

Primljen / Received: 25.2.2021.

Ispravljen / Corrected: 12.5.2021.

Prihvaćen / Accepted: 18.5.2021.

Dostupno online / Available online: 10.6.2021.

# Pregled istraživanja djelovanja požara u AB elementima i procjena stanja AB konstrukcije nakon požara

## Autori:



**Lucija Stepinac**, mag.ing.aedif.

Sveučilište u Zagrebu  
Arhitektonski fakultet  
[lstepinac@arhitekt.hr](mailto:lstepinac@arhitekt.hr)

Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Josip Galić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu  
Arhitektonski fakultet  
[jgalic@arhitekt.hr](mailto:jgalic@arhitekt.hr)



**Hrvoje Vukić**, mag.ing.aedif.

Sveučilište u Zagrebu  
Arhitektonski fakultet  
[hvukic@arhitekt.hr](mailto:hvukic@arhitekt.hr)



Izv.prof.dr.sc. **Miljenko Haiman**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu  
Arhitektonski fakultet  
[mhaiman@arhitekt.hr](mailto:mhaiman@arhitekt.hr)

Pregledni rad

**Lucija Stepinac, Josip Galić, Hrvoje Vukić, Miljenko Haiman**

## Pregled istraživanja djelovanja požara u AB elementima i procjena stanja AB konstrukcije nakon požara

U radu su predstavljeni postupci procjene oštećenosti i preostale nosivosti AB konstrukcija nakon požara. Prikazana su oštećenja konstrukcijskih AB elemenata stupa, grede, ploče, zida te detalja spajanja. Iako se AB elementi općenito smatraju otpornima na požar, utjecaj temperature bitno utječe na njihove fizikalne i mehaničke karakteristike, a nosivost prije i nakon požara možemo odrediti primjenom više različitih metoda koje su prikazane u radu. Napravljen je osvrt na temu procjene stanja AB konstrukcija nakon požara te daljnja metodologija postupanja.

### Ključne riječi:

požar, armiranobetonske konstrukcije, metode ispitivanja, procjena stanja

Subject review

**Lucija Stepinac, Josip Galić, Hrvoje Vukić, Miljenko Haiman**

## Overview of research on fire effects in RC elements and assessment of RC structures after fire

Procedures for estimating damage and remaining bearing capacity of RC structures after fire are presented in the paper. The damage to structural RC elements of a column, beam, slab, wall, and connection details, is presented in the paper. Although RC elements are generally considered to be fire resistant, their physical and mechanical characteristics are greatly influenced by temperature, while the bearing capacity before and after fire can be determined through a number of different methods that are presented in the paper. An overview of condition assessment for RC structures after fire is proposed, and methodology for taking further action is presented.

### Key words:

fire, reinforced-concrete structures, test methods, condition assessment

Übersichtsarbeit

**Lucija Stepinac, Josip Galić, Hrvoje Vukić, Miljenko Haiman**

## Übersicht der Forschung im Hinblick auf die Wirkung des Brandes in den Stahlbetonelementen und Einschätzung der Lage der Stahlbetonkonstruktion nach dem Brand

In der Arbeit wurden die Verfahren im Hinblick auf die Einschätzung der Beschädigung und im Hinblick auf die restliche Tragfähigkeit von Stahlbetonkonstruktionen nach dem Brand dargestellt. Es wurde auch eine Beschreibung der Brandwirkung auf die Konstruktionen dargestellt. In der Arbeit wurden auch die Beschädigungen von Stahlbetonkonstruktionselementen der Säulen, der Balken, der Platten, der Wand, sowie der Verbindungsdetails dargestellt. Obwohl die Stahlbetonelemente allgemein für brandwiderstandsfähig gehalten werden, beeinflusst die Temperatur wesentlich ihre physikalischen und mechanischen Eigenschaften, und die Tragfähigkeit vor dem Brand und nach dem Brand kann durch die Anwendung von mehreren verschiedenen Methoden festgelegt werden, welche in der Arbeit dargestellt wurden. Es wurde auch ein Rückblick auf das Thema der Einschätzung des Standes von Stahlbetonkonstruktionen gemacht, und es wurden weitere Verfahrensmethoden vorgestellt.

### Schlüsselwörter:

Brand, Stahlbetonkonstruktionen, Prüfungsmethoden, Lageeinschätzung

## 1. Uvod

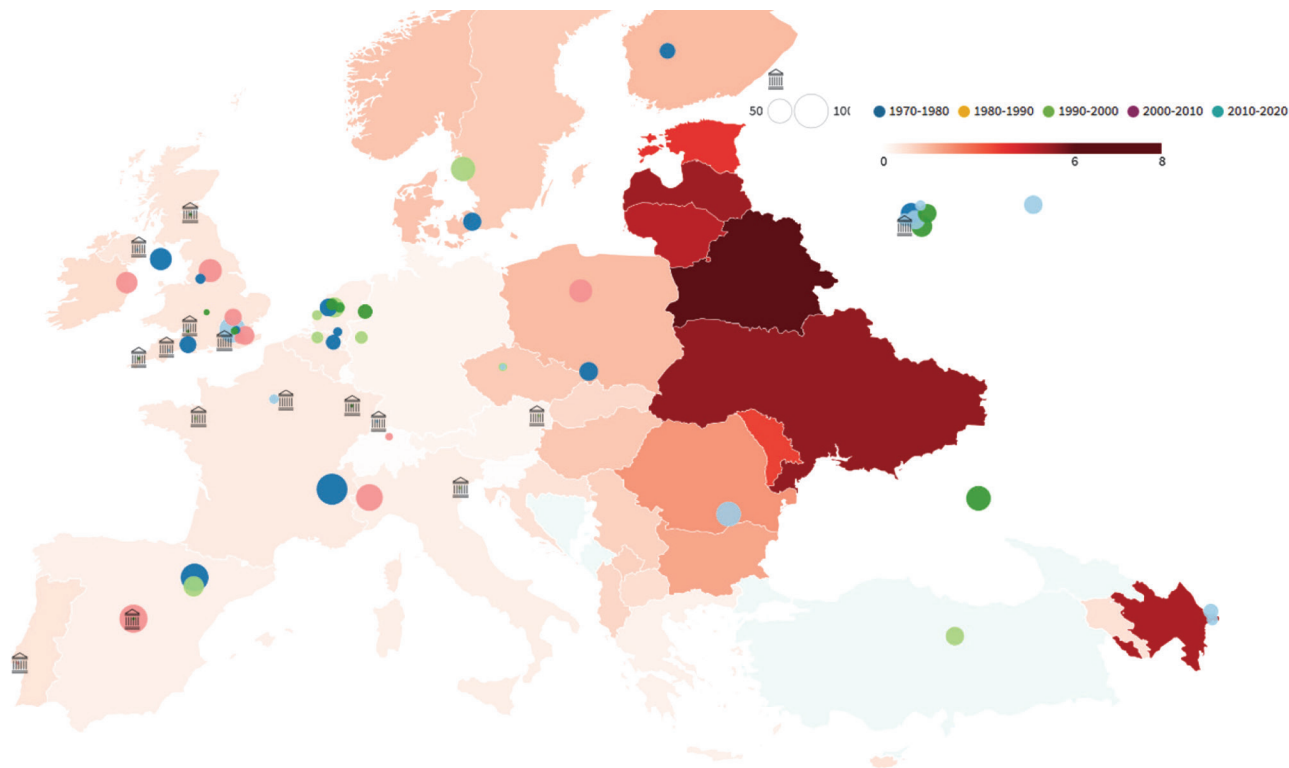
Požar se smatra jednim od glavnih uzroka oštećenosti građevina i gubitka ljudskih života. U 2015. godini samo u SAD-u požari u konstrukcijama su odnijeli 2685 života i napravili materijalnu štetu u iznosu od 10,3 milijuna dolara [1]. U Europi, dnevno se dogodi oko 5000 požara sa smrtnošću od 4000 osoba godišnje, a čak 70.000 građana zatraži bolničko liječenje zbog direktnih ili indirektnih posljedica požara u kućanstvima [2]. Požari u konstrukcijama na razini Europe naprave materijalnu štetu od 126 milijardi eura svake godine, što čini 1 % od ukupnog BDP-a. Požar može dovesti do velikih infrastrukturnih zastoja, gubitka podataka i pada vrijednosti dionica, pada proizvodnje i povećanja nezaposlenosti, pa čak i do bankrota [3].

Slika 1. prikazuje značajnije požare u Europi posljednjih 50 godina usporedno s brojem mrtvih zbog požara na 100.000 stanovnika. Veličina kruga predstavlja lokaciju građevine zahvaćene požarom, godinu u kojoj se dogodio požar te broj umrlih u tom požaru. Također, prikazani su i značajniji požari gdje su stradali objekti kulturne baštine, a gdje nije bilo ljudskih stradanja (na karti označeni ikonom hrama). Takvi incidenti (kao npr. Notre Dame, slika 2.) zahtijevaju goleme napore i izrazito velika novčana izdavanja za sanaciju nastale štete. Činjenice su temeljene na prikupljenim i analiziranim podacima [4], koji zasigurno nisu potpuni zbog nedostataka dokumentacije požarnih incidenata u Europi, ali mogu poslužiti kao dobar vizualni prikaz posljedica požara. Podaci za države, odnosno prosječan broj godišnjih žrtava na 100 000 stanovnika temeljeni

su na podacima International Association of Fire and Rescue Services za razdoblje od 2013. do 2017. [5]. Zbog nedostupnih podataka u izvješću za određene države [5], na kartu su dodani podaci za Portugal (2008. - 2010.), Albaniju (2002. - 2004.), Azerbajdžan (2001. - 2007.) te Sjevernu Makedoniju (2006. - 2010.) iz izvješća [3].

Armiranobetonske konstrukcije vrlo često se laički percipiraju kao potpuno sigurne na djelovanje požara, pogotovo u usporedbi s konstrukcijama od drugih materijala, kao što su čelik i drvo. Beton je nezapaljiv i vatrootporan materijal i s visokim efektivnim koeficijentom difuzije koji mu omogućuje da prodor topline u elemente izložene požaru bude usporen. Unatoč tome, AB konstrukcije tijekom požara mogu pretrpjeti značajna oštećenosti ako su izložene visokim temperaturama dulje vrijeme ili pak mogu biti potpuno oštećene i posve neuporabljive. Visoke temperature uzrokuju promjenu fizikalnih i kemijskih svojstava čelika i betona što u konačnici može dovesti do kolapsa cijele konstrukcije i potencijalne opasnosti gubitka ljudskih života. Najsvježiji primjer je požar u rezidencijalnoj zgradi Grenfell Tower u Londonu gdje su život izgubila 72 čovjeka, a još toliko ih je ozlijeđeno.

