



Knowledge FOr Resilient soCiEty

www.kforce.uns.ac.rs

Bezbednost zgrada od požara

*pristup i praksa na
Zapadnom Balkanu*

Editori
dr Mirjana Laban, dr Igor Džolev,
dr Mirjana Malešev, dr Vlastimir Radonjanin



eBOOK

Bezbednost zgrada od požara
Pristup i praksa zapadnog Balkana

Editori:

**dr Mirjana Laban, dr Igor Džolev,
dr Mirjana Malešev, dr Vlastimir Radonjanin**

Novi Sad, 2020.

**Izdavač: Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka,
Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6, Srbija**

Recenzeti:

dr Meri Cvetkovska, dr Ana Trombeva Gavriloska
Ss. Cyril and Methodius University in Skopje, North Macedonia

Urednici i lektori za izdanje na srpskom i bosanskom jeziku:

dr Mirjana Laban, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija
dr Jelena Marković, Univerzitet u Tuzli, Bosna i Hercegovina

Tehnički urednik: dr Anka Starčev - Ćurčin, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija

Grafički dizajn: Futura doo, Novi Sad

CIP - Каталогизација у публикацији
Библиотеке Матице српске, Нови Сад

614.84:728.22(497-15)(082)

BEZBEDNOST zgrada od požara [Elektronski izvor] : pristup i praksa zapadnog Balkana / editori
Mirjana Laban ... [et al.].

- Novi Sad : Fakultet tehničkih nauka, 2020 (Novi Sad : Futura).

- 1 elektronski optički disk (CD-ROM) ; 12 cm

Sistemske zahteve: Nisu navedeni. - Nasl. s naslovnog ekrana. - Bibliografija uz svaki rad.

ISBN 978-86-6022-292-5

a) Противпожарна заштита -- Стамбене зграде -- Западни Балкан -- Зборници

COBISS.SR-ID 21298697

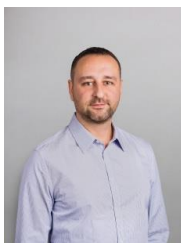
SADRŽAJ:

PREDGOVOR UREDNIKA	ix
Deo I – Požari, materijali i konstrukcije	
1. INŽENJERSTVO BEZBEDNOSTI OD POŽARA <i>Edisa Nukić, Jelena Marković</i>	2
2. KARAKTERISTIKE GRAĐEVINSKIH MATERIJALA NA VISOKIM TEMPERATURAMA <i>Vesna Bulatović, Mirjana Malešev</i>	44
3. POŽARNA OTPORNOST KONSTRUKCIJA <i>Igor Džolev, Đorđe Lađinović</i>	84
Deo II – Procena i sanacija konstrukcija	
1. OŠTEĆENJA ARMIRANOBETONSKIH KONSTRUKCIJA UZROKOVANA POŽAROM I MOGUĆNOSTI SANACIJE <i>Mirjana Malšev, Vlastimir Radonjanin</i>	120
2. PROCENA STANJA I SANACIJA AB KONSTRUKCIJE OŠTEĆENE U POŽARU – STUDIJA SLUČAJA <i>Vlastimir Radonjanin, Mirjana Malešev</i>	136
Deo III – Zakonodavstvo zapadnog Balkana i studije slučaja	
1. PERSPEKTIVE INŽENJERSTVA BEZBEDNOSTI OD POŽARA NA ZAPADNOM BALKANU <i>Jelena Markovića, Edisa Nukić</i>	149
2. POŽARNA BEZBEDNOST FASADA – REGULATIVA U ZEMLJAMA ZAPADNOG BALKANA I U ZEMLJAMA EVROPSKE UNIJE <i>Olivera Bukvić, Suzana Draganić, Mirjana Laban, Vlastimir Radonjanin</i>	159
3. ENERGETSKA REHABILITACIJA I BEZBEDNOST OD POŽARA FASADA VISOKIH STAMBENIH ZGRADA <i>Suzana Draganić, Mirjana Malešev, Olivera Bukvić, Mirjana Laban</i>	175
ZAKLJUČNE NAPOMENE	196
<i>Izvod iz recenzije</i>	197

O UREDNICIMA



Dr Mirjana Laban je vanredni profesor na Univerzitetu u Novom Sadu, Fakultetu tehničkih nauka, jedan od osnivača i rukovodilac osnovnih, master i doktorskih akademskih studija Upravljanje rizikom od katastrofalnih događaja i požara, gde predaje i više predmeta. Pomoćnik je za nauku direktora Departmana za građevinarstvo i geodeziju. Ima više od 15 godina iskustva u istraživanju u oblasti upravljanja rizikom, pretežno u oblasti bezbednosti od požara. Učestvovala je u više nacionalnih i međunarodnih projekata (Erasmus, COST, bilateral, IPA CBC) i publikovala je više od 150 stručnih i naučnih radova u časopisima i na konferencijama. Učestvovala je u organizaciji i naučnim odborima više desetina nacionalnih i međunarodnih konferencija.



Dr Igor Džolev je ekspert u oblasti konstrukcija i uticaja požara na konstrukcije, sa dodatnim kompetencijama u oblastima zemljotresnog inženjerstva i energetske efikasnosti zgrada. Stekao je diplomu doktora nauka 2018. godine na Univerzitetu u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, gde je i izabran za docenta, 2019. godine.



Dr Mirjana Malešev is redovni profesor Univerziteta u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, rukovodilac doktorskih studija Građevinarstvo i rukovodilac Laboratorije za ipotivanje građevinskih materijala i konstrukcija. Posедуje bogato profesionalno iskustvo i ekspert je za procenu stanja i sanaciju betonskih i zidanih konstrukcija oštećenih u požaru i zemljotresu. Publikovala je više od 300 stručnih i naučnih radova, uključujući i 16 naučnih radova u SCI časopisima. Citirana je više od 700 puta u međunarodnim časopisima.



Dr Vlastimir Radonjanin je redovni profesor Univerziteta u Novom Sadu, šef katedre za građevinske materijale, procenu stanja i sanaciju konstrukcija i direktor Departmana za građevinarstvo i geodeziju Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. Poseduje bogato profesionalno iskustvo i ekspert je za procenu stanja i sanaciju betonskih i zidanih konstrukcija oštećenih u požaru i zemljotresu. Publikovao je više od 350 stručnih i naučnih radova, uključujući i 20 naučnih radova u SCI časopisima. Citiran je više od 750 puta u međunarodnim časopisima.

SPISAK AUTORA RADOVA

Đorđe Ladinović	Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija
Edisa Nukić	Rudarsko geološko građevinski fakultet, Univerzitet u Tuzli, Bosna i Hercegovina
Igor Džolev	Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija
Jelena Marković	Rudarsko geološko građevinski fakultet, Univerzitet u Tuzli, Bosna i Hercegovina
Mirjana Laban	Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija
Mirjana Malešev	Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija
Olivera Bukvić	Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija
Sokol Dervishi	Fakultet za arhitekturu i inženjerstvo, Epoka Univerzitet u Tirani, Albanija
Suzana Draganić	Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija
Vesna Bulatović	Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija
Vlastimir Radonjanin	Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija

PREDGOVOR

Požari u zgradama su danas veći, nepredvidljiviji i opasniji nego ikada pre. Savremena dešavanja pokazuju da, sa modernim načinom života i privređivanja, požari prouzrokuju sve veće rizike po ljudske živote i štete po materijalna dobra i prirodno okruženje.

Iako je hazarde poput požara nemoguće u potpunosti sprečiti, cilj naučnih istraživanja je, kao i struke u privredi, da prvenstveno umanje mogućnost nastajanja požara, a ukoliko do požara ipak dođe, da se njegove posledice ograniče, odnosno da se spreči gubitak ljudskih života, a oštećenje objekata i imovine svede na minimalnu moguću meru.

Procene rizika od požara u velikoj meri se oslanjaju na istorijske podatke i statistiku o prethodnim događajima, ali trenutno ne postoje evropski standardi za metodologiju prikupljanja i analizu podataka o požarima, pa je teško porediti nacionalne statističke rezultate o žrtvama požara i nastaloj šteti. Dostupni podaci ukazuju na značajne napretke u bezbednosti od požara tokom poslednjih decenija, ali požari u zgradama, naročito stambenim, i dalje ostaju razlog za posebnu brigu i pažnju.

Bezbednost zgrada od požara zavisi od mnogo faktora i zahteva holistički pristup i istovremenu implementaciju prevencije i konstrukcionih mera, uzimajući u obzir performanse materijala i sistemska rešenja za zgradu i njen omotač. U tom smislu, potrebno je da građevinski materijali i proizvodi budu izabrani, ugrađeni i održavani odgovorno i u skladu sa zakonskom regulativom.

Savremene građevine moraju da budu održive, a u pogledu bezbednosti od požara to znači da moramo graditi zgrade otporne na požar. Samo zgrade koje mogu da se odupru požaru, adaptiraju i oporave od požara i povrate svoje osnovne funkcije u vremenski optimalnom roku i na efikasan način, mogu da doprinesu održivoj budućnosti urbanih prostora.

Ova knjiga je nastala kao rezultat saradnje učenika *Knowledge FOr Resilient soCiEty (K-FORCE)* - *Znanje za otporno društvo* (K-FORCE) Erasmus + projekta, čiji je cilj da unapredi postojeće i uspostavi nove programe visokog obrazovanja i celoživotnog učenja u oblasti upravljanja rizicima od katastrofalnih događaja i požara na zapadnom Balkanu.

Radovi autora u knjizi prikazuju postupke kako unaprediti bezbednost i zaštitu od požara, pri projektovanju, gradnji i sanaciji objekata. Potrebno je pored tradicionalnih, primeniti i nove materijala, napredne konstruktivne tehnike i mere zaštite od požara. Iako na prvi pogled ove aktivnosti mogu da deluju kao uvećanje troškova gradnje, održavanja ili sanacije, sprovođenje ovih mera je upravo ulaganje u budućnost, a sve u cilju obezbeđenja sigurnog života i rada u objektima, kao i njihovu funkcionalnost. Naročito treba voditi računa da, nakon eventualnog slučaja nastanka požara, objekti i dalje imaju upotrebnu vrednost, i da se u prihvatljivom vremenskom roku mogu opet privesti nameni.

Svojim sadržajem ova knjiga treba da doprinese boljem razumevanju složenosti problematike požara prilikom projektovanja, gradnje, sanacije i održavanja objekata, kao i da bude korisna literatura kako za studente, tako i za profesionalce iz oblasti bezbednosti od požara.

Urednici

Zahvalnost

Knjiga "*Fire Safety in Buildings - A Western Balkan approach and practise*" nastala je kao rezultat K-Force projekta i saradnje visokoškolskih ustanova iz Albanije, Bosne i Hercegovine i Srbije u pripremi i implementaciji master studijskih programa u oblasti upravljanja rizikom od katastrofalnih događaja i požara. Ovo izdanje je prevod originalnog izdanja na engleskom jeziku.

Urednici ove knjige se zahvaljuju učesnicima projekta *Knowledge FOR Resilient soCiEty (K-FORCE) - Znanje za otporno društvo* (K-FORCE), za njihov doprinos, pomoć i podršku. Posebna zahvalnost se odnosi na autore radova, koji su prilažući svoja istraživanja omogućili publikovanje ove knjige.

Deo I

Požari, materijali i konstrukcije

INŽENJERSTVO BEZBEDNOSTI OD POŽARA

Edisa Nukić, Jelena Marković

1. UVOD

Prilikom projektovanja i građenja objekta mora se osigurati i zaštita od požara koja treba biti integrirana u proces projektovanja od samog početka. Budući da se vrlo često nastanak požara vezuje za neispunjenost adekvatnih preventivnih mjera kroz planiranje, projektovanje i izgradnju važno je da svi uključeni u projektovanje zgrade - arhitekta, inženjeri, dizajneri enterijera, budu svjesni pitanja bezbjednosti od požara u svakoj fazi procesa. Neke elemente koji su neophodni za zaštitu od požara, a koji nisu projektovani u fazi planiranja građevine, teško je kasnije inkorporirati i često je izuzetno skupo.

Bezbjednost od požara u zgradama određena je faktorima kao što su osiguranje evakuacije i spašavanja u slučaju požara, sposobnost objekta da se odupre uticaju požara i ograniči širenje vatre i dima (unutar objekta, kao i na susjedne objekte), te osiguranje pristupa vatrogasnim jedinicama za efikasne akcije spašavanja i gašenja.

U samom začetku vatrogastva i zakona iz ove oblasti značajnu ulogu imala su osiguravajuća društva koja su akcenat stavljala na zaštitu imovine, a ne na sigurnost života ljudi. Danas se, pored primarnih ciljeva zaštite od požara - zaštite života i imovine, navodi još jedan bitan cilj - održavanje funkcije. Jasno je da, bez obzira na štete koje prouzrokuje požar, ljudi moraju nastaviti vršiti svoje životne funkcije.

Za *sigurnost života ljudi* neophodno je stvoriti uslove za bezbjednu evakuaciju i sklanjanje od požara. Za ostvarenje ovog cilja neophodno je imati sistem za pravovremeno upozorenje, adekvatne puteve za evakuaciju, i osigurati da lica koja se evakušu nisu izložena djelovanju dima ili vatre tokom evakuacije. U nekim objektima potrebno je planirati posebne mjere i rješenja zbog prisustva osoba koje se ne mogu same spašavati, kao što su npr. bolnice sa nepokretnim pacijentima, institucije za njegu starih i hendikepiranih lica.

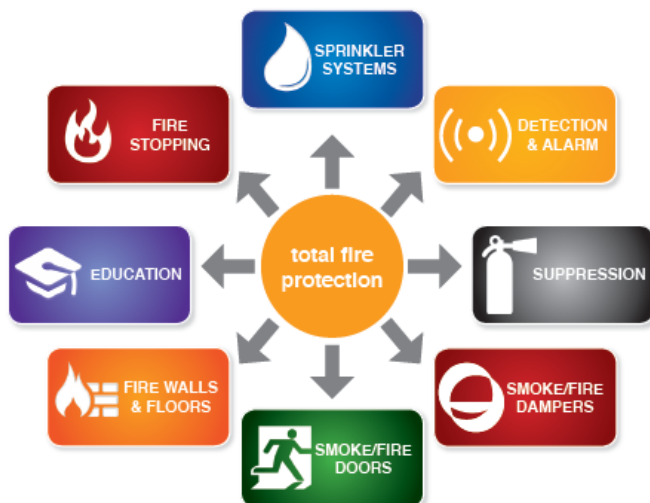
Zaštita imovine postiže se zaštitom građevinske konstrukcije, elemenata i sadržaja zgrade, ali i zaštitom od požara sa susjednih objekata. Pod zaštitom imovine podrazumijeva se i zaštita nematerijalnih vrijednosti kao što je prekid poslovanja ili nenadoknadivi gubitak kulturnog naslijeđa.

U postizanju cilju *zaštite životne sredine* primarna briga su emisije gasnih polutanata u dimu i tečnih polutanata koji nastaju korištenjem sredstava za gašenje požara, jer mogu imati značajan uticaj na okolinu. Efikasan način za ograničavanje ovih uticaja jeste gašenje požara u početnoj fazi, što je u zgradama najlakše postići ugradnjom stacionarnih instalacija za gašenje požara.

Složenost interakcije između ljudi, zgrada i požara je takva da se ne može primijeniti niti jedan jedinstveni pristup ili metoda proračuna na sve vrste zgrada u različitim okolnostima. Stoga inženjerstvo zaštite od požara zahtijeva od projektanta veći stepen angažovanja, odgovornosti i iskustva od puke primjene propisanih kodova. Koncept inženjerstva zaštite od požara primjenljiv je gdje god postoji opasnost od požara, pri čemu je neophodno kvantifikovati rizike i dati optimalno rješenje za primjenu preventivnih ili zaštitnih mjera (aktivne i pasivne mjere).

U slučaju požara, dobar dizajn građevine i njeno održavanje su od ključnog značaja u omogućavanju bezbjedne evakuacije ljudi, ali i ograničavanju širenja požara na minimalnu

moгуću mjeru, te osiguranju bezbjednog pristupa gasiocima i spasiocima. Najbolja rješenja uzimaju u obzir specifični dizajn svake građevine te način na koji je njeni stanari koriste, kombinujući pri tome aktivne i pasivne mjere, u holističkom pristupu (slika 1).



Slika 1. Holistički pristup zaštiti od požara
(www.lifesafetyservices.com)

1.1. Projektovanje zaštite od požara

Požar predstavlja jednu od najvećih opasnosti za život i imovinu u građevinskim objektima. Materijalne štete i ljudske žrtve izazvane požarima nisu zanemarive, kao ni prosječan broj požara koji se desi godišnje. Statistički podaci pokazuju da najveći broj požara nastaje na stambenim i javnim objektima. Zbog požara svake godine u Evropi u prosjeku 8 osoba od milion izgube život, dok veći broj bude hospitalizovan. Prema podacima Svjetskog statističkog centra u Ženevi, požari svake godine oštete svjetsku privredu za cca 1% bruto nacionalnog dohotka. Požare je vrlo teško spriječiti, pa se pitanjem ovog rizika intenzivno bave državne vlade koje svoje strategije zaštite od požara kontinuirano unapređuju. Zbog toga je uspostavljen veliki broj državnih i regionalnih propisa o zaštiti od požara posebno namijenjen za građevinske objekte (a naročito zgrade).

Teško je dati preciznu definiciju “inženjerstva bezbednosti od požara”. Prihvatljiva bi bila slijedeća: primjena naučnih dostignuća i inženjerskih principa na efekte požara u cilju smanjenja stradanja ljudi i štete na imovini, kroz kvantifikaciju rizika i omogućavanje optimalnih rješenja sprovođenjem preventivnih mjera i mjera zaštite [3].

Preciznije govoreći, osnovni cilj inženjeringa zaštite od požara je smanjenje rizika od smrtnog stradanja, ozljeda, materijalnih šteta i onečišćenja okoliša na prihvatljiv nivo. Iako specijalisti inženjeri zaštite od požara razvijaju i dostavljaju rješenja bezbjednog dizajna, često se od projektanata iz drugih područja traži da daju veliki doprinos načinu razvijanja strategije zaštite od požara.

Tri su glavna pristupa inženjerstva bezbednosti od požara, i to:

- *Komparativni pristup* kojim se dokazuje da projekat obezbeđuje nivo sigurnosti jednak onom koji bi bio dobijen primjenom propisanih kodova.

- *Deterministički* pristup kojem je cilj pokazati da se neki set definisanih uslova neće pojaviti, a što je određeno na osnovu inicijalnih pretpostavki (najčešće najgoreg mogućeg slučaja). Kada postoji bilo kakva sumnja u pouzdanost ulaznih podataka, treba usvojiti konzervativni pristup. Ovo može zahtijevati korištenje egzaktnih sigurnosnih faktora kako bi se nadoknadile nejasnoće u pretpostavkama.
- *Probabilistički* pristup čiji je cilj da pokaže da je vjerovatnoća datog događaja koji je uslijedio prihvatljivo mala. Ovo se obično izražava u smislu godišnje vjerovatnoće pojave neželjenog događaja (na primjer, vjerovatnoća individualne smrti usljed požara od 10^{-6} ili jedan po milionu).

Koncept bezbjednosti od požara obezbeđuje okvir koji omogućava projektantima da pokažu da su funkcionalni zahtjevi zakonodavstva ispunjeni ili poboljšani, iako usvojena rješenja za projekat ne spadaju u preporuke propisanih kodova i smjernica. Pored toga, omogućava i funkcionalne ciljeve osim sigurnosti života koji se odnose na: zaštitu imovine, kontinuitet poslovanja, ciljeve zaštite životne sredine i održivosti. Kada postoji veća razlika između dizajna objekta i smjernica koje nude kodovi, tada se mogu zahtijevati analitičke tehnike koje analiziraju kontrolu rasta požara, kontrolu širenja dima i evakuacije ljudi kako bi se dokazala ukupna strategija zaštite od požara. Prvi korak u pripremi takve analize je definisanje geometrije zgrade, funkcionalno planiranje građevinskog materijala i generalno korišćenje zgrade.

Inženjerstvo bezbednosti / zaštite od požara može biti jedini održivi način da se postignu zadovoljavajući standardi požarne sigurnosti u nekim velikim i kompleksnim objektima, a često je najefikasniji način pri adaptaciji postojećih objekata i objekata kulturoloških vrijednosti. Može se korisno primjeniti za određene elemente projekta zgrade, pri čemu će se ostatak zgrade projektovati prema propisanim kodovima.

Upotreba metoda inženjeringa bezbednosti od požara omogućava prepoznavanje korisnih efekata. Na primjer, obezbjeđivanje automatskog sistema suzbijanja požara može umanjiti projektovanu veličinu požara, što zauzvrat može voditi ka ekonomičnijem projektu sistema kontrole dima ili smanjenom obimu zaštite od požara za predmetni objekat.

Elementi bezbednosti od požara mogu se lako identifikovati, a odnose se na sigurnost života i imovine. Te oblasti nisu uzajamno isključive obzirom da aktivnost koja povećava sigurnost života, može povećati i sigurnost imovine.

Osnovni aspekti inženjeringa bezbjednosti od požara su:

- Kontrola paljenja i sagorijevanja - kontrola zapaljivosti materijala unutar konstrukcije, kontrola rasta požara ili upravljanje zaštitom od požara - zabranom pušenja ili korištenja otvorenog plamena.
- Kontrola evakuacije - nametanjem zakonskih zahtjeva za obezbjeđenje odgovarajućih puteva za povlačenje ili edukacijom stanara.
- Detekcija i kontrola požara - instalacija sredstava za detekciju požara (manuelni i automatski sistemi); kontrola dima u požaru; sistemi za gašenje požara.
- Kontrola širenja požara u zgradi ili na okolnu imovinu - pasivne mjere zaštite (kao što su formiranje požarnih sektora) ili kontrola (određivanjem sigurnih) udaljenosti između zgrada ili mehaničkim sredstvima (kao što su ventilacija, dimni zasloni ili raspršivači).
- Sprečavanje rušenja konstrukcije u požaru - konstrukcijska zaštita od požara - barijere (sprječavanje prenošenja požara preko građevinskih elemenata i/ili konstrukcije); zaštita građevinskih elemenata i/ili konstrukcija.

1.2. Kontrola paljenja

1.2.1. Uvod

Zakoni iz oblasti gradnje i zaštite od požara jasno definišu bitne zahtjeve za građevinu koji se osiguravaju u projektovanju i građenju u domenu zaštite od požara. Građevine moraju biti projektovane i izgrađene tako da u slučaju izbijanja požara:

- očuvaju nosivost konstrukcije tokom određenog vremena,
- nastanak i širenje požara i dima unutar građevine bude ograničeno,
- širenje požara na susjedne građevine bude ograničeno,
- omogućiti da korisnici mogu neozlijeđeni napustiti građevinu, odnosno da se omogućiti njihovo spašavanje i
- omogućiti sigurnost spasilačkih službi.

Svaki od navedenih zahtjeva traži provođenje određenih građevinskih mjera i to:

- zaštitu nosivih konstrukcija građevine od djelovanja požara,
- dijeljenje građevine na manje prostorne cjeline (požarne sektore) odgovarajuće otpornosti na požar,
- odeljivanje izlaznih puteva iz zgrade konstrukcionim barijerama,
- izgradnja vatrogasnih pristupa oko građevine.

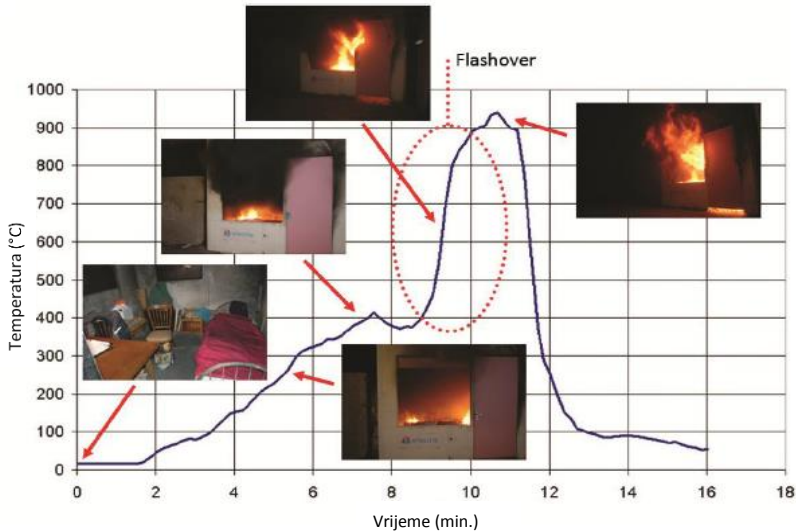
Navedeni zahtjevi, osim regulative kojom se definišu elementi požarne zaštite građevine, mogu se rješavati i inženjerskim metodama što je regulisano tačkom 2.3. Temeljnog evropskog dokumenta iz područja zaštite od požara.

Evropska regulativa o građevinskim proizvodima CPR 305/2011 - Osnovni zahtjevi za građevine i bitna obilježja građevinskih proizvoda, definiše Aneksom I, da građevinski radovi i objekat u cjelini, kao i njihovi pojedinačni dijelovi moraju odgovarati namjenjenoj upotrebi, uzimajući posebno u obzir zdravlje i sigurnost osoba uključenih u cjelovit ciklus izgradnje i eksploatacije objekta i radova. Kao prvi zahtjev stavljena je mehanička otpornost i stabilnost objekta, a drugi zahtjev se odnosi na sigurnost u slučaju požara, dok se ostali zahtjevi ne odnose na konstruktorske aspekte. U domenu zahtjeva sigurnosti u slučaju požara, između ostalih zahtjeva, navodi se da građevina mora biti projektovana i izgrađena tako da u slučaju požara mora očuvati kapacitet nosivosti konstrukcije tokom određenog vremena.

Pravilnim odabirom građevinskih materijala, građevinskih elemenata i konstrukcija s obzirom na njihovu otpornost na požar, te pravilnim projektovanjem građevine ispunjavaju se fundamentalni zahtjevi zaštite građevina od požara. Pored preduzetih građevinskih mjera zaštite vrlo je važna edukacija i obavještanje ljudi o mogućim uzrocima i mjestima nastajanja požara. Ispravnim postupanjem, znanjem i dostupnim tehničkim sredstvima djeluje se kako bi se otklonila ili smanjila požarna opasnost.

Na razvoj požara u građevinskom objektu utiču *količina i karakteristike gorivih materijala i dostupnost kiseonika*. Ako je požar u zatvorenom prostoru, kao što je zgrada, to će imati ogroman uticaj na ponašanje požara jer se toplota i dim ne mogu slobodno širiti. Takođe, širenje dima unutar zgrade je jedan od važnih aspekata kod projektovanja, pošto je u praksi odsustvo dima često odlučujuće za uspješnu evakuaciju ljudi iz objekta. Čak i zgrade prilikom čije izgradnje su korišteni nezapaljivi materijali, sadrže bez izuzetka materijale koji gore u određenim okolnostima. S druge strane, gorivi materijali, na osnovu provedenih ispitivanja, mogu imati zanemariv značaj prilikom požara.

Slika 2. prikazuje faze razvoja požara sa odgovarajućim požarnim rizicima kao što su: zapaljivost, širenje plamena, povećanje temperature, pojava dima, rušenje konstrukcije i sl.



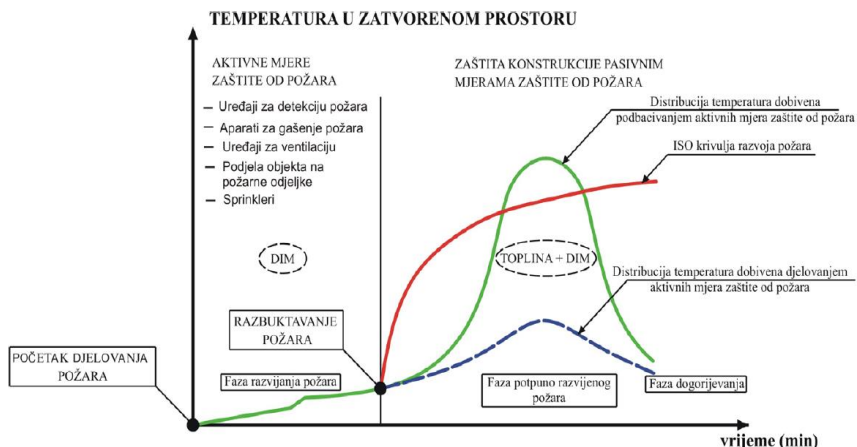
Slika 2. Razvoj požara i pojava flashover-a u prostoriji [10]

Dim obično sadrži nesagorjele pirolitičke gasove, a temperatura mu se povećava zbog oslobađanja toplote. U određenom trenutku, kada nivo radijacije iznosi oko 20 kW/m^2 i temperatura dimnog sloja bude oko $400 - 600^\circ\text{C}$, svi zapaljivi gasovi u prostoriji počinju sagorijevati u kratkom vremenu. Ovaj trenutak se naziva flashover (razbuktavanje požara) kada je intenzitet požara najveći.

Prema NFPA 921-2004, *flashover* je prelazna faza u razvoju požara u zatvorenom prostoru u kojoj površine izložene termalnoj radijaciji dostignu temperaturu paljenja, a vatra se širi velikom brzinom kroz prostor a kao rezultat toga požarom je zahvaćen cijeli zatvoren prostor. Flashover se događa kada sloj užarenih gasova dostigne nivo energetske radijacije (toka) na nezapaljenim predmetima od otprilike $15-20 \text{ kW/m}^2$. Taj nivo je obično dovoljan da zapali uobičajene zapaljive materijale, a odgovara temperaturama od minimum $500-600^\circ\text{C}$ ($932-1112^\circ\text{F}$). U svakoj zgradi cilj mora biti da se što duže ograniči širenje požara kako bi se omogućila bezbjedna evakuacija ljudi i rad spasilačkih ekipa.

Prije flashover-a, požar se može lokalizovati aktivnim mjerama za suzbijanje požara poput sprinklera (raspršivača vode) i ručnih aparata za gašenje, slika 3. Nakon flashover-a ove mjere aktivnog suzbijanja više ne mogu pomoći. Količina oslobođene toplote je jednostavno prevelika za efikasno suzbijanje požara. Pasivne mjere zaštite, kao što su kompartimentalizacija / odvajanje i požarne barijere, postaju važne za sprječavanje ili ograničavanje loma konstrukcije ili širenja požara.

Zavisno o karakteristikama objekta i požarnom opterećenju te mjerama i smjernicama za zaštitu ljudi i imovine može se izraditi scenario razvoja požara u objektu. Slika 3 prikazuje krive realnog i standardnog požara u zatvorenom prostoru, gdje su vidljive aktivne mjere zaštite koje imaju ulogu sprečavanja razbuktavanja požara i širenja dima.



Slika 3. Razvoj realnog i standardnog požara u zatvorenom prostoru [6]

Jedan od fundamentalnih zahtjeva zaštite od požara je pravilan odabir građevinskih materijala prema njihovom ponašanju u požaru. Požarne karakteristike građevinskih materijala prema kojima se mogu odrediti brzina širenja požara, vrsta i količina produkata izgaranja, te njegovo ponašanje u požaru odnose se na: gorivost, zapaljivost, brzinu širenja plamena, gorivo otkapavanje materijala, sposobnost stvaranja dima, toksičnih gasova i toplotnu moć. Pravilna primjena građevinskih materijala ključno zavisi o poznavanju navedenih karakteristika.

Prema normativu EN 13501-1 [14] građevinski materijali se ocjenjuju i klasifikuju na osnovu rezultata testova reakcije na požar, tabela 1.

Razlikuju se negorivi građevinski materijali (euroklase A1 i A2) i gorivi građevinski materijali (euroklase B, C, D, E i F) gdje je presudan faktor u klasifikaciji vrijeme koje prođe dok kod gorućeg proizvoda dođe do udarnog širenja plamena.

Tabela 1
Klasifikacija materijala prema EN 13501-1

<i>Klasifikacija materijala u pogledu reakcije na požar</i>	
A negorivi materijali	
A1	ne doprinosi požaru
A2	ne doprinosi požaru
B gorivi materijali	
B	vrlo ograničen doprinos požaru
C	ograničen doprinos požaru
D	prihvatljiv doprinos požaru
E	prihvatljivo ponašanje u požaru
F	svojestvo (u odnosu na odolijevanje plamenu) nije ustanovljivo
<i>Klasifikacija materijala - sposobnost stvaranja dima</i>	
s ₁	vrlo ograničena proizvodnja dima - malo dimi
s ₂	ukupna proizvodnja dima i porast količine dima su ograničeni - srednje dimi
s ₃	nema ograničenja za proizvodnju dima - jako dimi
<i>Klasifikacija materijala - gorivog otkapavanja materijala</i>	
d ₀	nema gorećih kapljica/čestica
d ₁	vremenski ograničena pojava gorećih kapljica/čestica
d ₂	pojava gorećih kapljica/čestica bez vremenskog ograničenja

U tabeli 2 prikazano je poređenje klasifikacije materijala s obzirom na doprinos požaru prema njemačkom standardu DIN 4102 [13] i europskom EN 13501-1:2010 [14].

Tabela 2
Klasifikacija materijala prema gorivosti

Doprinos požaru	Klasifikacija materijala		Materijal
	DIN 4102-1	EN 13501-1	
Minimalan negorivi materijal	A1	A1	Gips, kreč, cement, beton, kamen, staklo, metal, glina, keramika, pijesak
	A2	A2 – s ₁ , d ₀	Proizvodi kao u grupi A1, ali koji sadržavaju malu količinu organskog materijala
Mali Teško gorivi materijal	B1	B – s ₃ , d ₂	Gipsane ploče s različitim (tankim) oblogama, požarni usporivači na bazi drva
		C – s ₃ , d ₂	Fenolna pjena, gipsane ploče s različitim oblogama (tanjim od onih u razredu B)
Normalan Normalno gorivi materijal	B2	D – s ₃ , d ₂	Drveni proizvodi koji imaju debljinu veću od 10 mm i gustoću veću od 400 kg/m ³
		E – d ₂	Različite vrste vlaknastih ploča, izolacijski proizvodi i proizvodi od plastike
Veliki Lako gorivi materijal	B3	F	Proizvodi koji nisu ispitani na požar

Svi gorivi materijali u zgradi oslobađati će u uslovima požara i određenu količinu toplote koja će dodatno opterećivati konstrukciju zgrade, onemogućavati kretanje ljudi prema izlazima, a istovremeno će ubrzavati dalje širenje požara.

Ovu ukupnu količinu oslobođene toplote nazivamo *požarno opterećenje*. Požarno opterećenje dijeli se na:

- *imobilno* požarno opterećenje – predstavlja gorivi materijal ugrađen u građevinskim konstrukcijama objekta i enterijer prostorije (vrata, prozori, podne i stropne obloge, drvene krovne konstrukcije i sl.) i
- *mobilno* požarno opterećenje – predstavlja inventar u prostoru (namještaj, uskladištena roba, oprema i sl).

Većinu gorivih, i uslovno gorivih materijala u zgradama, čine različiti materijali prirodnog, sintetičkog i kombinovanog porijekla. Oni su sastavni dio konstrukcije zgrade ili se nalaze kao završne obloge i namještaj u pojedinim prostorima.

Požarno opterećenje će biti veće što je veća količina gorivih materijala u nekom prostoru, a njegovom povećanju će doprinijeti i materijali s visokom toplotnom moći.

U tabeli 3 date su toplotne moći gorivih materijala za proračun požarnog opterećenja [6].

Požarno opterećenje je relativan pojam, jer ponašanje nekog konstruktivnog elementa neće biti isto ako se toplotna moć zapaljenog materijala, koji može da ugrozi stabilnost konstruktivnog elementa, oslobodi u vrlo kratkom vremenskom intervalu ili to oslobađanje traje mnogo duže. Ovo će zavisiti od toga da li je zapaljeni materijal usitnjen ili u komadima, od vlažnosti zapaljenog materijala, od mogućnosti veće izmjene vazduha

potrebnog za pravilno i potpuno sagorijevanje, udaljenosti tog materijala od izvora toplote i još mnogih drugih faktora.

Maksimalne temperature koje se javljaju prilikom požara uglavnom zavise od požarnog opterećenja neke prostorije. Dakle, različita požarna opterećenja uslovljavaju i različite vrijednosti maksimalnih temperatura. Za opisivanje izgaranja različitih goriva u zatvorenim prostorima već niz godina postoje standardne temperaturne krivulje koje određuju zavisnost temperature o vremenu izgaranja dobivene na osnovu ispitivanja reprezentativnih goriva. Do danas su razvijene projektne krivulje požara za gotovo sve građevine i situacije kao i brzine rasta požara.

Tabela 3
Toplotne moći gorivih materijala Hu (MJ/kg)

Tipični materijali u zgradama			
Čvrste materije	Hu (MJ/kg)	Plastike	Hu (MJ/kg)
Drvo	~ 17,5	Poliuretan	~ 23-25
Celulozni materijali (odeća, pluta, papir, karton, svila, slama)	~ 19-20	Poliuretanska pjena	26
Vuna	~ 23	Polistiren, polipropilen	~ 40
Linoleum	~ 20	Polietilen	~ 40-44
Mast	41	Poliester	~ 30-31
Pamuk	~ 20	Celuloid	19
Guma	~ 30-32	Melaminska smola	18
Ugljovodnici			
Gasovi		Tečnosti	
Metan, etan	~ 50	Benzin, nafta, diesel	~ 44-45
Butan, propan	~ 46-50	Ulje	41
Acetilen, etilen, propilen	~ 45-48	Benzen	~ 40
		Benzil alkohol	33
		Metanol, etanol, špirit	~ 27-30
Ostali produkti			
Čvrste materije		Plastike	
Bitumen Asfalt	~ 40-41	ABS	~ 35-36
Koža	~ 20	Akril	28
Parafinski vosak	47	PVC	~ 17-20
Ugalj, drveni ugalj, antracit	~ 30	Polikarbonat	29
Guma (isopren)	45	Epoksi	34

Karakteristična vrijednost požarnog opterećenja (u MJ/m² prema Gumbel-ovoj podjeli tipa I) u zavisnosti od namjene objekta data je u tabeli 4 [12].

