

Jedinstvena funkcija za opisivanje naprezanja i deformacije betona u požaru

Milan Blagojević, Dušica Pešić, Marina Mijalković, Srđan Glišović

Ključne riječi

požar,
beton,
naprezanje,
deformacija,
temperatura,
EC2 krivulje,
analitička funkcija

Key words

fire,
concrete,
stress,
strain,
temperature,
EC2 curves,
analytic function

Mots clés

feu,
béton,
contrainte,
déformation,
température,
courbes EC2,
fonction analytique

Ключевые слова

пожар,
бетон,
напряжение,
деформация,
температура,
кривые EC2,
аналитическая функция

Schlüsselworte

Brand,
Beton,
Spannung,
Verformung,
Temperatur,
EC2 Kurven,
analytische Funktion

M. Blagojević, D. Pešić, M. Mijalković, S. Glišović

Prethodno priopćenje

Jedinstvena funkcija za opisivanje naprezanja i deformacije betona u požaru

U radu je predložena jedinstvena analitička funkcija za aproksimaciju EC2 krivulja koje opisuju ovisnost naprezanja i deformacije betona na temperaturama u požaru. Na osnovu predložene funkcije dobivena je familija krivulja koje se razlikuju samo po vrijednosti jednog parametra - maksimalne temperature pri požaru. Prikazani su numerički eksperimenti kojima je dokazano da se jednom funkcijom može opisati ponašanje betona u požaru i predloženi su smjerovi daljnjih istraživanja.

M. Blagojević, D. Pešić, M. Mijalković, S. Glišović

Preliminary note

Unique function for describing stress and strain behaviour of fire-affected concrete

A unique analytic function for the approximation of EC2 curves describing dependence of stress and strain of concrete at fire-generated temperatures is presented in the paper. The proposed function enables generation of a family of curves differing only in the value of a single parameter - maximum temperature during fire. Numerical experiments demonstrating that fire behaviour of concrete can be described with a single function are presented, and directions for further study are proposed.

M. Blagojević, D. Pešić, M. Mijalković, S. Glišović

Note préliminaire

Fonction unique pour décrire les contraintes et les déformations du béton sous l'influence de feu

Une fonction analytique unique pour l'approximation des courbes EC2 qui décrivent la dépendance entre la contrainte et la déformation de béton aux températures générées par feu, est présentée dans l'ouvrage. La fonction proposée permet la génération d'une famille de courbes se distinguant entre eux par la valeur d'un seul paramètre - température maximale sous l'influence de feu. Les analyses numériques démontrant que le comportement du béton au cours de feu peut être décrit avec une seule fonction sont présentées, et les directions pour les études à faire dans l'avenir sont proposées.

М. Благојевић, Д. Пешић, М. Мијалковић, С. Глишовић

Предварително саопштење

Единая функция для описания напряжения и деформации бетона при пожаре

В работе предложена единая аналитическая функция для аппроксимации кривых EC2, описывающих зависимость напряжения и деформации бетона при температурах пожара. На основании предложенной функции получено семейство кривых, отличающихся значениями только одного параметра – максимальной температуры пожара. Приведены цифровые эксперименты, доказывающие возможность описания одной функцией поведения бетона при пожаре, предложены направления дальнейших исследований.

M. Blagojević, D. Pešić, M. Mijalković, S. Glišović

Vorherige Mitteilung

Einheitliche Funktion für die Beschreibung von Spannung und Verformung des Betons bei Brand

Im Artikel ist eine einheitliche analytische Funktion für die Approximation der EC2 Kurven vorgeschlagen, welche die Abhängigkeit der Spannung und Verformung des Betons von den Temperaturen bei Brand beschreiben. Auf Grund der vorgeschlagenen Funktion erhielt man eine Familie von Kurven die sich nur vom Wert eines Parameters unterscheiden - der maximalen Temperatur bei Brand. Dargestellt sind numerische Experimente mit denen man beweist dass man mit einer Funktion das Verhalten des Betons bei Brand beschreiben kann. Vorgeschlagen sind Richtungen weiterer Forschungen.