Fizikalno-kemijske promjene imaju važnu ulogu u nosivoj funkciji AB konstrukcije na način da značajno reduciraju mehanička svojstva betona. Poznato je da prvi značajniji gubitak čvrstoće nastupa kada je dostignuta temperatura 300 °C. Visoke temperature uzrokuju širenje čelika, a samim time i gubitak čvrstoće i modula elastičnosti. Promjena svojstava armature izložene visokim temperaturama iznimno je značajna



Slika 1. Karta značajnijih požara u Europi [4] u usporedbi s prosječnim brojem poginulih uslijed požara u konstrukcijama [3, 5]



Slika 2. Notre Dame u požaru [6], Grenfell Tower u požaru [7]

za konstrukciju. Osnovni procesi prilikom porasta temperature u AB konstrukcijama prikazani su na slici 3.

Beton zagrijan na temperaturu više od 500 do 660 °C oštećen je do te mjere da više nije prikladan za daljnju upotrebu u konstrukciji [8], pa tijekom ispitivanja treba odrediti veličinu degradacije vanjskog sloja [8]. Eksperimentalno ispitivanje u svrhu detektiranja procesa razvoja pukotina i preostale mehaničke otpornosti betona nakon izloženosti visokim temperaturama istraživali su Xiang i suradnici [9]. Ispitano je 36 uzoraka na temperaturama iznad 600 °C DIC tehnologijom (eng. *Digital Image Correlation*) te su dobiveni osnovni zaključci: beton različitog w/c omjera daje slične rezultate raspucavanja i promjene u boji ako je izložen istoj temperaturi. Pad karakterističnih svojstava betona nastupa nakon izloženosti temperaturi 400 °C ili višoj. Pri temperaturi od 200 °C preostala tlačna čvrstoća je bila na 85 % u odnosu na normalnu sobnu temperaturu, pri 400 °C čvrstoća je pala na 75 % dok je za 600 °C pala na 45 %. Na temperaturi od 600 °C vrijednost modula elastičnosti je pala za 80 %.

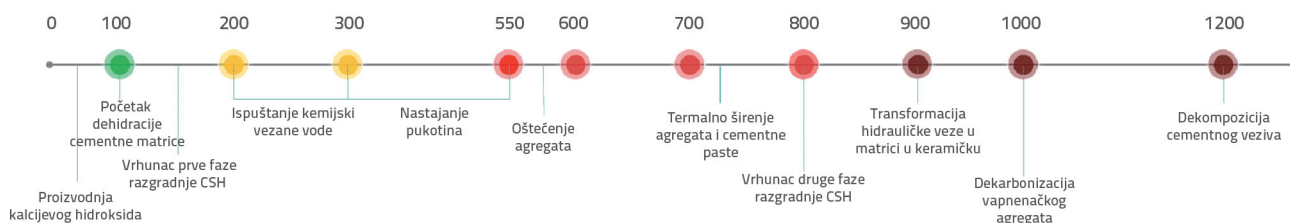
Svaki pojedini nosivi armiranobetonski element podložan je velikom broju utjecaja uslijed požara. Najznačajniji su trajanje povišene temperature, udio vode u betonu, tip agregata i sastav betona. Uz materijalne karakteristike, na ponašanje konstrukcije nakon požara također utječe tip konstrukcijskog sustava jer sila unutar zatvorene konstrukcije može uzrokovati nepovratna oštećenosti uslijed temperaturnog utjecaja [10]. Također, medij za gašenje požara može imati izrazito velik utjecaj. Naime, kad zagrijana konstrukcija dođe u doticaj s velikom količinom hladnog sredstva za gašenje (uobičajeno je to voda), događa se dodatni termalni šok za konstrukciju [11].

Povećanje temperature u AB konstrukciji popraćeno je fizikalnim i mehaničkim oštećenjem u konstrukcijama koje su prikazane na slici 3. te povezane s rizikom (veća temperatura pridonosi javljanju eksplozivnog odlamanja betona (eng. *spalling*), povećanju pukotina, oštećenju armature te može dovesti i do kolapsa konstrukcije). Na slici 4. prikazan je rizik te su konstrukcije, ovisno o temperaturi i razini oštetljivosti, svrstane u kategorije A do E, kako se primjerice ocjenjuju konstrukcije u SAD-u i Japanu [43].

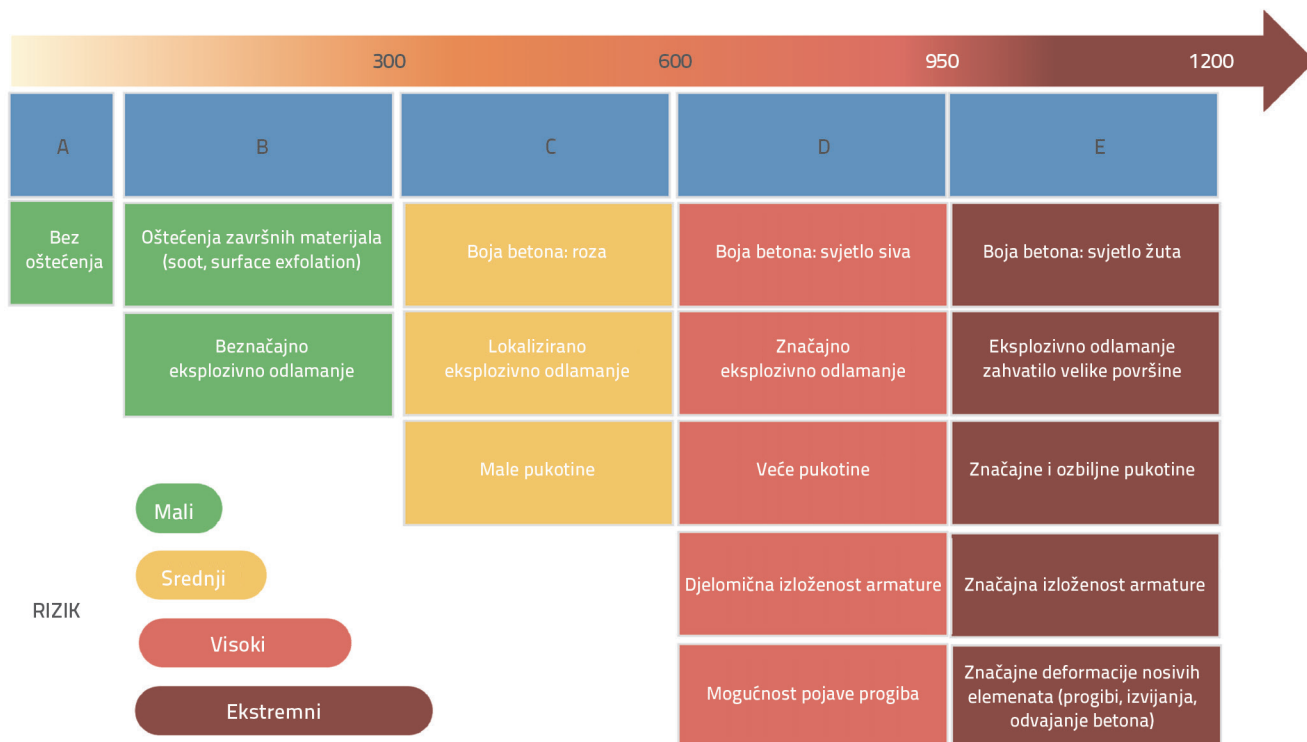
Kao jedno od najopasnijih izvanrednih djelovanja, požar je uključen u normativne dokumente, ali se njegovo djelovanje i sam proračun požarnog djelovanja vrlo često krivo interpretira i definira. Norme i pravila za projektiranje građevina otpornih na požar neprestano se mijenjaju, pa stoga treba stalno usavršavati i implementirati nova znanja stečena znanstvenim istraživanjima i studijama slučaja.

Požarna otpornost je sposobnost konstrukcije, dijela konstrukcije ili konstrukcijskog elementa da ispunji zahtjev funkcije (nosivosti i /ili širenja požara) za definiranu razinu opterećenja, definiranu požarnu izloženost i definirano razdoblje.

Visoka razina otpornosti armiranobetonskih konstrukcija u požarnim uvjetima dovodi do činjenice da su rijetki slučajevi otkazivanja AB konstrukcija. Iako postoji velik broj smrtnih slučajeva tijekom djelovanja požara u građevinama vrlo rijetki slučajevi postoje kad se smrt dogodila zbog rušenja AB konstrukcije nakon požara. Nakon požara gotovo je neizostavan tehnički uvid na konstrukciji. Kao rezultat procjene stanja, potrebno je označiti elemente koje treba zamijeniti ili ojačati, ako je moguće.



Slika 3. Osnovni procesi prilikom porasta temperature u AB konstrukcijama



Slika 4. Razina rizika u AB konstrukcijama ovisno o porastu temperature

Mnoga su istraživanja provedena u svrhu procjene preostale otpornosti oštećene AB konstrukcije u požaru. Ocjena otpornosti na požarno djelovanje u AB konstrukcijama fokusirana je na dobivanje otpornosti na visoke temperature primjenom standardnih krivulja temperatura-vrijeme, numeričkim i eksperimentalnim analizama.

U ovom radu izrađen je pregled osnovnih pojmova vezanih za požar u AB konstrukcijama, opisana su sadašnja ispitivanja vezana za probleme požara u AB konstrukcijama i dan je osvrt na metode procjene stanja AB konstrukcije nakon djelovanja požara

## 2. Istraživanja požara u armiranobetonskim elementima

Prema Eurokodu [12] moguće je koristiti se tabličnim podacima (EN 1992-1-2, poglavlje 5), jednostavnim proračunskim metodama za ocjenu jedinog elementa (EN 1992-1-2, poglavlje 4.2) i naprednim proračunskim metodama (EN 1992-1-2, poglavlje 4.3).

Proračun armiranobetonskih konstrukcija na požarno opterećenje se sastoji od odabira odgovarajućeg poprečnog presjeka i debljine zaštitnog sloja. Nosivi elementi tipične konstrukcije mogu se izračunati pomoću takozvanih tabličnih podataka [12]. U zahtjevnijim slučajevima, otpornost na požar u konstrukcijama se može dobiti jednostavnim analizama u kojima se na požar gleda kao na izvanredno djelovanje i na temelju kojeg je moguće provesti provjere graničnih stanja nosivosti [12, 13]. Tablični podaci daju prepoznatljivo proračunsko rješenje

za izloženost požaru do 240 minuta. Ako se primijene tablični podaci prema EN 1992-1-2, poglavlje 5, nisu potrebne daljnje provjere na posmik i torziju ili provjere vezane za eksplozivno odlamanje poprečnog presjeka.

