada je konstrukcija izložena višim temperaturama u trajanju od tri sata.
- Ljuškanje nije zabilježeno niti na jednom uzorku do temperature od 500 °C; iznad te temperature, termička naprezanja dovode do nasumičnog ljuškavanja zaštitnoga sloja.
- Iznad temperature od 500 °C, siva boja uzoraka morta blijedi te pri temperaturi od 900 °C poprima bjelkasto sivu nijansu.
- Što se tiče utjecaja debljine zaštitnoga sloja na mehanička svojstva, tu se svi motovi ponašaju vrlo slično.

#### LITERATURA

- [1] Vijayalakshmi, M., Sekar, A.S.S., Ganesh, G.: Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste, *Construction and Building Materials*, 46 (2013), pp. 1-7.
- [2] Gupta, L.K., Vyas, A.K.: Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder, *Construction and Building Materials*, 191 (2018), pp. 155-164.
- [3] Yang, H., Liang, D., Deng, Z., Qin, Y.: Effect of limestone powder in manufactured sand on the hydration products and microstructure of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 188 (2018), pp. 1045-1049.
- [4] Li, B.X., Ke, G.J., Zhou, M.K.: Influence of manufactured sand characteristics on strength and abrasion resistance of pavement cement concrete, *Construction and Building Materials*, 25 (2011) 10, pp. 3849-3853.
- [5] Shen, W.G., Yang, Z.G., Cao, L.H., Cao, L., Liu, Y., Yang, H., Lu, Z., Bai, J.: Characterization of manufactured sand: particle shape, surface texture and behaviour in concrete, *Construction and Building Materials*, 114 (2016), pp. 595-601.
- [6] Westerholm, M., Lagerbladn B., Forssberg, E.: Rheological properties of micro mortars containing fines from manufactured aggregates, *Materials and Structures*, 40 (2007), pp. 615-625.