Autori: Prof. dr. sc. **Milan Blagojević**; doc. dr. sc. **Dušica Pešić**; doc. dr. sc. **Srđan Glišović**, Univerzitet u Nišu, Fakultet zaštite na radu, Niš; prof. dr. sc. **Marina Mijalković** Gradjevinsko-arhitektonski fakultet, Niš

1 Uvod

Razvoj požara u zatvorenom prostoru i oblik temperaturne krivulje koja opisuje taj razvoj zavise od niza faktora kao što su: ventilacija, požarno opterećenje, geometrija prostorije i termičke osobine materijala koji su ugrađeni u prostoriju.

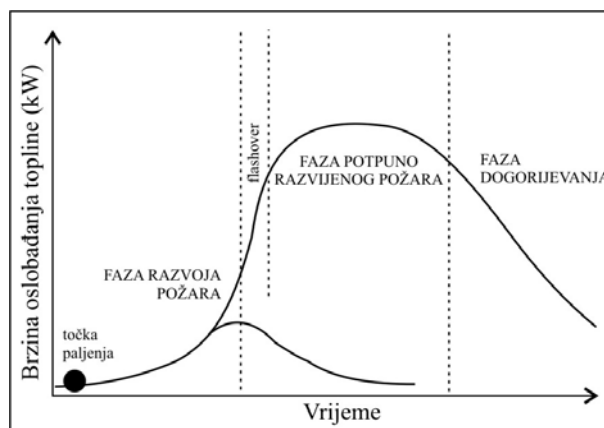
Postojeći scenariji razvoja požara kao rezultat daju veoma različite termičke reakcije strukturnih elemenata u smislu sile, naprezanja i deformacije pojedinih elemenata, kao i kompletne strukture.

Požari koji se razvijaju na podu i kratko traju poslije trenutka *flashovera*¹ (kratka faza potpunog razvoja) odlikuju se niskim temperaturama u betonu, ali vrlo visokom temperaturom u čeličnim elementima. Plohe koje su izložene požaru imaju znatno veću temperaturu od onih koje su u dubini ili na vanjskoj strani prostorije. Zbog toga se po dubini kompozitnih konstrukcija stvaraju veliki temperaturni gradijenti kao posljedica različite brzine njihovog širenja po pojedinim dijelovima konstrukcije, što izaziva termičko savijanje koje je glavni uzrok deformacija u betonskim pločama i stupovima. Požari s dužim trajanjem omogućavaju da beton dostigne visoke temperature, tako da je problem termičke ekspanzije najizraženiji kod kompozitnih konstrukcija.

Na drugoj strani, generalizacija i definiranje jedinstvene požarne krivulje (krivulje temperaturnog režima požara) vrlo je složen zadatak zbog velikog broja parametara od kojih ovisi razvoj požara. Pri konstruiranju temperaturne krivulje potrebno je uzeti u obzir velik broj faktora kao što su zapaljivost i karakteristike izgaranja materijala, faktori koji utječu na brzinu razvoja topline i širenje plamena itd. Također, oblik temperaturne krivulje direktno će ovisiti o postojanju vrata, prozora, otvora, ventilacijskih kanala i slično.

Idealizirana temperaturna krivulja razvoja požara u prostoriji ima tri različite faze: fazu razvoja požara - od paljenja do *flashovera*, fazu potpuno razvijenog požara i fazu dogorijevanja. Treba napomenuti da je prijelaz iz faze razvoja u fazu potpuno razvijenog požara moguć i bez postojanja *flashovera*, ako brzina oslobađanja topline nije dovoljno velika zbog nedostatka goriva, ventilacije i drugih uvjeta za širenje požara. U tom su slučaju intenzitet i trajanje faze potpuno razvijenog požara znatno manji (donja krivulja na slici 1.) [7].

¹ Pojam *flashover* ne prevodi se, a definira se kao moment prelaska iz rane faze razvoja požara u fazu potpuno razvijenog požara. To je trenutak kada dolazi do paljenja cjelokupnog materijala koji je bio pod utjecajem toplotnog zračenja i često je praćen bljeskom.