Prema EN 1992-1-2, poglavlje 4 i EN 1992-1-2, Annex B, opisane su tri glavne pojednostavljene metode. Prva metoda *500 °C izoterme* (eng. *Method 500 °C isotherm*) primjenjiva je na standardnu požarnu izloženost i vrijedi za minimalnu širinu poprečnog presjeka potrebnu za požarnu vatrootpornost koja je definirana u EN 1992-1-2, Annex B, Table B1. Debljina oštećenog betona ( $a_{500}$ ) dobivena je kao jednaka prosječnoj dubini izoterme od 500 °C u tlačnoj zoni presjeka. Pretpostavlja se da beton s temperaturama višim od 500 °C ne pridonosi nosivosti, a preostali presjek betona zadržava svoje početne vrijednosti čvrstoće i modul elastičnosti. Druga metoda, *metoda zone* (eng. *Zone method*), daje pouzdanije rezultate od prve naročito u pogledu stupova, a primjenjiva je isključivo za standardnu krivulju temperatura/vrijeme. Temelji se na dobivanju reduciranog poprečnog presjeka na način da se ne uzima u obzir zona oštećenosti na požarom izloženoj strani. Vrijednost se definira faktorima redukcije za svaku pojedinu zonu poprečnog presjeka. Treća metoda, tj. *Metoda koja se temelji na parametarskim krivuljama – preporuka za pojednostavljeni model* (eng. *Method based on estimation of curvature*) prema EN 1992-1-1, poglavlje 5, omogućuje procjenu stanja armiranobetonskog poprečnog presjeka izloženog momentu savijanja i uzdužnoj sili. Moguća je primjena kod stupova kod kojih utjecaji drugog reda imaju značajnu ulogu.

Napredne proračunske metode uključuju (EN 1992-1-2, poglavlje 4.3) sljedeća tri modela. Model toplinskog odziva (zasnovan na teoriji prijenosa topline i toplinskih djelovanja predstavljenoj u EN 1991-1-2). Međunarodne krivulje požara temperatura/vrijeme (u struci najpoznatija standardna ISO 834 krivulja) mogu se koristiti pod uvjetom da su svojstva materijala (betona i čelika) poznata za svaki relevantni temperaturni stadij. Model mehaničkog odziva uvodi u izračun promjenu mehaničkih karakteristika uslijed promjene temperature. Učinci termički izazvanih naprezanja i naprezanja uslijed porasta temperature i temperaturnih razlika moraju se uzeti u obzir. Kompatibilnost u vidu dopuštenih deformacija na razini konstrukcije mora biti zadovoljena, gdje bi se kao relevantni trebali uzeti nelinearni utjecaji geometrije i rubni uvjeti.

## 2.1. Stup

Požarna otpornost betonskog stupa za standardni požar može biti određena primjenom više različitih metoda. Najjednostavnija bi bila preko tabličnih vrijednosti iz EN 1992-1-2 [12]. Primjena tablica je isključivo za nepomične stupove do 6 metara visine. Druga vrsta određivanja požarne otpornosti betonskog stupa je pomoću *Naprednih proračunskih metoda*. Njihova je prednost u tome što nema ograničenja samo na određeni tip elementa kao što je to slučaj kod tabličnih proračuna. Za brzu provjeru požarne otpornosti razvijeni su pojednostavljeni proračuni kojima je najveći nedostatak nemogućnost promatranja konstrukcije kao cjeline, nego su ograničenja dana samo za pojedini element promatran za slučaj opterećenja standardnim požarom. Većina normi, uključujući ACI 216 [14] i EN 1992-1-2 [12], propisuju odredbe za utvrđivanje požarnog razreda kod nosivih elemenata kao što su stupovi. Sadašnja norma za proračun požarne otpornosti betonskih elemenata EN1992-1-2 u slučaju vitkih stupova za zahtjev R30 precjenjuje vrijednost nosivosti na požarno opterećenje. Parametri koji utječu na požarnu otpornost mogu biti: vitkost stupova, dimenzije poprečnog

presjeka, duljina, rubni uvjeti i ekscentričnost opterećenja [15]. Također, vrlo su važne i materijalne karakteristike čelika za armiranje [16]. Postotak vlažnosti betona može utjecati na postotak eksplozivnog odlamanja (eng. *spalling*), odnosno gubitka poprečnog presjeka tijekom požara (slika 5.). Zatim su tu i odabir agregata u sastavu betona, debljina zaštitnog sloja i sl. Veća površina uzdužne armature u betonskom presjeku stupa može pridonijeti požarnoj otpornosti.

Buch i ostali [15] u svojim istraživanjima zaključuju da porast degradirane betonske površine od 15 % do 80 % vodi do pada nosivosti za 77 % te bi upravo novi empirijski izrazi morali uzeti u obzir eksplozivno odlamanje (eng. *spalling*) betona kao bitan parametar za proračun požarne otpornosti betonskog elementa. Nagli pad nosivosti betona visoke čvrstoće dogodit će se uslijed lokalnog izvijanja uzdužne armature u stupu. Detalji armiranja kako uzdužne tako i poprečne armature, tj. smanjenjem razmaka vilica povećava se požarna otpornost AB stupa.

Gernay [1] je promatrao požarnu otpornost AB stupa. Požarna otpornost je definirana kao sposobnost konstrukcijskog elementa da preživi izloženost požaru uključujući i vrijeme hlađenja konstrukcije. Numeričkom metodom nelinearnih elemenata analiziran je stup u fazi grijanja i hlađenja kako bi se dobila požarna otpornost. Konačni cilj je bio dobiti pojednostavljenu metodu proračuna požarne otpornost AB stupova. Stavljajući fokus na betonske stupove, ovaj rad je obuhvatio bazu od 74 standardna testa požarne otpornosti. Usporedbom rezultata numeričkih modela i rezultata ispitivanja pokazalo se da je modelom moguće predvidjeti otkazivanje AB stupova u standardnom požaru. U drugom koraku, 74 stupa su ispitana na požar koji se sastojao i od faze hlađenja. Posebno se pritom pazilo na ispravno definiranje utjecaja hlađenja materijala, uključujući naknadni gubitak tlačne čvrstoće betona, nepovratni gubitak svojstava betona uslijed doticaja s vlagom i eksplicitnu procjenu propagacije puzanja.

Iterativna proračunska procedura je zasebno provedena za svaki pojedini stup na način da se produljivalo vrijeme prirodnog



Slika 5. Oštećenosti stupa uslijed požara: a) zacrtnjen stup; b) pukotine; c) vidljiva armatura

požara kako bi se došlo do najkraćeg požara koji bi doveo do potpunog gorenja svakog pojedinog stupa, definirajući tako DHP fazu (faze porasta temperature). DHP faza mora biti kraća od vremena dostizanja požarne otpornosti (R). Drugim riječima, razlika između DHP i R raste s R. Ta je razlika dobar pokazatelj sklonosti odgođenom otkazivanju konstrukcijskog elementa. Stoga je, za praktičnu upotrebu pronađena bliska veza između požarne otpornosti (R) i otpornosti definirane DHP fazom. Preporuka je da se za klasifikaciju konstrukcijskih elemenata treba oslanjati na vrijednosti DHP i R, a ne samo na požarnu otpornost (R) [1].

Lo Monte i dr. [17] su u svojim ispitivanjima stupova pod realnim požarom zaključili da je u modeliranju realnog požara od velike važnosti dobro definirati i fazu hlađenja.

U radu [18] je promatrana nosivost na uzdužnu silu i granično stanje uporabivosti AB stupova. AB stup je ojačan čeličnom šupljom cijevi. Osnovni zaključci istraživanja su: mod otkazivanja AB stupa ojačanog tankostijenim šupljim čeličnim cijevima je lokalno izvijanje, a sam AB stup otkazao je na posmik; ojačanje je vratilo nosivost oštećenog stupa na razinu od prije požarnog opterećenja, dok je nosivost na uzdužnu silu čak i premašena u odnosu na stanje prije požara, a povećana je i razina duktilnosti.

## 2.2. Greda

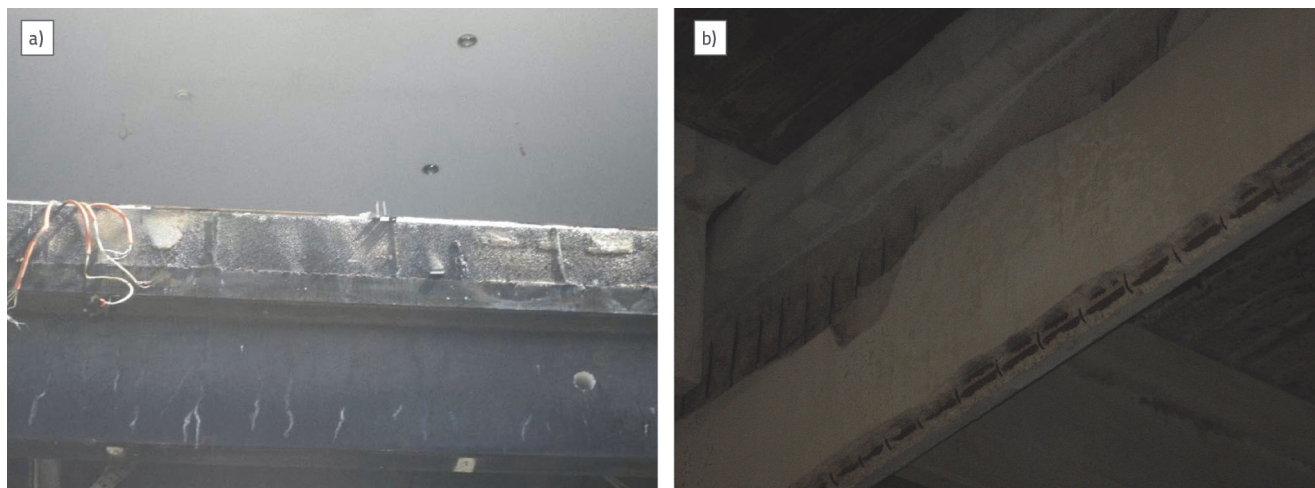
U istraživanjima Yang i dr. [19] glavni su ciljevi bili kvantificiranje utjecaja različitih parametara na ponašanje armiranobetonske T-grede PSS (eng. *Prestressed Steel Straps*). Promatrano je dvanaest uzoraka požarom oštećenih T-greda koje su podvrgnute posmičnom ojačanju prednapinjanja PSS metodom. Na temelju eksperimentalnih rezultata zaključeno je sljedeće: prilikom ispitivanja za požar od 60, 90 i 120 minuta dostignute su temperature 900 °C, 990 °C i 1025 °C koje se mogu dobro usporediti s krivuljom temperature i vremena kod standardnog požara prema ISO 834. Međutim, porast temperature unutar elementa nije lako detektirati. Razlike u promjeni temperature na donjem dijelu i pojasnici T-grede relativno velike su, 290 °C, 400 °C i 580 °C. S povećanjem vremena trajanja požara, rastao je i stupanj oštećenosti betonskih greda (slika 6.) smanjujući krutost i posmičnu nosivost. Nakon ojačanja PSS metodom prednapinjanja T-grede, posmična nosivost i krutost AB greda izloženih požaru je obnovljena, a čelična užad pridonosi duktilnosti grede i sprječavanju razvoja pukotina. Smanjenje razmaka čeličnih užadi omogućuje povećanje nosivosti i krutosti greda (važno je paziti da prevelik postotak prednapinjanja ne bi ograničio posmičnu nosivost) [19].