Tabela 4
Vrijednost požarnog opterećenja u zavisnosti od namjene objekta

Namjena	Prosječno	80% Fraktil*
Stambeni prostori	780	948
Bolničke sobe	230	280
Hotelske sobe	310	377
Biblioteke	1500	1824
Uredski prostori	420	511
Školske učionice	285	347
Tržni centri	600	730
Pozorišta (kina)	300	730
Javni transportni prostori	100	122

*Fraktilna vrijednost od 80% znači da 80% požara ima manju ili jednaku vrijednost gustine požarnog opterećenja od specificirane

U tabeli 5. date su neto toplotne moći i stope oslobođene energije po kvadratnom metru nekih tekućina, plastike i različitih oblika drveta.

Tabela 5
Toplotne moći i stopa oslobođene energije za različite materijale (Buchanan 1994)

Materijal	Neto toplotne moć (MJ/kg)	Stopa oslobođene energije (MW/m ²)
Tečnosti		
Benzin	43,5	3,27
Lako ulje	41,9	1,75
Drvo		
Ravno drvo	16,7	0,10
1 m ³	16,7	0,61
Namještaj	16,7	6,63
25 mm u krevetu	16,7	15,3
Plastika		
PMMA	24,9	1,34
Polietilen	43,8	1,36
Polistiren	39,9	1,40

Plastika i drugi sintetički materijali generalno imaju veću toplotnu moć nego na primjer drvo, što može uzrokovati višu temperaturu požara (Buchanan, 1994).

Na osnovu požarnog opterećenja, može se procijeniti količina raspoložive energije. S druge strane, dostignuta temperatura zavisi i od brzine rasta temperature u požaru. Ovaj fenomen se naziva stopa oslobođene energije (Rate of Heat Release/RHR) koja zavisi od uslova ventilacije požarnog sektora. Evrokod 1 predviđa tri brzine rasta temperature: spora ($t_{lim} = 25$ min), srednja ($t_{lim} = 20$ min) i brza ($t_{lim} = 15$ min).

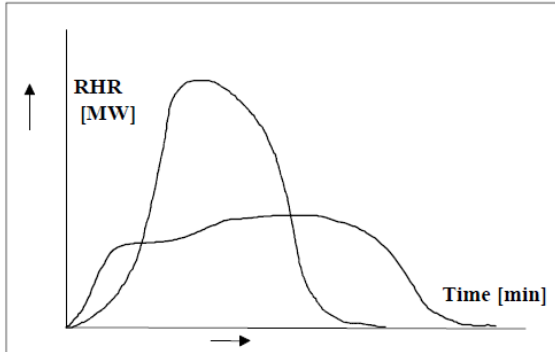
Tabela 6
RHR u zavisnosti od namjene prostora

Maksimalna stopa oslobađanja toplote RHR _t			
Namjena	Brzina rasta	t_a (s)	RHR _t (kW/m ²)
Stambeni prostori	srednja	300	250
Bolničke sobe	srednja	300	250
Hotelske sobe	srednja	300	250
Biblioteke	brza	150	500
Kancelarijski prostori	srednja	300	250
Školske učionice	srednja	300	250
Tržni centri	brza	150	250
Pozorišta (kina)	brza	150	500
Javni transportni prostori	spora	600	250

RHR (Tabela 6) je izvor porasta temperature gasa i pokretačka snaga za širenje gasa i dima. Mogu se pojaviti dva sasvim različita scenarija razvoja požara zavisno od dostupnosti kiseonika za održavanje procesa sagorevanja i to:

- požar koji se kontroliše količinom gorive materije (RHR dostiže maksimalnu vrijednost bez ograničenja kiseonika, tako da je ograničen raspoloživim požarnim opterećenjem) i
- požar se kontroliše ventilacijom (raspoloživi kiseonik ograničava RHR, ako je veličina otvora suviše mala da bi se omogućila dovoljana količina vazduha za ulazak u požarni sektor).

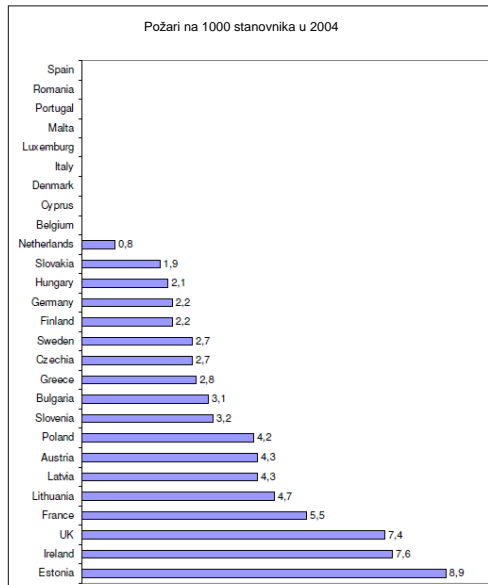
Slika 4 ilustruje navedene scenarije gdje dvije potpuno različite RHR krivulje odgovaraju istoj količini požarnog opterećenja obzirom da se radi o istoj površini ispod obje krivulje.



Slika 4. Dvije RHR krivulje koje odgovaraju istoj količini požarnog opterećenja [6]

Glavni uzroci destruktivnih požara u zgradama su prisustvo vrlo velikih količina lako zapaljivih materijala, neispravnost električnih uređaja i nepropisno izvedene električne instalacije (ili propusti pri njihovom održavanju i rukovanju), termički aparati i uređaji (kućni aparati bez nadzora, neopreznosti pri pripremanju hrane u kuhinjama), nepropisno izvedene dimovodne instalacije, odbačeni opušak, građevinski nedostaci (nedostatak inspekcije i kontrole na gradilištima, nemar prema propisima o zaštiti od požara) zlonamjerno podmetanje požara i sl.

Potrebno je istaći da u 80% svih požara čovjek direktno ili indirektno učestvuje kao uzročnik svojim neznanjem, nemarom, greškama u radu i nepravilnim postupanjem pri nastanku požara. Ovaj podatak ukazuje da fokus treba usmjeriti na edukaciju ljudi.

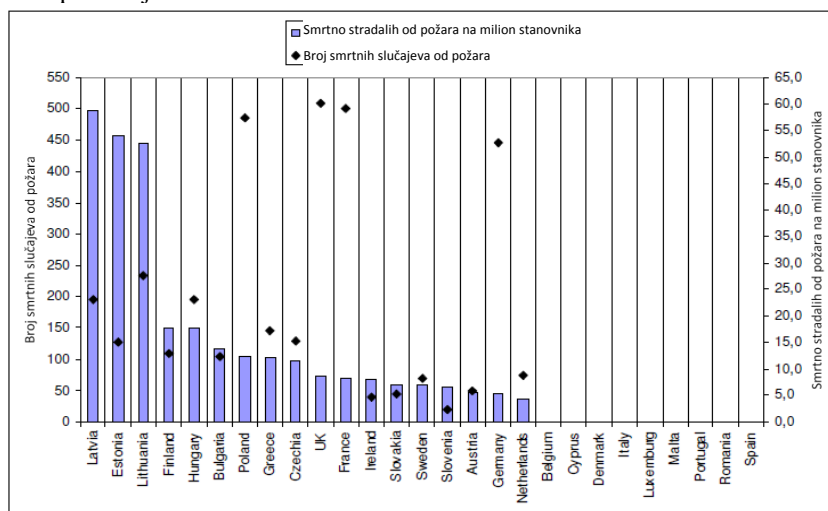


Slika 5. Požari na 1000 stanovnika po zemljama EU [11]

Poznavanje najvažnijih scenarija paljenja je od suštinskog značaja za projektante koji pokušavaju smanjiti vjerovatnoću pojave požara u zgradama. Problematika požara se kontinuirano prati i statistički obrađuje kako bi se mogli uočiti trendovi i karakteristike kretanja broja požara. Obzirom na ogroman broj mogućih uzroka požara, obično se daju osnovne klasifikacije i tipični slučajevi koji obuhvataju najveći broj uzroka požara.

Na slici 5 dat je pregled broja prijavljenih požara u 2004. godini po zemljama EU (nema raspoloživih podataka za Belgiju, Luksemburg, Italiju, Španiju, Portugal, Kipar, Maltu i Rumuniju). Uočava se da je broj požara na 1.000 stanovnika veoma različit za 18 zemalja EU koje su analizirane, te da je relativno visok broj u Velikoj Britaniji, Irskoj i Estoniji.

Slika 6 daje pregled broja smrtnih slučajeva i broja smrtnih slučajeva na milion stanovnika po zemljama EU.



Slika 6. Broj smrtnih slučajeva i stopa smrtnosti od požara po zemljama EU [11]

Apsolutni broj smrtnih slučajeva je relativno visok u Poljskoj, Velikoj Britaniji, Francuskoj i Njemačkoj, međutim, u poređenju sa ostalim zemljama EU, broj smrtnih slučajeva na milion stanovnika nije izuzetno visok u ove četiri zemlje. Broj smrtnih slučajeva na milion stanovnika je relativno visok u Latviji (58,7), Estoniji (54,0) i Litvaniji (52,4). Broj smrtnih slučajeva na milion stanovnika relativno je nizak za Holandiju (4,3), Njemačku (5,3) i Austriju (5,5). Prosječna stopa smrtnosti od požara je 17,3 za 18 zemalja EU.

Obzirom na ogroman broj mogućih uzroka požara, obično se daju osnovne klasifikacije i tipični slučajevi koji obuhvataju najveći broj uzroka požara. Kao i svi statistički podaci i podaci o uzrocima požara zavise od metodologije, broja požara, perioda vremena, namjene građevine itd.

Da bi poređenje između zemalja bilo manje ili više moguće korištena je slijedeća klasifikacija uzroka požara [11]:

- namjerno izazvan požar,
- pušenje,
- kvanje,
- upotreba svijeće,

- električni uređaji,
- upotreba uređaja za grijanje,
- nesmotrenost,
- igranje sa vatrom,
- ostalo.

U tabeli 7 dat je pregled uzroka požara prema statistici vatrogasaca u nekoliko evropskih i drugih zapadnih zemalja, a u tabeli 8 dat je pregled požara sa fatalnim posljedicama u domaćinstvu [11]:

Tabela 7
Uzroci svih požara u domaćinstvima po zemljama

Uzrok	UK	Holandija	US	Australija
Namjerno izazvan požar	9%	11%	6%	3%
Pušenje	57%	3%	2%	4%
Kuvanje	4%		26%	44%
Upotreba svijeće	17%		5%	4%
Električni uređaji	6%	31%	3%	12%
Upotreba uređaja za grejanje			11%	3%
Nesmotrenost				
Igranje sa vatrom	4%	2%	0,4%	3%
Ostalo	2%	27%	9%	
Nepoznat			36%	29%

Tabela 8
Uzroci požara sa fatalnim posljedicama u domaćinstvu

Uzrok	UK	London	NL	Švedska	DK	US	Australija	Novi Zeland
Namjerno izazvan požar	35,4%		9%	8,3%		11,7%		
Pušenje	16,7%	47%	31%	29,8%	51%	7,8%	42%	13,1%
Kuvanje	5,6%	14%	9%	5,8%		2,2%		16,9%
Upotreba svijeće	5,8%	8%	3%	5,0%	9%	5,6%	7%	10,0%
Električni uređaji	7,6%	3%	21%	12,4%	4%	3,4%	14%	13,1%
Upotreba uređaja za grejanje		8%	3%	5,8%		3,4%		6,9%
Nesmotrenost		18%	12%	2,5%				4,6%
Igranje sa vatrom	3,3%	3%	6%	0,0%		1,5%	5%	9,2%
Ostalo	23,5%	17%	6%	0,0%		6,8%		13,9%
Nepoznat		1%	0%	30,6%		57,8%		7,7%

Kao što je vidljivo iz tabele 8, najveći broj požara sa fatalnim posljedicama izaziva pušenje (ostavljena upaljena cigareta/opušak). Drugi česti uzroci su nesmotrenost pri kuvanju i upotreba neispravnih električnih uređaja.

Prema Zakonu o zaštiti od požara vlasnici i korisnici građevina i prostora dužni su voditi brigu o ispravnosti instalacija i uređaja koji mogu izazvati požar te ispravnosti uređaja za dojavu, gašenje i sprečavanje širenja požara i drugih zaštitnih uređaja.

1.2.2. Kontrola zapaljivosti

Razvoj građevinarstva ogleda se u kontinuiranom pronalaženju novih, sve odvažnijih rješenja u primjeni struktura i materijala koji se ugrađuju u zgrade. Međutim, napredak na polju požarne bezbjednosti ne ide u korak s tehnološkim inovacijama i trenutnim građevinskim praksama.

Svi gorivi materijali u uslovima požara oslobađat će određenu količinu toplote koja će dodatno opterećivati konstrukciju zgrade i ubrzati dalje širenje požara. Mnogo je slučajeva kada se požar ubrzano širio zbog neodgovarajuće strukture završnih obloga na konstrukcijama. Iz tog razloga bilo koji upotrijebljen materijal za završne radove na bilo kojem dijelu konstrukcije bi trebao biti takav da ograniči širenje plamena i zapaljivost.

To se uglavnom kontroliše uvođenjem ispitivanja na zapaljivost ili širenje plamena, što se vrši prema uslovima definisanim nekim od relevantnih državnih ili međunarodnih standarda. Dobijeni rezultati ispitivanja pružaju korisnu indikaciju uspješne kontrole paljenja.

Ispitivanje izdržljivosti/otpornosti na požar određuje sposobnost građevinskog materijala i njegovih komponenti da izdrže i obezbijede zaštitu tokom požara.

Numeričko modeliranje ponašanja građevinskih konstrukcija uslijed djelovanja požara je trenutno jedno od najaktuelnijih područja istraživanja. Razvoj jednostavnih i efikasnih numeričkih modela predstavlja osnovu za bolje razumjevanje požara kao stohastičkog procesa i dalje usavršavanje građevinskih normi.

Istraživanja uzroka urušavanja tornjeva WTC-a u New Yorku 2001. god. su pokazala da su uslijed udara aviona pasivni sistemi zaštite od požara djelomično uništeni, tj. gipskartonski zidni paneli su se raspali u sitne komadiće, a pjena je otpala s čeličnih elemenata nakon udara. Analiza je pokazala da do urušavanja tornjeva nije doveo udar aviona, vjerovatno zbog brojnih jakih stubova u fasadi, već opisano djelovanje požara na konstrukciju koja je bez zaštite popustila zbog toplotnog djelovanja.

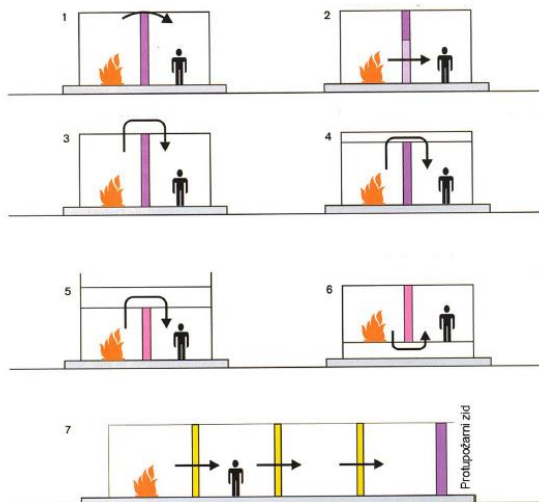
Zbog toga projektant posebnu pažnju treba posvetiti pravilnom odabiru građevinskih materijala i konstrukcija u pogledu njihove otpornosti na požar. Budući da je nepraktično insistirati na sastavu konstrukcije koji neće doprinijeti zapaljivosti u slučaju požara, potrebno je osigurati da ti sastavni dijelovi konstrukcije predstavljaju što je moguće manji rizik. Takođe, specijalni površinski premazi korišteni za zaštitu od neželjenog paljenja bi trebalo da spriječe zagrijavanje osnovnog materijala u što dužem vremenu.

Pored toga što kontroliše paljenje pomoću izbora materijala u pogledu njihove otpornosti na požar, projektant može koristiti aktivne ili pasivne mjere zaštite od požara ili oboje.

1.2.3. Kontrola širenja/rasta požara

Jedan od klasičnih načina kontrole širenja požara je upotreba vertikalnih ili horizontalnih požarnih barijera. Međutim, oni mogu zadovoljiti samo u slučaju kada ne postoji mogućnost prolaza dima i plamena njihovim rubovima. Također, širenje požara se može desiti u prostoriji ili odjeljku izvan mjesta izvora požara, ukoliko se požar ne može zadržati u okviru granica svog nastanka zbog neadekvatnog zatvaranja prostorije u kojoj je nastao požar [9].

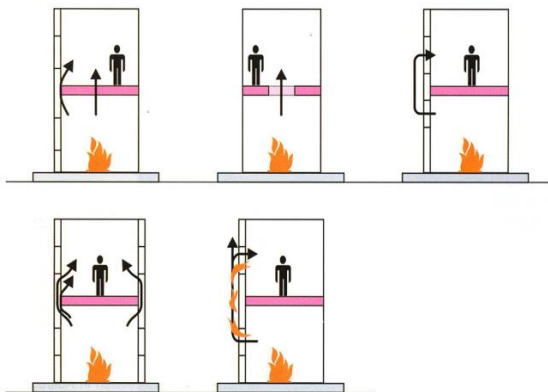
Na slici 7 data je ilustracija sedam načina mogućeg horizontalnog širenja požara: iznad zida (1), kroz otvore u zidovima (2), preko krova (3), kroz krovnu konstrukciju (4), kroz spuštene stropove (5), ispod duplih podova (6), kroz loše izvedene pregradne zidove (7).



Slika 7. Mogući načini horizontalnog širenja požara

Sigurnost od horizontalnog širenja požara kroz zid obezbeđuje se zidovima otpornim na požar. Za sprječavanje pojava širenja požara iz prostorije u kojoj je nastao u ostale prostorije preko vrata, na granicama požarnog odjeljka moraju se ugrađivati vrata otporna na požar. Ventilacioni i drugi kanali moraju se izrađivati od materijala preko kojeg se požar ne može širiti, a sprečavanje širenja požara osiguravaju automatske klapne otporne na požar.

Na slici 8 data je ilustracija pet načina mogućeg vertikalnog širenja požara: preko međuspratnih konstrukcija (1), kroz otvore u međuspratnim konstrukcijama (2), preko prozora (3), kroz fasadne obloge (4), preko gorive fasade (5).



Slika 8. Mogući načini vertikalnog širenja požara

U vertikalnom smjeru požar se širi puno brže od horizontalnog i već za 20-30 minuta može zahvatiti nekoliko etaža. Ovaj problem nastaje kod međuspratnih konstrukcija neotpornih na požar gdje može doći do njihovog urušavanja i pada sadržaja na niže etaže. Sigurnost od vertikalnog širenja požara preko međuspratne konstrukcije obezbeđuje se građenjem iste otporne na požar. Postoji opasnost vrlo brzog širenja požara kroz otvore u

međuspratnim konstrukcijama, jer se topli gasovi koji su lakši dižu u vis i šire požar. Takve otvore treba izbjegavati, a ako ih nije moguće izbjeći treba ih pravilno zatvoriti.

Velika opasnost prijeti i od vertikalnog širenja požara iz jednog požarnog sektora u drugi preko fasada od gorivog materijala. Ovaj način širenja predstavlja opasnost kod visokih objekata jer se požar velikom brzinom širi na više spratove i postoji opasnost od pada komada materijala koji gori na etaže ispod kao i od kapanja otopljenih materijala. Kako je naopasnije vrijeme kada zgrada može da se zapali tokom renoviranja potrebno je osigurati da korišteni materijali stvaraju što je moguće manji hazard.

Primer studije slučaja širenja požara desio se u Frankfurtu maja 2012. godine zbog neodgovarajuće upotrebe materijala za termičku izolaciju prilikom renoviranja Studenskog doma. Za samo nekoliko minuta, do dolaska vatrogasaca, cijela fasada zgrade bila je prekrivena plamenom, a vazduh je bio crn od dima. Bilo je potrebno 80 vatrogasaca da požar stave pod kontrolu i na kraju ga ugase. Istraga je pokazala da je zapaljivi izolacioni materijal, koji se koristio za renoviranje zgrade, brzo proširio vatru. Kada se jednom zapali, ova vrsta izolacionog materijala može stvoriti plamen i gusti dim i vjerovatno je da će ispuštati goruće kapljice, koje su u ovom slučaju padale na gomilu zapaljivog materijala koji se nalazio ispod na gradilištu (www.firesafeeurope.eu).

Dodatni problem može nastati u slučaju, iako ivice požarnog sektora zadovoljavaju i građevinski ili konstrukcijski dio faze izgradnje je završen, ugradnje instalacija koje mogu uništiti prepreke širenju požara ili ako zamjena prepreke nije prema zadovoljavajućem standardu. Ova situacija takođe može nastati kada su izvršene naknadne modifikacije, usljed promjena namjene konstrukcije, popravki ili zamjene materijala. Kod ugradnje instalacija kroz zidove i stropove, za koje se postavljaju zahtjevi u pogledu zaštite od požara, potrebno je izvesti požarno zaptivanje pregradama iste klase otpornosti na požar kao i građevinske konstrukcije kroz koje prolaze.

Nadalje, problem može nastati zbog neuklanjanja nakupljenog zapaljivog otpada, koji se može zapaliti u požaru, ili može postepeno izazvati flashover/razbuktavanje veoma sporim razvojem požara, tj. tinjanjem vatre. Takvi problemi se mogu smanjiti osiguranjem primjene potpuno efikasnih pravila upravljanja zaštitom od požara.

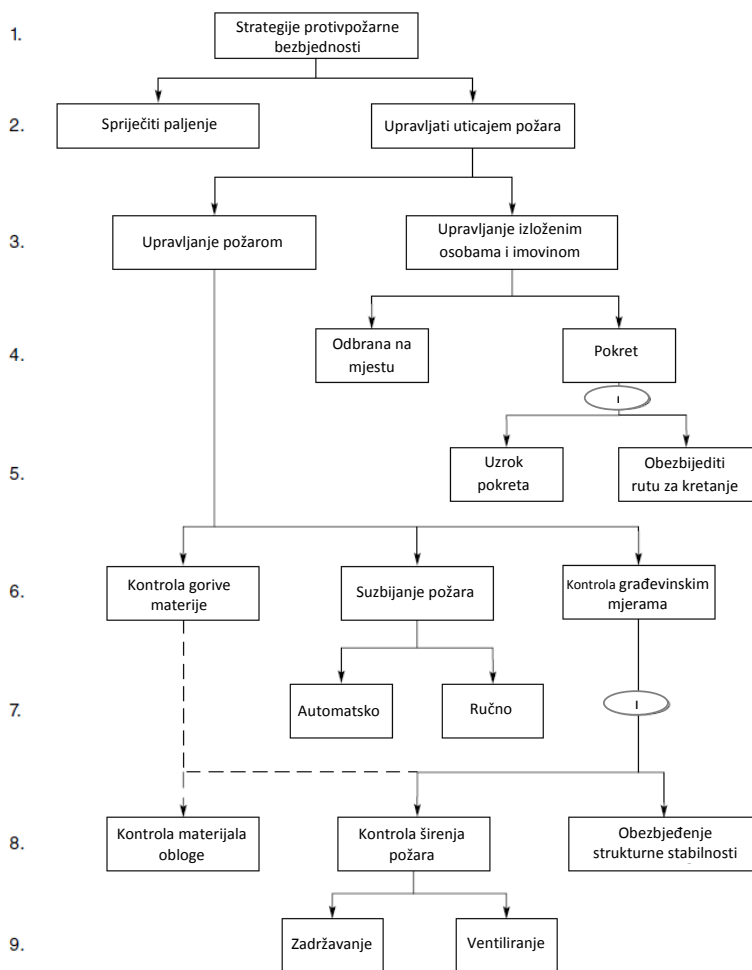
1.2.4. Upravljanje zaštitom od požara

Upravljanje zaštitom od požara predstavlja jedan je od najvažnijih aspekata bezbednosti u zgradama, koji se mora kontinuirano provoditi.

Kod individualne upotrebe prostora, relativno je lako uspostaviti procedure sa kojima bi se, u slučaju požara, svo osoblje upoznalo, kao i odgovarajuće osobe koje bi djelovale kao vođe i usmjeravale vatrogasnu jedinicu. Međutim, problem je u slučaju višestrukih korisnika prostora, posebno tamo gdje je frekventna izmjena zadržavanja, gdje prolazi velik broj ljudi, kao što su npr. veliki tržni centri, sportske dvorane, stadioni i sl. Zbog toga je osnovno da vlasnici, obično korporativna tijela, uspostave strategiju upravljanja zaštitom od požara i osiguraju postojanje odgovorne grupe osoba koje su cijelo vrijeme na dužnosti kako bi preuzele potpunu kontrolu u slučaju izbijanja požara. Tu funkciju može obavljati potpuno i adekvatno obučeno osoblje, zaposleno na svakodnevnom obezbjeđenju objekta. Takođe je neophodno da se čuva kompletna evidencija o detekciji požara, kontroli požara i sistemima za zaštitu od požara, te da se vrši potpuna provjera bilo kojeg upotrebnog prostora kako bi se osiguralo da se ne dozvoli preduzimanje nikakve radnje koja će staviti van funkcije bilo koji dio tih sistema. Bitno je da se, tamo gdje je inženjerski pristup bezbednosti od požara projektu zgrade odobren i prihvaćen, mjere sadržane projektom primjenjuju čitavo vrijeme, a nije dozvoljeno da eventualni finansijski pritisci ugroze sigurnost od požara [3].

1.3. Koncepti sigurnosti od požara

Američko Nacionalno udruženje za zaštitu od požara (NFPA, 2003) razvilo je okvir za procjenu požarne sigurnosti, tzv. “Stablo koncepata bezbjednosti od požara” (Fire Safety Concepts Tree). Slika 9 prikazuje prilagođeni pregled stabla koncepta.



Slika 9. Stablo koncepata bezbjednosti od požara [2]

Linija 2 stabla ukazuje na očigledno: nema potrebe za dalјim upravlјanjem požarima ukoliko se može spriječiti paljenje, ali ako ne može, mora se upravlјati uticajem požara. U stvarnosti je teško apsolutno eliminisati sve izvore neželjene upale, ali njihovu vjerovatnoću moguće je umanjiti mjerama zaštite od požara.

Linija 3 ukazuje da se kontrola uticaja požara može ostvariti ili upravlјanjem požarom ili kontrolom izloženih osoba i imovine. Linija 4 ukazuje da se kontrola izloženih osoba i imovine može ostvariti njihovom evakuacijom iz zgrade ili spašavanjem unutar objekta. Uobičajena je strategija da se ljudi evakuuju, osim ako su nepokretni ili iz drugih razloga onemogućeni. Prelazno rješenje za visoke objekte je premještanje lica u sigurne prostore

unutar objekta. Većina imovine unutar objekta, koja je izložena požaru, mora se braniti na licu mjesta jer je nemoguće izvršiti njeno brzo izmještanje.

Za početak evakuacije neophodno je detektovati požar i obavijestiti lica koja su se zatekla u objektu. Osim toga, moraju postojati adekvatni i sigurni putevi za njihovo kretanje (linija 5).

Linija 6 pokazuje tri opcije za kontrolu požara. U prvom slučaju "izvor goriva" moguće je kontrolisati ograničavanjem količine i geometrije gorive materije, druga opcija je gašenje požara i treća je kontrola požara građevinskim mjerama. Linija 7 ukazuje da gašenje požara može biti automatsko ili ručno, no u oba slučaju uspješnost zavisi od rane detekcije požara i primjene dovoljne količine odgovarajućeg sredstva za gašenje.

Linija 8 stabla koncepta pokazuje da je za kontrolu požara građenjem potrebno postići kontrolu širenja požara ali i obezbijediti stabilnost konstrukcije. Lijevo polje u liniji 8 upućuje na činjenicu da se razvoj i veličina požara mogu kontrolisati ograničenjem gorivih materijala u oblogama prostorija sa zapaljivim materijama. Vidljivo je da je ono povezano isprekidanim linijama sa poljem "kontrola gorive materije" u liniji 6, jer bi strogo gledajući trebalo biti njen podskup, ali obzirom da je odabir i postavljanje obloga dio procesa izgradnje svrstano je u liniju 8.

Obezbjeđenje strukturne stabilnosti je važno ako se zgrada i njen dio mora održati tokom požara, što zavisi od značaja zgrade. Strukturna stabilnost je važna i radi zaštite ljudi i imovine unutar zgrade u požaru.

Kontrola širenja požara može se realizovati na dva načina i to zadržavanjem požara ili odvođenjem toplote izvan objekta (linija 9). Odvođenje toplote od požara je korisna strategija za smanjenje njegovog uticaja, posebno u jednospratnim zgradama (ili ako se izvodi sa najvišeg sprata visokih zgrada). Može biti realizovano pomoću aktivnog sistema otvora koji se mehanički otvaraju, ili pasivnog sistema koji funkcioniše na principu topljenja plastičnih krovnih prozora.

U oba slučaja, povećana ventilacija može lokalno dovesti do porasta požara, ali njegovo širenje u zgradi i ukupan termički uticaj na konstrukciju će biti umanjen. Zadržavanje požara radi sprečavanja njegovog širenja je u principu pasivna zaštita od požara. Vatrootpornost pomaže u ograničavanju širenja požara iz prostorija u kojima nastaje, a istovremeno osigurava integritet konstrukcije požarnog sektora. Stoga, zidovi i podovi većine zgrada imaju određenu vatrootpornost, i to primarno da bi zadržali požar u prostoriji u kojoj nastane.

Sprečavanje razvoja požara jedna je od osnovnih strategija zaštite od požara.

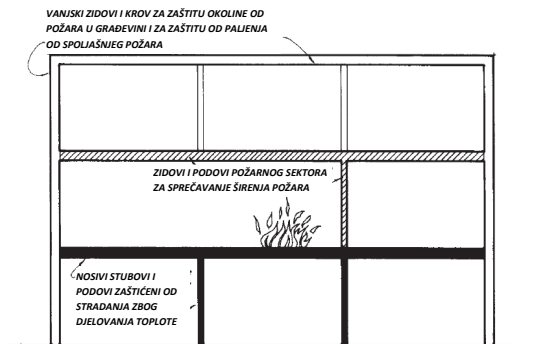
Takođe se mora spriječiti širenje požara na susjedne građevine ograničavanjem veličine otvora na vanjskim zidovima.

Kontrola dima se ostvaruje zadržavanjem dima (zatvaranje prostora barijerama) ili ventilisanjem prostora (prirodnim ili mehaničkim putem). Odvođenje dima važna je strategija u požarima čiji je razvoj ograničen sistemima automatskih prskalica (sprinkler). Za kontrolu dima mogu se koristiti dimne barijere ali i tzv. presurizacija (ventilacija povišenim pritisakom) koji su objašnjeni u nastavku [2].

1.4. Pasivne mjere zaštite od požara

Pasivna zaštita objekata od požara obuhvata mjere zaštite od požara koje se odnose na konstrukciju i omotač građevine, te njenu podjelu na požarne sektore. Pasivne mjere zaštite mogu se posmatrati kroz strukturnu zaštitu (zaštita konstruktivnih elemenata od uticaja toplote), podjelu zgrade na požarne sektore (podučja otporna na vatru i dim) i zaštitu koju

pruža omotač zgrade (okolni zidovi i krov). Ovi elementi traju cijeli životni vijek zgrade i uvijek su dostupni kao odbrana od širenja požara.



Slika 10. Pasivna zaštita od požara [4]

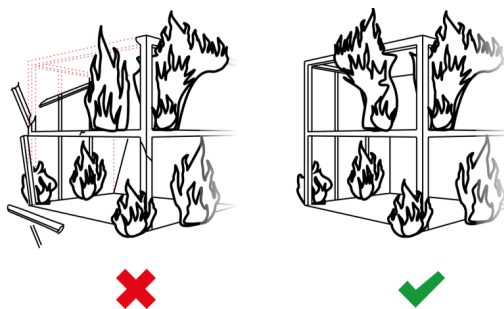
Pasivna zaštita od požara ne zahtijeva nikakvo spoljašnje djelovanje nego se oslanja na određene građevinske karakteristike i materijale koji ispunjavaju definisane zahtjeve za vatrootpornost.

1.4.1. Zaštita konstrukcije

Najveći uzrok smrtnih stradanja ljudi u požarima je usljed gušenja u dimu (broj umrlih od dima kreće se od 80% pa čak do 90%¹), dok znatno manji broj strada zbog rušenja građevine. Ova relativno niska učestalost smrtnih stradanja usljed “strukturnog kolapsa” ne znači da je strukturni integritet (nosivi odgovor građevine) nevažan. Naprotiv, sve zgrade se moraju projektovati na način da se njihov strukturni integritet održi tokom požara te tako omogućiti bezbjedna evakuacija ljudi i pruži određeni nivo zaštite vatrogascima koji su angažovani na gašenju.

Vremenski period prije rušenja objekta treba iznositi minimalno [8]:

- 15 minuta: za lagane drvene ili čelične konstrukcije, uključujući krovove;
- jedan sat: za niske objekte (do 3 sprata) zidana / betonska konstrukcija i
- tri sata: za visoke objekte (više od tri sprata) zidana / betonska konstrukcija.



Slika 11. Integritet konstrukcije u požaru [8]

¹ M. Vidaković, B. Vidaković, „Požar i arhitektonski inženjering“, Beograd 2008.

Navedeni nominalni period može se razlikovati u zavisnosti od rizika koji proizilaze iz korištenja zgrade, stepena opasnosti od izbijanja požara, požarnog opterećenja i postojanosti korištenih materijala.

Zahtijevani nivo zaštite od požara za konstruktivne elemente zavisi od utvrđenih potreba za evakuacijom i gašenjem požara. Ukoliko zgrada mora da “opstane” dok svi stanari ne budu evakuisani tada je zahtijevano vrijeme kratko, oko pola sata; međutim ako se strategija bezbjednosti života ljudi bazira na sklanjanju u područja “sigurnih zona” unutar zgrade ili je neophodno da vatrogasci intervenišu u njoj, tada se zahtjevi za zaštitu povećavaju na 1 sat ili i više. Ukoliko osiguravajuća društva radije biraju mogućnost obnove zgrade nego ponovnu gradnju i rekonstrukciju tada zahtjev za vrijeme zaštite od požara raste na 2 ili čak 4 sata. Sposobnost konstruktivnog elementa da održi svoju funkciju kada je izložen djelovanju toplote, predstavlja njegovu *vatrootpornost* koja se izražava u jedinici vremena. Ovdje se podrazumijeva vatrootpornost sklopova, a ne samo elemenata, koja se mora izračunati. Vatrootpornost koja se mora osigurati zavisi od požarnog opterećenja u zgradi.

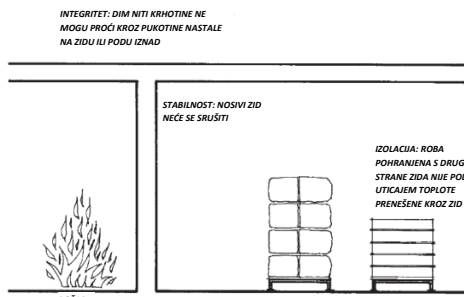
Kao primjer za procjenu požarnog opterećenja i zahtijevane vatrootpornosti za određene vrste objekata može se koristiti tabela 9. Namjena joj je uglavnom informativnog i edukativnog karaktera jer daje grubu procjenu veličina.

Važno je imati na umu da je zaštita konstrukcije objekata onoliko dobra koliko je dobra najslabija karika u projektu i da spojevi između konstruktivnih elemenata moraju biti jednake vatrootpornosti kao i sami elementi. Posebni su rizici povezani sa visokim objektima preko 10 spratova ili objektima sa podzemnim prostorijama u dva ili više nivoa.

Tabela 9
Požarno opterećenje i zahtijevana vatrootpornost za različite tipove zgrada

Vrsta zgrade	Požarno opterećenje	Zahtijevana vatrootpornost (min)		
		1-spratne	2-spratne	3-spratne
1. Kuće	Nisko	0	30	30
2. Stanovi	Srednje	30	30	60
3. Ustanove (bolnice, zatvori, i sl.)	Visoko	30	60	90
4. Hoteli i pansioni	Srednje	30	30	60
5. Kancelarije, škole	Srednje	30	30	60
6. Skupni objekti (bioskopi, pozorišta)	Visoko	30	60	90
7. Trgovine	Srednje	30	30	60

Prilagodena tabela 5.1 i 5.2 [4]



Slika 12. Stabilnost, integritet i izolacija [4]

Otpornost na požar mjeri se sposobnošću elementa ili konstrukcije da određeno vrijeme ispunjava zahtjevanu nosivost, integritet i izolaciona svojstva u uslovima djelovanja predviđenog požara (standardnog ili projektovanog). Upravo ta tri zahtjeva i definišu otpornost na požar: *nosivost* konstrukcije je njegova dimenziona stabilnost, *integritet* je njegova sposobnost da se suprotstavi toplotnom šoku i pucanju, te da zadrži svoju adheziju i koheziju; *izolacija* je svojstvo materijala definisano nivoom toplotne vodljivosti.

Kod konstruktivnih elemenata u prvim trenucima požara važni su samo stabilnost i integritet, ali obzirom da oni često imaju ulogu da dijele zgradu horizontalno-spratovima ili vertikalno-zidovima kako bi zadržali širenje požara, tada je i izolaciona karakteristika značajna.

1.4.2. Podjela zgrade na požarne sektore

S aspekta osiguranja života ljudi i zaštite imovine, neophodna je adekvatna podjela zgrade u požarne sektore, odnosno odjeljke koji mogu zadržati širenje vatre i dima određeni vremenski period. Svaka velika građevina treba biti podijeljena u sektore vertikalno, horizontalno ili kombinovano.

Konstrukcije i elementi koji razdvajaju požarne odjeljke dijele se na:

- požarne zidove (unutrašnje i vanjske) koji se grade kao neprekidne konstrukcije od temelja do krova i
- druge pregradne konstrukcije i elemente otporne na požar i dim na granici požarnog odjeljka.

Požarni zidovi su jedno od najefikasnijih rješenja za zaštitu objekta od požara jer sprečavaju širenje vatre i dima unutar jednog objekta (ili požarnog sektora), između različitih objekata, ali i objekta i zapaljivih materijala koji mogu biti u njegovoj blizini ili postavljeni na fasadu.