Slika 1. Faze razvoja požara u prostoriji s dobrom ventilacijom (idealizirana požarna krivulja)

Naravno, nemoguće je definirati temperaturnu krivulju koja generalno prikazuje razvoj požara kao procesa nekontroliranog sagorijevanja zbog toga što vrlo veliki broj faktora utječe na taj proces.

2 Požarne krivulje u inženjerskim primjenama

Postupci na osnovi kojih je standardizirano ispitivanje otpornosti konstrukcija na djelovanje požara stari su više od 80 godina iako je većina ispitivanja obavljena neformalno i bez odgovarajućega metodološkog pristupa. Najranija su ispitivanja izvršena u Engleskoj, Njemačkoj i SAD-u, pri čemu je razvoj temperature u peći iskorišten za definiranje temperaturnog režima standardnog požara. Temperaturna krivulja koja je dana relacijom (1), definirana je britanskim standardom iz 1932. godine. Razvoj temperature u peći programiran je požarnim opterećenjem, tj. količinom goriva. Tradicionalno, postupci ispitivanja otpornosti na požar u Velikoj Britaniji zasnivaju se na izlaganju elemenata konstrukcije temperaturi u skladu s požarnom krivuljom koja je definirana relacijom:

$$T = T_0 + 345 \log(0.133t + 1) \quad (1)$$

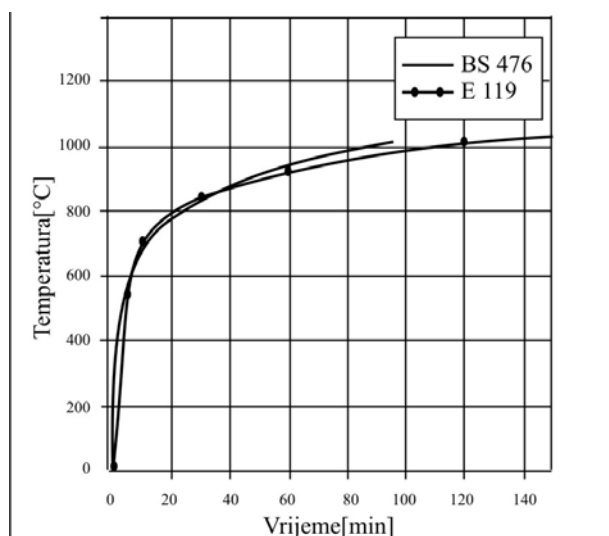
gdje su:

t - vrijeme (min)

T_0 - temperatura sredine [°C] (obično 20 °C)

T - temperatura u prostoriji [°C]

Prva ASTM norma za ispitivanje otpornosti na požar, C19 (danas E119) donesena je 1918. godine. Iako je normirana požarna krivulja definirana serijom točaka, a ne kontinuiranom krivuljom, aproksimacijska krivulja koja se dobiva na njihovoj osnovi ne odstupa mnogo od krivulje koja je definirana britanskim standardom BS 476 (slika 2.).



Slika 2. Standardne temperaturne krivulje BS i ASTM

Također, u većini inženjerskih primjena upotrebljava se krivulja temperaturnog režima standardnog požara koja je zadana normom ISO 834:

$$T = \begin{cases} T_0 + 504t^{0.141} & t < 10 \text{ min} \\ T = T_0 + 345 \log(8t + 1) & t \geq 10 \text{ min} \end{cases} \quad (2)$$

gdje su:

t - vrijeme (min)

T_0 - temperatura sredine [°C]

T - temperatura u prostoriji [°C]

U tablici 1. prikazane su vrijednosti temperatura za trajanje požara do 2 sata, u skladu s relacijom (2).