U radu Elshorbagy i dr. [20] izrađene su numeričke parametarske analize u računalnom programu ANSYS za djelovanja požara u svrhu dobivanja sljedećih parametara: tlačne čvrstoće betona, zaštitnog sloja i bočne krutosti grede. Algoritam za proračunski model se temelji na nelinearnoj analizi konačnih elemenata koji objedinjuje više požarnih scenarija u svrhu dobivanja odgovora konstrukcije na djelovanje požara. Valjanost proračunskog modela je dokazana eksperimentalnim ispitivanjima. Prijedlog je

da se simulira fenomen eksplozivnog odlamanja (eng. *spalling*) koje bi se moglo provesti hidro-termalnom analizom jer bi se ovakvim pristupom uzeo u obzir utjecaj vode na degradaciju betonskog presjeka u pogledu eksplozivnog odlamanja koja se ujedno smatra i glavnim uzrokom ove pojave.

Tijekom izloženosti AB elementa požaru stvaraju se termalni gradijenti kako temperatura napreduje s površine prema unutrašnjosti poprečnog presjeka. Postojeće metode su: Postojeće metode su: Metoda jednakih površina (Equal area method), Metoda maksimalne temperature (Maximum temperature method), Metoda energije (Energy method), Metoda nosivosti (Load capacity concept), Metoda maksimalnog otklona (Maximum deflection method). Kako bi se olakšao proračun, potrebne su vremenske ekvivalente metode za procjenu jačine normalnog požara na temelju trajanja standardnog požara [21]. Primjenom vremenski ekvivalentnih metoda vrlo se jednostavno može dobiti stvarno požarno opterećenje na temelju dostupnih podataka, testiranja i računalnih programa koji se temelje na standardnoj požarnoj krivulji. Trenutačno dostupne metode ovog tipa su neprecizne u pretpostavljanju termalnog gradijenta AB elemenata izloženih požarnom opterećenju. Kuehnen i dr. [21] razvili su metodu AITP, Metodu profila prosječne unutarnje temperature (eng. *Average internal temperature profile*) koja se pokazala točnijom u interpretiranju termalnog gradijenta. Autori tvrde da AITP metodom projektanti mogu brzim postupkom povezati ozbiljnost stvarnog požara sa standardnim požarom kako bi dobili zadovoljavajuće ponašanje konstrukcije u požaru. U radu Albuquerque i dr. [22] napravljena je usporedba na AB gredi koja je bila opterećena savijanjem s različitim rubnim uvjetima (zglobno i upeto). Zaključak je toga rada da nosivost na požarno djelovanje uvelike utječe na rubne uvjete u gredi, u nekim je slučajevima to bilo stopostotno povećanje nosivosti. U gredi s osloncima koji preuzimaju isključivo pomake (bez rotacije) uočeno je manje vidljivih pukotina. Za slučaj upetih oslonaca (spriječen i pomak i rotacija) uočena je značajna bočna deformacija, što je prouzročilo otkazivanje uzdužne armature u nekim slučajevima i u gornjoj i u donjoj zoni.

Kod prednapetih greda potrebno je uzeti u obzir niz činjenica: hladno oblikovani čelik za prednapinjanje osjetljiviji je u požaru od toplovaljanog, smanjenje poprečnog presjeka vodi prema smanjenju zaštite prednapetog čelika, prednapeti elementi projektirani prije normi nisu definirali zaštitni sloj koji bi osiguravao zaštitu čelika u požaru, loše izvedeni spojevi između nosivih elemenata nisu u mogućnosti preraspodijeliti unutarnju silu nastalu uslijed požarnog opterećenja te na taj način direktno utječu na gubitak globalne stabilnosti konstrukcije. U radu [23] ispitivana je prosta greda (prethodno i naknadno prednapeta) izložena normalnom požaru u svrhu određivanja mogućnosti zakašnjelog otkazivanja konstrukcije (u fazi hlađenja) i razjašnjavanja uloge pojedinih parametara uključujući vrijeme trajanja požara, požarnu silu i brzinu hlađenja. U oba slučaja, prethodno i naknadno prednapeti betonski elementi pokazuju nastavak zagrijavanja prednapetog čelika i nakon postizanja krajnje točke hlađenja, što može dovesti do zakašnjelog



Slika 6. Oštećenosti grede uslijed požara: a) vidljive pukotine na vanjskom licu grede; b) smanjenje poprečnog presjeka, vidljiva armatura

otkazivanja konstrukcijskog elementa, pogotovo kod kratkotrajnih požara. Duža faza hlađenja uzrokuje postizanje većih temperatura u prednapetom čeliku, naročito masivnijeg poprečnog presjeka. Udvostručavanjem brzine hlađenja s 5 na 10 °C/min dolazi do znatnog smanjenja zaostalih deformacija. Novija istraživanja usmjerena su ka karakterizaciji utjecaja požara na armiranobetonskim i prednapetim betonskim elementima u fazi hlađenja. Ispitivanja uključuju eksperimentalna istraživanja na naknadno prednapetim betonskim pločama koje su prethodno izložene lokaliziranom požaru [24], proračunske studije armiranobetonskih stupova [25, 26], armiranobetonskog okvira [27], prednapetih betonskih greda [23] i studije koje definiraju preostali koeficijent nosivosti betonskih greda nakon požarnog djelovanja [28]. Numeričkom analizom moguće je predvidjeti otkazivanje konstrukcije tijekom i nakon faze hlađenja različitih konstrukcijskih elemenata i materijala [29].

### 2.3. Ploča

Posmično otkazivanje za standardne konstrukcijske elemente u požaru je rijetko, međutim za ravne ploče je situacija drugačija. Generalno gledajući, svaki proračun ravnih ploča u požaru trebao bi uzeti u obzir točan požarni scenarij, termalnu analizu i ponašanje konstrukcije. U radu [30] je stvarni požarni scenarij determiniran ispitivanjem požarnog opterećenja na modelu u stvarnom mjerilu. Na primjeru podzemne garaže [23] pokazano je da povećanje temperature u konstrukcijskom sustavu ploča-stup vodi do povećanja poprečne sile na spoju sa stupom što vodi do povećanja uzdužne sile za 50 % više u odnosu na sobnu temperaturu. Usporedno sa standardnim požarom ISO 384 [31] dokazano je da standardna požarna krivulja pokazuje veće narušavanje materijalnih karakteristika u odnosu na stvarni požar dok je na drugu stranu preraspodjela unutarnjih sila bila podcijenjena.

Iako se spoj stupa preko ravne ploče smatra kritičnom zonom koja može voditi do kolapsa u požarnom scenariju, samo je

nekoliko ispitivanja provedeno na ovu temu. Zaključeno je da u slučaju ravnih ploča i stupova povišena temperatura direktno utječe na materijalne karakteristike i na dramatični gubitak mehaničkih i termalnih svojstava. Moguć je stopostotni gubitak pri temperaturi od 1000 °C. Uz gubitak navedenih svojstava, tu je i drastično povećanje unutarnje sile u odnosu na stanje pri sobnoj temperaturi. Kvaliteta betona i postotak uzdužne armature pokazali su nepovoljno djelovanje, odnosno veći stupanj oštećenosti u požaru dok je utjecaj posmične armature bio minimalan. Također, ovaj test je pokazao različite mehaničke karakteristike elemenata koji su bili izloženi naglom odnosno postupnom hlađenju. Pri naglom hlađenju došlo je do većeg stupnja oštećenosti od onoga uslijed postupnog hlađenja [30].

Prepoznavanje čvrstoće materijala i gubitak sile prednapona ključni su u procjeni savojne čvrstoće vitke prednapete betonske ploče. Još uvijek nije dovoljno istražen, odnos toplinskog širenja i pada razine naprezanja u kabelima [32]. U radu Musmara i dr. [32] provedena je numerička analiza metodom konačnih elemenata ploče zahvaćene požarom kako bi se mogla predvidjeti krajnja točka otkazivanja konstrukcije. Promatran je požar u trajanju 60 minuta za prednapetu betonsku ploču oslonjenu na betonskim stupovima. Konačni zaključak ovog ispitivanja je taj da je bolje srušiti i ponovno sagraditi konstrukciju nego poduzimati mjere kao što su: potpuna zamjena prednapete ploče te ojačanje stupova na etažama ispod i iznad ploče.

Točna predviđanja ponašanja konstrukcijskih elemenata u požaru su moguća samo u slučaju kada su poznati svi parametri za numeričku analizu. Zanimare li se parametri kao što su deformacije, tada pogreška u rezultatima poraste na više od 20 %. Analiza koja uzima u obzir stanje u konstrukciji nakon faze hlađenja smatra se relevantnom za predviđanje preostale nosivosti AB elemenata nakon požarnog djelovanja, iako i nju treba nadopuniti dodatnim eksperimentalnim ispitivanjima. Nužno je provesti eksperimentalne i numeričke analize za proračun stvarne otpornosti betonskih elemenata u požaru [33].

## 2.4. Zid

Armiranobetonski zidovi često se primjenjuju kao vertikalne pregrade u konstrukcijama zbog pristupačne cijene, estetike, bolje iskoristivosti prostora i jednostavnosti ugradnje. Usporedno sa zidanim zidovima, pružaju znatno veću nosivost u ravnini i izvan nje. Požar u AB zidovima ne djeluje jednoliko po visini poprečnog presjeka te termalni gradijent može uzrokovati nejednoliku degradaciju u poprečnom presjeku zida što dovodi do ekscentričnosti gravitacijske sile, a to znači da požarno opterećenje na zidu može dovesti do gubitka stabilnosti izvan ravnine [34].