Kao barijera širenju toplote i dima kroz otvore koji se na drugi način ne mogu zatvoriti koriste se *požarne zavjese*. Postoje i slučajevi kada je ova vrsta zaštite praktična iz estetskih ili opravdana iz tehnički razloga. Jednostavno rečeno, požarna zavjesa je posebno konstruisana zavjesa koja se spušta sa stropa da blokira otvore i zaustavi širenje vatre i dima između dva područja. Požarna zavjesa je uglavnom slična metalnoj roletni po tome što se vertikalno spušta dok se odmotava iz “gornje kutije”, međutim, zbog toga što je izrađena od materijala kao što su staklena vlakna, mnogo je fleksibilnija i kompaktnija. Dostupna su rješenja u vidu automatske zavjese (povezane sa sistemom detekcije požara, automatski se spuštaju u požaru), fiksne (trajno su na mjestu i koriste se za podjelu na požarne sektore) ili izolacione (pružaju dodatnu izolaciju, omogućavaju ljudima da prolaze bliže zavjesi, a da pri tome ne osjete uticaj toplote od požara s druge strane).



Slika 13. Požarna zavjesa za liftove

(<http://www.metalpress.co.il/en/product/fire-curtains-for-elevators.aspx>)

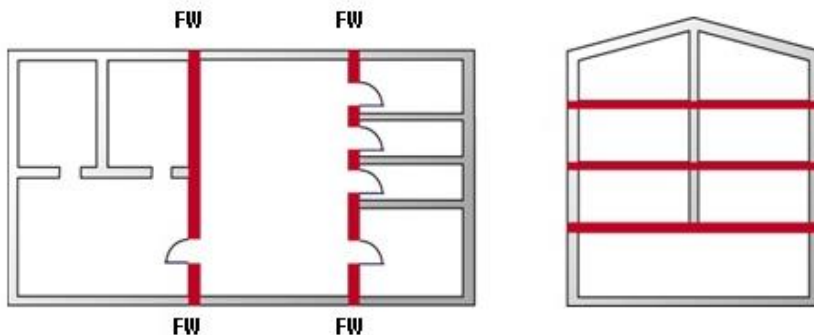
Požarni sektor je po definiciji zatvoreni prostor koji je odijeljen od susjednih prostora unutar građevine elementima konstrukcije koji imaju propisanu vatrootpornost čime se postiže uslov da se požar i dim ne prošire unutar građevine, odnosno susjedne građevine unutar određenog vremena. Požarni sektor može biti jedna prostorija, grupa prostorija ili čak cijela građevina. Oblikovanje požarnih sektora zavisi od namjene građevine, visine požarnog opterećenja i vatrootpornosti građevine. Požarni sektor je osnovna prostorna jedinica koja se samostalno tretira pri procjeni ugroženosti od požara, izradi planova za zaštitu od požara, ali i vatrogasnoj operativi pri gašenju požara.

Granice požarnih sektora moraju biti od negorivih građevinskih materijala. Da bi se postiglo potpuno razdvajanje požarnih sektora potrebno je zaštititi i elemente koji nisu konstruktivni, kao što su unutrašnji zidovi i vrata. Na granicama požarnih sektora ne smije biti "slabih tačaka" ili šupljina koje bi ugrozile dimnu i požarnu barijeru, a sve instalacije koje prolaze kroz zidove ili podove sektora moraju biti izvedene na način da pružaju jednak nivo otpornosti na požar kao i svi segmenti tog sektora.

Osim što ugrađena vrata moraju zadovoljiti definisanu vatrootpornost požarnog sektora, neophodno je preduzeti mjere kako bi se osiguralo njihovo brzo zatvaranje u slučaju požara.

Veliku opasnost, kroz cijeli životni vijek građevine, predstavlja mogućnost ugrožavanja požarnih sektora nesavjesnim presjecanjem granica sektora ili dodavanjem otvora.

Fire walls



FW = Fire walls

Slika 14. Podjela zgrade na požarne sektore
(<http://www.fml.eu.com/compartmentation/>)

Normativno i građevinskim propisima uglavnom su uređena pitanja veličine požarnih sektora, no projektant mora poznavati neka osnovna načela na kojima se bazira adekvatna podjela na sektore.

Broj požarnih sektora na koje treba podijeliti građevinu zavisi od visine požarnog opterećenja, instalisanih sistema za automatsku dojavu i gašenje požara, zaposjednutosti prostora, te od namjene zgrade jer mnogi propisi iskazuju maksimalne površine ili zapremine prostora u zavisnosti od namjene zgrade.

U nastavku je data tabela 10, koja je edukativnog i informativnog karaktera, sa orijentacionim vrijednostima veličine požarnog sektora za različite vrste zgrada.

Tabela 10
Površine požarnih sektora za različite tipove zgrada

Vrsta zgrade	Veličina požarnog sektora
1. Kuće	Svaki stan zaseban PS
2. Stanovi	Svaki stan zaseban PS
3. Ustanove (bolnice, zatvori, i sl.)	1600 m ²
4. Hoteli i pansioni	2500 m ²
5. Kancelarijske i komercijalne	2500 m ²
6. Skupni objekti (bioskopi, pozorišta)	1600 m ²
7. Trgovine	2500 m ²

Prilagođena tabela [4]

Što je sadržaj objekta zapaljiviji, manje bi trebale biti veličine požarnih sektora. Pri podjeli objekta u sektore geometrija nije važna, imperativ je da se očuva integritet požarnog sektora.

Ukoliko svaki sprat treba biti zaseban požarni sektor, projektant mora osigurati i da izlazi sa svakog sprata na stubište imaju jednaku otpornost na požar i dim. Kod stambenih zgrada svaka jedinica mora biti odvojeni požarni sektor.

Granice požarnih sektora mogu biti uslovljene i sposobnošću lica da se evakuiraju iz ugroženih prostora. Maksimalno prihvatljiva dužina puta evakuacije može ograničiti i veličinu požarnog sektora. Osim što se zgrada dijeli na sektore na osnovu požarnog opterećenja, mora se uzeti u obzir i zaštita evakuacionih puteva iz zgrade te ih je potrebno tretirati kao zasebne požarne sektore.

1.4.3. Sprečavanje širenja požara na susjedne objekte

Jedna od uloga pasivne zaštite od požara je da ograniči opasnost od uticaja požara na susjedne objekte i lica izvan zgrade, te smanji rizike od nastanka požara u susjednom objektu. Sprečavanje širenja požara na susjedne objekte odnosi se na: objekte u neposrednoj blizini i objekte koje se dodiruju vanjskim zidovima.

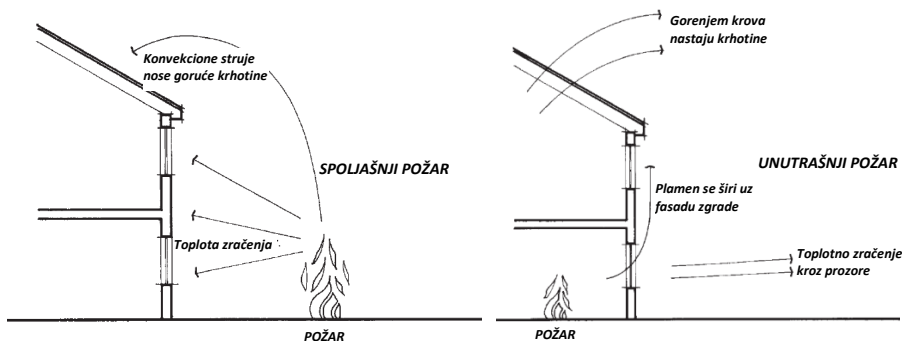
Bezbjedno rastojanje predstavlja slobodan prostor oko objekta koji je dovoljno širok da onemogućiti prenošenje požara na susjedne objekte.

U slučaju da nije moguće obezbijediti potrebno rastojanje do granice parcele, ili već izgrađenog objekta, tada su rješenje požarni zidovi.

Požarni zidovi ne služe samo da odvoje dva objekta koja su međusobno bliže nego što je bezbjedno, već mogu podijeliti i jedan veći objekat na "požarne sektore" i tako spriječiti širenje požara kako je objašnjeno u prethodnom podpoglavlju.

Za ograničavanje širenja požara posebnu pažnju treba obratiti na krov i vanjske zidove (zbog toplotnog zračenja). *Krov* predstavlja opasnost zbog konvektionog strujanja koje može nositi goruće čestice (drvene građe i sl.) do susjednog objekta. Postoje standardi za projektovanje krovnih konstrukcija otpornih i kada su izloženi direktnom plamenu ili toplotnom zračenju.

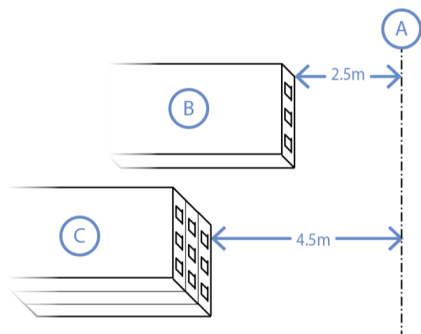
I vanjski zidovi zahtijevaju posebnu pažnju pri projektovanju zbog mogućnosti prenosa toplote preko njih na susjedne objekte (slika 15 b). Uobičajeno je ograničavati opasnosti od toplotnog zračenja smanjenjem broja i veličine otvora u vanjskim zidovima kada su u blizini drugih objekata. Ograničavanje veličine otvora s ciljem smanjenja toplotnog zračenja na susjedne objekte takođe može pomoći i u sprečavanju širenja požara sa sprata na sprat istog objekta.



Slika 15. Zaštita omotača (levo-požar van zgrade, desno-požar unutar zgrade) [4]

Rizici od širenja požara po *površini zgrade* uglavnom se umanjuju odabirom materijala za oblaganje i krovnih pokrivača koji imaju nulti potencijal širenja požara (cigla, beton i kamen). Neki građevinski propisi ograničavaju upotrebu fasadnih materijala s visokim potencijalom širenja požara.

U priručniku [8] date su preporuke za sprečavanje prenosa požara među objektima (slika 16).



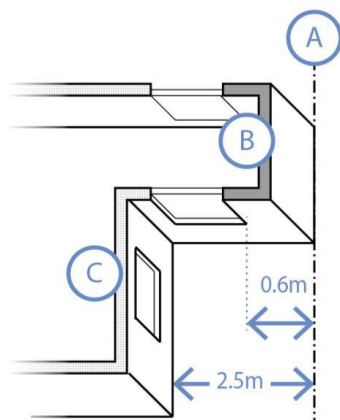
Slika 16. Sprečavanje širenja požara sa susjednih objekata
(A – granica parcele, B – jednospratnica, C – primjer trospratne zgrade)

S ciljem kontrole širenja požara, rastojanje između nove zgrade i bočne ili stražnje granice parcele mora biti najmanje 2,5 m za jednospratnicu i po 1,0 m više za svaki dodatni sprat, ukoliko zid nove zgrade sadrži prozore okrenute prema granici.

Ako ovakvo zadržavanje požara nije izvodivo, zid ne smije imati prozore okrenute prema granici parcele i mora biti od negorive konstrukcije.

Ako vanjski zid sadrži otvor s prozorima pod uglom od 90° prema granici, tada mora imati razdjelnu stijenku/zid (vatrootporan zid) od minimalno 600 mm (slika 17-B).

Nema potrebe za vatrootpornim svojstvima vanjskog zida ili prozora na njemu kada je smješten na minimalnoj zahtijevanoj (ili većoj) udaljenosti od graničnog zida (slika 17-C).



Slika 17. Odvajanje požara i prozora: granica (A), 2-sata vatrotporan zid (B), požarno neotporan zid (C)

1.5. Aktivne mjere zaštite od požara

Aktivna zaštita od požara odnosi se na kontrolu požara djelovanjem neke osobe ili automatskog uređaja. Sprovođenje aktivnih mjera podrazumijeva ugradnju i održavanje uređaja za detekciju požara i alarmiranje, sistema za kontrolu dima i vatre; ugradnju stacionarnih sistema za zaštitu od požara; kontrolu opasnih sadržaja i instalisanje sistema (centrale) za upravljanje zaštitom od požara.

Da bi se osigurali životi ljudi tokom evakuacije, potrebno je obezbijediti sredstva za detekciju i kontrolu požara. Kontrola požara je neophodna kako bi se umanjio nastanak dima što omogućava efikasniju evakuaciju, kao i da bi se ograničio porast temperature u konstrukciji/građevini i tako umanjile naknadne štete. Veliki broj građevina oprema se automatskim sistemima za gašenje požara zbog zahtjeva osiguravajućih društava ili kao kompromisno rješenje između aktivnih i pasivnih sistema predviđenih određenim državnim regulativama.

1.5.1. Detekcija požara

Detektori požara i alarmni sistemi osnovni su vatrozaštitni elementi svake zgrade čija instalacija i upotreba može značajno smanjiti gubitak ljudskih života i imovine u požaru.

Vrste detektora koji se najčešće primjenjuju u zgradama, posebno u slučajevima kada su ugroženi ljudski životi, su detektori toplote i dima, a u upotrebi su i detektori ostalih požarnih fenomena, kao i kombinovani (multisenzorski) detektori.

Veliki je broj usvojenih standarda za ovu opremu, kako nacionalnih tako i međunarodnih.

Sistemi za detekciju požara mogu biti ručni ili automatski ili njihova kombinacija.

Ručni sistemi uglavnom su relativno jednostavne izvedbe, tj. tradicionalna staklena ploča čijim se lomljenjem aktivira alarm. Ovi sistemi zahtijevaju prisustvo ljudi koji trebaju uočiti požar i procijeniti njegovu ozbiljnost, te ih je moguće instalirati i koristiti samo tamo gdje je sigurno da će boraviti ljudi.



Slika 18. Sistemi za detekciju požara i alarmni sistemi (<http://www.vindexsystems.com>)

U prostorima u kojima ljudi spavaju potrebno je ugraditi dodatne uređaje za detekciju – automatske. Takve građevine su hoteli, hosteli, prostori za smještaj lica sa posebnom brigom i njegovom, kao i višenamjenski objekti.

Automatski sistemi aktiviraju se usljed prisustva velike količine toplote ili dima koje registruju senzori i direktno uključuju sistem za gašenje požara (kao što je topiva glava sprinkler uređaja) ili indirektno aktiviraju bilo koji sistem kontrole požara ili evakuacije. Novije izvedbe ovih sistema izrađuju se sa upotrebom lasera male snage ili infra-crvenih senzora za praćenje pojave dima. Mnogi automatski sistemi zasnovani su na kombinaciji senzora za detekciju toplote i dima. Prednost automatskih uređaja je u činjenici da oni mogu upozoriti lica koja se zateknu u zgradi i prije nego sami uoče požar.

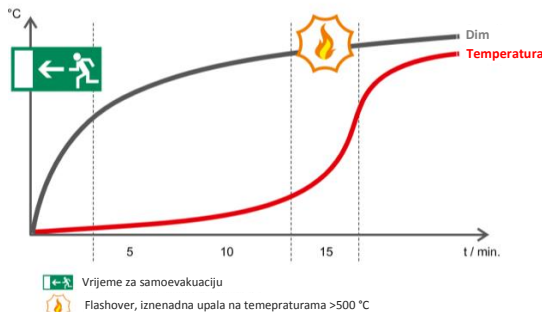
Svi uređaji za detekciju, osim onih instalisanih u zgradama sa malim brojem korisnika, trebaju biti povezani u sistem koji:

- ukazuje na mjesto izbijanja požara ili lokaciju na kojoj se oglasio alarm,
- aktivira kontrolu požara zatvaranjem vrata za izolaciju požarnog sektora, dimne zavjese ili automatski ventilacioni sistem,
- inicira procedure za evakuaciju uz automatsko registrovanje pojave požara u lokalnoj vatrogasnoj jedinici.

1.5.2. Kontrola dima: ventilacija i presurizacija

Dim koji nastaje u požaru ne smije onemogućiti vidljivost tokom evakuacije, a donja granica do koje se spušta ne smije biti ispod 2,5-3 m od površine poda tokom prvih 15 minuta požara.

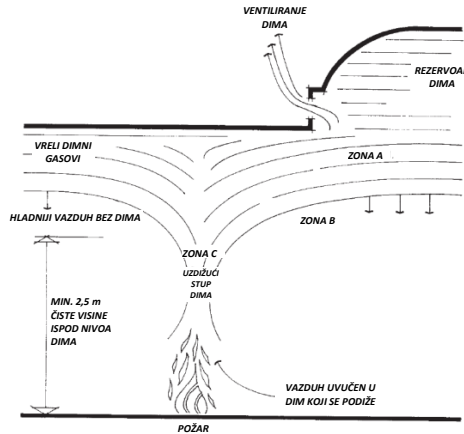
Kontrola dima neophodna je zbog problema koje uzrokuju toksične materije prisutne u njemu, kao i zbog učinka potpune dezorijentacije zbog smanjene vidljivosti. Na slici 19 je prikazan razvoj požara bez odvođenja dima.



Slika 19. Opis tipičnog požara bez odvođenja dima (www.hautau.de)

Najjednostavniji način za sprečavanje širenja dima unutar zgrade jeste njegovo odvođenje izvan objekta, što omogućava ograničavanje dima na području gdje nastaje, ali i osigurava vrijeme za evakuaciju i preduzimanje mjera za gašenje požara.

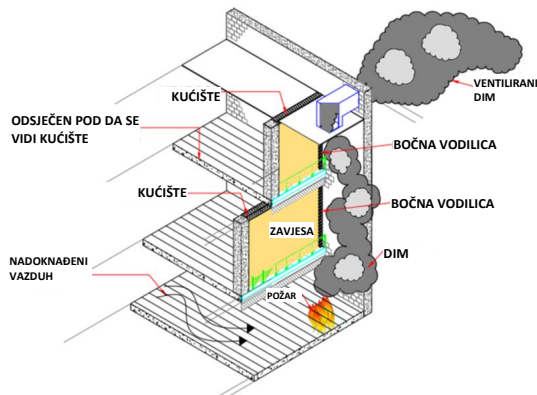
Činjenica o kojoj projektant mora posebno voditi računa jeste uslojavanje dima (stratifikacija) koje nastaje zbog uzgona, a koje se njegovim hlađenjem narušava. Kako je prikazano na slici 20, neposredno ispod stropa stvara se gornji sloj od vrućih dimnih gasova (zona A) koji plutaju na hladnijem zraku bez dima (zona B). Oblak dima koji se uzdiže iz vatre povlači zrak dok se diže formirajući gonji sloj (zona C).



Slika 20. Uslojavanje dima i ventilacija [4]

S porastom požara eksponencijalno će rasti i količina nastalog dima, a sloj dima će postajati deblji kako se požar razvija. Ventilacioni sistem ima ulogu osigurati da količina dima koji se dodaje već formiranom sloju bude dobro izbalansirana sa onim koji se odvodi ventilacijom, tako da dubina sloja dima ostane konstantna i nikada se ne spusti na nivo na kome bi ugrozila lica zatečena u požaru.

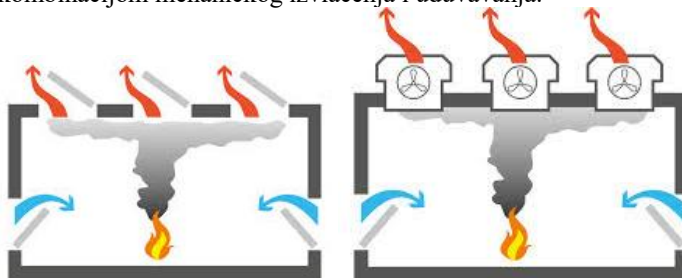
Ograničavanje horizontalnog širenja dima postiže se pomoću dimnih zavjesa-prepreka koje se spuštaju sa stropa. Ove zavjese mogu biti trajno postavljene ili se jednostavno aktivirati u slučaju požara (slika 21).



Slika 21. Odimljavanje i dimne zavjese (<http://www.fercoshutters.com/smoke-curtains/>)

Odimljavanje je najjednostavnije riješiti kod jednospratnih zgrada kroz krovne otvore – *prirodna ventilacija*, dok se kod višespratnica ugrađuju mehanički sistemi – *prinudna ventilacija*.

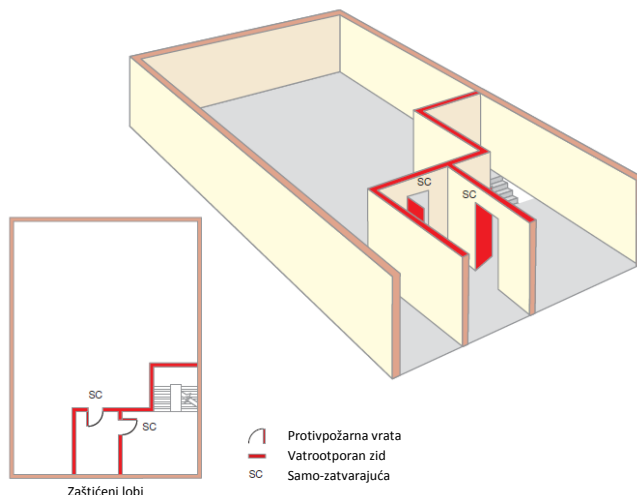
Prirodna ventilacija u potpunosti reaguje na uslove okoline, a vanjski vremenski uslovi određuju efikasnost ovakvog ventilacionog sistema. Mehanička ventilacija mora biti projektovana s visokim nivoom pouzdanosti, uz uslove da se može popravljati i održavati tokom cijelog životnog vijeka zgrade. Prinudno ventiliranje realizuje se izvlačenjem dima iz prostorija sa požarom ili iz evakuacionih puteva, uduvanjem svježeg vazduha u ove prostorije ili kombinacijom mehaničkog izvlačenja i uduvanja.



Slika 22. Prirodno i prinudno odimljavanje (www.hautau.de)

Ranije je naglašeno da se problem ugradnje vrata u vatrootporne zidove rješava pravilnim odabirom vrata odgovarajuće vatrootpornosti. Ipak, i takva vrata moraju se pri napuštanju prostora tokom evakuacije otvoriti pri čemu postoji opasnost od ulaska dima u zaštićeno područje.

Ova vrsta rizika može se prevenirati pristupom sa pretprostorijom stepeništu za evakuaciju, što omogućava stvaranje “zračne komore” (slika 23) gdje će u bilo kom trenutku samo jedna vrata biti otvorena.

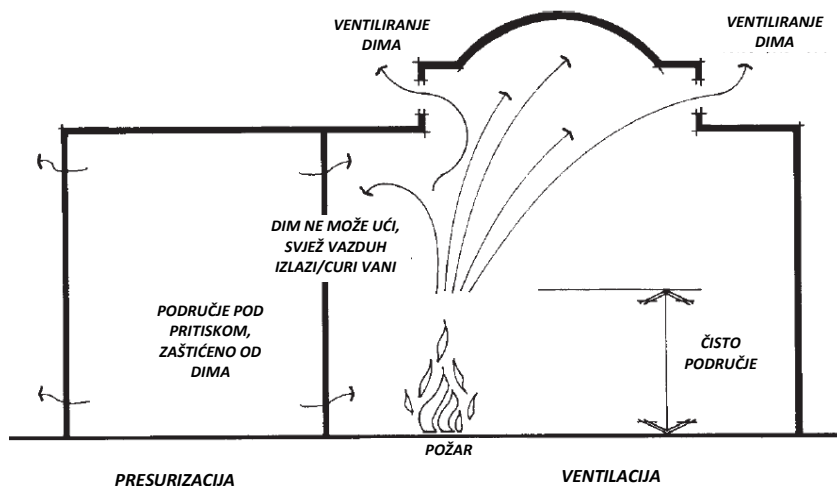


Slika 23. Primeri stepeništa sa zaštićenim pristupom lobijem [5]

Bolji način zaštite od navedenog jeste *povećanjem pritiska (presurizacija)* u takvim zaštićenim zonama, hodniku ili stepeništu. Jedna od mogućnosti je i izvlačenje dima iz

prostoriya predviđenih za evakuaciju, ali ovo rješenje je daleko od idealnog jer sa sobom nosi i opasnost od uvlačenja većih količina dima u ovo područje.

Presurizacija je prikladna za prostore manje zapremine i to ne samo za sprečavanje prodora dima u uslovima požara, nego i održavanje "čiste atmosfere" bez kontaminata kao npr. u operacionim salama ili tvornicama elektronske opreme (slika 24).



Slika 24. Korištenje presurizacije i ventilacije kao strategije za kontrolu dima [4]

Svjež vazduh se dovodi u prostor presurizacije, a pritisak se održava na nivou višem od onoga u okolnim prostorijama. Kada se vrata u području sa pozitivnim pritiskom otvaraju vazduh će prije iz ovakve prostorije izlaziti vani nego što će dim ući unutra. Osim toga, kada su vrata zatvorena pozitivan pritisak koji je ostvaren će spriječiti prostrujavanje kroz pukotine u ovo područje i svježi zrak će oticati vani u susjedne prostore.

Moguće je staviti pod pritisak samo stepenice, ali je očigledno mnogo bolje (i prostrujavanje će biti znatno smanjeno) ako su i stepenišna predvorja pod pritiskom. Idealno rješenje je da se cjelokupni evakuacioni put stavi pod povišen pritisak, uključujući i horizontalne i vertikalne dijelove.

1.5.3. Gašenje požara

Tri su glavna načina primjene sredstava za gašenje: od strane lica koja se zateknu u požaru sa ručnom opremom za gašenje požara, sistemima automatskog gašenja i gašenje od strane vatrogasnih službi. Arhitekta i projektanti moraju tokom faze projektovanja razmotriti i predvidjeti koji od ovih načina se mogu očekivati, a zatim projektovati kako bi osigurali njihovu efikasnost.

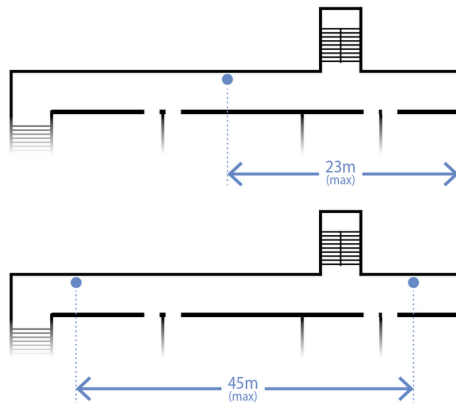
Arhitekta ima važnu ulogu u obezbjeđivanju odgovarajuće opreme za ručno gašenje požara (ručni aparati, vatrogasna čebad i crijeva) u dovoljnom broju i na zahtijevanim lokacijama.

Broj i raspored *aparata za ručno gašenje požara* zavisi od procjene rizika od požara.



Slika 25. Aparat za gašenje i hidrant u hotelskoj sobi
(<http://www.travelino.hr>)

Aparate za gašenje treba postaviti na mjestima gdje su lako dostupni u požaru. Postavljaju se u blizini ulaza u svaki sektor, tako da se nalaze na putevima za evakuaciju i da budu na raspolaganju licima koja ulaze u to područje da bi gasila požar.



Slika 26. Putna udaljenost između aparata za gašenje požara [8]

Po preporukama UNOPS-a maksimalna površina prostora po jednom aparatu je 500 m², a maksimalna dužina trase za kretanje između aparata za gašenje je 45 m ili 23 m ako zgrada sadrži jedan aparat za gašenje [8].

Za gašenje požara u zgradama izvodi se i posebna vodovodna mreža – *hidrantska mreža* sa specijalnim priključcima koja se koristi kada se aparatima za početno gašenje ne može ugastiti požar i kada su potrebne veće količine sredstva za gašenje.

Tri su vrste hidranata: zidni, nadzemni i podzemni, a mreža se izrađuje kao unutrašnja i vanjska hidrantska mreža. Postavljaju se na pristupačnim mjestima u zgradama, uglavnom u stubištima, u ormariće na način da se cjelokupan prostor koji se štiti može pokriti mlazom vode.

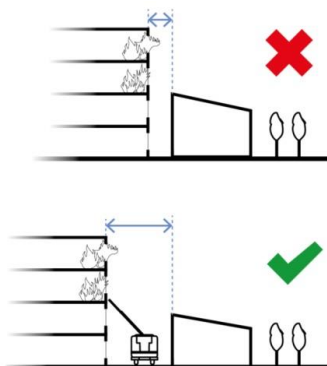
Rastojanje vanjskih hidranata određuje se zavisno od namjene, veličine i karakteristika objekta.



Slika 27. Unutrašnji i vanjski (nadzemni) hidranti

Za sve zgrade površine veće od 500 m² potrebna su namjenska vitla i cijevi za gašenje požara. One moraju obuhvaćati najmanje 30 m dugo vatrogasno crijevo prečnika 25 mm koje se nalazi na koturu i crijevo izlaznog otvora od 38 mm koji može davati 60 l/min vode tokom najmanje 30 minuta. Crijevo mora imati domet 6 m od najudaljenijeg dijela zgrade (najudaljeniji od lokacije hidranta). Mjesto hidranta mora biti uz izlaz ili izlazno stubište iz zgrade. Ako udaljenost ispunjava navedene zahtjeve, može se koristiti jedan hidrant za opsluživanje dvospratne zgrade. Određivanje broja vodova, vitlova i linija vodoopskrbe određuje se prema očekivanom korišćenju objekta, broju lica i drugim instalisanim sistemima za zaštitu od požara [8]. Navedeni zahtevi su minimalni međunarodni propisi, Svaka zemlja pojedinačno definiše svoje propise.

U početnoj fazi projektovanja zgrade potrebno je konsultovati inženjere bezbednosti od požara radi potvrđivanja svih mjera zaštite od požara i ispunjenja zahtjeva za pristup vatrogasnim vozilima (slika 28), lokacije vanjskih hidranata, broja i njihovog kapaciteta, kao i obezbjeđenja komunikacionih veza za obavijesti o aktiviranju alarma.



Slika 28. Pristup vatrogasnim vozilom [8]

Sistemi za *automatsko gašenje* su sistemi koji se aktiviraju po nastanku požara bez ikakvog djelovanja ljudi. Najčešći oblik automatskog gašenja je sprinkler instalacija, ali su dostupni i drugi oblici za specifične rizike.

Sprinkler instalacije su u upotrebi od kraja XIX vijeka i najrasprostranjeniji su tip stabilnih instalacija za gašenje. Koriste se za automatsko gašenje požara u različitim tipovima objekata koji mogu biti i različitog požarnog opterećenja (hoteli, muzeji, škole, robne kuće, i sl.). Smatraju se veoma djelotvornim u smanjenju gubitaka imovine u toj mjeri

da osiguravajuće kuće daju značajne popuste na premije vlasnicima zgrada u kojima su instalirane (čak do 60-80%).

Sprinkler instalacije mogu biti mokri sistem koji se koristi u prostorijama gdje nema opasnosti od zamrzavanja ili isparavanja vode i u kojima je cjevovod uvijek napunjen vodom, te suvi sistem u čijem se cjevovodu nalazi vazduh pod pritiskom. Mogu se montirati na stropu ili na zidove; nekada je potrebno da budu postavljeni čak i na različitim visinama (npr. skladišta u kojima se drži roba u gomilama na različitim visinama).

Sprinkler sistemi su projektovani za gašenje malih požara ili za kontrolu požara do dolaska vatrogasne službe. Sistem se aktivira pucanjem staklene ampule koja se nalazi u glavi prskalice (koja je osjetljiva na toplotu), ispušta vodu preko područja ispod glave sprinklera nakon njenog aktiviranja. Više sprinkler glava će se aktivirati ako temperatura lokalno poraste.

Sprinkler sistem će spriječiti male požare da prerastu u velike, a može i ugasiti požare.



Slika 29. Sprinkler uređaj (<https://www.houseidea.pw>)

Doprinos sprinklera u podizanju stepena sigurnost ljudskih života je teško kvantifikovati. Njihova vrijednost leži u ograničavanju požara i omogućavanju licima zatečenim u požaru da se evakuiraju.

U ispitivanjima provedenim nakon Woolworth² požara, maksimalne temperature na nivou stropova s instalisanim sprinkler prskalicama bile su 190°C a bez sprinkler instalacije 940°C. Zapremina nastalog dima i gasova u prvih 7 minuta s prskalicama je bila 1500 m³, a bez njih 10.000-20.000 m³. Takođe se procjenjuje da bi se s prskalicama dobila dodatna minuta za evakuaciju i da bi požar bio doveden pod potpunu kontrolu u 22 minute. Bilo je i nekih dilema po pitanju efikasnosti sprinkler sistema u požaru jer su zabilježeni i slučajevi kada se nisu aktivirali, za šta dokazi nisu potpuno jasni.

Osim sprinkler uređaja za kontrolu požara se koriste i *drenčer (deluge) sistemi* koji se mogu aktivirati ručno ili povezati u sistem sa detekcijom požara. Drenčer sistemi se uglavnom instaliraju sa spoljašnje strane zgrade (iako mogu biti i unutrašnji) da bi je štitili od prenosa požara sa susjednih zgrada. Uglavnom se postavljaju na krovove ili preko prozora ili drugih otvora.

Drenčer sistemi se koriste u zonama s visokim požarnim opterećenjem, odnosno tamo gdje se očekuje vrlo brzo širenje požara. Veoma su slični sprinkler sistemima jer imaju mlaznice za vodu s cjevovodima, ventilske stanice i sistem vodosnabdijevanja. Razlikuju se od sprinklera jer su drenčer mlaznice otvorene i nemaju toplinski osjetljiv element, tako da pri aktivaciji sistema voda izlazi na sve mlaznice, a ne samo lokalno kao kod sprinklera.

² Anon (1980) Report of the Woolworth's fire, Manchester. Fire Prevention, 138, 13-24



Slika 30. Drenčer sistem (www.themeparkpro.co)

Drenčeri se također mogu koristiti za hlađenje elemenata konstrukcije (npr. čelične krovne grede), a posebno su vrijedni kao dodatna zaštita na otvorima unutar zidova sektora. Ovi sistemi se uglavnom koriste kada je moguće širenje požara velikom brzinom. Služe i za odvajanje sektora koji je zahvaćen požarom (vodena zavjesa). Nalaze primjenu i u hlađenju rezervoara za tečnosti sa niskom temperaturom plamišta, kao i za gašenje tih postrojenja. Drenčer instalacije mogu se koristiti i za nanošenje pjene za gašenje požara.

Vodene zavjese predstavljaju specijalan primjer korištenja drenčer instalacija čiji je zadatak da spriječe širenje požara iz jednog u drugi požarni sektor (slika 31). Vodene zavjese nastaju od mlaza vode iz drenčer instalacije i njihovo aktiviranje se vrši putem centrale za dojavu požara. Vodene zavjese omogućavaju dodatnu sigurnost kod podjele prostora na požarne sektore.



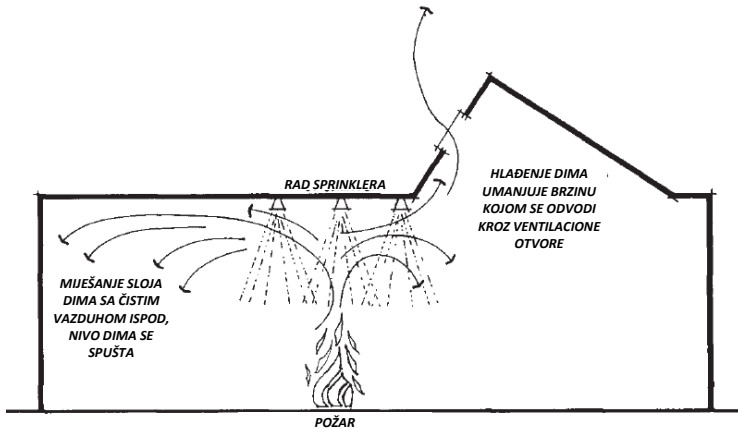
Slika 31. Vodena zavjesa (www.coopersfire.com)

Osim navedenih automatskih sistema u upotrebi su i stabilni sistemi za gašenje požara s inertnim plinovima, vodenom maglom, pjenom, ugendioksidom, posebni sistemi za zaštitu kuhinja od požara itd. Neki sistemi, zbog toksičnosti sredstva za gašenje i smanjenja sadržaja kiseonika u prostoru, nisu primjenjivi u zgradama u kojima borave ljudi, dok se sistemi koji kao sredstvo za gašenje koriste pjenu i prah u nekim situacijama ne mogu koristiti zbog uticaja sredstva za gašenje na sadržaj objekta.

1.5.4. Interakcija aktivnih i pasivnih mjera

Evidentne su negativne posljedice interakcije ventilacionih uređaja i sprinkler sistema. Problemi su uzrokovani rashladnim djelovanjem vode na dim čime je

onemogućeno njegovo uzgonsko strujanje naviše. U vezi s ovom pojavom provedeno je niz testova i objavljene su smjernice za projektovanje.



Slika 32. Međudjelovanje sprinklera i ventilacije [4]

Problem uzrokovan međudjelovanjem sistema za odimljavanje i sprinkler instalacije manifestuje se na način da se oblak dima ne podiže i stoga smanjuje vidljivost tokom evakuacije; ili u drugom slučaju, strujanje naviše usljed ventilacije uzrokuje gubitke efekta kapljica vode koje padaju iz glave sprinkler uređaja. Ako su oba sistema instalirana u skladištima, sprinkleri se trebaju aktivirati prije uređaja za odvođenje dima, a u drugim područjima gdje je važna evakuacija oba sistema mogu djelovati zajedno.

Pored mogućeg negativnog uticaja prskalica na rad ventilacionih sistema, moguće je i obrnuto. Ukoliko se ventilacioni sistem aktivira prije aktiviranja prskalica, njihovo djelovanje može biti odloženo. Međutim, u većini slučajeva, ovo odlaganje aktiviranja se smatra zanemarljivim.

1.6. Evakuacija

Sedamdesetih godina prošlog vijeka provedena su opsežna istraživanja u SAD i Engleskoj koja su se odnosila na ponašanje ljudi u požaru; uslijedila su istraživanja u Kanadi i Japanu, a potom i u Njemačkoj osamdesetih godina. Istraživanja, koja su obuhvatila požare u stambenim objektima, bolnicama, poslovnim zgradama, hotelima, pozorištima, tržnim centrima, dala su različite rezultate koji su bili u direktnoj korelaciji sa tradicijom vezanom za gradnju objekata (drvene kuće ili zgrade od cigle), održavanjem građevine, informisanosti ili disciplinom ljudi u odnosu na zaštitu od požara.