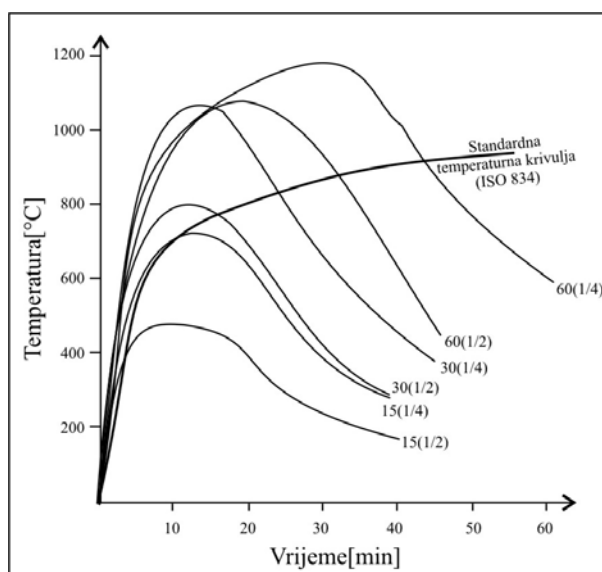
Tablica 1. Vrijednosti temperature u skladu s normom ISO834

h-min	t [°C]
0-05	556,41
0-10	658,43
0-15	718,56
0-20	761,25
0-25	794,60
0-30	821,80
0-35	844,80
0-40	864,74
0-45	882,34
0-50	898,00
0-55	912,33
1-00	925,34
1-10	948,39
1-20	968,37
1-30	986,00
1-40	1001,75
1-50	1016,00
2-00	1029,00

Međutim, međusobni odnos i odstupanja “realnih požara” od normirane temperaturne krivulje bili su predmet razmatranja, i još su uvijek, gotovo jedno stoljeće.

Dvadesetih godina prošlog stoljeća, Simon Ingberg predložio je rješenje ovog problema tako da je intenzitet požara povezan s požarnim opterećenjem i da se može izraziti plohom na kojoj se nalazi goriva materija.

Prema Ingbergu, dva požara na jednakim plohama imaju isti razvoj (prednji rub temperaturne krivulje je identičan) koji je u skladu s normiranom temperaturnom krivuljom. Time je stvorena mogućnost uspoređivanja razvoja temperature u realnom požaru s normiranom temperaturnom krivuljom (slika 3.) [6].



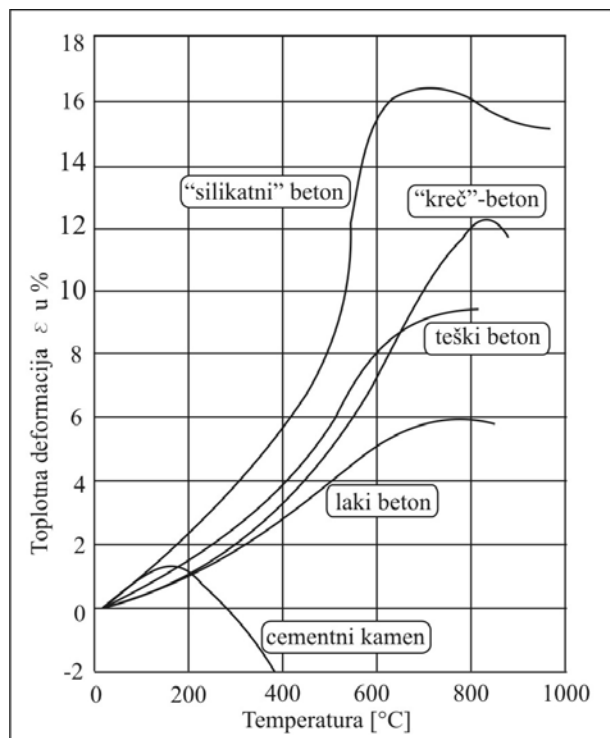
Slika 3. Temperaturne krivulje realnih požara i normirana temperaturna krivulja ISO 834

Na slici 3. prikazana je normirana temperaturna krivulja prema normi ISO 834 i krivulje realnih požara u zavisnosti od požarnog opterećenja i veličine ventilacijskih otvora. Požarno je opterećenje izraženo u kg/m^2 , dok je površina otvora za ventilaciju dana u odnosu na površinu zida. Na primjer, vrijednost 15(1/2) odgovara požarnom opterećenju od 15 kg/m^2 i otvoru za ventilaciju koji zauzima polovinu površine zida prostorije.