Kumar i dr. [34] proveli su numeričku analizu na 3D modelu u ANSYS programskom paketu koju su popratili eksperimentom. Posebno se pazilo na uvrštavanju temperaturnog bočnog izvijanja u procjeni ponašanja AB zidova u požaru. Dobiveni su sljedeći zaključci: veliki termalni prirast dovodi do stvaranja strmih termalnih gradijenata unutar AB zida što dovodi do nestabilnosti zida izvan ravnine. Odgovor konstrukcije zahvaćene požarom prolazi kroz tri faze: prva faza označava ubrzani prirast pomaka izvan ravnine, druga faza je okarakterizirana pomicanjem neutralne osi, što je posljedica degradacije materijala pri povišenim temperaturama, a treća faza obilježena je dominacijom pomaka u efektima neutralne osi uslijed toplinskih gradijenata. Moguće je iskoristiti rezultate dobivene 3D modelom za razvoj pojednostavljenog 2D numeričkog modela kojim bi se mogla izračunati požarna otpornost nosivih AB zidova.

## 2.5. Okvir

U radu Magisanoa i dr. [35] predstavljen je prijedlog numeričkog proračuna za procjenu globalne otpornosti na požarno opterećenje u armiranobetonskim 3D okvirima. Izveden je jednostavan, točan i djelotvoran numerički postupak računanja doprinosa uzdužne sile i dvoosnog savijanja AB okvira u požaru. Temelji se na Minkowskijevu zbroju elipsoida, pri čemu svaki elipsoid predstavlja doprinos poddomene presjeka ukupnoj površini. Tako dobiveni uvjeti ovise o vremenu. Ovi kriteriji mogu se lako upotrijebiti za procjenu sigurnosti konstrukcije jednostavno provjeravanjem lokalne nosivosti poprečnog presjeka. Međutim, prekomjerna duljina konstrukcije i duktilnost zbog zatvorenosti i povećanja temperature omogućuju preraspodjelu napona preko okvira, što čini provjeru poprečnog presjeka krajnje konzervativnom. Zbog toga je predložena nova globalna analiza požara. Ova vrsta proračuna omogućuje uvid u vremenski tijek požarnog opterećenja i preraspodjele naprezanja te mogućnost detektiranja ograničenja trajanja, odnosno vremenske izloženosti požaru koja vodi do otkazivanja konstrukcije.

U radu Elbayomya i dr. [36] prikazan je utjecaj požara na ponašanje višekratne betonske konstrukcije. Ispitivanje je provedeno Primijenjenom metodom elemenata (eng. *Applied Element Method - AEM*). Promatrane su deformacije i naprezanja

u elementima izloženim povišenim temperaturama. Utvrđeno je sljedeće: maksimalna temperatura u požaru je pokazala značajan utjecaj na ponašanje različitih tipova konstrukcijskih elemenata, tlačna čvrstoća betona ima značajan utjecaj na deformacije u rubnim područjima ploča i greda, postotak armiranja stupa ima značajan utjecaj na progib rubne ploče i progib rubne grede. Iz navedenog se može zaključiti da su vrijeme trajanja požara i temperatura najvažniji parametri za proračunavanje AB stupova u požaru. Temperatura od 900 °C može voditi do progresivnog otkazivanja pojedinih konstrukcijskih elemenata ili cijele konstrukcije. U numeričkim analizama karakteristike su materijala (njegovo propadanje) tijekom povišene temperature nužne za proračunski model. Lokacija samog požara također je bitan faktor u procesu projektiranja. Primjerice požar je u uglovnim dijelovima konstrukcije kritičniji od onoga koji se događa u središnjem prostoru, a na donjim etažama je opasniji od onoga na višim etažama.

## 2.6. Detalji

Različiti detalji armiranja spoja greda-stup unutar AB okvira promatrani su prije i nakon požarnog opterećenja [37, 38]. Brojna istraživanja su usmjerena na dobivanje pojednostavljenih modela kako bi se idealizirano pokazalo ponašanje unutar spoja greda-stup za vrijeme požarnog opterećenja. Stylianidis i dr. [39] predstavili su detaljnu studiju mehanike progresivnog otkazivanja s prijedlogom za jednostavno izvođenje detalja spajanja. Posebna se pozornost usmjerila na usporedbu eksperimentalnih rezultata i teorijskih predviđanja interakcije uzdužne sile i momenta savijanja za uvjete sobne temperature prije i nakon požara (slika 7.). Uočeno je da je moguća usporedba eksperimentalnih ispitivanja i pojednostavljenih analitičkih modela korištenjem izraza za slučaj prije požara i poslije požara. Numerički proračun predlaže pouzdan i učinkovit pristup detektiranja ključnih faza, uključujući početnu krutost i nosivost te granično stanje deformacija. Predloženi model proračuna uzima u obzir materijalne karakteristike i prionjivost nakon požara te preostalo područje plastifikacije armature.



Slika 7. Oštećenje detalja na mjestu spoja greda - stup

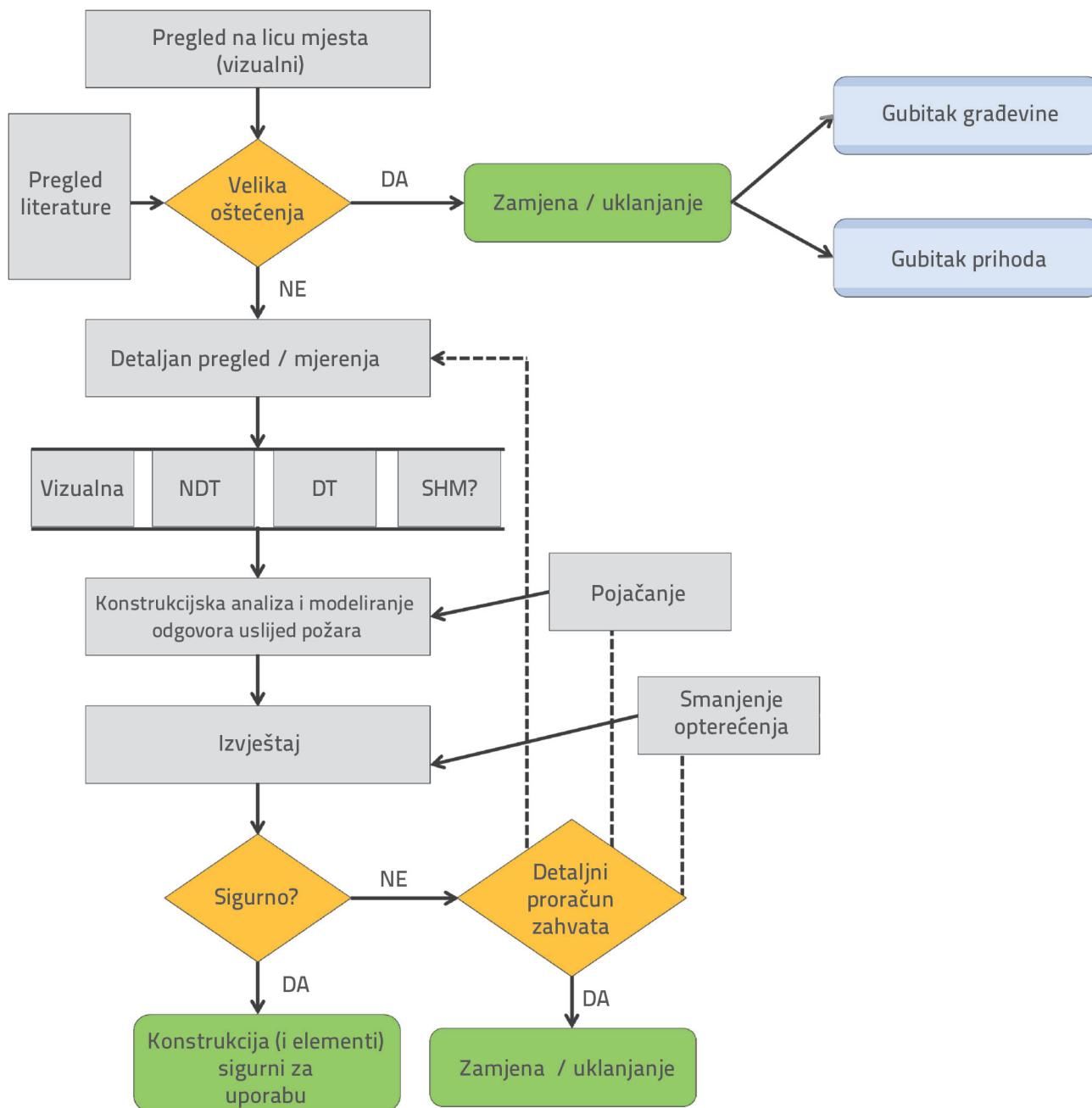


### 2.7. Most

Za sada postoji manjak objavljenih radova na temu standardizacije kriterija za nadzor, procjenu i metodu popravaka mostova koji su zahvaćeni požarom. U većini dosadašnjih istraživanja požarna otpornost je determinirana usporedbom teoretskih rezultata na temelju numeričkih modela i eksperimentalnih istraživanja. Međutim, stvarne performanse konstrukcije lošije su od teoretski pretpostavljenih što upućuje na vjerojatnost pogreške pri ocjeni stanja mostova [40].

### 3. Procjena stanja preostale nosivosti AB elemenata nakon požara

Prije početka obnove i sanacije konstrukcije oštećene u požaru nužno je utvrditi njezino trenutačno stanje. Dostupne informacije i tehnologije kojima raspolažemo daju nam mogućnost boljšeg pristupanja požaru i boljoj edukaciji u slučaju kako pristupiti prije, a kako nakon samog požarnog djelovanja [41]. Nedestruktivne metode ispitivanja (NDT) nedavno su dobile na važnosti za procjenu stanja u armiranobetonskim konstrukcijama. Betonske



Slika 8. Dijagram toka procjene stanja AB konstrukcija

konstrukcije su podložne oštećenjima uslijed uporabnog opterećenja, umora, utjecaja iz okoliša i ekstremnih djelovanja. Svi ti utjecaji mogu ugroziti integritet betonskih konstrukcija u smislu oštećenosti armature ili betona.

Pouzdana i brza procjena poslijepožarne otpornosti armiranobetonske konstrukcije nužna je za otkrivanje stadija oštećenost konstrukcije prije ulaska službi za gašenje konstrukcije i spašavanje ljudi. Moguće je provesti forenzičku istragu kako bi se procijenilo stanje konstrukcije nakon požara. Ekonomska procjena štete je ključna pri donošenju odluke o popravku ili potpunom uklanjanju konstrukcije. Uzimajući u obzir visoku cijenu zamjene nosivih elemenata, potrebne opreme i troškova same studije procjene oštećenosti, nužno je pronaći jednostavan i brz postupak ispitivanja [42]. U slučaju kada popravak oštećene konstrukcije nije moguć ili u slučaju kada je popravak moguć, preliminarne informacije o razini štete uzrokovane požarom trebale bi biti dostatne za popravak odnosno uklanjanje konstrukcije bez skupih i sofisticiranih procjena.