Evakuacija je jedno od najvažnijih pitanja u požaru i svaka zgrada mora biti projektovana tako da se lica koja se zateknu u požaru mogu evakuisati samostalno ili uz pomoć spasilaca/drugih lica. Sve osobe moraju biti u stanju da dođu do bezbjednog mjesta prije nego što ih savlada dim ili vatra, odnosno vrijeme potrebno za bijeg mora biti kraće od vremena za koje će se požar širiti, što je moguće postići kontrolom širenja požara i dima, te obezbjeđenjem puteva za evakuaciju koji nisu predugački niti previše složeni.

Postoje dvije osnovne strategije bijega od požara: prvo, *izlaz (egress)* - jednostavno, direktan bijeg iz zgrade kada se oglasi alarm i drugo, *utočište (refuge)* – korištenje konstrukcijsko izdvojenog i požarno otpornog prostora koji čini bezbedno mjesto unutar zgrade, tako da se evakuacija vrši iz sektora u kojem se desio požar u susjedni sektor. Postoji i treća strategija: spašavanje ugroženih od strane ljudi izvan zgrade (primjenljivo

samo kod niskih zgrada; nije primjenljivo za hronične bolesnike i nemoćne, kao ni invalidne osobe).

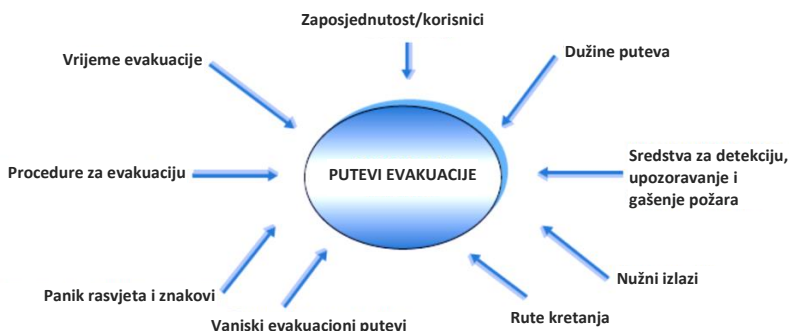


Slika 33. Tipično moderno stepenište za evakuaciju [1]

Pod pojmom “evakuacioni putevi” podrazumijevaju se konstrukcijske mere kojima se osiguravaju bezbjedni putevi za kretanje iz bilo kojeg dijela zgrade na sigurno mjesto. Evakuacioni putevi su, dakle, najfundamentalnija od navedenih mjera zaštite od požara potrebna za osiguranje života, i moraju biti planirani u ranoj fazi projektovanja zgrade.

Prilikom projektovanja važno je razmotriti buduće potencijalne stanare/korisnike zgrade i njihove obrasce ponašanja, što može imati veći uticaj od nekih fizičkih faktora dizajna koji su definisani u kodovima i smjernicama.

Osnovne karakteristike korisnika zgrada su brojnost, pokretljivost, poznavanje prostora, odgovor na požarni alarm i rizik od spavanja (zgrade u kojima ljudi spavaju opasnije su od onih koje se koriste samo tokom dana).



Slika 34. Faktori koji utiču na evakuaciju [1]

“Sigurno mjesto” uglavnom se nalazi izvan zgrade; bijeg na ravne krovove ili slične prostore, od kojih ne postoji put do nivoa ulice, ne predstavlja evakuacioni put u savremenom smislu tog pojma (iako je ranije prihvatano u određenim okolnostima). Ni prozori ne predstavljaju put za evakuaciju, osim u nekim situacijama kada su prihvaćeni u

građevinskim propisima kao alternativni putevi bijega iz nekih prostorija u jednospratnicama ili dvospratnim stambenim zgradama.

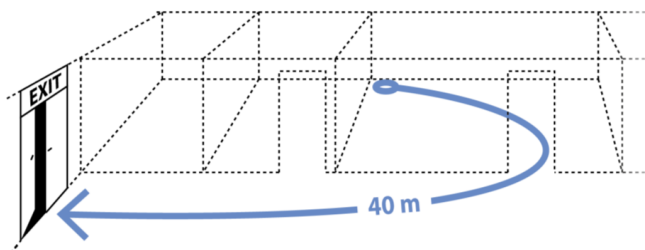
Evakuacija invalidnih osoba ne bi se trebala oslanjati samo na spašavanje od strane vatrogasaca i spasilačnih službi; u ovom slučaju za zgrade sa dva i više spratova primarna sredstva za evakuaciju trebaju biti adekvatni liftovi za evakuaciju uz uslov postojanja alternativnih puteva preko stepeništa.

1.6.1. Uslovi za evakuaciju

Sve zgrade trebaju ispunjavati osnovne uslove za evakuaciju i bijeg u slučaju požara: adekvatna evakuaciona trasa, jasno označeni putevi, dovoljan broj izlaza, pravilno otvaranje vrata, dovoljne širine izlaznih vrata, dovoljne širine hodnika i stepeništa, pravilno projektovani slijepi hodnici, nužno osvjetljenje.

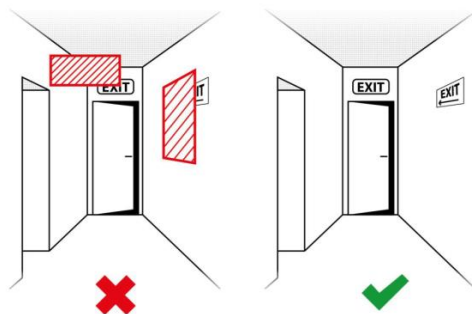
U nastavku su date ilustracije i definicije kako ih navodi UNOPS u Design planning manual iz 2014. godine [8].

- Evakuaciona trasa: jasno označena vrata prema izlazu iz zgrade ili stubišta sa viših spratova, maksimalne dužine kretanja do 40 m od najudaljenije tačke na spratu.



Slika 35. Maksimalna dužina kretanja

- Vidljivost oznaka: znakovi za izlaz trebaju biti uočljivi i vidljivi; moraju se predvidjeti i u hodnicima gdje su izlazna vrata zaklonjena.

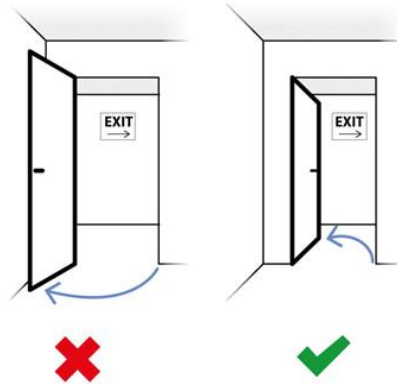


Slika 36. Vidljivost oznaka

- Broj izlaza: minimalno po spratu treba da budu na dvije lokacije, široko odvojeni kako bi osigurali alternativne tačke bijega. Zgrade u kojima boravi više od 500 ljudi po spratu zahtijevaju 3 izlaza, a preko 1000 ljudi po spratu zahtijevaju 4 izlaza.

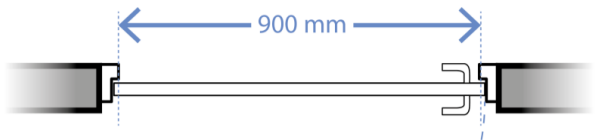
Iznimku predstavljaju male zgrade koje imaju manje od 100 m² i 20 ljudi po spratu, te za maksimalno dvospratnu zgradu mogu imati jedan izlaz.

- Smijer otvaranja izlaza: u svim prostorijama u kojima može boraviti više od 20 osoba trebaju se predvidjeti izlazna vrata koja se moraju otvarati u smijeru izlaznog puta (slika 37). Ostala vrata mogu se otvarati unutra, a ako su obezbijedena samo jedna vrata ona se moraju otvarati u smijeru izlaza.



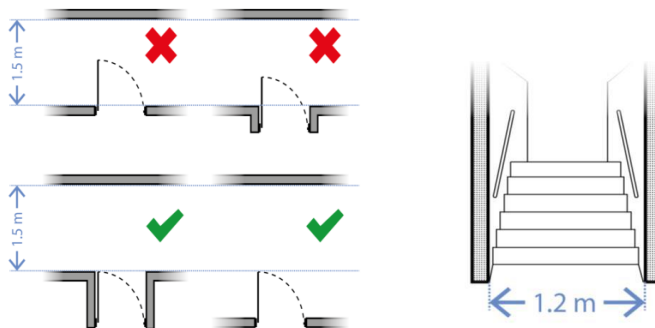
Slika 37. Smijer otvaranja izlaza

- Širina izlaznih vrata: širine svih izlaznih vrata (ili višestrukih vrata kao što su dvostruka vrata) moraju biti prikladne za očekivani broj ljudi. Minimalna svjetla širina izlaznih vrata je 900 mm unutar okvira (slika 38). Ovo se odnosi na sva vrata na izlaznom putu od izlaza iz sobe do izlaza iz zgrade, osigurava da su sva vrata dostupna invalidskim kolicima uz sprečavanje blokiranja vrata u slučaju nužde.



Slika 38. Širina izlaznih vrata

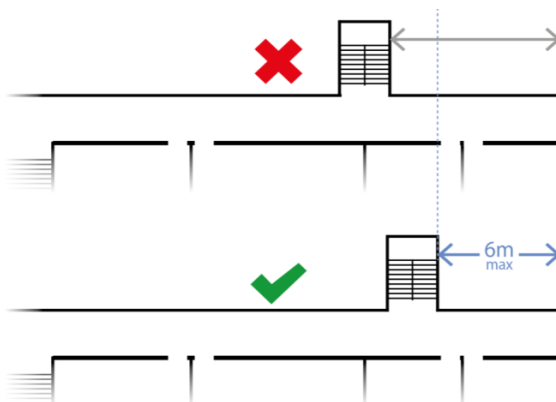
- Širina hodnika i stepeništa: sve širine stubišta i hodnika moraju biti prikladne za očekivani broj ljudi. Minimalna svjetla širina hodnika je 1.500 mm, a stepeništa između stijenki zidova 1.200 mm (slika 39). Otvaranje vrata u svjetlu širinu nije dopušteno. Ovo vrijedi i za vanjske pristupe balkonu kada se oni primarno koriste za izlaz.



Slika 39. Minimalna širina hodnika i minimalna svjetla širina stepeništa

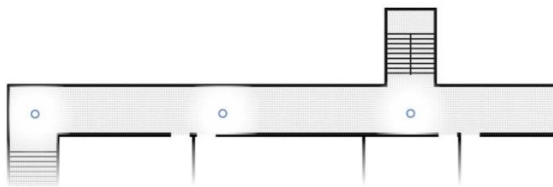
Jedini izuzetak od zahtjeva za širinu stepenica je da stepenice koje opslužuju manje od 50 lica mogu biti širine 900 mm između zidova.

- Slijepi hodnici ne smiju biti duži od 6 m do tačke odvajanja od glavnog izlaznog hodnika (slika 40). Izuzetak od ovog pravila jeste u uslovima kada je potreban samo jedan izlaz.



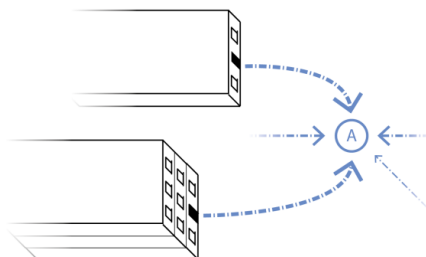
Slika 40. Slijepi hodnik

- Stepenište izolovano od vatre: ako zgrada ima više od 3 sprata, jedno od izlaznih stepeništa MORA biti izolovano od požara. Ovo se izvodi prikladnim građevinskim tehnikama kako bi se postiglo najmanje 2 sata vatrootpornosti uključujući sva vrata, prozore, zidnu i podnu konstrukciju. Izlaz sa izolovanog stepeništa u prizemlju mora voditi direktno na vanjsku stranu zgrade ili kroz hodnik koji ima vatrootpornost 2 sata.
- Sigurnosna rasvjeta: sve zgrade MORAJU imati sigurnosnu rasvjetu s rezervnom baterijom kako bi se osigurala sigurna evakuacija u slučaju nestanka struje (slika 41).



Slika 41. Sigurnosna rasvjeta

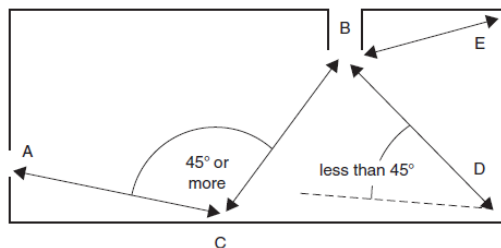
Na situacionim planovima potrebno je utvrditi *zborna mjesta* za stanare koji se evakušu i koja moraju biti dovoljno udaljena od zgrade kako bi se izbjegle ozljede uslijed padajućih krhotina od stakla ili zidova (slika 42).



Slika 42. Zborna mjesta (Assembly points)

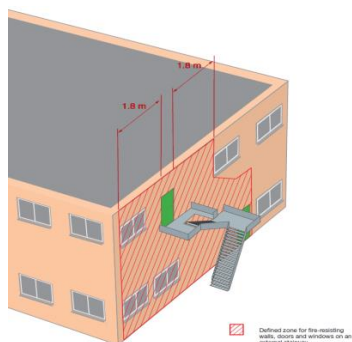
Posebnu pažnju valja posvetiti čuvanim objektima i skloništima za osobe u okolnostima u kojima nije sigurno ili poželjno da napuštaju zgrade (zatvori i sl.).

Pri razmatranju adekvatnosti izlaznih kapaciteta potrebno je razumjeti pojam “odvojeni izlazi” i pravilo 45°. Izlazi se mogu smatrati zasebnim samo ako se jedan u odnosu na drugi, gledano iz bilo koje tačke u dotičnoj prostoriji, nalaze pod uglom od najmanje 45°. Alternativni evakuacioni putevi su dostupni iz tačke C jer je ugao ACB 45° (ili više), i put CA ili CB (koji god je kraći) ne bi trebalo da bude veći od maksimalne dužine evakuacione trase definisane za alternativne pravce. Alternativni pravci nisu dostupni iz D jer je ugao ADB manji od 45°. Nema ni alternativnog puta od tačke E (slika 43).



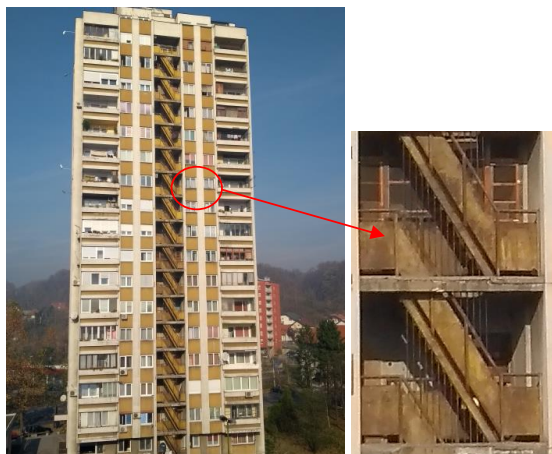
Slika 43. Pravilo 45° [1]

Alternativni putevi evakuacije trebaju biti pod uglom od najmanje 45° (kako je objašnjeno gore) ili, ako to nije slučaj, moraju biti međusobno odvojeni vatrootpornom konstrukcijom.



Slika 44. Zaštićeno vanjsko stepenište [5]

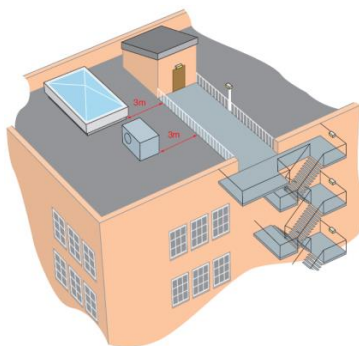
Da bi se vanjsko stepenište smatralo putem za evakuaciju ono mora biti zaštićeno od uticaja požara iz zgrade cijelom svojom dužinom [5], što znači da sva vrata, prozori i zidovi moraju biti vatrootporni (slika 44). Prozori trebaju biti fiksno zatvoreni, a vrata samozatvarajuća. Ova stepeništa ne bi se trebala koristiti u normalnim okolnostima.



Slika 45. Posljedice lošeg održavanja vanjskog požarnog stepeništa (visoki objekat Tuzla, BiH)

Vanjsko stepenište treba zaštititi od vanjskih uticaja (vlage, leda i sl.), te izraditi od neklizajućih materijala.

Nekada je opravdano koristiti krov za evakuacioni put. U tom slučaju potrebne su dodatne mjere: krov mora biti ravan, trasa kretanja mora biti jasno definisana i dobro osvijetljena, te zaštićena (ograđena), evakuaciona trasa preko krova mora biti konstruisana od vatrootpornih materijala, a izlaz sa krova mora voditi na sigurnije mjesto odakle se lica mogu u potpunosti spasiti.



Slika 46. Evakuacioni put preko krova [5]

Na slici 46 data je ilustracija tipičnog evakuacionog puta koji vodi preko krova zgrade.

1.6.2. Preskriptivni i inženjerski pristup planiranju evakuacije

Spašavanje ljudskog života najvažniji je cilj svih mjera zaštite od požara, a za njegovo ostvarenje neophodni su adekvatni planovi evakuacije.

Prilikom planiranja evakuacije koriste se dvije metode [7]:

- preskriptivna metoda (bazirana na propisima) i
- metoda performanse (izvedbe/učinka).

Prva metoda (a) se bazira na tri glavne veličine:

- gustina ljudi;
- protok ljudi i
- dužina i širina evakuacionih puteva.

Druga metoda (b) utvrđuje da li je potrebno vrijeme evakuacije manje od raspoloživog vremena za izlazak na sigurno mjesto.

- *Preskriptivni pristup*

Većina građevinskih propisa i standarda iz područja zaštite od požara koji se danas koriste su preskriptivni. Oni vuku svoje korijene iz XIX vijeka kada su veliki požari nametali potrebu za specifičnom gradnjom objekata.

Ti su kodovi sačinjeni bez efikasne procjene njihove adekvatnosti, prekomjernosti ili kolizije s drugim zahtjevima. Tako su nastali propisi bazirani na empirizmu i iskustvu, a ne na naučnom razumijevanju požara. U međuvremenu je učinjeno mnogo napretka u zaštiti od požara, ali sva saznanja nisu ugrađena u svakodnevnu praksu.

Propisane metode za procjenu sigurnosti evakuacije temelje se na sljedećem:

- broj izlaza i maksimalna širina i dužina evakuacionih puteva,
- maksimalno vreme za evakuaciju i
- strategija upravljanja za održanje puteva za spasavanje dostupnim i sigurnim.

Pretpostavljena je brzina kretanja korisnika objekata na oko 0,5 m/s, a vrijeme izlaska oko 3-5 min. Ove vrijednosti su zadovoljavajuće za većinu situacija, ali u nekim slučajevima mogu biti nedovoljne i tada je nužan inženjerski pristup.

- *Inženjerski pristup*

Metod performansi temelji se na definiciji i poređenju između *raspoloživog* vremena za dolazak na sigurno mesto, ASET (dostupno vrijeme za sigurnu evakuaciju) i vremena *potrebno*g licima zatečenim u požaru da dođu do sigurnog mjesta RSET (vrijeme potrebno za sigurnu evakuaciju).

Inženjerski pristup podrazumijeva određivanje granice sigurnosti, koju daje razlika između ASET i RSET vremena (slika 47).

$$T_{safety} = T_{ASET} - T_{RSET} \quad (1)$$

Metoda performanse/izvedbe primjenjiva je u složenim ili modernim zgradama gdje preskriptivni pristup nije prihvatljiv. Pored toga, inženjerski pristup može se koristiti za procjenu i provjeru rješenja proisteklih iz preskriptivnih metoda.

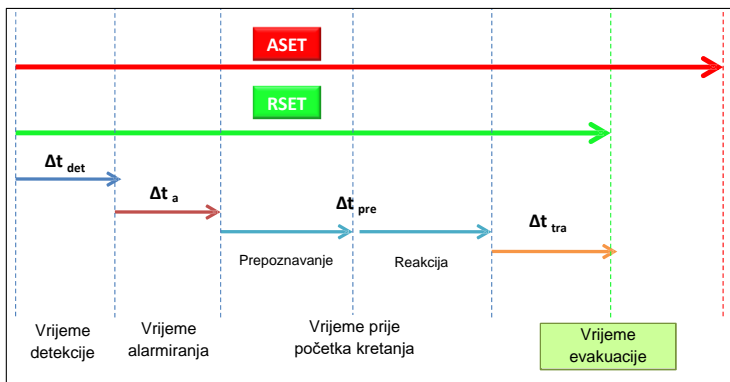
Da bi se izračunalo ASET vreme potrebno je detaljno proučiti požar, od paljenja do njegovog razvoja. To je izračunato vrijeme između izbijanja požara i vremena kada su „kriteriji održivosti“ prekoračeni zbog dima, toksičnih materija i toplote. Kraj ASET vremena je trenutak kada se uslovi u prostoru smatraju neizdrživim jer se lica koja se tamo nalaze više ne mogu sama spasiti.

RSET vrijeme zavisi od 4 različita “vremena” koja su u direktnoj vezi sa licima koja se spašavaju i to njihovim fizičkim stanjem i biheioralnim karakteristikama.

Ta vremena su:

- vrijeme detekcije - t_{det} (vrijeme od trenutka nastanka požara do njegove detekcije bilo ručnim ili automatskim putem),
- vrijeme alarma - t_a (vrijeme od detekcije do aktiviranja alarma),
- vrijeme prije pokretanja - t_{pre} (vrijeme od detekcije do pokretanja prve grupe lica),
- vrijeme kretanja - t_{tra} (vrijeme potrebno za stizanje na sigurno mjesto).

$$t_{RSET} = \Delta t_{det} + \Delta t_a + (\Delta t_{pre} + \Delta t_{trav}) \quad (2)$$



Slika 47. Vrijeme evakuacije [7]

Četiri vremena snažno su pod utjecajem ljudskog ponašanja, zbog čega ih nije lako jednoznačno odrediti. Za analizu se u razmatranje uzima ponašanje korisnika u stvarnim i simuliranim hitnim situacijama.

Za sigurnu evakuaciju, od presudne je važnosti precizno projektovanje puteva evakuacije (u odnosu na udaljenost do sigurnog mjesta) i vremena evakuacije.

Izbor najprikladnijeg pristupa i metode proračuna za adekvatan dizajn evakuacije odgovornost je inženjera uz dostupne različite mogućnosti: od najjednostavnijih manualnih proračuna do najsofisticiranijih softverskih simulacija, u zavisnosti od cilja i željenog nivoa tačnosti.

LITERATURA

- [1] A. Furness, M. Muckett, "Introduction to Fire Safety Management", Elsevier, 2007.
- [2] A. H. Buchanan & A. K. Abu, "Structural Design for Fire Safety", 2nd ed., John Wiley & Sons, Ltd, 2017.
- [3] J. A. Purkiss, "Fire Safety Engineering Design of Structures", 2nd ed., Elsevier Ltd., 2007.
- [4] P. Stollard & J. Abrahams, "Fire from First Principles", 3rd ed., Routledge,
- [5] HM Government, "Fire Safety Risk Assessment, Residential Care Premises", ISBN: 978 1 85112 818 1, 2006.
- [6] Schleich J, B, "Fire Actions in Buildings" Leonardo Da Vinci Project CZ/02/B/F/PP-134007, Development of Skills Facilitating Implementation of Eurocodes, Handbook 5, Design of Buildings for the Fire Situation, Luxembourg, 2005. Pages I-1 to I-81.
- [7] The Confederation of Fire Protection Associations in Europe (CFPA E), "Fire safety engineering concerning evacuation from buildings", (CFPA-E No 19:2009).
- [8] UNOPS, "Design Planning Manual for Buildings", Technical framework for minimum requirements for infrastructure design, Version 1.1, 2014.
- [9] J.S. Hopkinson, "Fire Spread in Buildings", Paper IP 21/84. Garson: BRE, 1984.
- [10] A.Y. Botma, "Research to the performance and adequacy of Fire compartmentation", Delft University of Technology, January 2013, Available: <https://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/201301-a-botma-research-to-the-performance-and-adequacy-of-fire-compartmentation.pdf>, Accessed on: Jan, 2019.
- [11] Netherlands Institute of Safety Nibra, "Consumer fire safety: European statistics and potential fire safety measures", Versie: 431N8032/3.0, January 2009.
- [12] BAS EN 1991-1-2:2015, Evrokod 1: Dejstva na konstrukcije - Dio 1-2: Opšta dejstva - Dejstva na konstrukcije izložene požaru, Institut za standardizaciju BiH, 2015, Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina
- [13] DIN 4102, Fire behavior of building materials and components
- [14] EN 13501-1:2010 (Fire classification of construction products and building elements – Part 1: Classification using test data from reaction to fire tests)

KARAKTERISTIKE GRAĐEVINSKIH MATERIJALA NA VISOKIM TEMPERATURAMA

Vesna Bulatović, Mirjana Malešev

1. UVOD

Tokom požara temperatura raste i formira se neujednačeno polje temperature. Zbog toga se građevinski materijali u unutrašnjosti konstruktivnog elementa oštećuju različitim intenzitetom [1]. Podvrgnuti su fizičko-hemijskim procesima, koji su povezani sa transformacijama mikrostrukture i promenama u karakteristikama [2]. Kada konstruktivni element ima noseću i potpornu ulogu, treba da ima dovoljnu čvrstoću određeni period tokom trajanja požara kako bi vatrogasci mogli da se bore sa požarom, da spasu povređene na sigurno, uklone poginule, kao i da spasu dragocenu imovinu [1].

Najčešće vrste materijala koje se koriste u konstrukcijama su drvo, čelik, armirani beton, opeka i slično.

2. KARAKTERISTIKE MATERIJALA NA VISOKIM TEMPERATURAMA

Izbor odgovarajućeg materijala i sklopa konstrukcije zahteva poznavanje njihovih karakteristika tokom požara, kako bi ispunili očekivane zahteve u toku njegovog trajanja [3]. Ponašanje konstruktivnog elementa izloženog požaru je jednim delom zavisno i od toplotnih i mehaničkih karakteristika materijala od kojeg je napravljen. Iako se tehnike proračuna koje se koriste za predviđanje oštećenja elemenata konstrukcije tokom požara brzo razvijaju, istraživanja koja se odnose na prikupljanje ulaznih informacija ne drže korak sa njima [2].

Generalno, građevinski materijali mogu biti gorivi (zapaljivi) i negorivi (nezapaljivi). Negorivi materijal će se oštetiti pri višoj temperaturi vatre ali se neće zapaliti. Gorivi materijal se neće samo oštetiti pri višim temperaturama, već će se zapaliti i goreti, i na taj način dodavati gorivo tokom požara [4]. Za gorivost je veoma važno sledeće: širenje plamena, doprinos goriva i razvoj dima [3].

Većina građevinskih materijala nije stabilna u temperaturnom intervalu 20°C do 800°C, i prikupljanje informacija o njihovim karakteristikama kroz ovaj interval nije jednostavno. Termofizičke i mehaničke karakteristike većine materijala menjaju se značajno u ovom intervalu temperature koji je povezan sa požarom u konstrukciji. Na primer, beton na 500°C je kompletno različit od betona na sobnoj temperaturi [2], čelik je veoma osetljiv na toplotu i gubi polovinu svoje čvrstoće na 500°C dok su dimenzije drvene konstrukcije redukovane kao rezultat gorenja i formiranja ugljeničnog sloja na površini elementa [5].

Istraživanje o primeni materijala u ovoj oblasti ima brojne poteškoće. Većina karakteristika materijala je zavisna od temperature i osetljiva na različite parametre tokom ispitivanja kao što su brzina zagrevanja, brzina deformacije, temperaturni gradijent i dr. Harmathy [2] navodi da nedostatak adekvatnog znanja o ponašanju građevinskih materijala na povišenim temperaturama uvodi najviše problema u inženjerstvo bezbednosti od požara. Važno je koristiti vrednosti koje garantuju slaganje eksperimentalnih i analitičkih rezultata i znati kako koristiti i proširiti informacije dobijene na osnovu prethodnih razmatranja i prikupljenih iz tehničke literature. Za određivanje ponašanja konstruktivnih elemenata

tokom požara od presudnog je značaja poznavanje jedinstvenih karakteristika materijala na povišenim temperaturama. Ove karakteristike su diskutovane u narednim poglavljima.

Približne temperature topljenja za neke materijale date su u Tabeli 1 [6].

Tabela 1
Približne temperature topljenja za neke materijale [6]

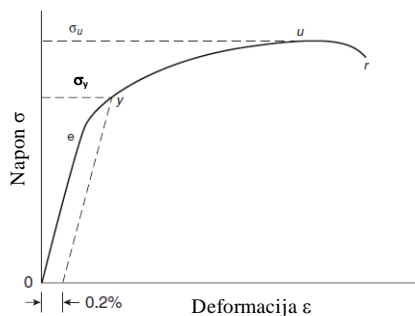
Materijal	Približne temperature topljenja materijala (°C)
Polietilen	110-120
Olovo	330
Cink	420
Legure aluminijuma	500-650
Aluminijum	650
Staklo	600-750
Srebro	950
Mesing i bronza	850-1000
Bakar	1100
Liveno gvožđe	1150-1300
Čelik	>1400

2.1. Mehaničke karakteristike

Osnovne mehaničke karakteristike koje određuju ponašanje konstruktivnih elemenata u požaru su čvrstoća, modul elastičnosti i tečenje komponentnih materijala pri povišenoj temperaturi.

Odnos napon-deformacija

Mehaničke karakteristike čvrstih tela su obično dobijene iz standardnih testova za određivanje čvrstoće pri pritisku i zatezanju. Svojstva čvrstoće su obično izražena preko odnosa napon-deformacija i često se koriste kao ulazni podaci u matematičkim modelima za računanje požarne otpornosti. Promena napona sa povećanjem deformacije za metale prikazana je na Slici 1. Zbog smanjenja čvrstoće i povećanja deformacije materijala, nagib krive napon-deformacija se smanjuje sa povećanjem temperature [2].

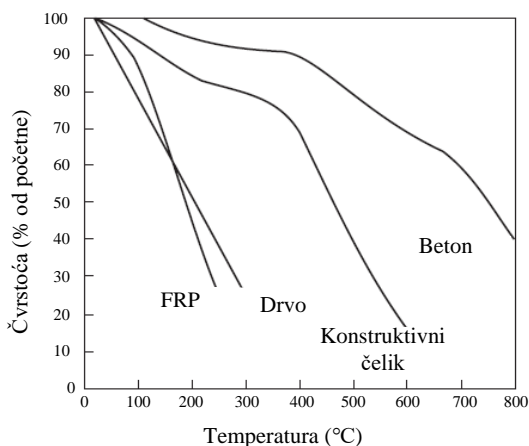


Slika 1. Kriva napon-deformacija za metale [2]

Deo krive 0-e (Slika 1) prikazuje elastičnu deformaciju materijala koja je trenutna i povratna. Nagib tog dela krive je modul elastičnosti E (Pa). Između tačke e i u deformacija

je plastična, nepovratna. Plastično ponašanje materijala karakteriše napon tečenja σ_y (Pa) i maksimalni napon σ_u (Pa). Čvrstoća materijala na zatezanje ili pritisak je generalno izražena preko napona tečenja i maksimalnog napona. Nakon određenog smanjenja poprečnog preseka ispitivani uzorak se kida u tački r [2].

Slika 2 pokazuje promene čvrstoće sa temperaturom, preciznije odnos čvrstoće na povišenoj temperaturi i čvrstoće na sobnoj temperaturi, za beton, čelik, drvo i FRP (polimer ojačan vlaknima). Važi pravilo kod svih materijala da se sa povećanjem temperature smanjuje čvrstoća, ali je brzina smanjenja različita. Za materijal kao što je beton, čvrstoća pri pritisku je od najveće važnosti jer taj materijal ima ograničene vrednosti čvrstoće pri zatezanju. Međutim, za materijale kao što je čelik, i čvrstoća pri pritisku i čvrstoća pri zatezanju su od iste važnosti [2].



Slika 2. Promena čvrstoće sa temperaturom za različite materijale [2]

Modul elastičnosti

Modul elastičnosti (E) je odnos napona koji izaziva deformacije prema dilataciji u materijalu i predstavlja meru mogućnosti materijala da se odupre deformaciji. Generalno, modul elastičnosti materijala se smanjuje sa povećanjem temperature.

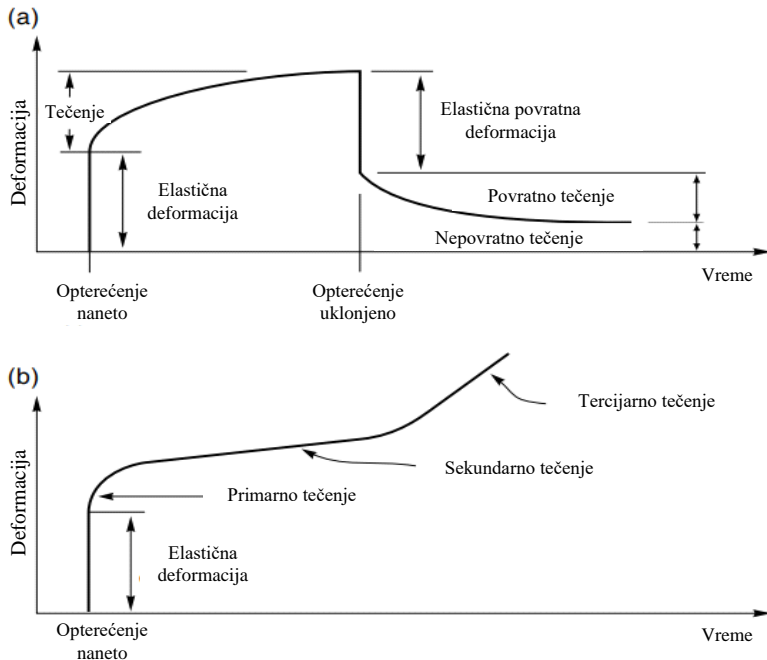
Tečenje

Tečenje se definiše kao vremenski zavisna plastična deformacija materijala i obeležava se sa ϵ_t . To je termin koji objašnjava dugotrajnu deformaciju materijala pod konstantnim opterećenjem, međutim, pri normalnim naponima i pri ambijentalnim temperaturama deformacija usled tečenja nije značajna. Suprotno, pri višim naponima i pri povišenoj temperaturi, brzina deformacije uzrokovana tečenjem može biti značajna.

Za većinu materijala tečenje postaje značajno samo ukoliko je temperatura viša od približno jedne trećine temperature topljenja materijala. Glavni faktori koji utiču na tečenje su temperatura, vrednosti napona i njihovo trajanje. Dopunski izraz za ovaj pojam je "relaksacija" koja objašnjava smanjenje napona u materijalu koji je podvrgnut konstantnoj deformaciji duži vremenski period [6].

Ukoliko je posle izvesnog vremena uklonjeno opterećenje doći će do izvesnog smanjenja deformacija usled tečenja kao što je prikazano na Slici 3(a). Tečenje postaje

mного važnije pri povišenim temperaturama (Slika 3(b)) zato što može da se ubrza kako se smanjuje kapacitet opterećenja što vodi sekundarnom i tercijarnom tečenju [6].



Slika 3. Tečenje kod konstruktivnih materijala: a) tečenje pri normalnim uslovima, b) tečenje pri povišenoj temperaturi [6]

2.2. Toplotne karakteristike

Glavne karakteristike materijala koje utiču na povećanje temperature i njen raspored unutar elementa su:

- toplotna provodljivost,
- termička ekspanzija,
- specifična toplota,
- toplotna difuzija,
- gubitak mase i
- gustina i poroznost.

Ove karakteristike zavise od sastava i svojstava komponentnih materijala.

Toplotna provodljivost

Koeficijent toplotne provodljivosti materijala je definisan kao količina toplote (J) koja prođe kroz jediničnu površinu (m^2) sa uniformnom temperaturom, u jedinici vremena (h) i za jedinični temperaturni gradijent (K/m). Njena jedinica je $W/(mK)$ ili $W/(m^{\circ}C)$. Porast temperature u elementu usled prolaska toplote je funkcija toplotne provodljivosti materijala. U poroznim telima, kao što je većina građevinskih materijala, mehanizam prenosa toplote je kombinacija kondukcije, radijacije i konvekcije. Toplotna provodljivost će zavisiti ne samo

od provodljivosti čvrste matrice već takođe i od poroznosti materijala, veličine i oblika pora. Ukoliko je veličina pora manja od 5 mm, njihov doprinos provođenju toplote putem konvekcije je zanemarljiv. Zbog povećanja važnosti provođenja toplote kroz pore putem radijacije pri povišenim temperaturama, provođenje toplote postaje osjetljivo na temperaturni gradijent [1].

Ekperimentalni podaci pokazuju da poroznost nije tako zbujujući faktor sve dok nije veća od 10%. Međutim, kod izolacionih materijala, poroznost može biti 80% pa čak i veća. Ukoliko materijal nije suv, temperaturni gradijent će izazvati kretanje vlage, uglavnom mehanizmom isparavanja. Kretanje vlage je obično, ali ne i nužno, u pravcu kretanja toplote i manifestuje se očiglednim povećanjem toplotne provodljivosti materijala. Čak iako je materijal suv može biti podvrgnut razlaganju na povišenim temperaturama. Toplota stvorena na ovaj način povećava složenost procesa prolaska toplote kroz pore [1].

Toplotna provodljivost slojevitog, višefaznog čvrstog materijala zavisi u kom položaju se nalazi faza u odnosu na pravac provođenja toplote i određuje se pravilom jednostavne mešavine. Pri povišenim temperaturama, zbog toga što provođenje toplote putem radijacije kroz pore postaje značajno, njihov doprinos toplotnoj provodljivosti tela ne sme biti zanemareno. Toplotna provodljivost materijala je strukturno-zavisna karakteristika. Za kristalna tela toplotna provodljivost je relativno visoka na sobnoj temperaturi i postepeno se smanjuje kako temperatura raste. Sa druge strane, za dominantno amorfna tela toplotna provodljivost je mala na sobnoj temperaturi i polako raste sa povećanjem temperature. Toplotna provodljivost poroznog kristalnog materijala može da se poveća pri veoma visokim temperaturama zbog doprinosa prenošenja toplote kroz pore putem radijacije [1].

Zagrevanje materijala uzrokuje nepovratne promene mikrostrukture i obično je zbog toga toplotna provodljivost takvih materijala različita pri zagrevanju i hlađenju.