3 Termičke karakteristike betona na visokim temperaturama u požaru

Širenje betona koji je izložen visokoj temperaturi, kao i sve ostale osobine, zavisu od niza faktora koji proizlaze iz naprezanja, karakteristika agregata, postotka cementne paste i brzine porasta temperature tokom požara. Cementna se pasta širi pri porastu temperature do 150 °C, a zatim skuplja između 150 °C i 400 °C, što se pripisuje kemijskim promjenama i isparavanju vode iz smjese. Na drugoj se strani agregat u betonu nastavlja širiti. Na slici 4.

prikazano je termičko širenje betona u požaru za različite tipove agregata. Očito je da tip agregata izravno određuje brzinu termičke ekspanzije betona i da se radi o promjeni koja eksponencijalno raste do određene točke, poslije koje ima konstantnu vrijednost ili opada. To se događa na veoma visokim temperaturama, 600-800 °C, ovisno o tipu agregata.



Slika 4. Termičko širenje betona od različitih agregata [8]

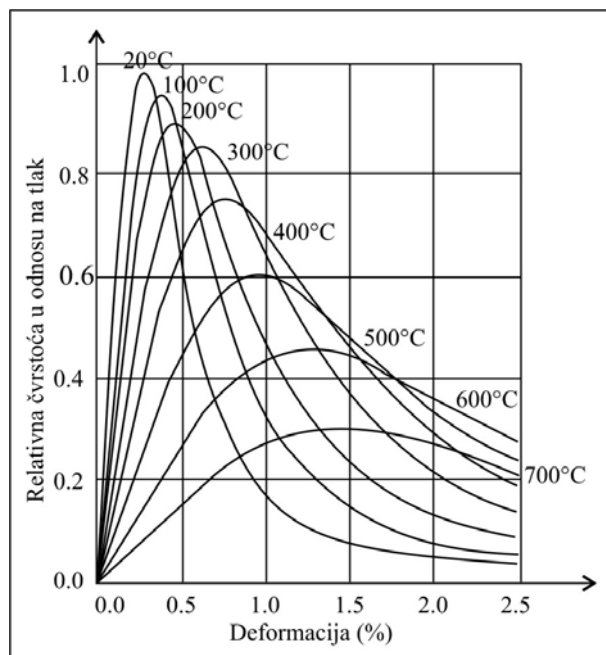
Naponsko-deformacijsko ponašanje betona drastično se razlikuje. Kada je u pitanju naprezanje betona, često se podrazumijeva da on ima nultu čvrstoću. Na čvrstoću betona utječe tip i veličina agregata, postotak cementne paste te odnos vode i cementa na temperaturi sredine i na povišenoj temperaturi.

Odstupanja koja postoje u eksperimentalnim rezultatima posljedica su velikog broja čimbenika, prije svega zbog razlika u primijenjenim metodama, kao i čimbenika koji su vezani za brzinu i trajanje test-požara, veličinu uzoraka i raspodjelu požarnog opterećenja. Funkcionalna zavisnost naprezanja i deformacije opisana je relacijama koje su definirane u Eurokodu 2 [2, 5].

Na slici 5. prikazana je familija krivulja kojima se u spomenutoj normi (EC2) definira odnos naprezanja i deformacije betona na temperaturama koje vladaju u požaru.

Sa slike 5. vidi se da se oblik krivulje kojom se definira odnos napona i deformacije betona na visokim temperaturama može promatrati kao impulsna pojava. To znači da je ovaj odnos moguće aproksimirati Heavisideovom funkcijom, linearnom kombinacijom eksponencijalnih

funkcija ili nekom pogodnom funkcijom koja na zadovoljavajući način može opisati impulsnu pojavu [1, 3].