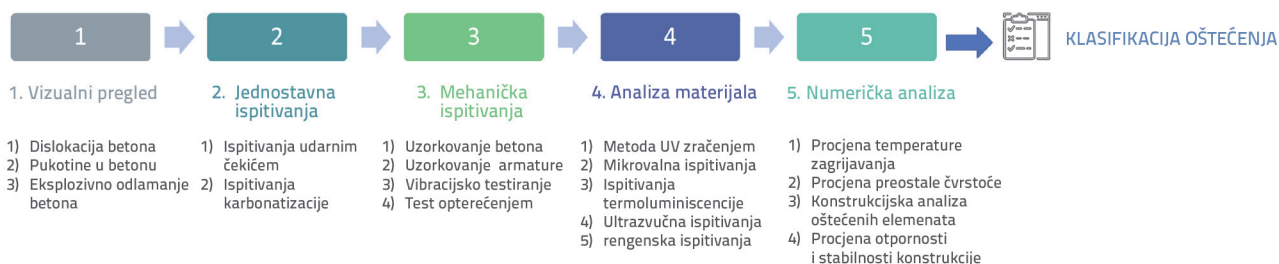
Kada govorimo o procjeni stanja, govorimo o dovođenju u svezu požara kao takvog i svojstava konstrukcijskog elementa. To nije nimalo lak zadatak jer pogreška može direktno ugroziti ljudski život. Postupci vezani za procjenu stanja betonske konstrukcija mogu se najlakše objasniti pomoću dijagrama, kako je prikazano na slici 8.

Oštećene zgrade uslijed visoke temperature u požaru pokazuju različite obrasce ponašanja od starenja ili propadanja. Prvi korak u procjeni stanja konstrukcije je vizualni pregled. Iako je vizualni pregled temelj svih procjena stanja i prvi (a ponekad i zadnji) korak, vrlo često nije moguće točno utvrditi preostalu nosivost nosivih elemenata koji su bili zahvaćeni požarom. Iako je vidljivo površinsko oštećenje kroz gubitak poprečnog presjeka, mehaničke karakteristike ili preraspodjelu naprezanja unutar elementa nije moguće utvrditi isključivo vizualnim pregledom. Naime, na taj je način teško točno procijeniti temperaturu jer procjena ovisi o iskustvu odgovorne osobe za dijagnostiku [43]. Od ostalih metoda za procjenu temperature mogu se koristiti nedestruktivne metode kao metoda ultraljubičastog spektra [44], metoda ultrazvučne spektroskopije [45], metoda rendgenske difrakcije i petrografska analiza [46] te metoda mjerenja količine ponovne apsorpcije ugljičnog dioksida. Rezultati mogu ovisiti o odabranoj metodi, ali i o kemijskom sastavu betona.

Nakon inicijalnog vizualnog pregleda i pregleda literature o samoj konstrukciji (eng. *desk survey*) potrebno je riješiti i materijalne i konstrukcijske nepouzdanosti koje je nemoguće vidjeti prostim okom. Usporedno s vizualnim pregledom ili neposredno nakon detaljnog vizualnog pregleda konstrukcije, brojne karakteristike mogu se odrediti i primjenom nedestruktivnih, poludestruktivnih i destruktivnih metoda. Pomoću dobivenih podataka provodi se statički proračun i ocjenjuje se preostala nosivost konstrukcije; ako je ona nedostatna i postoje određene nepouzdanosti, možemo ponoviti detaljnija ispitivanja ili se odlučiti na smanjenje postojećeg opterećenja, ojačanje konstrukcije ili je pak srušiti zbog neisplativosti. Preostala nosivost između ostalog ovisi i o čvrstoći betona. Torić i dr. [47] rezultatima ispitivanja na laganom betonu pokazali su važnost faze hlađenja betonskih elemenata. Preostala nosivost ima pad za dodatnih 20 % nakon 96 sati u odnosu na stanje odmah nakon hlađenja. Osnovni postupci procjene stanja AB konstrukcije nakon požara prikazani su na slici 9.

Informacije o pukotinama mogu pomoći pravovremenom i proaktivnom upravljanju betonskim konstrukcijama, a u tome nam mogu pomoći senzori za snimanje, dok se vizualni pregled smatra ekonomski i vremenski neisplativim. Algoritmima za otkrivanje pukotina možemo provesti kvantitativnu analizu čvrstoće ili duljine pukotina kako bi se procijenio stupanj sigurnosti [48]. Unatoč sensorima, uvijek je izazovno pouzdano detektirati pukotine na oštećenim površinama.

Cioni et al. [49] primijenili su termo-mehaničke i mikrostrukturne analize proračuna armiranobetonskih konstrukcija nakon požara usporedno s ultrazvučnim mjerenjima za procjenu oštećenosti AB konstrukcija. Povišene temperature mijenjaju mikrostrukturu betona i na taj način narušavaju njegovu čvrstoću. Isključivo jedna nedestruktivna metoda ne može biti dovoljna za procjenu stanja oštećenosti betonskog elementa te je potrebno kombinirati više metoda kao npr. sklerometar (udarni čekić), ultrazvuk, mikrostrukturnu analizu, interpolaciju temperaturne izloženosti. U radu su provedena ispitivanja na 18 armiranobetonskih stupova, greda i uzoraka valjaka. Rezultati ispitivanja jednakim opterećenjem na valjcima i na AB gredama i stupovima su konzistentni. Svi uzorci su bili podvrgnuti nedestruktivnim metodama prije i nakon požara. Testirana je čvrstoća svakog pojedinog uzorka. Analizirana je korelacija između NDT metoda i preostale čvrstoće dobivene ispitivanjem u različito vrijeme požarnog opterećenja. Glavni



Slika 9. Osnovni postupci procjene stanja AB konstrukcije nakon požara

zaključci su sljedeći: vrijednosti tlačne čvrstoće dobivene sklerometrom neusporedive su s rezultatima ispitivanja uzoraka pod prešom jer udarni čekić procjenjuje vrijednost čvrstoće na temelju površinske čvrstoće. Rezultati dobiveni ultrazvukom i iterativnom metodom pokazali su se kao koristan alat za provjeru mehaničke karakteristike čvrstoće betonskih elemenata izloženih požaru, a mikrostrukturna analiza također se pokazala dobra u procjeni stanja oštećenosti betona.

U radu [50] je predstavljena metodologija za procjenu preostale nosivosti betonskih konstrukcija nakon požarnog opterećenja. Ona se temelji na stvarnom primjeru požarnog djelovanja u stambenoj zgradi, s fokusom na zadnji raspon kontinuirane betonske ploče zahvaćene požarom. Rezultat je pouzdana procjena maksimalne dopuštene vrijednosti opterećenja ploče. Predložena metodologija je korisna za donošenje odluke o daljnjoj uporabi građevina nakon požara. Točna prostorna i vremenska raspodjela temperature u konstrukciji tijekom stvarnog požarnog opterećenja uglavnom nije poznata. Zbog toga se projektanti moraju koristiti neizravnim metodama kako bi dobili realnu procjenu ozbiljnosti požara. Procjene preostale nosivosti elemenata zahvaćenih požarom mogu se dobiti pomoću numeričkih modela i proračuna, ali je neizbjegno pojednostavljenje pretpostavki i modeliranje nepouzdanosti. Karakteristike konstrukcije je ponekad teško pretpostaviti zbog nedostatka projektne dokumentacije ili zbog degradacije ili modifikacija koje je mogla doživjeti tijekom svog trajanja, a prije samog požarnog opterećenja. U radu je prikazan proračun pouzdanosti proveden za betonske konstrukcije, ali je metodologija primjenjiva i za ostale tipove konstrukcija.

Ovakav pristup povezuje zahtjeve pouzdanosti proračunske nosivosti prije i nakon požarnog događaja. Sam tijekom metodologije pouzdanosti uključuje: promatranje požarnog opterećenja, prikupljanje podataka, pa sve do više koraka procjene maksimalnog dopuštenog opterećenja na konstrukciju. Poželjno je imati forenzičku istragu (mjerena na mjestu događaja, razgovor s vatrogascima i projektantom konstrukcije), pojednostavljene metode, napredno numeričko modeliranje (FEM), proračun pouzdanosti i inženjersku procjenu. S tako prikupljenim podacima moguća je primjena koncepta pouzdanosti za procjenu konstrukcija nakon požara, a koja je u skladu s odredbama norme EN 1990. Metodologija je ispitana na primjeru stvarnog slučaja betonske ploče (rubnog raspona) zahvaćene požarom. Zaključeno je sljedeće: nedostatak informacija uvelike otežava procjenu stanja konstrukcije nakon požara, iterativnom metodom se uzelo u obzir ispitivanje na požarištu, numerički model (usporedba dobivenih deformacija s mjerenjima na stvarnoj konstrukciji) i vještačenje mjerodavne osobe.

Ponovna procjena [51] može biti provedena za dobivanje maksimalnog dopuštenog opterećenja nakon požarnog djelovanja s uključenim prethodno definiranim faktorima sigurnosti koji uzimaju u obzir oštećenosti nastala uslijed požara (i nakon). Ova metoda se temelji na konceptima pouzdanosti i stoga omogućava eksplicitnu kvantifikaciju preostale razine sigurnosti. Brz postupak proračuna temelji

se na pojednostavljenim analitičkim izrazima i interakcijskim dijagramom ocjene stanja (AID). Cilj je te metode donošenje odluke o daljnjoj uporabi konstrukcije s obzirom na sve navedene parametre. Važno je napomenuti i to da primjenom koncepta pouzdanosti ne uzimamo u obzir granično stanje uporabivosti (deformacije), nego isključivo granično stanje nosivosti.

Trenutačni je trend razvoj probabilističkog pristupa za procjenu gubitaka konstrukcije ili njenih elemenata u požaru. Ovakvim pristupom projektanti su u mogućnosti procijeniti vrijednost popravka ili zamjene konstrukcije. Takav pristup im također omogućuje računanje dodatne zaštite u svrhu smanjenja konačnih troškova, ako se pojavi izvanredno potresno djelovanje. Postojeće metode projektiranja na požarno opterećenje općenite su i uključuju procjenu hoće li konstrukcija otkazati ili ne. Potrebno je zadovoljiti propisane kriterije vremenske otpornosti na požar koji se gotovo potpuno temelje isključivo na očuvanju ljudskih života. Procjena stanja se provodi prema normi ISO-834 [31], koja predstavlja samo jedan slučaj požara iz niza mogućih požara koji se mogu dogoditi.