- [7] Ji, T. Chen, C.Y., Zhuang, Y.Z., Chen, J.F., A mix proportion design method of manufactured sand concrete based on minimum paste theory, *Construction and Building Materials*, 44 (2013) 3, pp. 422-426.
- [8] Shen, W.G., Liu, Y., Cao, L., Huo, X., Yang, Z., Zhou, C., He, P., Lu, Z.: Mixing design and microstructure of ultra high strength concrete with manufactured sand, *Construction and Building Materials*, 143 (2017), pp. 312-321.
- [9] Gewain, R.G., Iwankiw, N.R., Alfawakhiri, F.: Facts for steel buildings, *Fire*, American Institute of Steel Construction, 5 (2003), pp. 51-59.
- [10] Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M.: *Concrete-microstructure, properties and materials*, Indian Concrete Institute, pp. 548-554, 1997.
- [11] Lin, W.M., Lin, T.D., Powers, C.L.J.: Microstructures of fire damaged concrete. *ACI Material Journal*, 93 (1996) 3, pp. 199-205.
- [12] El-Hawary, M.M., Ragab, A.M., El-Azim, A.A., Elibiari, S.: Effect of fire on shear behaviour of RC beams, *Computers & Structures*, 65 (1997) 2, pp. 281-287.
- [13] Chung, J.H., Consolazio, G.R.: Numerical modeling of transport phenomena in reinforced concrete exposed to elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, 35 (2005), pp. 597-608.
- [14] Topcu, I.B., Isikdag, B.: The effect of cover thickness on rebars exposed to elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, 22 (2008), pp. 2053-2058.
- [15] Hussin, M.W., Bhutta, A.R., Azreen, M., Ramadhansyah, P.J., Mirz, J.: Performance of blended ash geopolymer concrete at elevated temperatures, *Materials and Structures*, 48 (2015) 3, pp. 709-720.
- [16] Mugume, R.B., Horiguchi, T.: Prediction of spalling in fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures, *Materials and Structures*, 47 (2014) 4, pp. 591-604.
- [17] Alessandra, M., Jay, G., Sanjayan, F.: Effects of slag and cooling method on the progressive deterioration of concrete after exposure to elevated temperatures as in a fire event, *Materials and Structures*, 44 (2011), pp. 709-718.
- [18] Balasubramanian, J., Gopal, E., Periakaruppan, P.: Strength and microstructure of mortar with sand substitutes, *GRADEVINAR*, 68 (2016) 1, pp. 29-37.
- [19] High strength deformed steel bars and wires for concrete reinforcement-Specification. IS 1786:2008, New Delhi, India.
- [20] Balasubramanian, J., Gopal, E., Periakaruppan, P.: Strength and microstructure of fired mortars with river sand alternatives after air cooling, *Materials and Structures*, 50 (2017) 1, pp. 76-90.
- [21] Indian Standard, *Metallic materials - tensile testing at ambient temperature (Third Revision) IS 1608 2005*, New Delhi, India.
- [22] Balasubramanian, J., Gopal, E., Periakaruppan, P.: Effects of elevated temperature and water quenching on strength and microstructure of mortars with river sand substitutes, *Construction and Building Materials*, 114 (2016), pp. 688-698.
- [23] Topcu, I.B., Isikdag, B.: The effect of cover thickness on rebars exposed to elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, 22 (2008), pp. 2053-2058.
- [24] Unluoglu, E., Topcu, I.B., Yalaman, B.: Concrete cover effect on reinforced concrete bars exposed to high temperatures, *Construction and Building Materials*, 21 (2007), pp. 1155-1160.
- [25] Topcu, I.B., Karakurt, C.: Properties of reinforced concrete steel rebars exposed to high temperatures *Research Letters in Materials Science*, 10 (2008), pp. 1-4.
- [26] Raj, H., Saraf, A., Sangal, S., Misra, S.: Residual properties of TMT steel bars after exposure to elevated temperatures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 9 (2015), pp. 1-9.
- [27] Hertz, K.D.: Reinforcement data for fire safety design, *Magazne of Concrete Research*, 56 (2004) 8, pp. 455-462.
- [28] Sarshar, R., Khoury, G.A.: Material and environmental factors influencing the compressive strength of unsealed cement paste and concrete at high temperatures. *Magazne of Concrete Research*, 45(1993), pp. 51-61.
- [29] Aydın, S., Baradan, B.: Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based mortars. *Cement and Concrete Research*, 37 (2007), pp. 988-995.
- [30] Aydın, S., Yazıcı, H., Baradan, B.: High temperature resistance of normal strength and auto claved high strength mortars incorporated polypropylene and steel fibers, *Construction and Building Materials*, 22 (2008), pp. 504-512.
- [31] Ibrahim, R.K., Hamid, R., Taha, M.R.: Strength and microstructure of mortar containing nano silica at high temperature, *ACI Material Journal*, 111 (2014) 2, pp. 163-170.
- [32] Chen, B., Li, C., Chen, L.: Experimental study of mechanical properties of normal-strength concrete exposed to high temperatures at an early age, *Fire Safety Journal*, 44 (2009) 7, pp. 997-1002.
- [33] Izabela, H.: Colour change in heated concrete, *Fire Technology*, 50 (2014), pp. 945-958.
- [34] Dugenci, O., Haktanir, T., Altun, F.: Experimental research for the effect of high temperature on the mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 75 (2015), pp. 82-88.
- [35] Dwaikat, M.B., Kodur, V.K.R.: Hydrothermal model for predicting fire-induced spalling in concrete structural systems. *Fire Safety Journal*, 44 (1982) 3, pp. 425-434.
- [36] Pinghua, Z., Samuel, B., Shanyu, Z., Michele, G., Andreas, L., Nikolajs, T., Andreas, M., Matthias, M., Koebelb, Pietro, L.: Study of physical properties and microstructure of aerogel-cement mortars for improving the fire safety of high-performance concrete linings in tunnels, *Cement and Concrete Composites*, 104 (2019), pp. 103-114.
- [37] Bilodeau, A., Malhotra, V.M., Hoff, G.C.: Hydrocarbon fire resistance of high strength normal weight and light weight concrete incorporating polypropylene fibres, *Proceedings of the International Symposium on High Performance and Reactive Powder Concrete*, Sherbrook, Canada, 1998.
- [38] Anderberg, Y.: Spalling phenomena of HPC and OC, proceedings from the international workshop on fire performance of high strength concrete, NIST, Gaithersburg, USA, 1997.