Slika 5. Krivulje međuzavisnosti naprezanja i deformacije betona u požaru (EC2 1993)

4 Nova funkcija za opisivanje veze naprezanja i deformacije betona u požaru

Osnovna ideja od koje se pošlo u istraživanju, sadržana je u pokušaju da se pronađe familija krivulja koja na zadovoljavajući način opisuje zavisnost naprezanja i deformacije betona na temperaturama tokom požara. Takvim bi se pristupom, aproksimacijske krivulje trebale razlikovati samo po vrijednosti jednog parametra koji ovisi o maksimalnoj vrijednosti temperature koja je dostignuta u požaru.

Za aproksimaciju odnosa naprezanja i deformacije predlaže se funkcija koja s jedne strane ima veliku točnost, a s druge je strane jednostavna za numeričku provjeru:

$$y = a \left[\frac{x}{b} e^{1-\frac{x}{b}} \right]^c \quad (3)$$

gdje su:

x - deformacija - S [%]

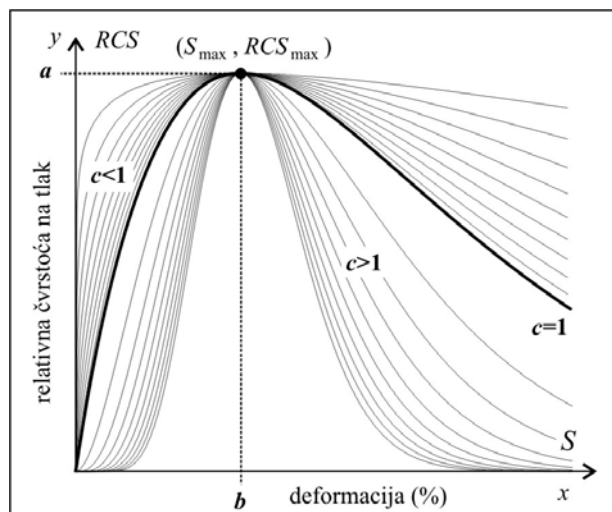
y - relativna čvrstoća na tlak - RCS

b - postotak maksimalnog naprezanja - S_{max}

a - maksimum relativne čvrstoće na tlak - RCS_{max} (za S_{max})

c - parametar koji ovisi o maksimalno dostignutoj temperaturi u požaru.

Na slici 6. prikazane su krivulje koje su dobivene na osnovi relacije (3) za vrijednosti eksponenta funkcije $c > 1$ i $c < 1$. Eksponent c funkcije koja je zadana relacijom (3) očito definira nagib odnosno brzinu prirasta funkcije.



Slika 6. Predložena funkcija za aproksimaciju odnosa naprezanja i deformacije betona u požaru

Da bismo dokazali valjanost izbora odabrane funkcije, kao i tvrdnju da je za osnovnu aproksimaciju potrebno prilagoditi samo parametar c koji je eksponent predložene funkcije, potrebno je poznavati relativne vrijednosti maksimalnog naprezanja RCS_{max} i maksimalne deformacije S_{max} .

Ako su te vrijednosti poznate, tada je potrebno samo izračunati vrijednost eksponenta c predložene funkcije. Očito je sa slike 6. da oblik krivulja koje su dobivene na osnovi funkcije (3) veoma slični krivuljama sa slike 5. te da svakoj vrijednosti maksimalne temperature koja je dostignuta u požaru treba odgovarati određena vrijednost c te se, prema tome, predložena funkcija može iskoristiti za opisivanje naprezanja i deformacija.