Termička ekspanzija

Termičku ekspanziju karakteriše širenje (ili skupljanje) materijala uzrokovano zagrevanjem. Definirano je kao širenje ili skupljanje jedinične dužine materijala kada se temperatura poveća za jedan stepen. Ekspanzija se uzima kao pozitivna kada se materijal izdužuje, a negativna kada se materijal skraćuje i zavisna je od temperature. Termička deformacija je ekspanzija koja se pojavljuje pri zagrevanju većine materijala i obično nije bitna za požarno projektovanje jednostavno poduprtih elemenata, ali se mora uzeti u obzir za složene konstruktivne sisteme, naročito kada su elementi ograničeni sa drugim delovima konstrukcije, a može izazvati i velike unutrašnje sile [6].

Specifična toplota

Specifična toplota supstance se definiše kao količina toplote koju apsorbuje pri porastu njene temperature [7]. Specifična toplota ili toplotni kapacitet (C_p) tela se takođe može definisati kao količina toplote koja je potrebna da poveća temperaturu jedinične mase tela za jedan stepen celzijus [1]. Jedinica je J/kgK. Koncept specifične toplote je obično povezan sa čvrstim telima i tečnostima, ali je jednako primenljiv i na gasove. Njene vrednosti za važne gasove pri konstantnom pritisku i određenom intervalu temperature date su u Tabeli 2 [1].

Tabela 2
Toplotni kapacitet izabranih gasova pri konstantnom pritisku [1]

Temperatura (K)	Cp (J/molK)				
	298	500	1000	1500	2000
Vrsta gasa					
CO	29,140	29,790	33,180	35,220	36,250
CO ₂	37,129	44,626	54,308	58,379	60,350
H ₂ O(g)	33,577	35,208	41,217	46,999	51,103
N ₂	29,125	29,577	32,698	34,852	35,987
O ₂	29,372	31,091	34,878	36,560	37,777
He	20,786	20,786	20,786	20,786	20,786
CH ₄	35,639	46,342	71,797	86,559	94,399

Ukoliko nisu dostupni eksperimentalni podaci za Cp u odnosu na T, mogu biti izračunati iz podataka o toplotnom kapacitetu i formiranju toplote za sve komponentne materijala i mogu se naći tabelarno date u brojnim priručnicima.

Toplotna difuzija

Toplotna difuzija je definisana kao odnos toplotne provodljivosti materijala prema njegovoj zapreminskoj specifičnoj toploti. Meri brzinu prenosa toplote od izložene površine materijala ka unutra. Slično toplotnoj provodljivosti i specifičnoj toploti, toplotna difuzija varira sa povećanjem temperature u materijalu. Toplotne karakteristike nekoliko materijala date su u Tabeli 3 [6].

Tabela 3
Toplotne karakteristike nekih materijala [6]

Temperatura (K)	Toplotna provodljivost λ (W/mK)	Specifična toplota Cp (J/kgK)	Gustina ρ (kg/m ³)	Toplotna difuzija α (m ² /s)
Bakar	387	380	8940	$1,14 \times 10^{-4}$
Čelik	45,8	460	7850	$1,26 \times 10^{-5}$
Opeka	0,69	840	1600	$5,2 \times 10^{-7}$
Beton	0,8-1,4	880	1900-2300	$5,7 \times 10^{-7}$
Staklo	0,76	840	2700	$3,3 \times 10^{-7}$
Gipsni malter	0,48	840	1440	$4,1 \times 10^{-7}$
PMMA	0,19	1420	1190	$1,1 \times 10^{-7}$
Hrast	0,17	2380	800	$8,9 \times 10^{-8}$
Vlaknaste izolacione ploče	0,041	2090	229	$8,6 \times 10^{-8}$
Poliuretanska pena	0,034	1400	20	$1,2 \times 10^{-6}$
Vazduh	0,026	1040	1,1	$2,2 \times 10^{-5}$

Gubitak mase

Gubitak mase se često koristi da izrazi smanjenje mase na povišenim temperaturama. Termogravimetrijska kriva je grafik koji prikazuje promenu mase u odnosu na temperaturu. Obuhvata reakcije koje su praćene gubitkom ili povećanjem mase, ali ne uzima u obzir promene u mikrostrukturi ili kristalnoj uređenosti materijala.

Gustina

Gustina ρ (kg/m^3) je masa materijala u jediničnoj zapremini, koja obuhvata čvrst materijal i pore ispunjene vazduhom, u suvom stanju. Toplotna provodljivost se najčešće povećava kako gustina raste i veoma često gustina određuje koliko brzo će se plamen proširiti preko površine materijala. Zbog toga je širenje plamena preko površine teških materijala obično sporije nego preko lakih [5].

Toplotna inercija

Jedna od važnih karakteristika materijala koja povezuje provodljivost, gustinu i toplotni kapacitet naziva se toplotna inercija i data je kao njihov proizvod. Tako na primer opeka i beton imaju visoke vrednosti toplotne inercije koja im omogućava da više toplote akumuliraju u sebe, na taj način snižavajući temperaturu vrelog gasa. Suprotno njima, izolacioni materijali imaju malu toplotnu inerciju [8]. U ovim materijalima sa malom toplotnom inercijom površina se brzo zagreva jer se u unutrašnjost materijala provodi manje toplote i tako dolazi do bržeg paljenja nego u slučaju materijala sa visokom toplotnom inercijom. Važi i obrnuto [5].

2.3. Specijalne karakteristike

Pored toplotnih i mehaničkih karakteristika, i neka druga svojstva kao što je ljuskanje betona i ugljenisanje drveta, utiču na ponašanje materijala na povišenim temperaturama. Ove karakteristike su jedinstvene za specifične materijale i presudne su za procenu ponašanja elemenata konstrukcije ili čitavog sistema u požaru.

Kritična temperatura

Kritična temperatura je definisana kao temperatura na kojoj materijal gubi najveći deo svoje čvrstoće i ne može više da prihvati naneto opterećenje. Na primer, američki standard (ASTM E119) pretpostavlja kritičnu temperaturu od 538°C za konstruktivni čelik i ova temperatura je takođe označena i kao temperatura loma za proračun požarne otpornosti čeličnih elemenata. Koncept kritične temperature se koristi za armaturu i prednapregnuti čelik u betonskim konstruktivnim elementima za ocenu požarne otpornosti. Ova otpornost je generalno obuhvaćena kroz minimalne dimenzije elemenata i minimalnu debljinu zaštitnog sloja betona. Zahtevi za minimalnu debljinu zaštitnog sloja betona su uvedeni kako bi se osiguralo da temperatura armature ne dostigne njenu kritičnu vrednost određeni vremenski period. Kritična temperatura za armaturni čelik je 593°C , dok za čelik za prednaprezanje ona iznosi 426°C [2].

Ljuskanje

Ljuskanje se definiše kao odvajanje slojeva (ili delova) betona sa površine betonskog elementa, Slika 4, kada je on izložen brzom povećanju temperature do visokih vrednosti, kao što je slučaj u požaru [2]. Može zavisiti od nekoliko mehanizama ili njihovih kombinacija kao što su pritisak u porama, pritisak usled temperaturnog gradijenta, razlike u toplotnoj dilataciji i hemijsko razaranje na povišenim temperaturama [9].



Slika 4. Ljuskanje betona [1]

Ljuskanje može da se pojavi veoma brzo nakon izlaganja toploti (obično u roku od 30 minuta pri jakoj izloženosti vatri [9]) i može biti povezano sa eksplozijom, ili može da se dogodi kada beton nakon zagrevanja postane tako slab da delovi otpadaju sa površine. Posledice mogu biti ograničene sve dok je obim oštećenja mali, ali obimno ljuskanje može da vodi ranom gubitku stabilnosti i integriteta elementa. Ovaj fenomen je veoma složen i ne može se predvideti jednostavnim matematičkim modelom [9].

Beton visokih čvrstoća (HSC-High Strength Concrete, beton sa čvrstoćom pri pritisku u intervalu od 50MPa do 100MPa) [2] se smatra mnogo osetljivijim na ljuskanje nego betoni normalnih čvrstoća (NSC-Normal Strength Concrete, beton sa čvrstoćom pri pritisku u intervalu od 20MPa do 50MPa). Najverovatniji razlog za to je niska propustljivost HSC betona i mali vodocementni faktor. U brojnim ispitivanjima HSC uzoraka, otkriveno je da je ljuskanje često eksplozivne prirode i da bi ga trebalo pravilno uzeti pri proceni ponašanja materijala u požaru. Na Slici 5 upoređeno je ljuskanje u NSC i HSC stubovima, korišćenjem podataka dobijenih iz požarnog testa na realno opterećenim stubovima [2].



(a)



(b)

Slika 5. Ljuskanje u a) NSC i b) HSC nakon izlaganja požaru [2]

Uočava se da je ljuskanje zaista značajno u slučaju HSC stuba. Ono je verovatno uzrokovano formiranjem pritiska u porama tokom zagrevanja. Izuzetno visok pritisak vodene pare, stvoren tokom izlaganja vatri, ne može da bude oslobođen usled visoke gustine

(i niske propustljivosti) HSC elemenata. Često može imati vrednost pritiska zasićenja vodene pare od približno 8MPa na 300°C, i takav unutrašnji pritisak je isuviše visok da bi mu se mogao odupreti HSC element koji ima čvrstoću pri zatezanju od približno 5MPa. Suvi uslovi na zagrejanju površini sa niskom propustljivošću betona vode ka jakom gradijentu u pogledu pritisaka. Kada pritisak vodene pare pređe vrednost čvrstoće na zatezanje betona, delovi betona otpadaju sa konstruktivnog elementa. Ljuskanje je zavisno od vatre ali i karakteristika betona. Međutim, drugi istraživači objašnjavaju pojavu ljuskanja na osnovu mehanizma loma i slažu se da je ljuskanje posledica ograničene toplotne dilatacije blizu zagrejanje površine.

Ljuskanje, koje često rezultira u brzom gubljenju betona tokom požara, izlaže dublje slojeve betona visokoj temperaturi i tako povećava brzinu prenosa topline do njih, uključujući i armaturu. Kada je armatura direktno izložena vatri, temperatura u njoj raste veoma brzo što vodi bržem smanjenju čvrstoće konstruktivnog elementa. Gubitak čvrstoće armature zajedno sa gubitkom čvrstoće betona usled ljuskanja značajno smanjuje otpornost na požar konstruktivnog elementa.

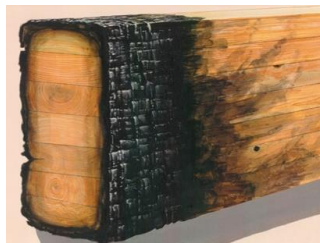
Uz čvrstoću i poroznost betona, gustina, intenzitet opterećenja, intenzitet požara, vrsta agregata i relativna vlažnost su osnovni parametri koji utiču na ljuskanje HSC elemenata. Promena poroznosti sa temperaturom je važna karakteristika koja je neophodna za predviđanje ljuskanja elementa od ovog betona [2].

Ugljenisanje drveta

Postoji bitna razlika između materijala koji formiraju ugljenisani sloj i onih koji ga ne formiraju. Ugljenisanje je proces formiranja sloja uglja na izloženoj površini drvenog elementa tokom izlaganja požaru [2]. Ugljenisani sloj koji se formira na površini materijala dok on gori, smanjuje brzinu prenosa topline u unutrašnjost materijala gde se javlja piroliza što za posledicu ima smanjenje brzine pirolize i gorenja tokom vremena.

Ovo smanjenje toplotne provodljivosti je posledica kako izolacionih karakteristika ugljenisanog sloja tako i zračenja sa ugljenisane površine čija temperatura može biti znatno iznad temperature pirolize materijala. Za materijale koji ne formiraju ugljenisani sloj, temperatura površine će biti na ili blizu temperature pirolize. Ovakvi materijali gore većom brzinom nego materijali koji formiraju ugljenisani sloj. Ovo je usled višeg ukupnog toplotnog fluksa na frontu pirolize, kod materijala koji formiraju ugljenisani sloj [10].

Tokom zagrevanja drvo prolazi kroz toplotnu degradaciju, što uključuje konverziju drveta u ugljen (sloj bez čvrstoće) i gas, što rezultira u smanjenju gustine drveta. Analize su pokazale da su temperature ugljenisanja drveta u intervalu 280°C do 300°C. Ovaj proces može da se pojavi još kod FRP i plastičnih materijala [2].



Slika 6. Ugljenisanje drveta [2]

Brzina ugljenisanja je definisana kao brzina na kojoj je drvo pretvoreno u ugljen. To je ključni parametar u određivanju požarne otpornosti drvenog konstruktivnog elementa. U standardnom ispitivanju otpornosti na požar primećeno je da je srednja brzina sagorevanja u pravcu poprečnom na pravac zrna približno 0,6 mm/min dok je brzina sagorevanja u pravcu paralelnom sa zrnima drveta dva puta veća u odnosu na poprečni pravac zrna. Najvažniji parametri koji utiču na sagorevanje su gustina, vlažnost i kontrakcija drveta. Brzina sagorevanja se smanjuje sa povećanjem gustine drveta ali i sa povećanjem vlažnosti. U realnom požaru brzina zavisi od jačine požara kojem je drvo izloženo. Generalno, požarna otpornost elementa zavisi od stepena ugljenisanosti i preostale čvrstoće u neugljenisanom delu [2]. Količina i dubina ugljenisanja se obično koristi za procenu širenja, intenziteta i trajanja požara [11].

3. BETON

Betonski elementi i sistemi se generalno ponašaju dobro u požaru. Prema pojedinim testovima moguće je postići veoma visok nivo požarne otpornosti, čak do 4 časa [12]. Zaštitni sloj betona koji je ispucao ili otpao, po potrebi se može zameniti livenim ili prskanim betonom sa ubačenom dodatnom armaturom. Betonski elementi bez vidljivih oštećenja ponekad mogu imati smanjenu čvrstoću usled povišene temperature betona ili armature. Ponašanje betona izloženog toploti zavisi od mnogo faktora, neki od njih su: komponentni materijali, mineralni hemijski sastav, sastav mešavine i vlažnost.

Beton ima malu toplotnu provodljivost i zbog toga oblast koja je zahvaćena delovanjem toplote najčešće nije duboka. Gubitak čvrstoće samog betona obično je manje zabrinjavajuće od gubitka čvrstoće armature. U jednostavno poduprtim, savijenim elementima, pritisnuta zona na vrhu ploče ili grede često nije izložena veoma visokim temperaturama. Gubitak čvrstoće betona blizu površine može jednostavno biti procenjeno udaranjem čekićem.

Većina vrsta betona menja boju nakon zagrevanja, zavisno od agregata. Marchant (1972) objašnjava proceduru za rekonstrukciju požarom uništene armirano-betonske konstrukcije i prikazuje sledeće činjenice za uobičajene betone tokom zagrevanja:

- beton zagrejan do 300°C neće imati promene u boji,
- beton zagrejan u intervalu 300–600°C može biti roze boje,
- beton zagrejan u intervalu 600–950°C može biti beličasto-sivi i
- beton zagrejan preko 950°C može biti prljavo žute boje.

Beton zagrejan do 300°C nema značajne gubitke čvrstoće dok za više temperature gubitak čvrstoće zavisi od temperature u betonu. Nakon hlađenja, beton lagano vraća samo deo njegove čvrstoće (Lie, 1992) [6].

Beton dokazano ima svojstva otporna na požar koja pružaju zaštitu života, imovine i životne sredine u slučaju požara. Bilo da se koristi za objekte za stanovanje, industrijska skladišta ili tunele, beton se može projektovati tako da ostane čvrst čak i u najekstremnijim požarnim situacijama [13].

Korišćenje betona u zgradama i konstrukcijama nudi izvanredne nivoe zaštite i sigurnosti u požaru [13]:

- Beton ne gori i ne doprinosi požarnom opterećenju;
- Beton ima visoku otpornost na požar i zaustavlja njegovo širenje;
- Beton je efikasan vatrogasni štit koji obezbeđuje sigurnost za evakuaciju stanara i zaštitu za vatrogasce;

- Beton ne stvara dim niti toksične gasove, na taj način smanjuje rizik za stanare u objektu;
- Beton ne stvara kapljice koje mogu da prošire požar;
- Beton ograničava požar i tako smanjuje rizik od zagađenja okoline;
- Beton već izgradnjom obezbeđuje zaštitu od požara i nema potrebe za dodatnim merama;
- Beton može da se odupre ekstremnim uslovima požara praveći ga idealnim prostorom za smeštanje velikog požarnog opterećenja;
- Robustnost betona olakšava gašenje požara i smanjuje i odlaže rizik od kolapsa konstrukcije;
- Beton je jednostavan za sanaciju nakon požara i tako pomaže privredi da se što pre povraća;
- Betonski trotoari se odupiru ekstremnim uslovima požara koji se javljaju u tunelima;
- Betonski elementi imaju odličnu toplotnu inerciju i masivnost, zahvaljujući tome beton može da se odupre visokoj temperaturi dug vremenski period sa minimalnim deformacijama [14].

Tabela 4
Toplotne karakteristike nekih materijala [6]

Nezaštićeni konstruktivni materijal	Požarna otpornost	Gorivost	Doprinos požarnom opterećenju	Brzina povećanja temperature kroz poprečni presek	Izgrađena požarna zaštita	Mogućnost sanacije nakon požara	Zaštita za evakuaciju i vatrogasce
Drvo	Niska	Velika	Veliki	Veoma mala	Veoma mala	Nula	Mala
Čelik	Veoma mala	Nula	Nula	Veoma velika	Mala	Mala	Mala
Beton	Visoka	Nula	Nula	Mala	Visoka	Velika	Velika

Betonske konstrukcije imaju reputaciju dobrog ponašanja u požaru. Kao što je poznato, beton je negoriv, ima nisku toplotnu provodljivost i malu brzinu povećanja temperature kroz poprečni presek. Cementna pasta u betonu je podvrgnuta endotermnoj reakciji kada se zagreje što pomaže u smanjenju porasta temperature u betonu izloženom požaru [6].

Prema standardu EN 13501-1, beton ispunjava zahteve klase A1 ili A2 (ne doprinosi požaru) jer su njegovi mineralni sastojci negorivi i u većini primena može se opisati kao vatrootporan kada se pravilno projektuje. Masa betona može da zadrži veliku količinu toplote. Takođe njegova porozna struktura obezbeđuje malu brzinu povećanja temperature kroz poprečni presek [6]. Sve ovo omogućava betonu da deluje kao efikasan vatrogasni štiti.

Usled male brzine povećanja temperature kroz poprečni presek betonskog elementa unutrašnja zona ne dostiže tako visoku temperaturu kao površina koja je izložena plamenu i ovo omogućava da se zadrži kapacitet konstrukcije, kao i da povećanje temperature armature bude odloženo usled postojanja zaštitnog sloja betona. Zbog toga je gubitak čvrstoće materijala manje značajan, nosivi kapaciteti elemenata se polako smanjuju a ponašanje u požaru je mnogo bolje nego u slučaju čeličnih i drvenih konstrukcija [1].

Kada je beton izložen visokoj temperaturi, brojne fizičke i hemijske promene mogu da se jave. Fizičke promene su pokazane u Tabeli 5 [13]. Boja i površinsko oštećenje betona na različitim temperaturama su prikazani u Tabeli 6 [1].

Tabela 5
Beton u požaru [13]

Temperatura (°C)	Šta se dešava
1000	-
900	Temperatura vazduha u požaru retko prelazi ovu vrednost ali temperatura plamena može porasti do 1200°C i iza.
800	-
700	-
600	Iznad ove temperature beton nije u punom funkcionalnom kapacitetu.
550-600	Materijali na bazi cementa doživljavaju značajno tečenje i gube njihov nosivi kapacitet.
400	-
300	Počinje gubljenje čvrstoće, ali u realnosti samo nekoliko centimetara betona koji su izloženi plamenu će imati temperaturu višu od ove, dok će unutrašnji delovi imati temperaturu dosta nižu.
250-420	Izvesno ljuaskanje se može javiti, sa delovima betona koji se odvajaju od površine.

Tabela 6
Površinske karakteristike betona na različitim temperaturama [1]

Temp. (°C)	Boja	Pukotine	Gubljenje površinskih delova	Odvaljen i uglovi	Labavi delovi
900	Crvena	Široke, bez pravca, povećanje	Gubitak nakon kuckanja	Svaki ugao, različitim stepenom	Ozbiljno, otpada pod prstima (nakon hlađenja)
700	Tamno crvena	Očigledne, povećanje	Manje	Nekoliko	Očigledno
500	Sivo-bela	Fine, povećanje	Nekoliko	Nema	Blago
300	Beličasta	Fine, nekoliko	Još nema	Nema	Nema
100	Isto kao pri normalnoj temperaturi	Nema	Nema	Nema	Nema

Tokom procesa zagrevanja težina betonskog uzorka se postepeno smanjuje. U slučaju kada je temperatura u intervalu 20-200°C beton gubi težinu brzo, uglavnom zbog isparavanja slobodne vode. U intervalu temperature 200-500°C težina se gubi polako jer sada isparava hemijski vezana voda u cementnom malteru. Kada temperatura dostigne 500°C, kalcijum-hidroksid (osnovna komponenta stvorena tokom hidratacije cementa) se razgrađuje i dehidrira. Nakon 600°C, magnezijum i kalcijum karbonati (u agregatu) počinju da se razgrađuju, zbog čega agregat postaje nestabilan i gubitak težine može dostići vrednost od 10%, a kada je temperatura čak i viša spoljašnji sloj betona je uništen i otpada, uzrokujući dalji gubitak težine [1]. Trebalo bi naglasiti da su dehidratacija i dekarbonizacija endotermne reakcije i da one absorbuju izvesnu količinu energije čime usporavaju zagrevanje [14].

Oštećenje i lom u betonskim konstrukcijama će se pojaviti sukcesivno dugi vremenski period: pucanje i rastresanje delova na površini, eksplozivno ljuskanje uglova, izlaganje armature, krivljenje elemenata, postepeno odvajanje površinskih slojeva od glavnog dela, prodiranje oštećenih površina u unutrašnjost elementa, i konačno, na kraju može doći do kolapsa cele konstrukcije [1].

Generalno, armirani betoni imaju sledeće karakteristike na povišenim temperaturama [1]:

1. Raspored temperature je neuniformni u unutrašnjosti

Temperaturno polje u konstrukciji konstantno varira tokom požara. Glavni faktori koji određuju temperaturno polje konstrukcije su sopstveni temperaturni proces, oblik i veličina elementa i toplotno ponašanje betonskog materijala. Fenomeni kao što su unutrašnje sile, deformacija i prsline u konstrukciji, imaju manji uticaj na temperaturno polje. Suprotno tome, temperaturno polje konstrukcije utiče značajno na unutrašnje sile, deformaciju i kapacitet nosivosti konstrukcije.

2. Ozbiljno pogoršanje ponašanja materijala

Na povišenim temperaturama vrednost čvrstoće i modula elastičnosti betona i armature se značajno smanjuje, a deformacije oba materijala se na odgovarajući način povećavaju. Pored toga, kako temperatura raste spoljašnje oštećenje betona (pucanje, odvajanje, ljuskanje) se javlja i postepeno postaje jače. Posledica toga je smanjenje nosivosti konstrukcije i njenih elemenata.

3. Zajednički efekat napona, deformacije, temperature i vremena

Za konstrukcije koje se nalaze u ambijentalnim uslovima neophodno je proučiti samo odnos napon-deformacija u materijalu. Međutim, čvrstoća i deformacija materijala su pod jakim uticajem zagrevanja i u tom slučaju veoma je važno za beton uzeti u obzir, osim napona i deformacije, i temperaturu i vreme.

4. Redistribucija napona u elementima i unutrašnje sile u konstrukciji

Polje neuniformne temperature u elementima nedvosmisleno rezultira u neujednačenoj termičkoj deformaciji i naponu u poprečnom preseku elementa. Termičku deformaciju materijala pri visokoj temperaturi ograničava susedni materijal na različitoj temperaturi, veza i nosač. Tako da je, redistribucija unutrašnjih sila (moment savijanja, sila smicanja, aksijalna sila i torzija) u konstrukciji veoma važna i različita od one na sobnoj temperaturi.

5. Postupak i šema loma

U betonskim konstrukcijama pod uobičajenim temperaturama lom se javlja polako sa vidljivim znacima. Na povišenim temperaturama, u konstrukcijama i njenim delovima do loma dolazi iznenada jer deformacije rastu veoma brzo, trajanje loma je kratko i samo nekoliko upozoravajućih znakova se javlja.

Beton može da štiti od svih negativnih uticaja požara i obično se koristi za obezbedi stabilan deo u velikim industrijama i visokim zgradama. Deljenjem velikih zgrada na

sektore, rizik od potpunog gubitka tokom požara je ustvari otklonjen – betonski podovi i zidovi smanjuju površinu zahvaćenu požarom i horizontalno (kroz zidove) i vertikalno (kroz podove).

Umereno opterećenje poda i relativno niska temperatura u većini požara u objektima znači da se nosivost betona u velikoj meri zadržava i tokom i nakon požara [4].

3.1. Mehanički parametri

Čvrstoća pri pritisku

Čvrstoće pri pritisku betonske kocke sa različitim vrstom agregata (L-krečnjak, G-granit) i dve klase čvrstoće (20 i 40), pri različitim temperaturama su navedene u Tabeli 7 [1].

Tabela 7
Čvrstoća pri pritisku betonskih kocki na povišenoj temperaturi [1]

Beton	20°C	60°C	100°C	150°C	200°C	300°C	400°C	500°C	700°C	900°C
C20L	30,5	28,3	28,2	29,0	31,1	32,5	30,6	24,7	10,6	3,6
C20G	28,8		26,1			30,3		22,8	8,3	2,4
C40L	55,0		50,3			56,7		43,7	21,4	5,0
C40G	54,1		48,2			54,3		40,9	13,8	2,9

Kada je temperatura $T=100^{\circ}\text{C}$, odnos između čvrstoće pri pritisku betona na povišenoj i normalnoj temperaturi je između 0,88 i 0,94. Pritisak vode i vodene pare u pukotinama i šupljinama raste sa povećanjem temperature što stvara sile zatezanja u okviru čvrstog materijala. Dodatno, koncentracija napona se javlja na vrhovima prslina i ubrzava njihovo širenje. Zbog toga se čvrstoća betona pri pritisku polako smanjuje.

Kada je temperatura u intervalu 200–300°C, odnos čvrstoće je između 0,95 i 1,08. U tom momentu slobodna voda u uzorku je isparila. Koeficijenti ekspanzije krupnog agregata i cementnog maltera u betonu nisu jednaki i usled razlike u termičkoj deformaciji između njih prslina se pojavljuju na granici agregata i smanjuju čvrstoću betona pri pritisku. Sa druge strane, kako hemijski vezana voda u cementu počinje da se otpušta, dolazi do jačanja adhezivnog delovanja cementnih čestica i relaksira se napon na vrhu pukotine, što pomaže povećanju čvrstoće betona. Ovi kontradiktorni faktori deluju istovremeno tako da čvrstoća betona pri pritisku prvo lagano raste, a kasnije se smanjuje unutar temperaturnog intervala. Raspon vrednosti čvrstoće zavisi od kvaliteta sirovog materijala, sastava komponenti i betonske mešavine [1].

Kada je temperatura 500°C, čvrstoća betona pri pritisku se značajno smanjuje i odnos čvrstoće je između 0,75 i 0,85. Razlika u termičkoj deformaciji između agregata i cementnog maltera raste još više tako da se pukotine na granicama proširuju. Takođe, hemijski vezana voda u jedinjenjima hidratisanog maltera je otpuštena uz zapreminsku ekspanziju, zbog toga se pukotine šire i čvrstoća pri pritisku smanjuje još brže.

Kada je $T \geq 600^{\circ}\text{C}$, kvarcne komponente u nehidratisanim cementnim česticama i agregatu se raspadaju i formira se kristal, što je povezano sa značajnom ekspanzijom. Kako temperatura raste, pukotine se takođe pojavljuju i u unutrašnjosti nekih agregata i ekspandiraju. Čvrstoća betona pri pritisku se značajno smanjuje:

$$T = 700^{\circ}\text{C}, f_{Tcu}/f_{cu} = 0,30-0,50 \quad (1)$$

$$T = 800^{\circ}\text{C} , f_{\text{Tcu}}/f_{\text{cu}} = 0,15-0,28 \quad (2)$$

$$T = 900^{\circ}\text{C} , f_{\text{Tcu}}/f_{\text{cu}} = 0,05-0,12 \quad (3)$$

Prema onome što je prethodno rečeno, glavni razlozi za gubljenje čvrstoće mogu se sumirati na sledeći način:

- Pukotine i poroznost nastaju u unutrašnjosti betona nakon što voda ispari.
- Termičko ponašanje krupnog agregata i cementnog maltera je različito, što uzrokuje i različite deformacije i unutrašnje napone između njih kao i pukotine na njihovim granicama.
- Na visokoj temperaturi krupan agregat i pukotine ekspandiraju. Ovo unutrašnje oštećenje u betonu se razvija i kontinualno akumulira, a ima tendenciju da bude još ozbiljnije kako temperatura raste.

Oprema za testiranje i metoda, oblik i veličina uzorka, brzina zagrevanja, i vreme kome je betonski uzorak podvrgnut pri unapred definisanoj temperaturi, su različiti u gotovo svakom eksperimentu. Zbog toga, eksperimentalne vrednosti ($f_{\text{Tcu}}/f_{\text{cu}}$) čvrstoće betona neminovno pokazuju izvesno odstupanje. Različiti faktori utiču na čvrstoću betona pri pritisku na povišenim temperaturama i oni su analizirani na osnovu eksperimentalnih rezultata.

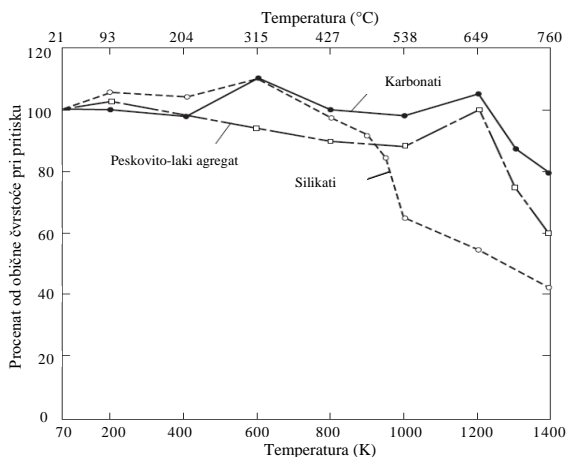
Klasa betona. Relativna čvrstoća ($f_{\text{Tcu}}/f_{\text{cu}}$) betona (C20–C50) smanjuje se sa višom klasom (Tabela 7), ali je manje od 10% razlike između njih.

Vrsta agregata. Beton koji sadrži silikatni agregat (npr. granit) ima blago niži odnos čvrstoća ($f_{\text{Tcu}}/f_{\text{cu}}$) u poređenju sa betonom koji sadrži kalcitni agregat (npr. krečnjak) na istoj temperaturi. Beton sa lakim mineralnim agregatom ima mnogo višu čvrstoću na visokim temperaturama nego beton sa običnim agregatom [2].

Drugi faktori. Veći vodocementni faktor ili količina vode u betonu ima za posledicu niži odnos čvrstoća ($f_{\text{Tcu}}/f_{\text{cu}}$) i sporije toplotno zagrevanje.

Kada konstrukcija iznenada dostigne visoku temperaturu i kada se požar konačno završi, analiza rezultata pokazuje da je unutrašnjost betona oštećena i da se održava visoka temperatura. Kada se beton ohladi, temperatura na njegovoj spoljašnjoj površini se polako smanjuje ali u unutrašnjosti ostaje visoka, na taj način se formira neuniformno temperatursko polje i novo oštećenje se javlja u unutrašnjosti betona. Neki faktori kao što su vrsta cementa i agregata, vodocementni faktor i starost betona, takođe utiču na preostalu čvrstoću u betonu nakon hlađenja.

Slika 7 pokazuje rezultate dobijene na uzorcima opterećenih do 40% njihove čvrstoće pri pritisku tokom procesa zagrevanja, a kada je dostignuta definisana temperatura, uzorci su opterećeni do loma. Kao što se može videti čvrstoća betona pri pritisku ostaje relativno nepromenjena do 500°C. Preko 500°C čvrstoća pri pritisku betona sa silikatnim agregatom počinje brzo da se smanjuje i smatra se da nema uticaja preko 650°C gde je čvrstoća pri pritisku smanjena približno 50% vrednosti pri normalnoj temperature. Međutim, beton sa karbonatnim i lakim agregatom se ponaša mnogo bolje i njegova čvrstoća pri pritisku ostaje relativno nepromenjena do 650°C, ali se ne smatra da postaje neefikasna kada se dostigne temperatura preko 650°C [2].



Slika 7. Odnos čvrstoća-temperatura za beton sa karbonatnim, silikatnim i peskovito-lakim agregatom [2]

Čvrstoća na zatezanje

Odnosi između čvrstoće na zatezanje pri visokim temperaturama i iste čvrstoće pri normalnim temperaturama (relativna čvrstoća na zatezanje) prikazani su u Tabeli 8 [1].

Tabela 8
Čvrstoća betona na zatezanje na povišenim temperaturama [1]

Temperatura (°C)	f^T_v/f_t
100	0,78-0,90
300	0,66-0,88
500	0,52-0,60
700	0,24-0,32
900	-

Čvrstoća betona na zatezanje brzo se smanjuje kada je temperatura u intervalu 20-100°C, sporo u intervalu 100-300°C, a linearno kada je iznad 300°C. Kada je temperatura 900°C, uzorci se približavaju lomu bez daljeg nanošenja opterećenja. Relativna čvrstoća pri zatezanju je niža od relativne čvrstoće pri pritisku što ukazuje na to da unutrašnja oštećenja u betonu uzrokovana delovanjem toplote imaju veći uticaj na čvrstoću na zatezanje.

Deformacija

Glavni faktori koji utiču na termičku deformaciju betona su: vrsta mineralnih komponenti u agregatu, sastav mešavine i količina vode u betonu, kao i brzina zagrevanja uzorka. Dodatno, razlike u metodama ispitivanja i tehnikama merenja uzrokuju značajno odstupanje u eksperimentalnim podacima koji se odnose na termičke deformacije betona.

Kada je temperatura niža od 200°C, čvrste komponente betona, kao što su krupan agregat i cementni malter, ekspandiraju usled povišene temperature, ali se istovremeno i skupljaju usled gubitka vode. Oba faktora se kompenzuju i uzrokuju manju deformaciju. Kada je temperatura 200°C, termička dilatacija je $\epsilon_{th} \approx (0,8-1,5) \times 10^{-3}$.

Kada je temperatura između 300°C i 600°C, čvrste komponente ekspandiraju kako temperatura raste, pojavljuju se prsline i šire na granici zrna. Deformacija raste veoma brzo. Na T=500°C termička dilatacija dostiže visoku vrednost, tj. $\epsilon_{th} = (6-9) \times 10^{-3}$.

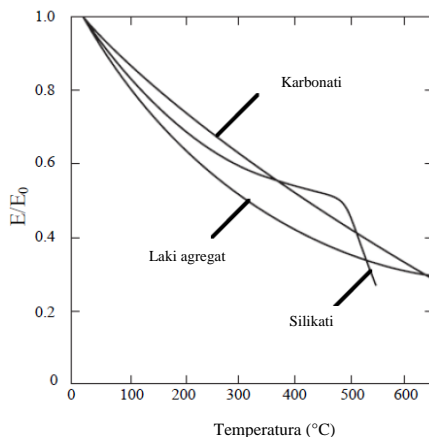
Kada je temperatura između 600°C i 700°C, brzina promene termičke deformacije se smanjuje ili čak izostaje. Termička dilatacija je verovatno ograničena zbog različitih kristala mineralnih komponenti unutar agregata a unutrašnje oštećenje u betonu se akumulira. U tom trenutku dilatacija ϵ_{th} je veća od 10×10^{-3} .

Tokom procesa zagrevanja, termička ekspanzivna dilatacija (ϵ_{th}) betona je sastavljena od četiri dela: ekspanzije čvrste komponente usled zagrevanja, skupljanja usled gubitka vode, pojave i proširenje prsline na granici između agregata i cementnog maltera, i oštećenja u unutrašnjosti agregata. Međutim, tokom procesa hlađenja samo termička ekspanzija čvrste komponente može da se obnovi u potpunosti dok ostali elementi ostaju nepromenjeni.

Pre opterećenja uzorka ali tokom zagrevanja i održavanja temperature, javlja se početna dilatacija i mnogo prsline se formira u unutrašnjosti betona iz više razloga. Neki od ovih razloga su isparavanje vode, razlike u termičkom ponašanju između krupnog agregata i cementnog maltera i ekspanzija i lom agregata [1].

Modul elastičnosti

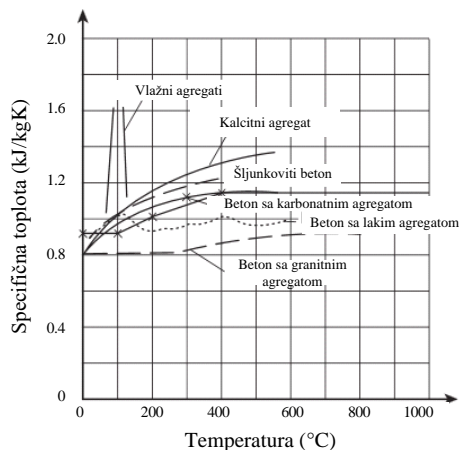
Modul elastičnosti (E) različitih betona upada unutar veoma širokog intervala, od 5 GPa do 35 GPa pri sobnoj temperaturi. Zavisi uglavnom od vodocementnog faktora u mešavini, starosti betona, metode kondicioniranja, i količine i prirode agregata. Neki autori su utvrdili da se modul elastičnosti brzo smanjuje uz povećanje temperature i da ne zavisi značajno od vrste agregata (Slika 8). Međutim, kod drugih istraživača modul elastičnosti sa normalno teškim agregatom brže sa smanjuje sa povećanjem temperature nego kod betona sa lakim agregatom [2].



Slika 8. Uticaj temperature na modul elastičnosti betona sa različitim vrstom agregata [2]

3.2. Termički parametri

U slučaju betona, vrednosti termičkih parametara su zavisi od sastava mešavine. Na Slici 9 date su vrednosti specifične toplote za neke vrste betona [15].