Standardno ispitivanje požara iz kojega su proizašle opće smjernice ograničeno je na provjeru jednog konstrukcijskog elementa, a ne konstrukcije kao cjeline. Mogućnost za kvantificiranjem veličine požara na konstrukciju je kompliciran postupak. Pri projektiranju ili procjeni stanja požarom zahvaćene konstrukcije, teško je znati stvarno stanje odnosa temperatura-vrijeme. Vizualni pregled može dati osnovne informacije o maksimalnoj temperaturi koja je mogla utjecati na stanje konstrukcijskih elemenata u smislu promjene boje i slično. Mjerenjem požarnog intenziteta mogu se pretpostaviti različiti scenariji koji bi mogli biti primijenjeni na proračunu odziva konstrukcije. Takvim pristupom mogla bi se kvantificirati skala stanja oštećenosti i bolje razumjeti oštećenje konstrukcijskih elemenata ili konstrukcije općenito.

Procjenom intenziteta požara na osnovi krivulje osjetljivosti moguće je predvidjeti stanje oštećenosti u kojem se nalazi primjerice stup, kao što je istraživao Rush sa suradnicima [42]. Kako bi se definirala vrijednost intenziteta stvarnog požara na krivulji vrijeme-temperatura za tri referentne visine, tri su razine stupa pretvorene u područja ispod standardne ISO požarne krivulje: ukupna površina ispod krivulje; ukupna površina ispod krivulje, ali iznad 150 °C; i ukupna površina ispod krivulje koja je iznad 400 °C. Ovi požari su primijenjeni kao mjera intenziteta unutar krivulje osjetljivosti iz kojih se može očitati vjerojatnost da će se stup naći u jednoj od faza oštećenosti. Vjerojatnost za oštećenje razine 4 (ds4) za intenzitet požara u 60-oj minuti otprilike je 40 %; vjerojatnost razine 3 (ds2) požara je oko 80 %; vjerojatnost razine 2 (ds2) je oko 97 % i gotovo 100 % da će biti oštećenje razine 1 (ds1). Ograničenjem krivulje ispod vrijednosti temperature od 400 °C očekuje se da će se stup naći u fazi 0 odnosno da požar neće imati utjecaj na njega.

Naser i ostali [52] objedinili su moderan koncept upotrebe računane inteligencije za predviđanje oštećenosti nastalih uslijed požara, ali i otpornosti betonskih stupova na požar. Računalnom inteligencijom, odnosno genetskim programiranjem moglo bi se

s velikom preciznošću otkriti oštećenje betonskog elementa i detektirati otpornost na požar betonskih stupova za izloženost požaru više od četiri sata.

Sustav za procjenu štete od požara razvijen u radu [53] uzima u obzir bazu podataka dobivenu inspekcijom AB konstrukcija preko sljedećih varijabli: promjene boje (CD), širini pukotine (CR), dubini degradiranog betona (SP), temperature grijanja (TP), omjera proračunske tlačne čvrstoće betona s izmjerenom (RCS) i dubine karbonatizacije betona (CA). Dobiveni su sljedeći zaključci: trenutačno dostupne metode za procjenu oštećenosti konstrukcija u požaru uvelike se oslanjaju na iskustvo i znanje osobe zadužene za pregled konstrukcije i zato je teško dobiti objektivne i pouzdane rezultate. Međutim, sustav dijagnosticiranja štete od požara (FDDS), predložen u ovom radu, može pružiti dosljedne i objektivne rezultate jer se na temelju neizrazite logike ("Fuzzy theory") može osigurati sveobuhvatno razmatranje podataka dobivenih pregledom i ispitivanjima na terenu. S obzirom na podudarnost s rezultatima dobivenim profesionalnom inspekcijom AIJ metodom, predlaže se primjena FDDS metode u ovom polju. FDDS metoda može pridonijeti povećanju pouzdanosti ocjene razreda oštećenosti AB elemenata u požaru. Problem je ove metode taj što se ocjena požarnog oštećenosti može dobiti isključivo za element, a nije primjenjiva za ocjenu stanja AB čitave konstrukcije. Dodatna istraživanja su nužna za potpunu aplikaciju FDDS metode.

#### 4. Zaključak

Do sada najčešći način popravka AB elemenata koji su opterećeni na savijanje jest metoda povećanja poprečnog presjeka, ojačanje polimerima ojačanih vlakana (FRP) i ojačanje čeličnim pločama (spojenim vijcima u beton) [54-56]. Metoda povećanja poprečnog presjeka je jednostavna, sofisticirana i široko primjenjiva metoda. Moguća primjena je na nosivim betonskim elementima grede, stupa, ploče, temelja i dr. Također, poznata je kao najjeftinija metoda, ali treba predvidjeti smanjenje unutarnjeg svijetlog otvora prostora. Metoda ojačanja FRP-om primjenjuje se na način da se polimerima ojačana vlačna (šipke, lamele, trake) vežu na vanjske stijenke (lijepi ili sidri) ili umeću u prethodno izrezane utore. Također, metoda je široko primjenjiva zbog prednosti koje ima, a to su mala volumna težina, visoka čvrstoća i otpornost na koroziju [50]. Ojačanjem omatanjem i sidrenjem čeličnim ploča na stijenke betonskog elementa pridonosimo povećanju vlačne i tlačne nosivosti AB greda (omatanje FRP-om pridonosi isključivo tlačnoj nosivosti). Sidrenje čeličnih ploča u beton izvodi se preko anker vijaka. Ovaj tip ojačanja također je pokazao povećanja u posmičnoj čvrstoći, krutosti i duktilnosti betonskog elementa.

Požar kao bilo koje drugo izvanredno djelovanje treba shvatiti ozbiljno već od prvotne faze projektiranja, preko izvođenja pa sve do održavanja građevina. Iako je općeprihvatljivo društveno mišljenje da je utjecaj djelovanja požara na drvene ili čelične konstrukcije značajan (ponekad i neopravdano), mišljenje laika je kako armiranobetonske konstrukcije ne gore i kao takve

vrlo malo stradaju prilikom požara. S inženjerskoga stajališta, proračun AB konstrukcija na djelovanje požara je jednoznačan, ali još uvijek s puno nepouzdanosti koje je potrebno uzeti u obzir. Prilikom visokih temperatura dolazi do niza fizikalnih i kemijskih procesa unutar AB elemenata, a koji su teško vidljivi golim okom i doprinose smanjenju nosivosti samih elemenata. Prema novijim istraživanjima, faza hlađenja predstavlja izrazito opasan period u vremenskom procesu požara te je u mnogočemu ova faza i opasnija nego kod ostalih konstrukcijskih materijala. Pravilno projektiranje, izvođenje i održavanje građevine, kao što je već spomenuto, doprinose požarnoj otpornosti građevine. Međutim, požari se događaju i događat će se, pa iz stečenih iskustava procjene stanja konstrukcije nakon izvanrednih djelovanja, poput potresa ili požara, moramo neprestano usavršavati norme i pravila vezane za ponašanje svih vrsta konstrukcija. Procjena stanja postojećih konstrukcija zahtjevan je proces sam po sebi, neovisno o tomu radi li se procjena preostale mehaničke otpornosti konstrukcije bez izvanrednog djelovanja na tu konstrukciju, ili procjena stanja nakon određenog izvanrednog djelovanja [57]. Sama procjena stanja AB konstrukcije nakon požara uvelike ovisi o iskustvu inženjera i ovlaštene osobe te je kontinuirana edukacija stručnjaka nužan preduvjet za uspješnu procjenu. Osnovno načelo vodećih svjetskih normi za projektiranje konstrukcija je zaštita ljudskih života, odnosno u slučaju požara projektirano vrijeme potrebno za evakuaciju ljudi bez značajnih ljudskih žrtava. Postupak projektiranja nakon požara ovisi ponajprije o stanju materijala i konstrukcije [58], odnosno interpretaciji ovlaštenog inženjera u pogledu preostale nosivosti i razine oštećenosti postojećih AB elemenata. Donositelji odluka, vlasnici i/ili investitori u dogovoru s ovlaštenim inženjerom donose odluku o tome u kojoj je mjeri isplativo "spasiti" građevinu ili ju treba ukloniti.

U ovom radu dan je kratak osvrt na problematiku požara u AB konstrukcijama te je predstavljen utjecaj visokih temperatura na njihova svojstva. Ukratko je prikazan normativni okvir u kojem je istaknuto kako je požarno opterećenje puno više od iščitavanja tabličnih podataka te za svaku konstrukciju pojedinačno postoji velik broj mogućih scenarija požarnog djelovanja. Norme i pravila za projektiranje građevina otpornih na požar neprekidno se mijenjaju, pa je potrebno kontinuirano usavršavati i implementirati nova znanja stečena znanstvenim istraživanjima i studijama slučaja. Prema Eurokodu [12], moguće je koristiti tablične podatke (EN 1992-1-2, poglavlje 5), jednostavne proračunske metode za procjenu pojedinog elementa (EN 1992-1-2, poglavlje 4.2) te napredne proračunske metode (EN 1992-1-2, poglavlje 4.3).

Glavni dio ovoga rada odnosi se na metode procjene preostale mehaničke otpornosti i stabilnosti AB konstrukcija nakon djelovanja požara. Osnovni postupci, s pratećim problemima, detaljno su opisani te je preporučeno hodogram procjene stanja AB elemenata nakon djelovanja požara. Osim toga, prikazani su i objašnjeni nužni postupci i istražne radnje koji bi trebali biti sastavni dio elaborata o procjeni stanja mehaničke otpornosti i stabilnosti AB konstrukcija nakon požara.