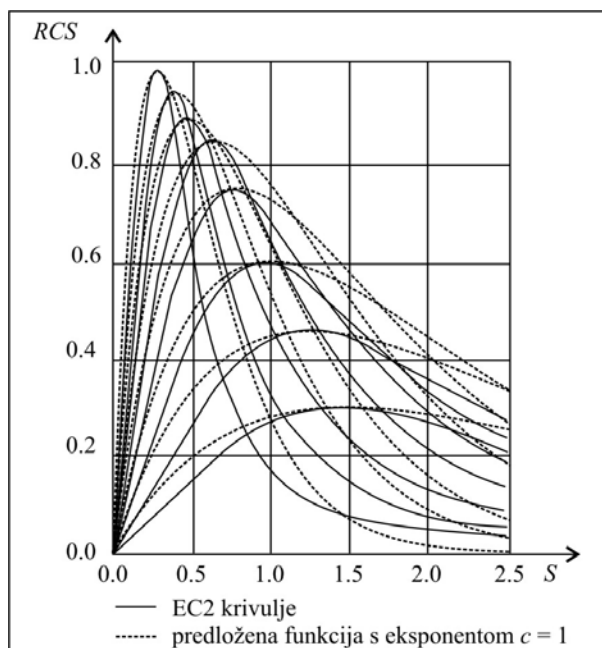
5 Upotreba nove funkcije

Funkcija koja je dana relacijom (3) može se iskoristiti na jedan od sljedeća dva načina:

1. Za početak, ako se pretpostavi da je eksponent funkcije $c = 1$, prilagođavanjem vrijednosti a i b predložene funkcije na točku maksimuma (S_{max}, RCS_{max}) za svaku od krivulja sa slike 5., dobiva se familija krivulja koje se zasnivaju na relaciji (3), a čiji je oblik prikazan na slici 7.

Sa slike 7. vidi se da prednji rub svake aproksimacijske krivulje, tj. nagib funkcije i njezin prijevoj, ne odgovaraju u potpunosti krivuljama prema EC2, ta-

ko da je potrebno proračunati eksponent c funkcije koji definira brzinu porasta i opadanja funkcije.



Slika 7. Krivulje prema EC2 i predložena funkcija

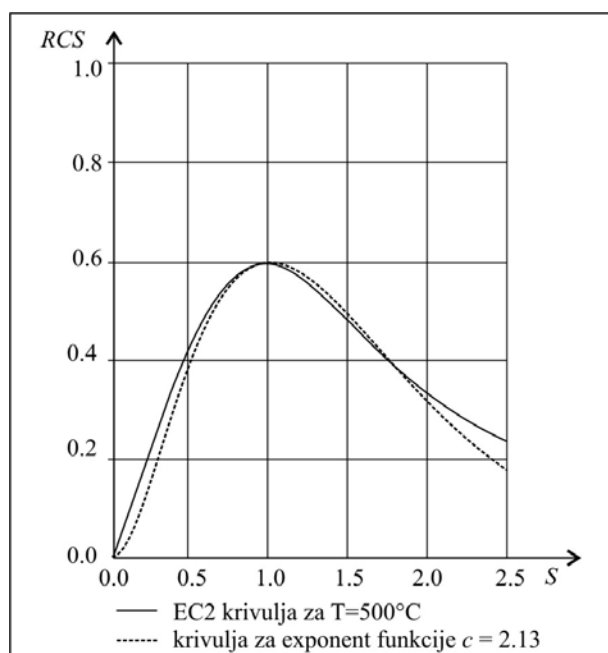
2. Ako je poznat par koordinata (S_{max}, RCS_{max}) , parametar c može se izračunati prilagođavanjem funkcije na točnu vrijednost u bilo kojoj točki s koordinatama (S, RCS) za izabranu EC2 krivulju.

Najbolje će se podudaranje predložene funkcije s bilo kojom EC2 krivuljom postignuti prilagođavanjem funkcije na vrijednost u prijevojnoj točki EC2 krivulje. Prilagođavanjem funkcije (3) u bilo kojoj točki (S, RCS) dobiva se:

$$c = \frac{\ln \frac{y}{a}}{\ln \frac{x}{b} + 1 - \frac{x}{b}} = \frac{\ln \frac{RCS}{RCS_{max}}}{\ln \frac{S}{S_{max}} + 1 - \frac{S}{S_{max}}} \quad (4)$$

Za numerički eksperiment koji bi ilustrirao opisani pristup izabrane su neke EC2 krivulje sa slike 5. Cilj numeričkog eksperimenta bio je da se usporede izabrane EC2 krivulje s krivuljom koja je dobivena numeričkim eksperimentom.