Slika 9. Promena specifične toplote sa temperaturom [15]

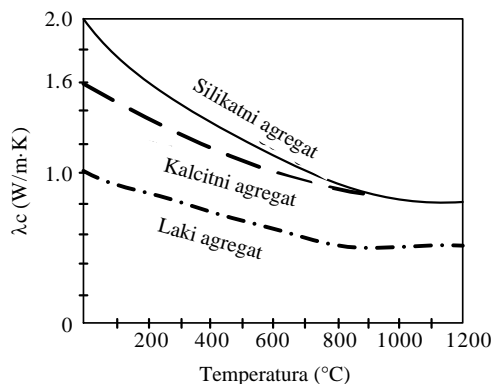
Toplotna provodljivost ili koeficijent toplotne provodljivosti

Toplotna provodljivost betona se smanjuje sa povećanjem temperature [9]. Krupan agregat ima najveći udeo u ukupnoj zapremini betona i ima dominantni uticaj na njegovo termičko ponašanje. Koeficijent toplotne provodljivosti agregata zavisi uglavnom od mineralnog sastava, karakteristika kristala i strukture zrna.

Vrednosti koeficijenta toplotne provodljivosti kamena se značajno razlikuju pri normalnim temperaturama ali teže da budu slične na povišenim temperaturama (kada je temperatura preko 200°C). Takođe, različito se menjaju kako temperatura raste. Koeficijent toplotne provodljivosti silikatnog peska, dolomita i krečnjaka se smanjuje brzo, kod granita i gnajsa smanjuje se sporo ali kod dijabaza i kalcitnog feldspata raste polako kada temperatura raste.

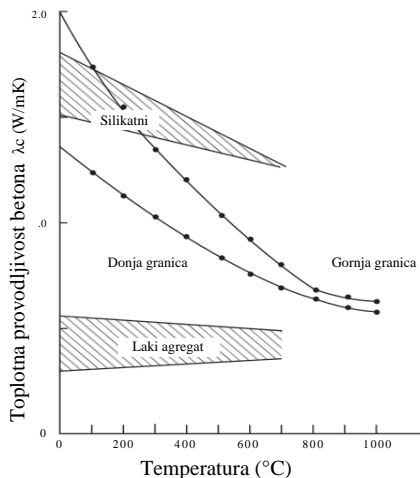
Vodocementni faktor maltera koji ima tokom mešanja, utiče na koeficijent toplotne provodljivosti. Uzorci sa velikim vodocementnim faktorom sadrže veću količinu vode i više mikropora se formira nakon što se izgubi voda tokom očvršćavanja maltera. Ovo uzrokuje smanjenje koeficijenta toplotne provodljivosti. Koeficijent toplotne provodljivosti betona koji sadrži agregat od različitog vrsta kamena, menja se sa temperaturom. Koeficijent običnog betona sa silikatnim agregatom je malo viši nego kod betona sa krečnjačkim agregatom, ali se oba smanjuju kako temperatura raste i slična su na veoma visokoj temperaturi (>800°C) [1].

Krupan agregat može biti napravljen od različitih poroznih mineralnih materijala kao što su plavac, zgura, ekspanzirana glina ili škriljac. Može zameniti običan stenski agregat i stvoriti laki beton. Zrna lakog agregata sadrže mnogo unutrašnjih pora i značajno smanjuju toplotnu provodljivost. Zato je koeficijent toplotne provodljivosti lakog betona daleko manji nego kod običnog betona. Ovaj koeficijent kod betona pokazuje veliku promenljivost i rasipanje zbog uticaja različitih faktora. Odnos između koeficijenta toplotne provodljivosti i temperature za beton sa različitim vrstom agregata prikazan je na Slici 10 [1].



Slika 10. Izračunata vrednost koeficijenta toplotne provodljivosti betona [1]

Isti ovaj odnos dat od drugog autora prikazan je na Slici 11 [15]. Donja granica toplotne provodljivosti formirana je poređenjem sa temperaturama dobijenim u požarnim testovima na različitim vrstama betonskih konstrukcija. Donja granica daje mnogo realističnije temperature za betonske konstrukcije nego gornja granica koja je dobijena iz testova na čelik/beton kompozitnim konstrukcijama [14]. Betoni sa normalno teškim agregatom padaju u pojas sa vrednostima za laki beton, ali se neki autori ne slažu sa tim [15].



Slika 11. Promene toplotne provodljivosti betona sa temperaturom [15]

Specifični toplotni kapacitet (Cc)

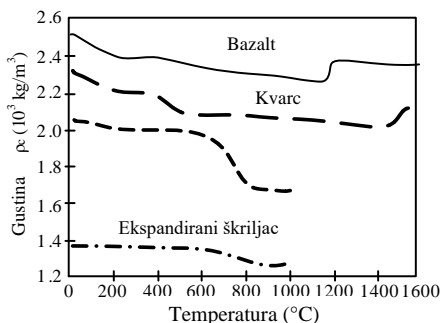
Specifična toplota suvog betona se ne menja mnogo sa temperaturom. Međutim, betonske konstrukcije uvek obuhvataju i vodu koja isparava na temperaturama iznad 100°C što predstavlja latentnu toplotu jer proces isparavanja troši mnogo toplote. Tako specifični toplotni kapacitet za normalni beton ima pik na temperaturama 100°C i 200°C, prema Evrokodu 2 [9].

Vrsta agregata ima uticaj na specifični toplotni kapacitet betona ali ne previše. Specifični toplotni kapacitet betona sa silikatnim agregatom (npr. kvarc) je malo viši nego kod betona sa kalcitnim agregatom (npr. krečnjak), a kod različitih lakih agregata malo je manji nego kod običnog betona. Drugi faktori kao što su odnos komponenti u mešavini, količina vode i starost, imaju manji uticaj na specifični toplotni kapacitet [1].

Gustina (ρ_c)

Gustina je definisana kao masa materijala po jedinici zapremine i njena jedinica je kg/m^3 . Ova karakteristika materijala takođe je nazvana i zapreminska gustina. Promena gustine betona tokom zagrevanja prikazana je na Slici 12. Tokom početnog perioda gustina se očigledno smanjuje jer dolazi do isparavanja vode. Čvrste komponente (agregat i cement) ekspandiraju nakon zagrevanja i gustina se smanjuje. Ovaj fenomen postoji tokom procesa zagrevanja i njen uticaj se postepeno povećava pri visokoj temperaturi.

Neke vrste kamenog agregata sa različitim mineralnim komponentama imaju posebne karakteristike na povišenoj temperaturi što utiče na gustinu. Na primer, silikatni agregat formira kristale na $T=600\text{--}800^\circ\text{C}$ što je povezano sa značajnom zapreminskom ekspanzijom i iznenadnim smanjenjem gustine. Bazalt i kvarc su istopljeni i sinterovani kada je $T=1200\text{--}1400^\circ\text{C}$, i tada gustina betona iznenada raste. Gustina betona koji sadrži različite vrste lakog agregata varira sa temperaturom slično kao kod običnog betona ali je veličina promene manja (Slika 12). Međutim, da bi se pojednostavio proračun, gustina betona se obično uzima kao konstantna ($2200\text{--}2400\text{ kg/m}^3$), bez obzira na temperaturu.



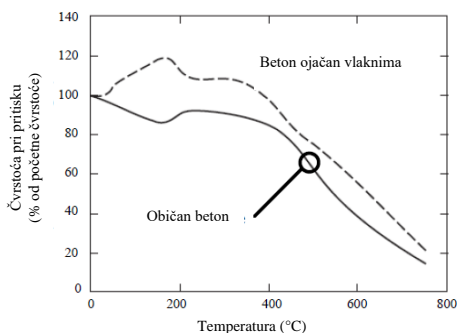
Slika 12. Gustina betona sa različitim agregatima [1]

Osnovno termičko ponašanje betona zavisi ne samo od termičkog ponašanja krupnog i sitnog agregata i očvrstlog cementnog maltera već i od sastava, količine vode, starosti, tehnike livenja i kompaktiranja, i kompaktnosti betona. Zbog toga termički parametri pokazuju velike promene i rasipanje. Ako se za analize zahtevaju tačni termički parametri, uzorke bi trebalo napraviti i ispitati specijalno za te namene i tada traženi parametri mogu biti izmereni. Pojednostavljene vrednosti termičkih parametara koje su predložene u relevantnim pravilnicima, mogu se koristiti za praktične proračune slučajnosti i rasipanja vrednosti temperature u toku delovanja požara [1].

3.3. Beton ojačan vlaknima

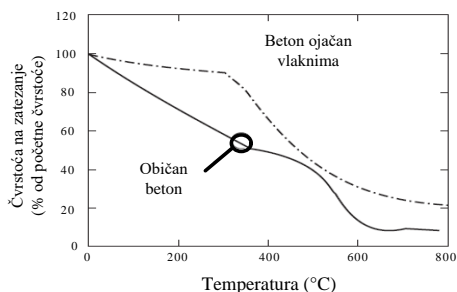
Čelična i diskontinualna polipropilenska vlakna su dve najčešće vrste vlakana koje se koriste u betonskim mešavinama za poboljšanje konstruktivnih karakteristika betona. Studije su pokazale da su polipropilenska vlakna u betonskim mešavinama zaista efektivna

u minimiziranju ljuškanja betona u uslovima požara. Polipropilenska vlakna se tope na relativno niskoj temperaturi od oko 170°C i stvaraju kanale u betonu kroz koje pritisak pare može da izađe. Količina polipropilenskih vlakana neophodna da smanji ljuškanje je oko 0,1% do 0,25% (po zapremini). Dodatak vlakana poboljšava izvesne mehaničke karakteristike na sobnoj temperaturi, kao što je čvrstoća na zatezanje, duktilnost i konačna deformacija. Međutim, postoji veoma malo informacija o karakteristikama betona ovog tipa tokom izlaganja visokim temperaturama. Beton sa čeličnim vlaknima (SFRC) na povišenim temperaturama pokazuje mehaničke karakteristike koje su povoljnije za otpornost pri delovanju požara nego kod običnog betona. Uticaj temperature na čvrstoću pri pritisku za dve vrste betona pokazan je na Slici 13 [2].



Slika 13. Uticaj temperature na čvrstoću pri pritisku betona ojačanog čeličnim vlaknima [2]

Kao što se vidi na slici, čvrstoća SFRC prevazilazi početnu čvrstoću običnog betona do oko 400°C. Ovo je u suprotnosti sa čvrstoćom običnog betona, koja se blago smanjuje do temperature od 400°C. Iznad približno 400°C, čvrstoća SFRC se smanjuje ubrzano.



Slika 14. Uticaj temperature na čvrstoću na zatezanje betona ojačanog čeličnim vlaknima [2]

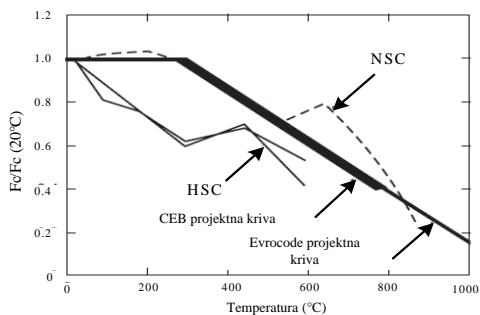
Uticaj temperature na čvrstoću na zatezanje betona sa čeličnim vlaknima je upoređeno sa onom kod običnog betona na Slici 14. Čvrstoća SFRC se smanjuje manjom brzinom nego kod običnog betona kroz temperaturni interval. Čvrstoća betona sa čeličnim vlaknima je značajno viša nego kod običnog betona do otprilike 350°C. Povećana čvrstoća na zatezanje odlaže propagiranje prslina u betonskom elementu ojačanom vlaknima i vrlo je korisna kada je element izložen delovanju napona savijanja.

Vrsta agregata ima značajni uticaj na čvrstoću na zatezanje betona sa čeličnim vlaknima. Smanjenje čvrstoće na zatezanje betona sa karbonatnim agregatom je veće nego

sa silikatnim agregatom. Termičke karakteristike SFRC, na povišenim temperaturama su slične tim karakteristikama kod običnog betona [2].

3.4. Beton visoke čvrstoće (HSC)

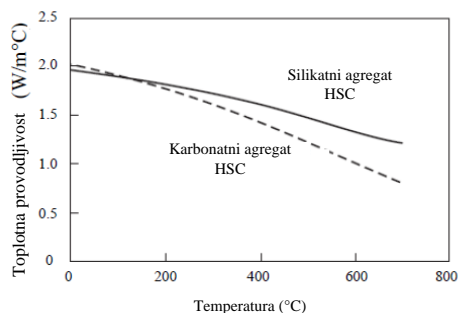
Čvrstoća betona ima značajan uticaj na druge karakteristike HSC. Karakteristike HSC se menjaju drugačije nego karakteristike betona sa normalnim čvrstoćama (NSC). Ova promena je mnogo naglašenija za mehaničke karakteristike na koje utiču sledeći faktori: čvrstoća pri pritisku, sadržaj vlage, gustina, brzina zagrevanja, procenat dodataka i poroznost. Gubitak čvrstoće pri pritisku sa temperaturom je viša za HSC nego NSC do otprilike 450°C. Slika 15 pokazuje poređenje čvrstoća za NSC i HSC, zajedno sa CEB i Evropskom projektnom krivom za NSC [2].



Slika 15. Poređenje projektne čvrstoće pri pritisku i rezultata testova bez opterećenja za HSC i NSC beton [2]

Razlika između čvrstoće pri pritisku za beton sa normalnim agregatom i betona sa lakim agregatom u zavisnosti od temperature nije značajna. Sa povećanjem temperature promena modula elastičnosti i čvrstoće na zatezanje za HSC i NSC je slična.

Vrsta agregata ima značajan uticaj na termičke karakteristike HSC na povišenoj temperaturi. Slika 16 prikazuje toplotnu provodljivost HSC, sa silikatnim i karbonatnim agregatima kao funkciju temperature.



Slika 16. Toplotna provodljivost betona visokih čvrstoća [2]

Jedna od glavnih briga oko korišćenja HSC se odnosi na njegovo ponašanje u požaru, naročito pojava ljuskanja na povišenim temperaturama. Ljuskanje HSC može biti

minimizirano stvaranjem pora kroz koje vodena para može biti oslobođena pre nego što pritisak dostigne kritičnu vrednost. Ovo je obično učinjeno dodavanjem polipropilenskih vlakana u HSC [2].

3.5. Laki beton

Laki beton je obično napravljen sa normalnim cementom i nekim oblikom lakog agregata kao što je plavac, ekspandirana glina ili škrljac. Drugi mogući materijali koji se koriste uključuju perlit i vermikulit. Laki beton je pokazao da ima odličnu požarnu otpornost usled njegove niske toplotne provodljivosti u poređenju sa betonom normalne težine. Mnogi laki agregati su proizvedeni na visokim temperaturama tako da ostaju stabilni tokom izlaganja požaru [6].

4. ČELIK

Čelik je materijal koji je dostupan u različitim vrstama proizvoda: konstruktivni (vruće valjani), za armiranje, prednaprezanje ili hladno oblikovan [10]. Čelična konstrukcija nije goriva, međutim, kada je izložena požaru, temperatura čelika raste, a čvrstoća i krutost se smanjuju vodeći mogućoj deformaciji i lomu, što zavisi od primenjenog opterećenja i uslova oslanjanja. Toplota se provodi veoma brzo kroz čelik [1]. Povećanje temperature u čeliku zavisi od jačine požara, površine čelika koja je izložena vatri i količine primenjene požarne zaštite [6]. Kritična temperatura čeličnog elementa je temperatura na kojoj ne može više da primi opterećenje a da to bude sigurno. Mehaničke karakteristike kao što su čvrstoća i modul elastičnosti posebno se pogoršavaju kada temperatura čelika pređe 400°C (Evrokod 3, EN 1993-1-2). Neki građevinski propisi i standardi definišu različite kritične temperature koje se ne smeju prekoračiti kada je konstrukcija izložena standardnom požaru određeno vreme. Čelična konstrukcija zato obično mora biti zaštićena da bi se postigla određena klasa otpornosti u požaru [9].

Testovi u punoj veličini i neki stvarni požari u velikim čeličnim objektima pokazali su da dobro projektovana čelična konstrukcija može da se odupre snažnom požaru bez kolapsa čak i ako su glavni noseći elementi nezaštićeni. Takođe, termička ekspanzija čeličnih elemenata može uzrokovati oštećenje na drugom mestu u objektu.

Glavni faktori koji utiču na ponašanje čelične konstrukcije u požaru su:

- povišena temperatura u čeličnim elementima,
- granično požarno opterećenje na konstrukciju,
- mehaničke karakteristike čelika,
- geometrija i dizajn konstrukcije.

Ozbilnost problema u konstrukciji izloženoj visokoj temperaturi zavisi od četiri faktora: (1) funkcije čeličnog elementa, (2) nivoa napona, (3) kako je čelični element oslonjen na druge konstruktivne elemente i (4) njegova površina i debljina [16].

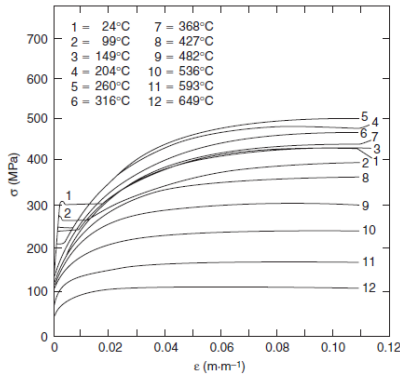
Jednačine za mnoge karakteristike čelika, kao funkcija temperature, dostupne su u Evrokodu 3 i u mnogim priručnicima.

4.1. Mehanički parametri

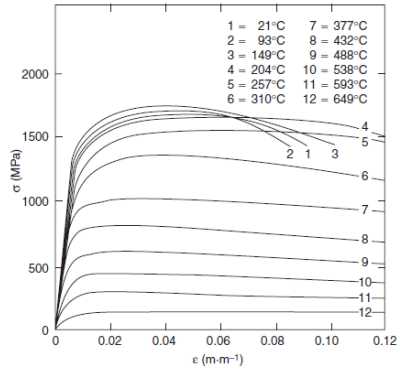
Čvrstoća na zatezanje

Struktura materijala ima veliki uticaj na njegovo ponašanje u požaru. Konstruktivni čelik i armaturne šipke imaju nasumično orjentisana zrna u strukturi i njihova čvrstoća uglavnom zavisi od sadržaja ugljenika. U slučaju čelika za prednaprezanje žice su obično napravljene od perlitnog čelika sa strukturom od izduženih zrna orjentisanih u pravcu

hladnog rada i sa visokim sadržajem ugljenika. Pored toga, laki profilni čelik ima široku primenu u lakim okvirima i napravljen je od hladno oblikovanog čelika. Može da se koristi za konstruktivne elemente kao što su zidovi i podovi. Mehaničke karakteristike dva uobičajena čelika (konstruktivni čelik i čelik za prednaprezanje) prikazane su na Slikama 17-19 [2].

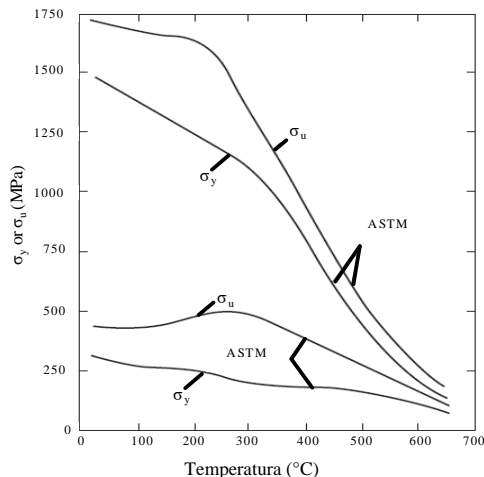


Slika 17. Krive napon-deformacija za konstruktivni čelik na sobnoj i povišenoj temperaturi [2]



Slika 18. Krive napon-deformacija za prednapregnuti čelik na sobnoj i povišenoj temperaturi [2]

Slika 17 i Slika 18 prikazuju krive napon-deformacija na sobnoj temperaturi (24°C i 21°C, redom) i na brojnim povišenim temperaturama. Slika 19 pokazuje uticaj temperature na napon tečenja i na granični napon dva čelika.



Slika 19. Granični napon i napon tečenja za konstruktivni čelik (ASTM A36) i čelik za prednaprezanje (ASTM A421) na povišenim temperaturama [2]

Sa slika se može videti da se i napon tečenja (σ_y) i modul elastičnosti (E) smanjuju sa povećanjem temperature ali da se granični napon zatezanje (σ_u) blago povećava na

umerenim temperaturama pre smanjenja na višim. Sa konstruktivne tačke, napon tečenja čelika je najvažniji parametar u utvrđivanju njegove nosivosti [16].

Tokom potpuno razvijenih požara, nezaštićeni čelični elementi često trpe velike deformacije, dok dobro zaštićeni elementi obično pokazuju malo ili nikakvo oštećenje. Za čelične elemente izložene požaru ali koji ostaju pravi nakon hlađenja, u većini slučajeva nije neophodna dalja procena stanja (Tide, 1998). Većina konstruktivnih čelika ne trpi značajne gubitke u čvrstoći kada se ohladi nakon zagrevanja do približno 600°C, dok zagrevanje do viših temperatura može da rezultira u smanjenju čvrstoća do 10% nakon hlađenja. Smanjenje čvrstoće je mnogo veće za čelik visokih čvrstoća koji sadrži legure kao što su vanadijum i niobijum. Ukoliko je potrebno mogu se uraditi određene vrste testova na uzorcima kako bi se utvrdilo da li je došlo do smanjenja čvrstoće. Mnoge vrste zavrtnejava visoke čvrstoće su bile toplotno tretirane tokom proizvodnje što ih čini podložnim gubitku čvrstoće nakon zagrevanja i u tom slučaju bi ih trebalo zameniti [6].

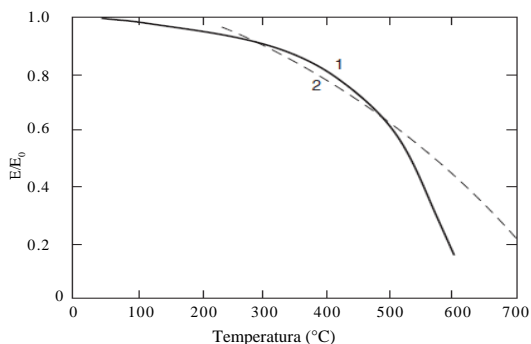
Čelici visokih čvrstoća, naročito za prednaprezanje, su mnogo osetljiviji na gubitak čvrstoće ukoliko se zagreju do temperature iznad 400°C. U slučaju ovih čelika, hlađenje nakon zagrevanja do 500°C može izazvati 30% gubitak čvrstoće dok zagrevanje do 600°C može da rezultira 50% gubitka čvrstoće (Gustafsson and Martin, 1988) [6].

Deformacija

Tečenje je strukturalno veoma osetljiva karakteristika i može da pokaže značajno povećanje. Ovaj parametar je relativno beznačajan kod konstruktivnog čelika na normalnoj temperaturi. Međutim, postaje veoma značajan na temperaturama preko 400°C ili 500°C i veoma je zavisian od nivoa napona. Na višim temperaturama deformacija tečenja u čeliku može da se ubrza vodeći plastičnom ponašanju i lomu [6].

Modul elastičnosti

Za uobičajene čelike, modul elastičnosti (E) je oko 210GPa na sobnoj temperaturi. Slika 20 pokazuje njene promene sa temperaturom za konstruktivni i armaturni čelik (E_0 je modul elastičnosti na sobnoj temperaturi).



Slika 20. Uticaj temperature na modul elastičnosti konstruktivnog (1) i armaturnog čelika (2) [2]

4.2. Termički parametri

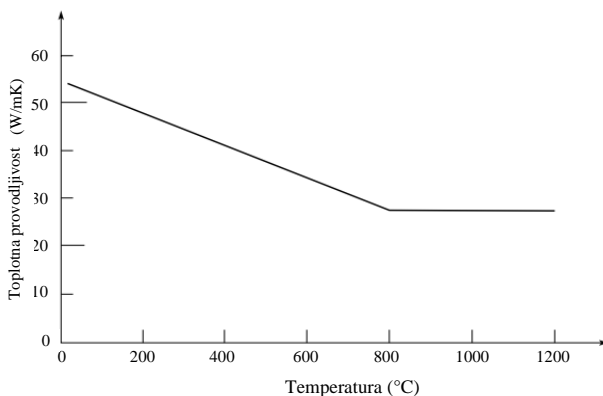
Sve karakteristike čelika, osim gustine (oko 7850 kg/m^3), su pod jakim uticajem temperature. Za bilo kakvo računanje neophodno je da se znaju toplotne karakteristike materijala [6].

Toplotna provodljivost

Toplotna provodljivost (λ) čelika nije jednostavna da se definiše. Za ugljenični čelik obično varira unutar intervala 46 W/mK do 65 W/mK [2]. Standard EN 1993-1-2 razlikuje dva intervala temperature za proračun λ :

- $20 \leq \theta \leq 800^\circ\text{C}$
- $\theta \geq 800^\circ\text{C}$.

Toplotna provodljivost čelika se menja sa temperaturom kao što je pokazano na Slici 21 [6] i u skladu je sa opštim pravilom fizike da je obrnuto proporcionalna molekularnoj težini [9]. Kao što se može videti, linearno se smanjuje od 54 W/mK na 0°C do $27,3 \text{ W/mK}$ na 800°C (CEN, 2005b) [6]. Za jednostavne proračune toplotna provodljivost λ (W/mK) se može uzeti da je 45 W/mK .

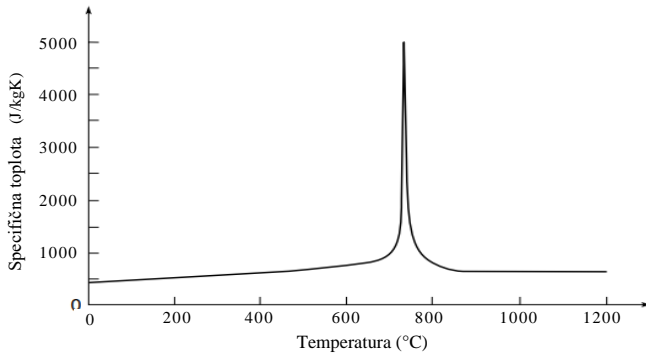


Slika 21. Toplotna provodljivost čelika kao funkcija temperature [6]

Toplotna provodljivost ugljeničnog čelika je reda veličine 30 puta veća nego odgovarajuća vrednost za beton i 100-1000 puta veća nego kod izolacionih proizvoda. Što je veća čistoća metala, to bolje provodi toplotu. Tako sadržaj ugljenika i legirajućih metala kao što je hrom smanjuju provodljivost i zato je nerđajući čelik relativno loš provodnik [9].

Specifični toplotni fluks

Za procenu razvoja temperature u čeličnoj konstrukciji izloženoj požaru, specifični toplotni fluks obično je značajniji parametar od provodljivosti [9]. Njegove promene zavise od temperature, kao što je prikazano na Slici 22 [6].



Slika 22. Specifična toplota čelika kao funkcija temperature [6]

U ovoj situaciji može se razlikovati nekoliko područja temperature:

- $20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 600^{\circ}\text{C}$
- $600^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 735^{\circ}\text{C}$
- $735^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 900^{\circ}\text{C}$
- $900^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$

Kao što se može videti metalurška promena se pojavljuje na 735°C usled faznih promena čelika [9]. Za jednostavan proračun konstantna vrednost od $0,6 \text{ kJ/kgK}$ se može uzeti [6], ali je preporučena vrednost $0,46 \text{ kJ/kgK}$ koja je na strani sigurnosti [9]. Međutim, za mnogo tačnije proračune preporučuje se Evrokod.

Termička ekspanzija

Koeficijent termičke ekspanzije čelika je svojstvo koje je neosetljivo na strukturu. Ispitivanje otkriva da je skupljanje materijala značajno na oko 700°C , što je povezano sa transformacijom feritno-perlitne strukture u austenitnu i za posledicu ima promenu u ponašanju materijala.

Koeficijent termičke ekspanzije se obično uzima da je $11,7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, na sobnoj temperaturi. Na višim temperaturama kao što je u požaru, koeficijent raste i javlja se diskontinuitet između 700°C i 800°C . Za normalne projektantske svrhe Evrokod 3 deo 1-2 preporučuje vrednost linearnog koeficijenta od $14,0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ [6].

Deformacija tečenja

Tečenje je relativno beznačajno u konstruktivnom čeliku na normalnoj temperaturi. Međutim, postaje veoma značajno na temperaturama preko 400°C ili 500°C . Mnogi eksperimenti oko ponašanja čelika pri puzanju na povišenim temperaturama pokazuju da je puzanje veoma zavisno od temperature i naponskog stanja [6].

Kritična temperatura

Kritična temperatura čelika se često koristi kao mera za određivanje loma konstruktivnog elementa izloženog požaru. Ovo osigurava da napon tečenja nije smanjen više od 50% od vrednosti na normalnim temperaturama. Kritična temperatura za različite vrste čelika date su u Tabeli 9 [2].

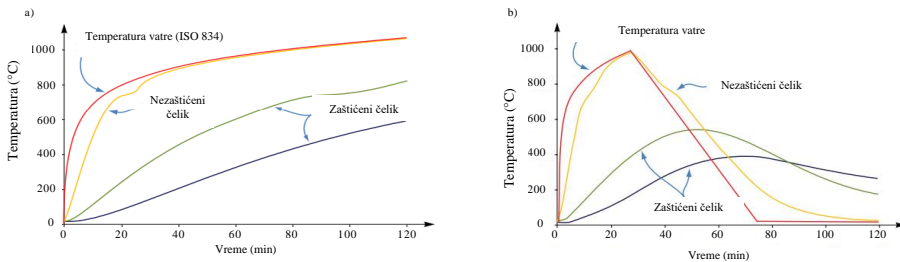
Tabela 9
Kritična temperatura za različite vrste čelika [2]

Vrsta čelika	Standard/Referenca	Temperatura (°C)
Konstruktivni čelik	ASTM	538
Armaturni čelik	ASTM	593
Čelik za prednaprezanje	ASTM	426
Tanki profilni čelik	EC 3	350

4.3. Zaštitni sistemi

Postoje mnoge metode zaštite čeličnih elemenata od uticaja vatre. Čelični objekti sa primenjenom protivpožarnom zaštitom mogu biti projektovani tako da imaju odličnu požarnu otpornost. Nezaštićene čelične konstrukcije ponašaju se loše u požaru u poređenju sa npr. armiranim betonom ili teškom drvenom konstrukcijom jer su čelični elementi obično mnogo tanji i čelik ima višu toplotnu provodljivost nego većina drugih materijala. Nezaštićene čelične konstrukcije mogu da idrže izvesne požare ukoliko nisu veoma snažni i ukoliko se čelik ne zagreje previše.

Primer ponašanja čelične grede zaštićene izolacionim materijalom debljine 15 mm i 30 mm kao i nezaštićene čelične grede prikazan je na Slici 23 [6].



Slika 23. Uobičajene temperature čelika za nezaštićenu i zaštićenu čeličnu gredu izloženu: a) standardnom požaru; b) parametarskom požaru [6]

Postoje mnogi alternativni pasivni sistemi zaštite od požara koji smanjuju brzinu povećanja temperature u čeličnoj konstrukciji izloženoj požaru [6]:

- Betonsko kućište,
- Pločasti sistemi,
- Sistem nanet raspršivanjem,
- Ekspandirajuća boja,
- Zaštita drvetom,
- Punjenje betonom.

Jedan od čestih oblika protivpožarne izolacije primenjen na čeličnim elementima kako bi se postigla zahtevana požarna otpornost je protivpožarni materijal nanet raspršivanjem (SFRM), koji radi na principu odlaganja porasta temperature u čeliku. SFRM je uglavnom sastavljen od osnovnog materijala kao što je gips, cementna i mineralna vlakna i drugih aditiva kao što je vermikulit [4].

5. ARMATURA

5.1. Mehanički parametri

Armaturni čelik je veoma osetljiv na povećanje temperature i njegova čvrstoća se značajno menja sa temperaturom i mora se to uzeti u obzir u svakom proračunu konstrukcije [2]. Mehaničko ponašanje armature uglavnom zavisi od sastava legura i tehnologije proizvodnje, uključujući i termičke tretmane. Kristalna struktura čelika se transformiše na povišenoj temperaturi i uzrokuje odgovarajuće promene u njegovom mehaničkom ponašanju. Eksperimentalni podaci dobijeni iz ispitivanja armature na povišenim temperaturama pokazuju da se čvrstoća i deformaciono ponašanje pogoršavaju postepeno kako temperatura raste.

Na temperaturi od 800°C, čvrstoća za sve klase armature dostiže mnogo nižu vrednost, koja je samo 10% od one na normalnim temperaturama. Čvrstoća i deformaciono ponašanje armature variraju u zavisnosti od različitih temperatura i napona što je eksperimentalno otkriveno. Međutim, dostupni eksperimentalni podaci i teoretske analize još uvek nisu dovoljno usklađeni i potrebno je sveobuhvatnije eksperimentalno istraživanje [1].

5.2. Termički parametri

Postojanje armature ima mali uticaj na raspored temperature u unutrašnjosti konstrukcija koja je pod uticajem vatre jer generalno čini veoma mali procenat (<3%) ukupne zapremine. Kada se analizira temperaturno polje konstrukcije, pretpostavlja se da je ono homogeno i da armatura može biti ignorisana. Glavni sastojci čelika korišćenog u građevinskim konstrukcijama su gvožđe i ugljenik. Prema količina ugljenika čelik je podeljen na niski, srednji i visoko-ugljenični čelik [1].

Različiti sastav komponenti, njihova količina i termički tretmani čelika utiču na njegovu termičko ponašanje. Čisto gvožđe ima najviši koeficijent provodljivosti i postepeno se smanjuje kako količina ugljenika i legura u čeliku raste. Koeficijent toplotne provodljivosti ugljeničnog i niskolegirajućeg čelika se monotono smanjuje kako temperatura raste ali brzina promena se postepeno smanjuje. Međutim, neki čelici koji obuhvataju više legura, imaju koeficijent toplotne provodljivosti koji se polako povećava sa temperaturom. Zbog toga što gvožđe, ugljenik i drugi legirajući elementi imaju različite vrednosti specifičnog toplotnog kapaciteta, čelik sastavljen od različitih vrsta i različite količine legirajućih elemenata ima odgovarajuće vrednosti toplotnog kapaciteta (Cs). Vrednost raste polako i postepeno sa temperaturom, ali je promena mala.

Gustina (ρ_s) čelika se takođe menja ali malo, zbog različitih vrsta i količina legirajućih elemenata u njemu. Gustina čistog gvožđa je visoka i dostiže 7871 kg/m³ dok je za ugljenične i niskolegirajuće čelike gustina 7850 kg/m³. Zapremina čelika ekspandira i gustina se blago smanjuje kako temperatura raste, ali je generalno uzeta kao konstantna tokom analize temperaturnog polja. Opšti intervali za termičke parametre čelika date su u Tabeli 10 i upoređene sa betonom.

Poredeći podatke prikazane u Tabeli 10, može se utvrditi da je čelik dobar toplotni provodnik a beton nije. Odnos koeficijenata toplotne provodljivosti je veoma veliki. Maseni toplotni kapacitet čelika je očigledno manji nego kod betona jer je definisan preko mase materijala. Termičko ponašanje i vrednosti parametara betona i čelika imaju očigledan uticaj na vrednost i raspored temperature u konstrukciji na povišenim temperaturama.

Tabela 10

Opšti interval termičkih parametara čelika i betona [1]

Materijal	Koeficijent toplotne provodljivosti λ (W/mK)	Maseni toplotni kapacitet C (kJ/kgK)	Gustina ρ (kg/m ³)
Čelik	55-28	0,42-0,84	7850
Beton	1,6-0,6	0,84-1,26	2300

6. ZIDANI ELEMENTI

6.1. Mehanički parametri

Čvrstoća pri pritisku

Čvrstoća pri pritisku opeke varira u veoma širokom intervalu, od 9 MPa do 110 MPa. Ova vrednost je veća nego dozvoljeni naponi u projektovanju opeka spojenih malterom. S obzirom da se retko smatra da opeka ima važnu noseću ulogu u objektima, postoji malo interesovanje za mehaničke karakteristike opeke na povišenim temperaturama.

Glinena opeka gubi veoma malo od čvrstoće nakon zagrevanja do temperature od 1000°C, ali je malter obično pretrpeo oštećenja. U slučaju armiranih elemenata sa betonskim blokovima trebalo bi ih proceniti na isti način kao normalni armirani beton [6].

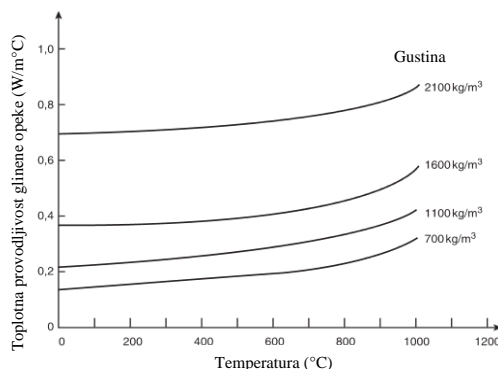
Modul elastičnosti

Modul elastičnosti opeke (E) je obično između 10 GPa i 20 GPa [2].

6.2. Termički parametri

Toplotna provodljivost

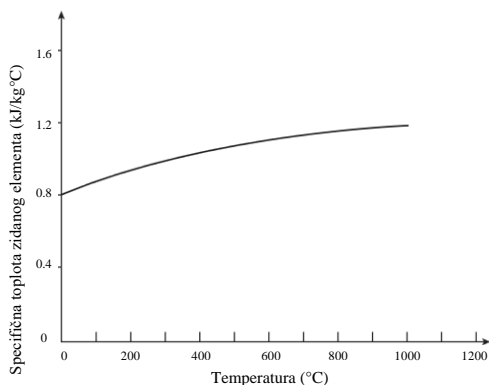
Toplotna provodljivost zidanih elemenata je zavisna od gustine i temperature, i vrednosti su date na Slici 24 [15].