## LITERATURA

- [1] Gernay, T.: Fire resistance and burnout resistance of reinforced concrete columns, *Fire Saf. J.*, 104 (2019) March, pp. 67-78, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.01.007>
- [2] Fire Safe Europe, <https://firesafeeurope.eu/>.
- [3] The Geneva Association: Fire and Climate Risk, *Bull. World Fire Stat.*, no. 29 (2014), pp. 12–15.
- [4] [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_building\\_or\\_structure\\_fires](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_building_or_structure_fires).
- [5] International Association of Fire and Rescue Services: World Fire Statistics, Report No 24 (2019).
- [6] [https://en.wikipedia.org/wiki/Notre-Dame\\_de\\_Paris\\_fire](https://en.wikipedia.org/wiki/Notre-Dame_de_Paris_fire).
- [7] Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Grenfell\\_Tower\\_fire](https://en.wikipedia.org/wiki/Grenfell_Tower_fire).
- [8] Khoury, G.A., Anderberger, Y., Both, K., Fellinger, J., Hoj, N.P., Majorana, C.: Fire design for concrete structures – materials, structures and modelling, *International Federation for Structural Concrete (fib)*, no. 38 (2007).
- [9] Xiang, S. i dr.: A DIC-based study on compressive responses of concrete after exposure to elevated temperatures, *Materials (Basel)*, 12 (2019) 13.
- [10] Rozsypalova, I., Schmid, P., Danek, P.: Determining the Condition of Reinforced and Prestressed Concrete Structures Damaged by Elevated Temperatures, *Procedia Eng.*, 195 (2017), pp. 120–126
- [11] Mikulica, K., Hela, R., Dufka, Á.: Determination of properties of concrete floor after a fire and renovation, in *Key Engineering Materials*, 2016.
- [12] EN 1992-1-2, Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1–2: General Rules – Structural Fire Design, (2004).
- [13] Taerwe, L., Bamonte, P., Both, K., Denoel, J.F., Diederichs, U., Dotreppe, J.C., Felicetti, R., Fellinger, J., Franssen, J.M., Gambarova, P.G., Hoj, N.P., Lennon, T., Meda, A., Msaad, Y., Ožbolt, J., Periškić, G., Riva, P., Robert, F., Van Acker, A.: Fire design of concrete structures – structural behaviour and assessment, *International Federation for Structural Concrete (fib)* 2008.
- [14] ACI/TMS Committee 216 ACI 216.1-97 / TMS 0216.1-97: Standard Method for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies, *Manual of Concrete Practice* (1997).
- [15] Buch, S.H., Sharma, U.K.: Empirical model for determining fire resistance of Reinforced Concrete columns, *Constr. Build. Mater.*, 225 (2019), pp. 838–852.
- [16] Martins, A.M.B., Rodrigues, J.P.C.: Fire resistance of reinforced concrete columns with elastically restrained thermal elongation, *Eng. Struct.*, 2010.
- [17] Lo Monte, F., Felicetti, R., Meda, A., Bortolussi, A.: Assessment of concrete sensitivity to fire spalling: A multi-scale experimental approach, *Constr. Build. Mater.*, 212 (2019), pp. 476–485.
- [18] Luo, Y., Su, J., Xu, Y., Ou, T., Peng, X.: Axial compression performance of post-fire concrete columns strengthened using thin-walled steel tubes, *Sustain.*, 11 (2019) 18, pp. 1–19.
- [19] Yang, Y., Feng, S., Xue, Y., Yu, Y., Wang, H., Chen, Y.: Experimental study on shear behavior of fire-damaged reinforced concrete T-beams retrofitted with prestressed steel straps, *Constr. Build. Mater.*, 209 (2019), pp. 644–654.
- [20] Elshorbagy, M., Abdel-Mooty, M.: During fire events based on nonlinear numerical SIMU- A validation of numerical simulation of RC-beams during fire events using ANSYS against experimental work , and failure scenarios. Effect of lateral support stiffness on the structural response of RC-," *Eng. Fail. Anal.*, p. 104297 (2019).
- [21] Kuehnen, R.T., Youssef, M.A.: Equivalent standard fire duration to evaluate internal temperatures in natural fire exposed RC beams, *Fire Saf. J.*, 108 (2019), June, p. 102831.
- [22] Albuquerque, G.L., Silva, A.B., Rodrigues, J.P.C., Silva, V.P.: Behavior of thermally restrained RC beams in case of fire, *Eng. Struct.*, 174 (2018), July, pp. 407–417.
- [23] Bamonte, P., Kalaba, N., Felicetti, R.: Computational study on prestressed concrete members exposed to natural fires, *Fire Saf. J.*, 97 (2018), pp. 54–65.
- [24] Gales, J.: Structural fire performance of contemporary post-tensioned concrete construction, 2016.
- [25] Salah Dimia, M., Guenfoud, M., Gernay, T., Franssen, J.M.: Collapse of concrete columns during and after the cooling phase of a fire, *J. Fire Prot. Eng.*, 2011.
- [26] Gernay, T., Dimia, M.S.: Structural behaviour of concrete columns under natural fires, *Engineering Computations (Swansea, Wales)*, 2013.
- [27] Behnam, B.: On the interaction between span length and opening ratio of RC frames under natural fires, *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.*, 2018.
- [28] Kodur, V., Hibner, D., Agrawal, A.: Residual response of reinforced concrete columns exposed to design fires," *Procedia Eng.*, 210 (2017), pp. 574–581.
- [29] Li, Y.H., Franssen, J.M.: Test results and model for the residual compressive strength of concrete after a fire, *J. Struct. Fire Eng.*, 2011.
- [30] Arna'ot, F.H., Abid, S.R., Özakça, M., Tayşi, N.: Review of concrete flat plate-column assemblies under fire conditions, *Fire Saf. J.*, 93 (2017), pp. 39–52.
- [31] International Organization for Standardization, "ISO 834-1: Fire Resistance Tests - Elements of building Construction - Part 1: General Requirement," in ISO 834: Fire Resistance Tests - Elements of building Construction, 1999.
- [32] Ali Musmar, M.: A case study on fire damage assessment of a two-story building with precast pretensioned hollow core slabs, *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, 2019.
- [33] Young Hwang, J., Kwak, H.G.: Evaluation of post-fire residual resistance of RC columns considering non-mechanical deformations, *Fire Saf. J.*, 100 (2018), pp. 128–139.
- [34] Kumar, P., Kodur, V.K.R.: Modeling the behavior of load bearing concrete walls under fire exposure, *Constr. Build. Mater.*, 154 (2017), pp. 993–1003.
- [35] Magisano, D., Liguori, F., Leonetti, L., de Gregorio, D., Zuccaro, G., Garcea, G.: A quasi-static nonlinear analysis for assessing the fire resistance of reinforced concrete 3D frames exploiting time-dependent yield surfaces, *Comput. Struct.*, 212 (2019), pp. 327–342.
- [36] Elbayomy, M.S., Salem, H.M.: Numerical assessment of midrise multi-storey reinforced concrete framed structures subjected to fire, *Alexandria Eng. J.*, 58 (2019) 2, pp. 773–788.

- [37] Li, Z., Liu, Y., Huo, J., Rong, H., Chen, J., Elghazouli, A.Y.: Experimental assessment of fire-exposed RC beam-column connections with varying reinforcement development lengths subjected to column removal, *Fire Saf. J.*, 99 (2018) May, pp. 38–48.
- [38] Li, Z., Liu, Y., Huo, J., Elghazouli, A.Y.: Experimental and analytical assessment of RC joints with varying reinforcement detailing under push-down loading before and after fires, *Eng. Struct.*, 189 (2019), pp. 550–564.
- [39] Stylianidis, P.M., Nethercot, D.A., Izzuddin, B.A., Elghazouli, A.Y.: Study of the mechanics of progressive collapse with simplified beam models, *Eng. Struct.*, 2016.
- [40] Liu, X., Yu, C., Quan, W., Chen, L.: Inspection, materials testing and field testing of a prestressed concrete box bridge after fire exposure, *Fire Saf. J.*, 108 (2019), p. 102852.
- [41] Zhang, D., Zhang, J., Xiong, H., Cui, Z., Lu, D.: Taking Advantage of Collective Intelligence and BIM-Based Virtual Reality in Fire Safety Inspection for Commercial and Public Buildings, *Appl. Sci.*, 9, 5068 (2019), doi:10.3390/app9235068
- [42] Rush, D., Lange, D.: Towards a fragility assessment of a concrete column exposed to a real fire – Tisova Fire Test, *Eng. Struct.*, 150 (2017), pp. 537–549.
- [43] Kang, H., Cho, H., Choi, S., Heo, I., Kim, H., Kim, K.S.: Estimation of Heating Temperature for Fire-Damaged Inference System, *Materials (Basel)*, v.12(23); (2019), <https://doi.org/10.3390/ma12233964>
- [44] Yoshida, M., Okamura, Y., Tasaka, S., Shimode, T.: A Study On Temperature Estimation In Concrete Members After Fire, *Fire Saf. Sci.*, 1994.
- [45] Yim, H.J., Park, S.J., Kim, J.H., Kwak, H.G.: Nonlinear ultrasonic method to evaluate residual mechanical properties of thermally damaged concrete, *ACI Mater. J.*, 2014.
- [46] Alqassim, M.A., Jones, M.R., Berlouis, L.E.A., Nic Daeid, N.: A thermoanalytical, X-ray diffraction and petrographic approach to the forensic assessment of fire affected concrete in the United Arab Emirates, *Forensic Sci. Int.*, vol. 264 (2016), pp. 82–88.
- [47] Torić, N., Boko, I., Juradin, S., Baloević, G.: Mechanical properties of lightweight concrete after fire exposure, *Structural concrete*, 17 (2016) 6., doi:10.1002/suco.201500145
- [48] Lee, J., Kim, H.S., Kim, N., Ryu, E.M., Kang, J.W.: Learning to detect cracks on damaged concrete surfaces using two-branched convolutional neural network, *Sensors (Switzerland)*, 19 (2019) 21.
- [49] Cioni, P., Croce, P., Salvatore, W.: Assessing fire damage to r.c. elements, *Fire Saf. J.*, 36 (2001) 2, pp. 181–199.
- [50] Molken, T., Van Coile, R., Gernay, T.: Assessment of damage and residual load bearing capacity of a concrete slab after fire: Applied reliability-based methodology, *Eng. Struct.*, 150 (2017), pp. 969–985.
- [51] Constructies, V.B.: Reliability-based decision making for concrete elements exposed to fire. 2015.
- [52] Naser, M.Z.: Heuristic machine cognition to predict fire-induced spalling and fire resistance of concrete structures, *Autom. Constr.*, 106 (2019), pp. 102916.
- [53] Cho, H.C., Lee, D.H., Ju, H., Park, H.C., Kim, H.Y., Kim, K.S.: Fire damage assessment of reinforced concrete structures using fuzzy theory, *Appl. Sci.*, 7 (2017) 5.
- [54] Kišiček, T., Sorić, Z., Galić, J.: Određivanje progiba betonskih nosača s armaturom od polimera armiranih vlaknima, *Građevinar*, 60 (2008), 6, pp. 499–511
- [55] Kišiček, T., Stepinac, M., Renić, T., Hafner, I., Lulić, L.: Strengthening of masonry walls with FRP or TRM, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 10, pp. 937–953, <https://doi.org/10.14256/JCE.2983.2020>
- [56] Sorić, Z., Kišiček, T., Galić, J.: Deflections of concrete beams reinforced with FRP bars, *Materials and structures*, 43 (2010), pp. 73–90, doi:10.1617/s11527-010-9600-1
- [57] Stepinac, M., Kisicek, T., Renić, T., Hafner, I., Bedon, C.: Methods for the assessment of critical properties in existing masonry structures under seismic loads—the ARES project, *Appl. Sci.*, 10 (2020) 5.
- [58] Torić, N., Boko, I., Peroš, B.: Degradation of mechanical properties of high-strength concrete after exposure to fire, *GRAĐEVINAR*, 63 (2011) 12, pp. 1033–1041.