U skladu s opisanim postupkom izračunana je vrijednost eksponenta funkcije c za EC2 krivulje koja je definirana za $T = 500 \text{ °C}$ tako što je u prijevojnoj točki ove krivulje s koordinatama $(1,75, 0,4)$ izvršeno prilagođavanje funkcije (3). Vrijednost eksponenta c koja je dobivena pomoću relacije (4) iznosi $c = 2,13$ (slika 8.).



Slika 8. EC2 krivulja za $T = 500^{\circ}\text{C}$ i odgovarajuća aproksimacijska krivulja

Tablica 2. Vrijednosti koeficijenata a , b i c funkcije

$T [^{\circ}\text{C}]$	a	b	c
20,00	0,98	0,28	1,47
100,00	0,94	0,38	1,53
200,00	0,88	0,46	1,58
300,00	0,84	0,63	1,68
400,00	0,74	0,76	1,77
500,00	0,60	1,00	2,13
600,00	0,46	1,35	3,10

LITERATURA

- [1] Abramowitz, M., Stengun, I.: *Handbook of mathematical functions*, Dover publications, New York, 1964.
- [2] Beeby A.W., Narayanan R. S.: *Designers' handbook to Eurocode 2: Design of concrete structures*, Thomas Telford, 1995.
- [3] Blagojević, M., Petković, D.: *Detecting fire in early stage - a new approach*, Facta Universitatis, Series: Working and Living Environmental Protection, Vol. 2, No 1, 2001.
- [4] Buchanan A.H.: *Structural design for fire safety*, Wiley, 2001.
- [5] Eurocode 2: *Design of concrete structures Part 1.2: General rules - Structural Fire Design*, 1995.
- [6] *Performance-based design of structural steel for fire conditions: a calculated methodology*, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 114, USA, 2009.
- [7] Purkiss J.: *Fire safety engineering design of structures, second edition*, Elsevier, 2007.
- [8] Schneider U.: *Concrete at high temperatures - a general review*, Fire Safety Journal, 1988.

Ponavljanjem ovog postupka dobivene su vrijednosti koeficijenata funkcije i za ostale EC2 krivulje sa slike 5. Rezultati su prikazani u tablici 2.

Prikazana procedura čiji je cilj bio dobivanje najbolje aproksimacijske krivulje za opisivanje odnosa naprezanja i deformacije betona u požaru može biti nastavljena u smjeru nalaženja zavisnosti između temperature koja se razvija u požaru i eksponenta c opisane funkcije. Međutim, ovo istraživanje treba nastaviti usporedno i u smjeru nalaženja korelacije između koeficijenata a , b i c i parametara koji prate termičko širenje betona, čime bi se postiglo da predložena funkcija dobije u potpunosti praktičnu - uporabnu vrijednost.

6 Zaključak

Zahvaljujući činjenici da krivulje koje u skladu s Eurokodom 2 opisuju odnos naprezanja i deformacije betona pri visokim temperaturama koje nastaju u požaru imaju oblik koji jako podsjeća na impulsnu pojavu, u radu je predložena metoda kojom sve EC2 krivulje mogu biti na zadovoljavajući način opisane jednom, jedinstvenom funkcijom.

Metoda koja je opisana u ovome radu može se matematički proširiti u smislu nalaženja zakonitosti po kojoj se mijenja eksponent c predložene funkcije. U tu je svrhu moguće iskoristiti metodu najmanjih kvadrata ili bilo koju sličnu metodu za nalaženje aproksimacijskog polinoma koji opisuje tu zakonitost.

Međutim, da bi predložena metoda izašla iz čisto teorijskih okvira, tokom daljih istraživanja potrebno je pronaći fizikalno značenje i način izračunavanja parametara a , b i c predložene funkcije, na osnovi fizikalnih veličina o kojima ovisi ponašanje betona na visokim temperaturama koje nastaju u požaru.