Slika 24. Promena toplotne provodljivost sa temperaturom zidanih elemenata [15]

Specifična toplota

Specifična toplota je takođe zavisna od temperature zidanog elementa i vrednosti su date na Slici 25 [15].



Slika 25. Promene specifične toplote sa temperaturom zidanih elemenata [15]

Termička ekspanzija

Na sobnoj temperaturi, koeficijent termičke ekspanzije za glinenu opeku je oko $5,5 \cdot 10^{-6}$ m/mK [2].

Gustina

Gustina (ρ) opeke se kreće u intervalu od 1660 kg/m^3 do 2270 kg/m^3 , zavisno od sirovog materijala koji se koristi u proizvodnji i od proizvodne tehnike. Stvarna gustina materijala (ρ_s) je negde između 2600 kg/m^3 i 2800 kg/m^3 [2].

7. DRVO

Drvo je nehomogeni materijal čije se karakteristike menjaju sa pravcem u kome je izvršeno merenje. To je složena mešavina prirodnih polimera velike molekulske težine i najvažniji su celuloza (~50%), hemiceluloza (~25%) i lignin (~25%) iako ovi odnosi variraju od vrste do vrste [17].

Drvo je široko korišćeno kao konstruktivni element u konstrukcijama male spratnosti [2]. Međutim, drvo je gorivo, ne može da zaštiti od požara, a čak može i da pojača požar nakon što on počne [1]. Zato je oštećenje površine drveta usled požara odmah vidljivo.

Složenost drveta čini ga komplikovanim za interpretaciju ponašanja u toku požara. Zbog zrnaste strukture, karakteristike se menjaju sa pravcem: tako je toplotna provodljivost u pravcu paralelnom sa pružanjem zrna oko dva puta veća nego u pravcu upravnom na zrna, a razlika je čak i veća u slučaju gasne propustljivosti (reda veličine 103). Isparljive čestice nastale odmah ispod površine netaknutog drveta mogu lakše izaći duž zrna nego u pravcu upravnom na njih [17].

Na temperaturama iznad $200\text{--}250^\circ\text{C}$, drvo menja boju i ugljeniše, iako će produženo zagrevanje na nižim temperaturama ($\geq 120^\circ\text{C}$) imati isti efekat. Fizička struktura počinje brzo da se urušava na temperaturama iznad 300°C . U tom momentu male pukotine se pojavljuju u ugljenisanom delu, upravno na pravac zrna. Pukotine će se postepeno širiti kako se dubina ugljenisanog dela povećava i dozvolice isparljivim česticama da izađu lako kroz površinu pogođenog sloja. Gorenje drveta je veoma složen proces koji će biti još komplikovaniji sa prisustvom ugljenisanog sloja i takođe interakcijama unutar njega. Čak i za vreme aktivnog sagorevanja, male količine kiseonika mogu da difunduju ka površini i reaguju, oslobađajući toplotu koja bi mogla doprineti dekompoziciji netaknutog drveta ispod

ugljenisanog sloja. Postoje velike razlike u sastavu i strukturi između drveta različitih vrsta [17].

Konstruktivni elementi kao što su grede, stubovi ili ploče, sačinjeni od teškog drveta, biće ugljenisani na površini, sa neoštećenim drvetom unutra. Za preostalo drvo ispod ugljenisanog sloja može se pretpostaviti da ima nepromenjenu čvrstoću i njegova veličina može biti određena uklanjanjem promenjenog dela na površini.

Elementi od teškog drveta izloženi požaru teže da se deformišu mnogo manje nego nezaštićeni čelični elementi. Drveni elementi koji su oštećeni u požaru ne moraju se zameniti ukoliko preostali deo poprečnog preseka ima dovoljno čvrstoće da nosi projektovano opterećenje. Za buduće možda će biti neophodno da se primeni dodatna zaštita kao što su novi slojevi drveta ili gipsa. U slučaju teško oštećenih elemenata biće neophodna zamena.

Okvir od lagane drvene konstrukcije je zaštićen od požara oblogama od negorivog materijala (npr. gipsanim pločama). Nakon snažnog požara obloga će izvesno biti oštećena ili će njeni delovi možda otpasti usled uticaja vatre ili usled aktivnosti vatrogasaca. Sve oštećene obloge trebalo bi ukloniti kako bi se pregledala oštećenja na nosačima, elementima i spojevima. Svako ugljenisano drvo će imati smanjenu nosivost i za proračun će biti neophodno da se proceni čvrstoća preostalih elemenata [6].

7.1. Mehanički parametri

Drvo je ortotropni materijal što znači da su čvrstoća i krutost u longitudinalnom i transverzalnom pravcu različiti i zavisi od orijentacije zrna. Mehaničke karakteristike drveta zavise od vlažnosti drveta, brzine ugljenisanja i orijentacije zrna. Bez obzira na vrstu drveta, mehaničke karakteristike su zavisne i približno proporcionalne gustini [2]. Postoji veoma malo informacija o odnosu napon-deformacija za drvo.

Deformacija

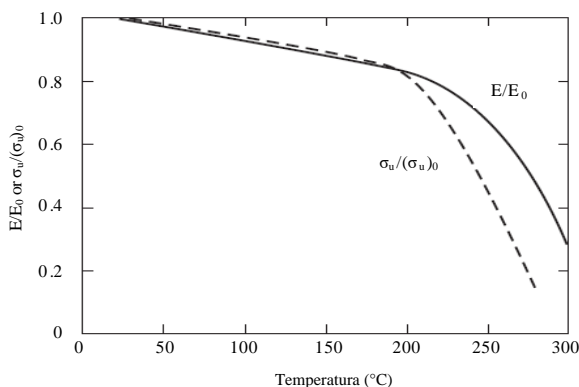
Koeficijent linearne termičke ekspanzije (β) se kreće u intervalu od $3,2 \times 10^{-6}$ m/mK do $4,6 \times 10^{-6}$ m/mK duž zrna, i od $21,6 \times 10^{-6}$ m/mK do $39,4 \times 10^{-6}$ m/mK upravno na zrna. Drvo se skuplja na temperaturama iznad 100°C , zbog smanjenja sadržaja vlage. Neka istraživanja su pokazala da skupljanje može biti procenjeno na 8% u radialnom pravcu, 12% u tangencijalnom pravcu, i osrednjeno od 0,1% do 0,2% u longitudinalnom pravcu [2].

Tečenje u drvetu je zakomplikovano promenama u sadržaju vlage, tako deformacija tečenja teži da bude veća u okruženju gde se sadržaj vlage u drvetu koleba tokom vremena, s toga tečenje može da postane glavna briga u drvetu koje je izloženo temperaturama preko 100°C [6].

Modul elastičnosti

Modul elastičnosti (E) prirodno sušenog, čistog drveta, u pravcu zrna varira od 5,5 GPa do 15,0 GPa, a njegova čvrstoća pri pritisku (σ_u) u granicama od 13 MPa do 70 MPa.

Slika 26 pokazuje promene modula elastičnosti i čvrstoće pri pritisku sa temperaturom, suvog, čistog drveta. E_0 i $(\sigma_u)_0$ na slici su modul elastičnosti i čvrstoća pri pritisku, redom, na sobnoj temperaturi. Modul elastičnosti se do otprilike 200°C polako smanjuje sa temperaturom kada dostiže vrednost oko 80%, a potom se smanjuje mnogo brže. Čvrstoća pri pritisku takođe opada linearno do otprilike 80% na temperaturi oko 200°C , a potom je pad mnogo brži, do otprilike 20% oko 280°C [2].



Slika 26. Uticaj temperature na modul elastičnosti i čvrstoću pri pritisku drveta [2]

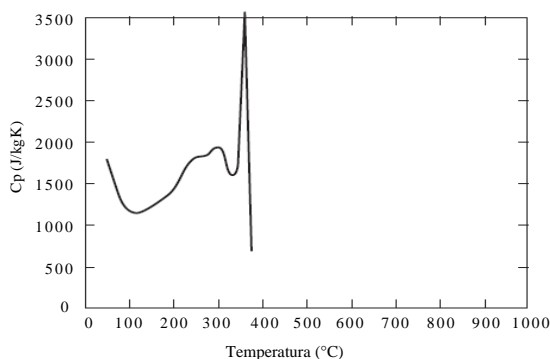
Čvrstoća na zatezanje pokazuje ponašanje slično onom kao kod čvrstoće pri pritisku, ali je smanjenje čvrstoće na zatezanje sporije sa temperaturom.

Količina vlage igra značajnu ulogu u određivanju čvrstoće i krutosti i tako povećanje sadržaja vlage vodi ka većem smanjenju ovih karakteristika. Formule za smanjenu krutost i čvrstoću mogu se pronaći u Evrokodu 5 (Deo 1-2) [2].

7.2. Termički parametri

Toplotna provodljivost i specifična toplota

Toplotna provodljivost drveta je zavisna od procenta vlažnosti u drvetu dok je specifična toplota zavisna od temperature drveta [2]. Na primer, toplotna provodljivost nekih vrsta borova je izmerena od 0,86 W/mK do 0,107 W/mK, između sobne temperature i 140°C. Toplotna provodljivost u početku raste do temperaturnog intervala 150°C do 200°C, potom se linearno smanjuje do 350°C, i konačno ponovo raste iza 350°C. Slika 27 prikazuje specifičnu toplotu za isti bor, kao funkciju temperature. Tačnost krive je donekle upitna, međutim obezbeđuje korisne informacije o prirodnoj reakciji razlaganja koje se javljaju između 150°C i 370°C [15].



Slika 27. Specifična toplota za bor od 400 kg/m³ [15]

Gustina

Gustina sušenog drveta (ρ) se kreće u intervalu od 300 kg/m^3 do 700 kg/m^3 . Gustina drveta se smanjuje sa porastom temperature dok odnos gustina (odnos gustine na sobnoj temperaturi prema onoj na povišenoj temperaturi) pada do otprilike 0,9 na 200°C , a potom oštro pada do otprilike 0,2 na oko 350°C [2].

Ugljenisanje drveta

Brzina gorenja drveta je često prikazana kao "brzina ugljenisanja" (mm/min) [17]. Ugljenisanje je jedno od glavnih karakteristika drveta koje je povezano sa temperaturom i trebalo bi ga uzeti u obzir kada se predviđa ponašanje u uslovima požara. Brzina ugljenisanja je zavisna od toplotnog fluksa ili jačine požara. Generalno, konstantna brzina ugljenisanja upravno na pravac zrna od $0,6 \text{ mm/min}$ može biti korišćena za drva izložena standardnom požaru, dok brzina ugljenisanja paralelno zrnima drveta je približno dva puta veće od te vrednosti. Ove brzine ugljenisanja trebalo bi koristiti samo kada se pokušava modelirati ponašanje drvenog segmenta u peći za proveru otpornosti na požar.

Ugljenisanje je zavisno od brojnih parametara, a najvažniji od njih su gustina, sadržaj vlage i kontrakcije drveta. Razumno je preinačiti $0,6 \text{ mm/min}$ u približno $0,4 \text{ mm/min}$ za vlažno, gusto drvo ili u $0,8 \text{ mm/min}$ za suvo i lako drvo. Brzina ugljenisanja za različite vrste drveta mogu se pronaći u literature. Evrokod daje izraze za dubinu ugljenisanja u drvenim elementima izloženim standardnom požaru [2].

Ugljen može izolovati materijal ispod njega od toplotnog izvora, jer je ugljen generalno slabiji provodnik nego drvo od kog potiče. Ovaj fenomen komplikuje određivanje "brzine ugljenisanja" jer se ova brzina menja tokom vremena. Moguće je odrediti osrednjenu brzinu ugljenisanja za substance izložene kalibriranom izvoru energije kao što je u pećima, ali za stvarni požar to nije slučaj. Brzina ugljenisanja za većinu vrsta drveta je utvrđeno da je u intervalu između $0,5 \text{ mm/min}$ i $0,8 \text{ mm/min}$ [18].

8. ALUMINIJUM

Ova vrsta materijala ima nižu temperaturu omekšavanja i topljenja u poređenju sa čelikom. Vrednost toplotne provodljivosti je između $180 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ i $240 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ [15], ali je različita za različite legure [19].

Međutim, granična temperatura za aluminijum je oko 200°C , jer iznad ove temperature gubitak čvrstoće je takav da je bilo koji faktor sigurnosti u projektovanju erodiran. Granična temperatura je uzeta kao funkcija tačne legure aluminijuma koja se koristi jer je gubitak čvrstoće usled temperature veoma zavisna od količine i vrste legirajućih elemenata. Za gustinu koja se koristi u računanju može se uzeti vrednost 2700 kg/m^3 [19]. Prema podacima u EN 1999-1-2, specifična toplota aluminijuma se menja od $913 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ na sobnoj temperaturi (20°C) do $1108 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ na povišenoj temperaturi 500°C , a to je 2,1 i 1,7 puta više nego kod čelika, redom [19].

9. PLASTIKA I KOMPOZITI NA BAZI PLASIKE

Polimeri su makromolekuli koji imaju veliku molekulsku težinu čiji individualni molekuli obuhvataju dugačke "lance" ponavljajućih jedinica koji su dobijeni od jednostavnih molekula poznatih kao monomeri [17]. Većina polimera je zasnovana na ugljeniku, poznatom kao organski polimeri. Velika molekulaska težina znači da polimer može postojati u čvrstom ili tečnom stanju ali je suviše dugačak da bi bio gasovit [4]. Jednostavni molekuli se mogu zajedno vezati linijski, površinski ili u trodimenzionalnu matricu. Većina polimera ima značajan udeo drugih sastojaka kao što su fileri i

plastifikatori, dodati da polimeru daju željene karakteristike. Neki polimeri mogu sadržati do 50% plastifikatora koji čine polimer mekanim i savitljivim [18].

Sa aspekta zapaljivosti, doprinos isparljivih materijala iz termičke dekompozicije polimera je mnogo manji kod visoko umrežene strukture, jer većina materijala formira neisparljivi ugljen, i tako efikasno smanjuju potencijal da se plamen snabde gasovitim gorivom [17]. Neophodno je razumeti faze pretvaranja dugačkog molekuskog lanca u isparljive segmente. Ovo je često označeno kao "piroliza" ili "gasifikacija", ali ovaj termin obuhvata složen set hemijskih i fizičkih procesa koji vode stvaranju isparljivih zapaljivih molekula. I fizika i hemija polimera utiču na njihovo razlaganje i sagorevanje. U zavisnosti od njihove termičke istorije, većina polimera ima izvestan stepen kristalnosti, dajući oštrij prelaz između čvrste i tečne faze. Hemijski sastav molekuskog lanca ima snažan uticaj na termičku dekompoziciju polimera pa tako oni sa razgranatim lancem, duplim vezama, ili kiseonikom u polimernom glavnom lancu smanjuju termičku stabilnost, dok aromatični prstenovi i poprečne veze polimernih lanaca povećavaju termičku stabilnost [4].

Sintetički polimeri su obično klasifikovani u dve grupe, termoplastične i termostabilne smole. Kao treća grupa mogu se uzeti elastomeri koji se razlikuju na osnovu njihovih karakteristika poput gume [17]. Glavna razlika između termoplastičnih i termostabilnih polimera je ta što ovi drugi imaju strukturu sa poprečnim vezama koje se neće istopiti kada se zagreju. Međutim pri dovoljno visokoj temperaturi mnoga razlaganja daju isparljive materije direktno iz čvrste supstance, ostavljajući ugljenični ostatak. Sa druge strane, termoplastični polimeri će omekšati i istopiti se kada se zagreju, što će promeniti njihovo ponašanje u uslovima požara [17]. Termostabilni su generalno jači, ali više kruti nego termoplastični, imaju višu termičku stabilnost, višu dimenzionalnu stabilnost, višu krutost, višu otpornost na tečenje i deformaciju pod opterećenjem [4].

Jedna vrsta polimera je plastični materijal. Plastika, a naročito kompoziti na bazi plastike su strukturno veoma efikasni u smislu odnosa težine i čvrstoće ali slabi kada su izloženi uticaju požara. Ovo znači da za takve materijale treba intenzivni nivoi zaštite da bi se zadržali kapaciteti nosivosti na povišenoj temperaturi. Takođe, ovo znači da debljina izolacije treba da osigura da temperatura unutar plastičnog elementa bude zadržana blizu ambijentalne. Dodatni problem je što se neke plastike razlažu sa temperaturom i emituju visoko zapaljive ili toksične gasove.

Karakteristike nekih od najpopularnijih termoplastičnih polimera su prikazane ispod [2]:

Polietilen (PE): Polietilen počinje da stvara poprečne veze na 202°C i da se razlaže (smanjenje u molekuskolj težini) na 292°C, iako intenzivni gubitak težine nije uočen ispod 372°. Produkti razlaganja uključuju širok spektar alkana i alkena. Glavni produkti koji pri tome nastaju su propan, propen, etan, butan, heksan-1 i buten-1. Zabeležen je širok interval energije aktivacije zavisno od procenta konverzije i početne molekulske težine. Razlaganje je jako naglašeno prisustvom kiseonika, sa značajnim efektima utvrđenim na 150°C.

Polipropilen (PP): Stabilnost polipropilena je niža kada se uporedi sa polietilenom. Kao i sa polietilenom, prekidi lanca i njegove reakcije su veoma važne tokom razlaganja. Smanjenja u molekuskolj težini prvo su uočena na 227°C i 247°C, a isparavanje postaje značajno iznad 302°C. Kiseonik drastično utiče i na mehanizam i na brzinu razlaganja. Temperatura razlaganja je smanjena za oko 70°C, i produkti oksidativnog razlaganja uglavnom uključuju ketone. Na temperaturama ispod tačke topljenja polipropilen je mnogo otporniji na oksidativnu pirolizu, jer je difuzija kiseonika u materijal otežana većom gustinom i kristalnošću polipropilena.

Polivinilhlorid (PVC): Najčešći halogeni polimer je PVC. To je jedan od tri najviše korišćenih polimera u svetu, zajedno sa polietilenom i polipropilenom. Između 227°C i

277°C, razvija se gas hlorovodonik. Veoma je važno naglasiti da je temperatura na kojoj počinje da se izdvaja hlorovodonik, merena na bilo koji način, veoma zavisna od paketa za stabilizaciju koji se koristi. Brzina promene zavisi od molekulske težine, kristaliteta, prisustva kiseonika, hlorovodonika i stabilizatora.

Polimerni proizvodi uglavnom imaju nisku cenu, malu težinu, dostupni su u velikom spektru boja, imaju malu toplotnu i električnu provodljivost, dobru žilavost i otpornost na kiseline, baze i vlagu [4].

10. GIPS

Gipsani proizvodi se intenzivno koriste u građevinskoj industriji u obliku ploča. Gipsana ploča je proizvedena mešanjem vode sa građevinskim gipsom (kalcijum sulfat poluhidrat: $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). Kristali $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ koji se međusobno spajaju su odgovorni za očvršćavanje materijala. Središte ploče je proizvedeno od građevinskog gipsa u koji su dodati aditivi [2].

Moguće je da postoje značajne razlike u ponašanju gipsane ploče tokom požara a usled različite vrste i sastava jezgra, što može da se razlikuje od proizvođača do proizvođača. Gips je idealan materijal za zaštitu od požara. Voda unutar gipsa igra značajnu ulogu u definisanju njegovih termičkih karakteristika i odgovara na požar. Pri zagrevanju, gips će izgubiti dva molekula vode (H_2O) na temperaturama između 125°C i 200°C. Toplota ukupne dehidracije je 0,61-106 J/kg gipsa. Usled značajne absorpcije energije tokom procesa dehidracije sloj gipsa primenjen na površini građevinskog elementa je sposoban da značajno odloži ulazak toplote u unutrašnje nosive delove konstrukcije.

Termičke karakteristike gipsane ploče se menjaju zavisno od sastava jezgra. Toplotnu provodljivost gipsanih proizvoda je teško proceniti zbog velikih razlika u poroznosti i prirode agregata. Uobičajena vrednost toplotne provodljivosti za gipsanu ploču gustine oko 700 kg/m³ je 0,25 W/mK. Koeficijent termičke ekspanzije gipsnih proizvoda može da varira između $11,0 \times 10^{-6}$ m/mK i 17×10^{-6} m/mK na sobnoj temperaturi, zavisno od prirode i količine agregata koji je upotrebljen [2].

Ne postoji mnogo informacija o mehaničkim karakteristikama gipsanih ploča na povišenim temperaturama jer su ove karakteristike komplikovane da se obuhvate eksperimentom. Čvrstoća gipsane ploče na povišenoj temperaturi je veoma mala i može biti zanemarena.

Pregled gipsane ploče može ukazati na dužinu trajanja požara. Kada je gipsana ploča izložena požaru ona stalno dehidrira sa površine. Dubina dehidracije se može posmatrati uzimanjem malog parčeta ploče kako bi se locirao prelaz između mekanog dehidratiranog gipsnog maltera i čvrstog gipsa originalne ploče. Uobičajene gipsane ploče dehidrišu približno 0,5 mm u minuti [6].

11. STAKLO

Staklo je čvrst materijal strukture slične tečnosti. Tokom zagrevanja ono prolazi kroz smanjenje viskoznosti. Staklo se ponekad koristi kao protivpožarna barijera, ali može dati samo ocenu integriteta zato što nema strukturu na povišenim temperaturama i ne može obezbediti ocenu izolacije sve dok nije pokriveno nekom vrstom ekspanzivne obloge. Ukoliko se zastakljivanje koristi u protivpožarnim barijerama ono mora biti ugrađeno sa specijalnim staklima, ili armiranim staklom (ojačano finom žicom u oba pravca) ili posebno formulisano staklo otporno na požar. Protivpožarno staklo je obično ugrađeno u čelične ramove koji stežu staklo i štite ga od prekomerne deformacije kada se ugreje. Aluminijumski ramovi se ne mogu koristiti zbog niske temperature topljenja. Stakleni

sklopovi mogu biti ispitani u protivpožarnim testovima, u punoj veličini, ali se procena može uraditi samo za kriterijum integriteta.

Većina uobičajenih stakala omekšava ili se topi u temperaturnom intervalu 600°C do 800°C, ali će pucati ili se lomiti na mnogo nižim temperaturama ukoliko je izloženo termičkom šoku, usled različitih temperatura unutar stakla ili zbog ekspanzije rama. Za normalno prozorsko staklo je pretpostavljeno da se lomi i otpada od prozora u trenutku "flashovera" (uobičajeno oko temperatura od 500°C do 600°C), iako su testovi pokazali da se ovo neće uvek desiti. Kaljeno staklo ili termički ojačano staklo neće se razbiti na visokim temperaturama. Dupla stakla teže da ostanu na mestu mnogo duže nego pojedinačna stakla. Nedavno je razvijen veliki broj zaštićenih izolovanih zastakljenih sistema koji sadrže naizmenične slojeve stakla ili natrijum silikata sa providnim ekspanzivnim materijalima. Ovi proizvodi su transparentni na sobnoj temperaturi, koji postaju neprovidni na visokim temperaturama, dostižući vatrootpornost do 2 časa. Stakleni zidovi i prozori mogu obezbediti otpornost na širenje požara ukoliko se konstantno prskaju vodom iz odgovarajuće projektovanih sprinkler sistema (Kim et al., 1998; England et al., 2000) [6].

12. FRP

Ojačanje pomoću polimernih vlakana (FRP- fibre reinforced polymers) veoma je popularno pre svega zbog svojih visokih mehaničkih karakteristika. FRP kompoziti su sastavljeni od vlakana visoke čvrstoće (npr. ugljenična, staklena, aramidna) i termostabilne organske matrice obično epoksidne smole koja povezuje vlakna sa konstrukcijom. Vlakna nose sile zatezanja, dok matrica prenosi napon do betonske podloge. Jednostavni su za postavljanje, imaju visok odnos čvrstoća/težina i imaju povoljne mehaničke karakteristike.

FRP kompoziti mogu biti vezani za element na spoljašnjoj površini (ER) ili smešteni unutar urezanog dela elementa i ispunjeni organskom matricom (Near Surface Mounted technique, NSM).

Problem nastaje kada je polimer izložen visokoj temperaturi i kada se dostigne tačka staklastog prelaza polimerne matrice T_g , usled omekšavanja smole, čime se smanjuje kapacitet prenosa sila između vlakana. Precizna definicija vrednosti T_g je problem za identifikaciju jer je progresivna priroda procesa omekšavanja. Za FRP koji polimerizuju na mestu primene, karakteristične su veoma niske vrednosti T_g (između 45°C i 80°C za normalne i toplotno rezistentne smole, redom). Kada se FRP koristi kao unutrašnja armatura moguće je dostići vrednost T_g iznad 100°C [20].

Iako prevazilaženje T_g podrazumeva smanjenje čvrstoće armature, značajno razaranje je dostignuto na temperaturama bliskim temperaturama topljenja smole (temperatura kristalizacije, $T_c > T_g$) ili čak i višim. Eksperimentalne studije su pokazale da omekšavanje smole koje počinje na T_g uvodi drastično smanjenje adhezionih karakteristika i efikasnost sistema ojačavanja za postojeću konstrukciju što uglavnom zavisi od efikasnosti veze između FRP i betona i veoma je zavisno od temperature [20]. FRP su klasifikovani kao anizotropni materijali i zato poseduju različite karakteristike u različitim pravcima [4].

Poređenje između čelika i FRP sistema ojačanja pokazalo je da FRP, naročito u obliku ploča i bez zaštite se ponaša bolje nego čelične ploče zbog niže toplotne provodljivosti i njihove manje težine. Korišćenje FRP kao spoljašnje ojačanje za armirane grede, zidove ili ploče zahteva zaštitu sa dodatnom izolacijom da bi se izbeglo odvajanje između FRP ploča ili laminata i betonske podloge [20].

13. IZOLACIJA ZA ZAŠTITU

Izolacioni materijal je često korišćen kao protivpožarni materijal za konstruktivne elemente kao što su stubovi, grede, ploče i zidovi. Izolacija pomaže da se odloži povećanje

temperature konstruktivnih elemenata na taj način povećavajući požarnu otpornost. Postoje brojni izolacioni materijali, ali mineralna vuna i staklena vlakna su dva najčešće korišćena izolaciona materijala u zidovima i pločama. Drugi izolacioni materijali koji se koriste za zaštitu od požara obuhvataju ekspandirajuće boje, mineralna vlakna koja se nanose prskanjem, izolacione ploče i kompresovane vlaknaste ploče. Termičke karakteristike izolacije igraju važnu ulogu u određivanju otpornosti na požar.

Ne postoji mnogo informacija dostupnih o termičkim karakteristikama različitih vrsta izolacije. Razlike u toplotnoj provodljivosti na višim temperaturama su uglavnom usled razlike u hemijskom sastavu vlakna. Testovi o ispitivanju otpornosti na dejstvo požara zidova i podova pokazali su da se izolacija sa mineralnim vlaknima ponaša bolje od izolacije sa staklenim vlaknima. Ovo je uglavnom zato što se staklena vlakna tope u temperaturnom intervalu 700–800°C dok je tačka topljenja za mineralna vlakna viša. Gustina staklenih vlakana je oko 10 kg/m³ i mnogo je manja nego kod kamenih vlakana čija gustina je oko 33 kg/m³ [4].

Takođe, sadržaj vlage u izolacionom materijalu ima uticaj na termičke karakteristike. Termičke karakteristike za požarnu izolaciju su pokazane za sobnu temperaturu i mogu se značajno menjati sa temperaturom i takođe sa sastavom izolacije [4].

14. EVROPSKI STANDARD EN 13501-1

Evropski standard EN 13501-1 [21] pruža klasifikaciju prema otpornosti na požar za sve proizvode i građevinske elemente. Prema ovom standardu, reakcija na požar je doprinos proizvoda svojom sopstvenom razgradnjom, izloženom požaru pod specifičnim uslovima. Proizvodi su posmatrani u odnosu na njihovo krajnje korišćenje i podeljeni su u tri glavne kategorije:

- građevinski proizvodi,
- podne obloge,
- linearni proizvodi za toplotnu izolaciju cevi.

Konstruktivni proizvodi su klasifikovani prema usaglašenim metodama ispitivanja u Evroklase A1, A2, B, C, D, E i F. Za proizvode klasifikovane u date klase smatra se da zadovoljavaju sve zahteve bilo koje niže klase. Proizvodi klasifikovani u A1 i A2 klase su negorive (na primer cement, beton, staklo, staklena vlakna, kamena vuna, keramika itd.), materijali sertifikovani od B do F su gorivi po rastućem redosledu.

Podne obloge i linearni proizvodi za toplotnu izolaciju cevi su klasifikovani prema istim klasama A1, A2, B, C, D, E i F praćeno skraćenicom "fl" i "l", redom.

Svi proizvodi i materijali klasifikovani kao A2, B, C, D obuhvataju dodatnu klasifikaciju koja se odnosi na emisiju dima i stvaranje gorećih kapljica i/ili čestica:

		1	količina/brzina emisije odsutna ili slaba
s	Emisija dima tokom gorenja	2	količina/brzina emisije prosečnog intenziteta
		3	količina/brzina emisije visokog intenziteta
		0	nema kapljanja
d	Stvaranje gorećih kapljica/čestica tokom gorenja	1	sporo kapljanje
		2	znatno kapljanje

Klasifikacija građevinskih proizvoda i podnih obloga prema standardu EN 13501-1 pokazano je u Tabeli 11.

Tabela 11

Klasifikacija prema Evropskom Standardu EN 13501-1 [21]

Definicija	Građevinski proizvodi			Materijali za podne obloge	
	A1			A1 _n	
Negorivi materijali	A2-s1,d0	A2-s1,d1	A2-s1,d2	A2 _n -s1	A2 _n -s2
	A2-s2,d0	A2-s2,d1	A2-s2,d2		
	A2-s3,d0	A2-s3,d1	A2-s3,d2		
Gorivi materijali-veoma ograničen doprinos požaru	B-s1,d0	B-s1,d1	B-s1,d2	B _n -s1	B _n -s2
	B-s2,d0	B-s2,d1	B-s2,d2		
	B-s3,d0	B-s3,d1	B-s3,d2		
Gorivi materijali-ograničen doprinos požaru	C-s1,d0	C-s1,d1	C-s1,d2	C _n -s1	C _n -s1
	C-s2,d0	C-s2,d1	C-s2,d2		
	C-s3,d0	C-s3,d1	C-s3,d2		
Gorivi materijali-srednji doprinos požaru	D-s1,d0	D-s1,d1	D-s1,d2	D _n -s1	D _n -s1
	D-s2,d0	D-s2,d1	D-s2,d2		
	D-s3,d0	D-s3,d1	D-s3,d2		
Gorivi materijali-visok doprinos požaru	E	E-d2		E _n	
Gorivi materijali-lako zapaljivi		F		F _n	

* Za klasu E postoji samo jedna podklasa d2.

LITERATURA

- [1] Z. Guo, X. Shi, *Experiment and Calculation of Reinforced Concrete at Elevated Temperatures*, 1st ed., Elsevier, 2011.
- [2] Group of authors, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd ed., Massachusetts and Maryland, 2002.
- [3] D. E. Della-Giustina, *Fire Safety Management Handbook*, 3rd ed., Taylor&Francis, 2014.
- [4] M. J. Hurley, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 5th ed., Springer, 2016.
- [5] L. G. Bengtsson, *Enclosure fires*, Swedish Rescue Services Agency.
- [6] A.H. Buchanan, A.K. Abu, *Structural Design for Fire Safety*, 2nd ed., Wiley, New Zealand, 2017.
- [7] Group of authors, *Fire Protection Handbook*, 19th ed., National Fire Protection Association, 2003.
- [8] B. Karlsson, J. G. Quintiere, *Enclosure Fire Dynamics*, 1st ed., CRC Press, 2000.
- [9] U. Wickström, *Temperature Calculation in Fire Safety Engineering*, 1st ed., Springer, 2016.
- [10] C. A. Harper, *Handbook of Building Materials for Fire Protection*, 1st ed., McGraw-Hill, 2004.
- [11] J. R. Almirall, K. G. Furton, *Analysis and Interpretation of Fire Scene Evidence*, 1st ed., CRC Press, 2004.
- [12] P. Stollard, J. Abrahams, *Fire from First Principles-A design guide to building fire safety*, 3rd ed., E&FN SPON, 1999.
- [13] *Comprehensive Fire Protection and Safety with Concrete*, 1st ed., The Irish Concrete Federation, Ireland, 2007.
- [14] I. J. F. Denoël, *Fire Safety and Concrete Structures*, 1st ed., FEBELCEM, 2007.
- [15] J. A. Purkiss, *Fire Safety Engineering-Design of Structures*, 2nd ed., Elsevier, 2007.
- [16] *Design: Fire Protection Engineering for Facilities*, 1st ed., Department of Defense USA, 2004.

- [17]D. Drysdale, *An Introduction to Fire Dynamics*, 3rd ed., Wiley, 2011.
- [18]J. J. Lentini, *Scientific Protocols for Fire Investigation*, 1st ed., Taylor&Francis, 2006.
- [19]J. A. Purkiss, L. Li, *Fire Safety Engineering Design of Structures*, 3rd ed., CRS Press, 2014.
- [20]C. Pellegrino, J. Sena-Cruz, *Design Procedures for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete Structures*, Vol. 19., RILEM-Springer, 2016.
- [21]*European Standard EN 13501-1:2010 Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests*, 2010.

POŽARNA OTPORNOST KONSTRUKCIJA

Igor Džolev, Dorđe Lađinović

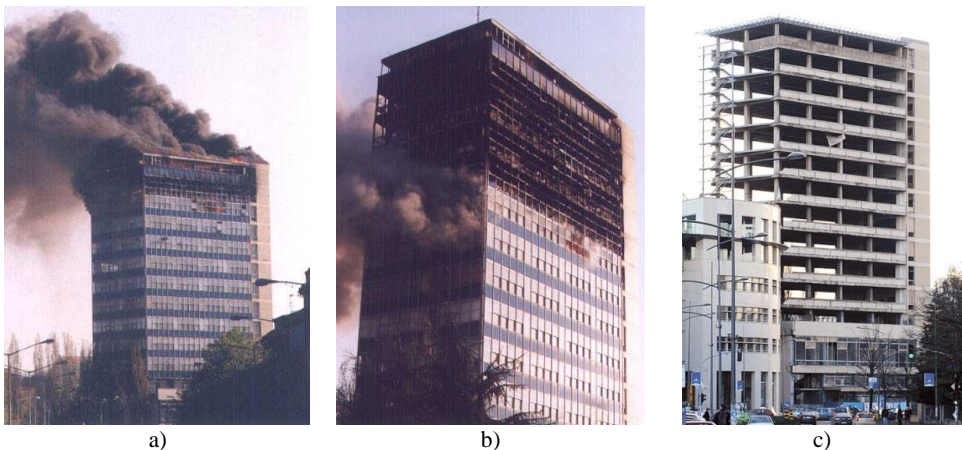
1. UVOD U POŽARNU OTPORNOST KONSTRUKCIJA

1.1. Osnovni zahtevi

Opšti ciljevi zaštite od požara, u slučaju njegovog nastanka, su ograničavanje rizika u odnosu na pojedinca i društvo, materijalna dobra, i ukoliko je potrebno, životnu sredinu ili direktno izloženu imovinu [1]. Prema Direktivi 89/106/EEC za građevinske proizvode, za ograničavanje rizika od požara potrebno je ispuniti sledeće osnovne zahteve [2]:

- nosivost konstrukcije mora biti obezbeđena u određenom vremenskom periodu,
- razvoj i širenje vatre i dima u okviru objekta moraju biti ograničeni,
- širenje vatre na okolne objekte mora biti ograničen,
- evakuacija ljudi mora biti omogućena,
- bezbednost spasilačkih ekipa mora biti obezbeđena.

Ovi zahtevi nameću dodatna razmatranja koja je potrebno uzeti u obzir tokom faze projektovanja, u vidu pasivnih i aktivnih mera zaštite od požara, kako bi se smanjile posledice u slučaju da se požar uopšte i dogodi. Kako se, uopšteno posmatrano, takva vrsta događaja ne može predvideti i eliminisati kao pretnja (Slika 1), cilj požarnog inženjerstva je smanjenje rizika, koji se temelji na konstantnoj nadogradnji baze znanja o analiziranim pojavama i implementacije rešenja u svakodnevnu inženjersku praksu.



Slika 1. Novi Sad (Srbija) Požar na zgradi Otvorenog Univerziteta 6. aprila 2000. godine: a) širenje vatre na celokupnu etažu nastanka požara, b) vertikalno širenje vatre i c) trenutno stanje zgrade

Metode procene požarne otpornosti, bilo eksperimentalne ili računске, mogu se podeliti na sledeće kategorije [3]:

- standardni požarni testovi,

- tabelarni podaci (definisani propisima i zasnovani na jednostavnijim proračunima),
- pojednostavljeni proračuni, zanemarujući kompleksne uticaje poput termičkih napona),
- napredni proračuni (zasnovani na ponašanju),
- testovi u punoj veličini.

Prema Evrokod standardima, analiza požarne otpornosti, u zavisnosti od nivoa kompleksnosti obuhvata:

- analizu elementa konstrukcije,
- analizu dela konstrukcije,
- analizu celokupne konstrukcije.

Pored preskriptivnih i eksperimentalnih metoda, savremeni tehnički razvoj dozvoljava procenu termičkog i mehaničkog odgovora u slučaju požara i na osnovu proračuna. Eksperimentalna istraživanja omogućavaju nova sveobuhvatna saznanja o ponašanju konstrukcija prilikom požara. Međutim, troškovi sprovođenja takvih studija su izuzetno veliki (eksperimentalna postavka, oprema, specijalizovane peći i merni uređaji). S obzirom na ograničenja u veličini specijalizovanih peći i troškova nabavke opreme, kao i velike količine energije koju je potrebno obezbediti za sprovođenje svakog pojedinačnog testa, potreba za održivijim pristupom je rezultirala razvoju računskih procedura kako bi se obezbedilo prihvatljivo ekonomsko rešenje za svakodnevnu inženjersku praksu.

Prilikom procene požarne otpornosti, bez obzira na korišćeni metod, prvi korak je procena stvarnog požara i modeliranje realnog i konzervativnog požarnog scenarija. U opštem slučaju, jačina požara zavisi od niza faktora, uključujući [3]:

- dostupnost gorivog materijala,
- uslove ventilisanosti, u smislu dostupnosti kiseonika,
- fizičkih svojstava prostora u kojem nastaje požar.

1.2. Požarno dejstvo i modeli požara

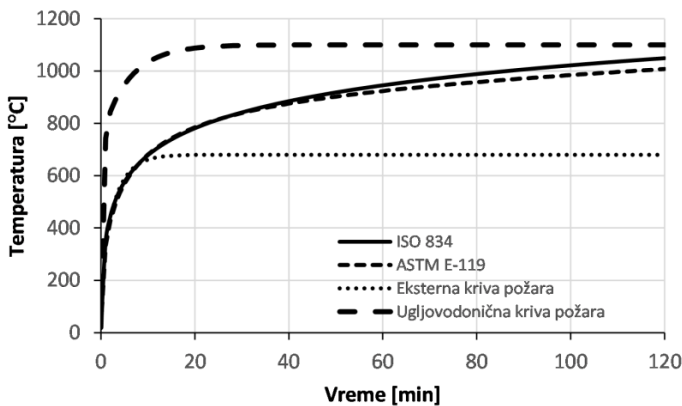
Svaki stvarni požar je jedinstven, ali se iste faze razvoja mogu jasno uočiti tokom svakog požara: paljenje, faza rasta, raspirivanje (flashover), faza potpuno razvijenog požara, faza opadanja i gašenje požara. Za sprovođenje analize ponašanja konstrukcije u požaru, u zavisnosti od pretpostavki i stepena kompleksnosti, modeli požara mogu se podeliti u tri kategorije:

- nominalne požarne krive,
- parametarske požarne krive,
- višezonski modeli.

Kako je precizno predviđanje mesta nastanka požara, kao i uslova u kojima će se požar razviti, praktično nemoguće sa sigurnošću uspostaviti, za definisanje referentnog požarnog modela koji bi se koristio za požarnu klasifikaciju konstrukcijskih elemenata, usvojene su standardne (nominalne) požarne krive. Najčešće su u upotrebi ISO 834 požarna kriva [4], ASTM E119 [5], ugljovodonična i eksterna požarna kriva [2] (Slika 2). Standardne požarne krive su nastale na osnovu baza maksimalnih registrovanih temperatura u stvarnim celuloznim požarima i predstavljaju razvoj temperatura nakon dostizanja flashover-a. Matematički posmatrano, krive predstavljaju funkcije promene temperature toplog gasa u fazi potpuno razvijenog požara, u zavisnosti od vremena. Zasnovane su na pretpostavkama da su temperature unutar požarnog sektora nezavisne od njegove veličine i

materijalizacije, količine gorivog materijala i uslova ventilisanosti po obodu. Takođe, smatra se da su temperature u toku požara nezavisne od prostornih koordinata unutar požarnog sektora. Funkcije temperatura-vreme su monotono rastuće, sa zanemarenjem faze hlađenja koja sledi po završetku faze potpuno razvijenog požara. Ukoliko se koriste standardni požari, požarna otpornost se izražava u minutima i odgovara periodu u toku kojeg je obezbeđen odgovarajući požarni kriterijum. U zavisnosti od funkcije elementa i topologije, požarna otpornost je definisana na osnovu sledećih kriterijuma:

- R - funkcija nosivosti (kapacitet konstrukcije ili elementa da zadrži zahtevanu mehaničku otpornost u slučaju požara, prema definisanom kriterijumu),
- E - funkcija razdvajanja (sposobnost elementa za razdvajanje, izloženog požaru sa jedne strane, da onemogući prodor otvorenog plamena na suprotnoj, neizloženoj površini elementa),
- I - funkcija termičke izolovanosti (sposobnost elementa za razdvajanje, izloženog požaru sa jedne strane, da ograniči rast temperature na neizloženoj površini elementa, ispod odgovarajućih vrednosti).



Slika 2. Standardne požarne krive temperatura-vreme

Ako se usvoji standardna požarna izloženost, funkcija nosivosti je zahtevana tokom određenog vremenskog perioda, dok, u slučaju parametarskih požara, konstrukcija mora da izdrži požarno dejstvo tokom celokupnog trajanja požara, uključujući i fazu hlađenja. Funkcije nosivosti i razdvajanja mogu se proceniti sprovođenjem termičko-naponske analize i/ili eksperimentalnom analizom. S druge strane, funkcija termičke izolovanosti može se utvrditi i samo na osnovu analize prenosa toplote. Obično se pretpostavlja da su kriterijumi izolovanosti zadovoljeni ako je prosečan porast temperature na celoj neizloženoj površini manji od 140°C i ako je maksimalni porast temperature u nekoj tački te površine manji od 180°C. Kriterijumom termičke izolovanosti sprečava se spontano paljenje gorivog materijala izvan požarnog sektora, čime se sprečava širenje požara na susedne objekte i sektore.

Konstrukcijski element se zatim klasifikuje pomoću oznaka koje odgovaraju konkretnom kriterijumu i prema minimalnom trajanju standardnog požara (u minutima) dok se ne prekorači odgovarajući kriterijum loma. (npr. "REI 60" obezbeđuje nosivost, razdvajanje i termičku izolovanost elementa najmanje 60 minuta standardne požarne izloženosti).

Iako je upotrebom nominalnih požarnih krivi omogućena klasifikacija elemenata prema požarnoj otpornosti, može se uočiti značajno odstupanje registrovanih temperatura u poređenju sa realnim požarima, u zavisnosti od veličine požarnog sektora, dostupnog požarnog opterećenja itd., što često obezbeđuje konzervativno rešenje, ali takođe u pojedinim slučajevima, rešenje koje nije na strani sigurnosti. Za detaljniju procenu požara koji se može razviti u određenom požarnom sektoru, mogu se koristiti parametarske požarne krive, koje uzimaju u obzir stvarna geometrijska svojstva i materijalna svojstva sektora, kao i uslove ventilisanosti. Parametarske požarne krive, za razliku od standardnih, takođe obuhvataju i fazu hlađenja, čime je evolucija temperature u toku vremena obezbeđena tokom celog požara. U postupku projektovanja, neophodno je dokazati da konstrukcija poseduje odgovarajuću požarnu otpornost u svim fazama, uključujući i fazu nakon potpunog gašenja požara. Ovo poslednje, u zavisnosti od primarnog konstrukcijskog materijala, može biti od presudne važnosti, jer se kod materijala koji poseduju veliku termičku inerciju, maksimalne temperature u elementima mogu pojaviti i nakon gašenja požara. Ovo je naročito važno zbog vatrogasnih službi i drugih koji ulaze u zgradu odmah nakon požara. Ovakav pristup je specifičan za projektovanje zasnovano na ponašanju (PBD), koje je sve više u upotrebi danas, jer jedinstvena savremena arhitektonska rešenja, upotreba savremenih materijala i smela projektantska rešenja često ne mogu biti sagledana korišćenjem preskriptivnih procedura projektovanja.

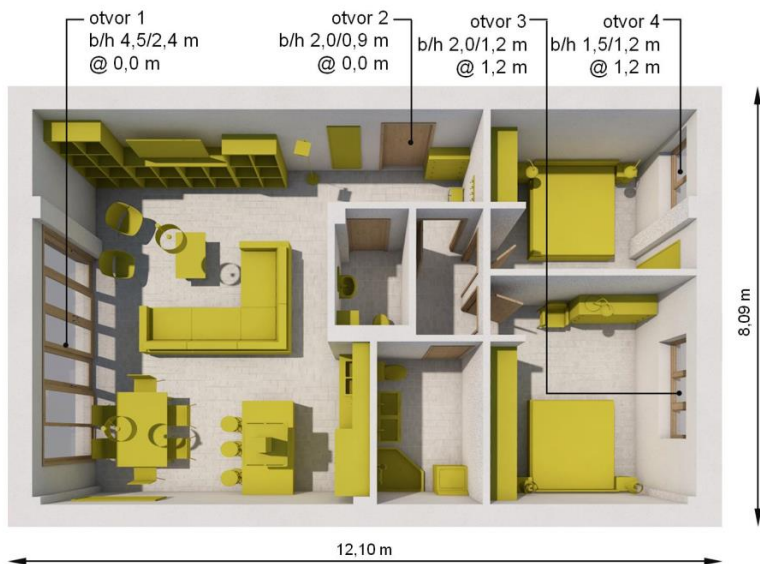
Tačan model požara je osnova računskog modeliranja ponašanja konstrukcije tokom požara. Iako danas tačni modeli još uvek nisu široko dostupni, poslednjih godina sprovede se opsežna istraživanja.

U slučaju da je potrebna tačnija procena razvoja temperature unutar požarnog sektora, mogu se primeniti zonski modeli, zasnovani na zakonima održanja energije i mase. Zbog složenosti numeričkog proračuna, potreban je iterativni postupak, čime je primena ovakvih modela uslovljena korišćenjem odgovarajućih specijalizovanih računarskih programa.

Proizvoljni požarni sektor, prema tome, može se analizirati korišćenjem različitih modela, u zavisnosti od ciljeva analize i pouzdanosti u slučaju nastanka požara. Primer požarnog sektora (trosobne jednorodne stambene jedinice) prikazan je na Slici 3, dok su materijalni podaci o slojevima na obodu požarnog sektora dati u Tabeli 1.

Tabela 1
Slojevi omotača stambene jedinice

	Materijal	Debljina [cm]	Gustina [kg/m ³]	Topl. provod. [W/mK]	Specifična topl. [J/kgK]
Pod	Keram. pločice	1	2300	1,28	920
	Bet. košuljica	5	2200	1,40	1050
	Kamena vuna	15	60	0,037	1030
	Beton	20	2300	1,60	1000
Plafon	Malter	1	1700	0,85	1050
	Beton	20	2300	1,60	1000
	Kamena vuna	25	60	0,037	1030
	Bet. košuljica	5	2200	1,40	1050
Zid	Malter	1	1700	0,85	1050
	Termo-blok	25	1400	0,61	920
	Kamena vuna	15	60	0,037	1030
	Malter	1	1700	0,85	1050



a)

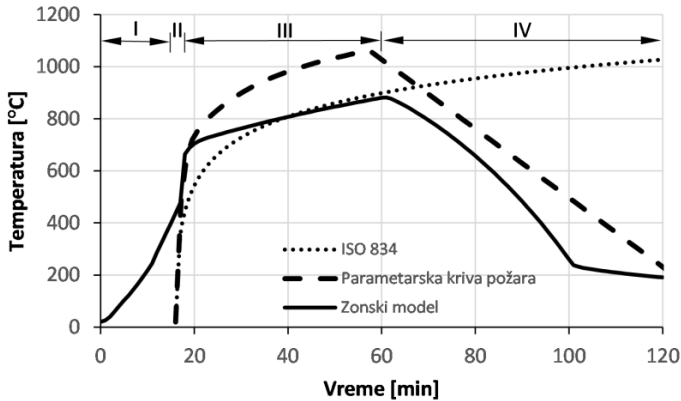


b)

Slika 3. Geometrija, otvori i granični slojevi analizirane stambene jedinice

Krive temperatura-vreme, određene za ovu konkretnu jedinicu, prikazane su na Slici 4. Kao što je prethodno opisano, za proračun odgovora konstrukcije na požar, mogu se primeniti različite požarne krive, od jednostavnih (ISO 834), parametarskih (definisanih prema Aneksu A iz EN 1991-1-2) do kompleksnijih, zonskih modela, koji uključuju fizička svojstva pregrada. Važno je naglasiti da standardne i parametarske požarne krive opisuju razvoj požara nakon pojave flashover-a, i ne obuhvataju fazu rasta koja se javlja nakon paljenja (faza "I"). Ukoliko je potrebno jednostavno poređenje temperatura, početak standardne i parametarske krive treba translatorno pomeriti na trenutak flashover-a

(faza "II"), koji je određen na osnovu zonskog modela, razvijenog u računarskom programu OZone [6, 7]. Standardna požarna kriva, pored faza "I" i "II", takođe ne uzima u obzir ni fazu hlađenja, odnosno gašenja požara (faza "IV").



Slika 4. Krive temperatura-vreme za analiziranu stambenu jedinicu

Razvoj temperature toplih gasova u požarnom sektoru dalje se može koristiti kao ulazni podatak za određivanje prodora toplote unutar nosećih elemenata u toku vremena. Rezultat termičke analize predstavljaju temperaturni profili, potrebni, npr. za određivanje funkcije termičke izolovanosti elementa za razdvajanje (nosećeg ili nenosećeg), ili za procenu degradacije nosivosti i krutosti elemenata, ako je cilj određivanje funkcije nosivosti. U zavisnosti od cilja analize, mogu se proceniti različiti kriterijumi požarne otpornosti i može se utvrditi požarna otpornost elementa/dela/celokupne konstrukcije.

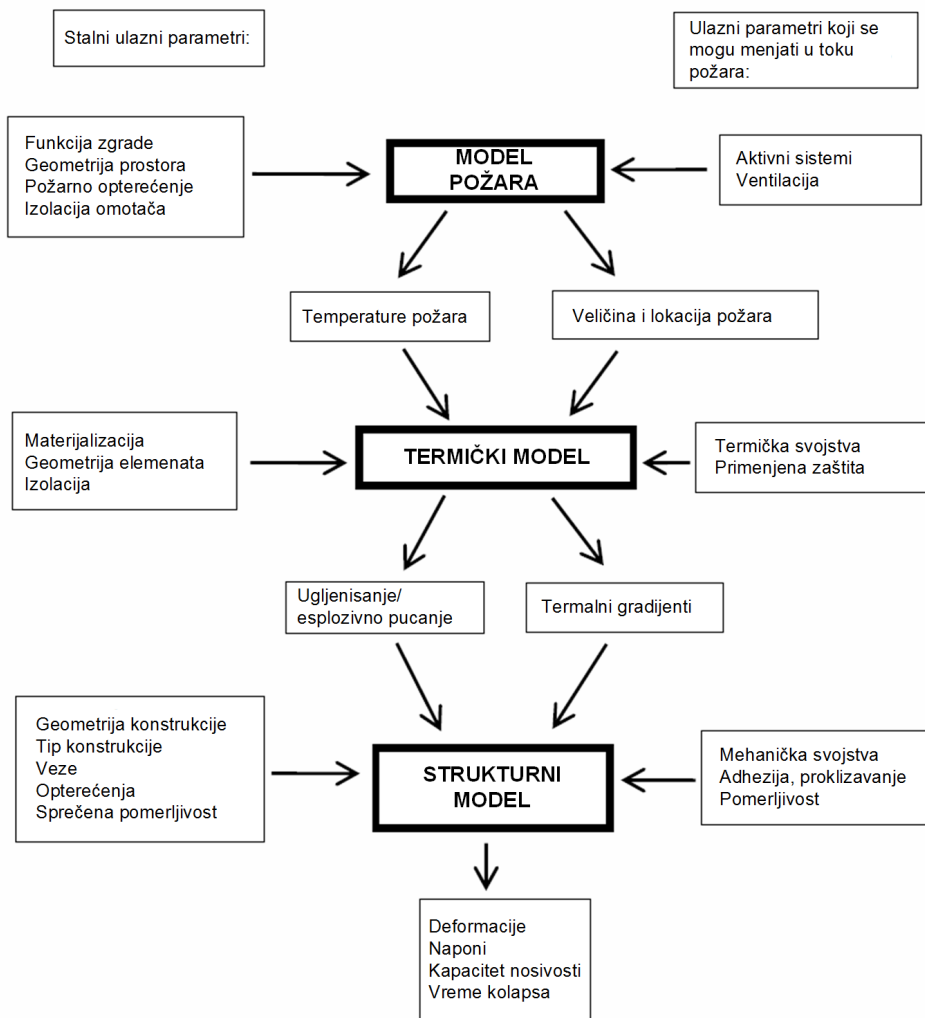
2. METODOLOGIJA ANALIZE POŽARNE OTPORNOSTI KONSTRUKCIJA

Analiza požarne otpornosti konstrukcija treba da obuhvati sledeće relevantne korake [2]:

- izbor relevantnih projektnih požarnih scenarija,
- određivanje odgovarajućih projektnih tipova požara,
- proračun temperaturnog razvoja unutar elemenata konstrukcije,
- proračun mehaničkog ponašanja konstrukcije izložene požaru.

Projektni požarni scenario predstavlja kvalitativni opis razvoja požara kroz vreme zasnovan na proceni rizika od požara, koji identifikuje ključne događaje koji određuju požar i razlikuju ga od drugih mogućih požara. Obično se definiše proces paljenja i razvoja požara, stanje potpuno razvijenog požara, hlađenje, kao i okruženje u sklopu objekta i sistemi koji mogu da utiču na tok požara.

Savremene metode projektovanja konstrukcija zahtevaju upotrebu sofisticiranog računarskog modeliranja, kako bi se predvidela dejstva nanetog opterećenja i požarne izloženosti, kao i kapacitet konstrukcije i nosećih elemenata da se odupru uticajima ovih dejstava [8]. Glavne komponente takvih modela su prikazane na Slici 5.



Slika 5. Algoritam za predviđanje ponašanja konstrukcije tokom požara

Napredni proračun razvoja temperature unutar nosećih elemenata se zasniva na vremenskoj analizi prenosa toplote, preko kondukcije, konvekcije i radijacije. Diferencijalna jednačina prenosa toplote putem kondukcije glasi:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

gde je:

- $\lambda_{x,y,z}$ termička provodljivost u tri glavna pravca (u zavisnosti od temperature),
- ρ gustina materijala (u zavisnosti od temperature),
- c specifična toplota (u zavisnosti od temperature),

- T temperatura,
- t vremenski parametar.

Granični uslovi se mogu modelirati uzimajući u obzir oba mehanizma prenosa toplote: konvekcije i radijacije.

Toplotni fluks usled konvekcije iznosi:

$$q_c = h_c (T_z - T_f) \quad (2)$$

gde je:

- h_c koeficijent konvekcije (za zid u sobi pri ambijentalnoj temperaturi preporučena vrednost iznosi $h_c = 4 [\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$, dok je u slučaju požara u prostoriji, preporučena vrednost $h_c \geq 25 [\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$),
- T_z temperatura na površini elementa,
- T_f temperatura fluida oko elementa.

Toplotni fluks izazvan zračenjem iznosi:

$$q_r = V \varepsilon \sigma_c (T_{z,a}^{r,4} - T_{f,a}^{r,4}) = h_r (T_z - T_f) \quad (3)$$

$$h_r = V \varepsilon \sigma_c (T_{z,a}^{r,2} + T_{f,a}^{r,2}) (T_{z,a} + T_{f,a}) \quad (4)$$

gde je:

- h_r koeficijent radijacije (u zavisnosti od temperature),
- V faktor oblika (uobičajeno, $V = 1,0$),
- ε rezultujući koeficijent emisije $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_z$, $\varepsilon_r = 1,0$ je koeficijent emisije okolnog fluida, ε_z je koeficijent emisije površine elementa, u zavisnosti od materijalizacije (može se usvojiti na osnovu relevantnih Evrokod standarda),
- $\sigma_c = 5,67 \cdot 10^{-8} [\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}]$ Stefan-Boltzmann-ova konstanta,
- $T_{z,a}$ apsolutna temperatura površine,
- $T_{f,a}$ apsolutna temperatura fluida.

Rešenje diferencijalne jednačine se najčešće traži korišćenjem numeričkih procedura, npr. korišćenjem metode konačnih elemenata (MKE).

Uvođenjem radijacije u obzir, problem postaje nelinearan. Rešenje se sprovodi korišćenjem iterativnog postupka u svakom vremenskom koraku. Problem takođe postaje nelinearan i usvajanjem temperaturno zavisnih fizičkih svojstava materijala. U tom slučaju, matrice konduktivnosti i kapaciteta su definisane na početku svakog vremenskog koraka na osnovu sračunatih temperatura iz prethodnog koraka.

Proračun mehaničkog ponašanja konstrukcije može se sprovesti ukoliko su poznata temperaturna polja tokom požara. Obično se prvo sračuna prenos toplote, a mehanički odgovor u toku vremena uzimajući u obzir temperaturnu raspodelu unutar elemenata, za konstantno gravitaciono dejstvo. To znači da se temperature određuju na nedeformisanom nosaču, što je kod konstrukcijskih sistema zadovoljavajuće tačno. Iako bi potpuno spregnutom termo-mehaničkom analizom modeliranje stvarnog fizičkog fenomena bilo realnije, računaska procedura bi zahtevala proračun spregnutih setova jednačina u svakom

vremenskom koraku analize. Ovim se uvode dodatni stepeni slobode čime proračun postaje računski zahtevniji. Kako je uticaj na tačnost odgovora praktično zanemarljiv, strukturna analiza se sprovodi nakon određivanja temperaturnih polja.

Strukturni model terba da se zasniva na fundamentalnom fizičkom ponašanju, u saglasnosti sa zakonima mehanike kontinuuma, počevši od linearne elastičnosti sa postepenim uvođenjem plastičnosti i razvoja oštećenja, izvan zone linearno elastičnog odgovora, s obzirom da je odgovor konstrukcije tokom požara izrazito nelinearan. Nelinearnost je posledica promena svojstava materijala (termičkih i mehaničkih), kao i nelinearne temperaturne raspodele na nivou poprečnog preseka elementa. Takođe, za pojedine vrste konstrukcija, termičko širenje usled povišenih temperatura može izazvati velike deformacije, što za realističnu procenu odgovora, zahteva i obuhvatanje geometrijske nelinearnosti proračuna. S obzirom da analitička rešenja nisu razvijena, koristi se MKE koji omogućava analizu konstrukcija proizvoljne geometrije, materijala i graničnih uslova. U pogledu tačnosti, računski modeli se moraju verifikovati (proces kontrole matematičkog rešenja modela) i validirati (proces kontrole adekvatnosti matematičkog modela koji predstavlja stvarno ponašanje konstrukcije).

Pored naprednih modela proračuna koji sa dovoljnom tačnošću mogu da predvide ukupni odgovor konstrukcija, ali su zahtevni i nepraktični za korišćenje u svakodnevnoj inženjerskoj praksi, Evrokod standardi omogućavaju korišćenje pojednostavljenih metoda proračuna za procenu požarne otpornosti pojedinačnih elemenata. U zavisnosti od konstrukcijskog materijala, spisak standarda za projektovanje požarne otpornosti konstrukcija dat je u Tabeli 2.

Tabela 2
Evrokod standardi koji se odnose na projektovanje konstrukcija otpornih na požar

EN	Deo	Naziv
EN 1990	n/a	Osnove projektovanja konstrukcija
EN 1991	1-2	Dejstva na konstrukcije - Dejstva na konstrukcije izložene požaru
EN 1992	1-2	Projektovanje betonskih konstrukcija - Projektovanje konstrukcija na dejstvo požara
EN 1993	1-2	Projektovanje čeličnih konstrukcija - Projektovanje konstrukcija na dejstvo požara
EN 1994	1-2	Projektovanje spregnutih konstrukcija - Projektovanje konstrukcija na dejstvo požara
EN 1995	1-2	Projektovanje drvenih konstrukcija - Projektovanje konstrukcija na dejstvo požara
EN 1996	1-2	Projektovanje zidanih konstrukcija - Projektovanje konstrukcija na dejstvo požara
EN 1999	1-2	Projektovanje aluminijumskih konstrukcija - Projektovanje konstrukcija na dejstvo požara

3. UTICAJ POŽARA NA KONSTRUKCIJE

Požarno dejstvo se smatra incidentnim. Temperature koje se razvijaju u nosećim elementima zaista imaju značajan uticaj na mehaničku otpornost cele konstrukcije, što, ukoliko se proračunom ne obuhvati pravilno, može izazvati konstrukcijski lom i rušenje celog objekta.

Visoke temperature gasova unutar požarnog sektora, koje nastaju paljenjem, a u slučaju da se dalje sagorevanje požarnog opterećenja ne može suzbiti, npr. aktivnim merama zaštite od požara (poput „sprinkler“ sistema prskalica), zagrevaju elemente konstrukcije mehanizmima prenosa toplote. Svojstva materijala koja utiču na porast temperature su toplotna provodljivost, specifična toplota i gustina materijala. Toplotna provodljivost je mera sposobnosti materijala da provodi toplotu. Prenos toplote se obavlja sporije kod

materijala sa nižim koeficijentima toplotne provodljivosti, u poređenju sa materijalima sa višim koeficijentima toplotne provodljivosti. Na primer, metali obično poseduju visoku toplotnu provodljivost što ih čini odličnim provodnicima toplote, što rezultuje bržim prodorom toplote, a samim tim i bržom degradacijom mehaničkih svojstava u toku požara. Sa druge strane, niža toplotna provodljivost, kao što je slučaj kod betonskih i drvenih konstrukcija, pruža dobra izolaciona svojstva, što znači da se javlja veliki temperaturni gradijent i temperatura je povišena samo u slojevima blizu izložene površine, dok temperatura unutrašnjih delova poprečnih preseka elemenata ostaje relativno niska, zadržavajući nosivost proporcionalno velikog dela preseka na nivou bliskom ambijentalnoj temperaturi. Veliki temperaturni gradijent izaziva značajna lokalna naprezanja, kao posledica nejednakog termičkog širenja delova poprečnog preseka. Ukoliko ti naponi prekorače čvrstoću materijala, može se ugroziti integritet poprečnog preseka. Kod armiranobetonskih konstrukcija, visok temperaturni gradijent u zoni zaštitnog sloja betona (kod direktno izloženih površina) može dovesti do odvajanja komada betona od elementa na silovit i eksplozivno pucaje način, fenomen koji je poznat kao eksplozivno pucanje betona (spalling). Jedan od glavnih parametara koji utiču na eksplozivno pucanje betona tokom požara je sadržaj vlage unutar elemenata, s obzirom da zagrevanje preseka izaziva isparavanje vode, što povećava porni pritisak usled sprečenog slobodnog širenja, a što dalje indukuje dodatne napone u zonama od interesa. Ostali faktori, kao što su debljina zaštitnog sloja betona, veličina zrna agregata, brzina zagrevanja, poroznost, permeabilnost, kao i nivo spoljašnjeg opterećenja, takođe mogu doprineti pucanju betona, ali su takvi modeli predviđanja još uvek u fazi razvoja. Ukoliko dođe do eksplozivnog pucanja betona, armaturne šipke, inače zaštićene okolnim betonom, postaju direktno izložene plamenu. Visoka toplotna provodljivost čelika utiče na brži prenos toplote unutar armature, što dovodi do bržeg porasta temperature i brže degradacije kapaciteta nosivosti, što konačno može da utiče i na ukupnu požarnu otpornost konstrukcije. Stoga je od suštinskog značaja da se verovatnoća pojave eksplozivnog pucanja betona tokom požara svede na minimum. S tim u vezi, brojna istraživanja su sprovedena koristeći aditive pri projektovanju betonske mešavine, kao što su polipropilenska (PP) vlakna u malim količinama (u granicama od 0 do 2% zapremine elementa), međutim, na račun smanjenja čvrstoće betona na pritisak [9]. PP vlakna, ravnomerno raspoređena unutar betona, imaju aktivnu ulogu u poboljšanju otpornosti betona izloženog povišenoj temperaturi na eksplozivno pucanje. Imaju relativno nisku tačku topljenja, nakon čega se razgrađuju (bez stvaranja štetnih gasova) i stvaraju prostorne džepove, omogućavajući tako da se smanji porni pritisak tokom zagrevanja.

Za razliku od betona i drveta, čelik poseduje relativno visoku toplotnu provodljivost, čime se temperatura brzo prenosi kroz ceo poprečni presek i dolazi do iznenadnog pada mehaničkih svojstava i kapaciteta nosivosti. Kako bi se usporilo zagrevanje čelika tokom požara, elementi su često zaštićeni oblaganjem izolacionim materijalom (kamena vuna, gips ploče), ili zaštitnim premazima otpornim na požar, na bazi epoksida.

Specifična toplota materijala predstavlja energiju potrebnu za podizanje temperature jedne jedinice mase tela za jednu jedinicu temperature. Samim tim, materijali sa većim vrednostima specifične toplote zahtevaju veću količinu toplote za jediničnu promenu temperature, što izaziva vremensko odlaganje povećanja temperature u poređenju sa temperaturom eksternog izvora toplote. U slučaju požara, ovaj efekat može biti povoljan, pružajući dovoljno vremena za evakuaciju. Međutim, u kasnijim fazama požara, u fazi hlađenja, kada se temperatura gasa smanjuje, temperatura u elementima i dalje može da raste još neko vreme, pre nego što počne da opada. Ovo je naročito važno zbog bezbednosti službi prve pomoći i/ili vatrogasaca koji prvi ulaze u objekat prilikom gašenja požara.

Kod pojedinih materijala, poput betona i drveta, dolazi do gubitka mase tokom požara, usled gubitka slobodne i hemijski vezane vode i/ili hemijskih reakcija koje se odvijaju na višim temperaturama. Za čelik, međutim, gustina ostaje konstantna u celom opsegu temperatura koje se mogu očekivati u požaru.

Sušinski zahtev za požarnu otpornost konstrukcija može se obezbediti prateći različite mogućnosti strategija zaštite od požara, poput konvencionalnih požarnih scenarija (nominalni požari), ili „prirodnih“ (parametarskih), uključujući pasivne i/ili aktivne mere zaštite.

Zahtevane funkcije i nivoi performansi mogu se definisati bilo u smislu nominalne (standardne) mere otpornosti na požar, obično date u nacionalnim propisima ili, ukoliko to dopuštaju nacionalni propisi, pozivajući se na inženjering zaštite od požara, za procenu pasivnih i aktivnih mera. Dodatni zahtevi, koji se odnose na moguću ugradnju i održavanje sistema prskalica, uslove korišćenja zgrade ili požarnog sektora, upotrebu odobrenih materijala za izolaciju i oblaganje, uključujući i njihovo održavanje, nisu dati u okviru ovog dokumenta, jer podležu specifikaciji od strane nadležnog organa. Numeričke vrednosti za parcijalne koeficijente sigurnosti i ostale elemente, date su kao preporučene vrednosti koje pružaju prihvatljiv nivo pouzdanosti. Izabrane su pod pretpostavkom da je obezbeđen odgovarajući nivo izrade i kontrole kvaliteta.

3.1. Betonske konstrukcije

Tradicionalno, beton se smatra „vatrootpornim“ materijalom zbog negorivosti i relativno visokih termo-izolacionih svojstava. Beton je raznovrstan materijal koji, ukoliko je pravilno projektovan, može inherentno biti otporan na požar. Međutim, analizirajući njegovo ponašanje tokom požara, primećena su tri potencijalna problema:

- deterioracija mehaničkih svojstava,
- oštećenja izazvana termičkim deformacijama,
- eksplozivno pucanje betona.

Na strukturnom nivou, razvoj inženjerskih metoda procene ponašanja u požaru nastao je iz ograničenja svojstvenih tradicionalnim preskriptivnim metodama projektovanja. Skup konvencionalnih pravila, za razliku od racionalnog pristupa inženjerskim alatima, ima svoje nedostatke, koji se najčešće ogledaju u konzervativnosti, ali i neprimenjivosti na zgrade jedinstvenog arhitektonskog i konstrukcijskog rešenja. Poslednjih godina, ovakav pristup konvencionalnih mera i zahteva preispituje se holističkim i naučnim pristupom, unapređujući oblast inženjerstva zaštite konstrukcija od požara.

Potpuni analitički postupak projektovanja konstrukcija otpornih na požar treba da obuhvati ponašanje konstrukcijskog sistema pri povišenim temperaturama, potencijalno izlaganje toploti i povoljne uticaje aktivnih i pasivnih mera zaštite od požara, kao i eventualne nesigurnosti u vezi njih i značaj konstrukcije (posledice loma). Trenutno je moguće sprovesti postupak za određivanje adekvatnih performansi koje uključuju pojedine od ovih parametara, pa čak i sve, kojim bi se pokazalo da konstrukcija, ili njeni delovi, poseduju adekvatne performanse u slučaju realnog požara u zgradi. Međutim, ako se procedura zasniva na nominalnom (standardnom) požaru, sistem klasifikacije, koji zahteva odgovarajuće periode požarne otpornosti, uzima u obzir (iako ne eksplicitno), karakteristike i nesigurnosti navedene iznad. Razlikuju se preskriptivni pristup, kao i pristup zasnovan na ponašanju. Preskriptivni pristup koristi nominalne požare za generisanje termičkih dejstava. Pristup zasnovan na ponašanju, koristeći inženjerske principe zaštite od požara, termička dejstva određuje na osnovu fizičkih i hemijskih parametara.

Prema EN 1992-1-2, proračunske vrednosti mehaničkih svojstava betona $X_{d,fi}$ (i čvrstoće i deformacija) su definisane kao:

$$X_{d,fi} = k_0 X_k / \gamma_{M,fi} \quad (5)$$

gde je:

- X_k karakteristična vrednost čvrstoće ili deformacije (uobičajeno f_k ili E_k) za projektovanje pri ambijentalnim temperaturama, prema EN 1992-1-1,
- k_0 faktor redukcije čvrstoće ili deformacije ($X_{k,0}/X_k$), u zavisnosti od temperature,
- $\gamma_{M,fi}$ parcijalni koeficijent sigurnosti za odgovarajuće svojstvo materijala, za požarnu situaciju.

Proračunske vrednosti termičkih svojstava materijala $X_{d,fi}$ su definisane kao:

$$X_{d,fi} = X_{k,0} / \gamma_{M,fi} \quad (6)$$

ukoliko povećanje doprinosi povećanju bezbednosti, odnosno:

$$X_{d,fi} = \gamma_{M,fi} X_{k,0} \quad (7)$$

ukoliko povećanje doprinosi smanjenju bezbednosti, gde je:

- $X_{k,0}$ vrednost svojstva materijala pri projektovanju na požar, obično temperaturno zavisnog,
- $\gamma_{M,fi}$ parcijalni koeficijent sigurnosti za odgovarajuće svojstvo materijala, u požarnoj situaciji.

Za armirani beton, preporučena vrednost parcijalnog koeficijenta sigurnosti iznosi $\gamma_{M,fi} = 1,0$, ukoliko nije drugačije naglašeno u Nacionalnom Aneksu.

Verifikacija otpornosti na požar može se izvršiti u vremenskom domenu, domenu nosivosti ili u temperaturnom domenu. Zahtevani period požarne otpornosti konstrukcije treba da bude manji ili jednak od dostupne otpornosti na požar. Verifikacija u domenu nosivosti je slična uobičajenom pristupu projektovanja konstrukcija pri ambijentalnim uslovima. Kritična temperatura u konstrukciji treba da bude niža od granične dozvoljene temperature konstrukcije.

Za analiziranu konstrukciju, potrebno je dokazati da je za određeno vreme izloženosti požaru:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,fi} \quad (8)$$

gde je:

- $E_{d,fi}$ proračunski uticaj usled dejstva u požarnoj situaciji, određen prema EN 1992-1-2, uključujući i uticaje usled termičkog širenja i deformacija,
- $R_{d,fi}$ je odgovarajuća proračunska otpornost u požarnoj situaciji.

Kao alternativa računskom projektovanju, požarnu otpornost je moguće sprovesti i na osnovu rezultata požarnih testova, ili u kombinaciji testova i proračuna, budući da su računski postupci značajno ekonomski prihvatljiviji, za razliku od testova koji zahtevaju specijalizovane peći i opremu za uspostavljanje kontrolisanih temperaturnih uslova i praćenje temperatura i deformacija na određenim lokacijama u konstrukciji.

Utjecaji od dejstava su identični kao pri ambijentalnoj temperaturi. Dejstva se nanose kao konstantna tokom projektnog izlaganja požaru. Kao značajno pojednostavljenje, utjecaji usled dejstava mogu se odrediti na osnovu proračuna pri normalnim temperaturama koristeći sledeći izraz:

$$E_{d,\bar{n}} = \eta_{\bar{n}} E_d \quad (9)$$

gde je:

- E_d proračunska vrednost odgovarajuće sile ili momenta pri ambijentalnim temperaturama, za osnovnu kombinaciju dejstava, prema EN 1990,
- $\eta_{\bar{n}}$ faktor redukcije za proračunski nivo opterećenja u požarnoj situaciji.

Ako je kombinacija opterećenja prilikom požara:

$$G_k + \psi_{\bar{n}} Q_{k,1} \quad (10)$$

a kombinacija opterećenja pri normalnom režimu:

$$\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \quad (11)$$

faktor redukcije $\eta_{\bar{n}}$ se može usvojiti kao:

$$\eta_{\bar{n}} = \frac{G_k + \psi_{\bar{n}} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (12)$$

gde je:

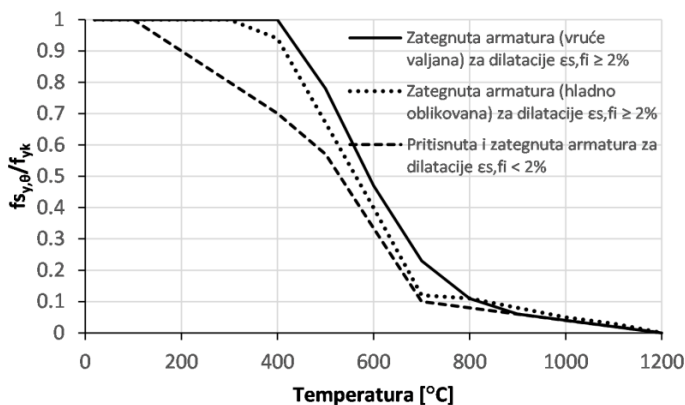
- $Q_{k,1}$ osnovno promenljivo dejstvo,
- G_k karakteristična vrednost stalnog dejstva,
- γ_G parcijalni koeficijent za stalno dejstvo pri normalnim temperaturama,
- $\gamma_{Q,1}$ parcijalni koef. za vodeće promenljivo dejstvo pri normalnim temperaturama,
- $\psi_{\bar{n}}$ faktor kombinovanja za česte i kvazi-stalne vrednosti date prema $\psi_{1,1}$ ili $\psi_{2,1}$.

Kao dodatno pojednostavljenje, preporučena vrednost $\eta_{\bar{n}} = 0,7$ može se koristiti za betonske konstrukcije.

Temperaturni profili u betonskim elementima tokom požara su složeni i neujednačeni. Usled nelinearne temperaturne zavisnosti fizičkih i termičkih svojstava betona, prenos toplote se obično sračunava pomoću numeričkih postupaka. Za konstrukcijske elemente izložene nominalnom standardnom požaru, Aneks A u EN 1992-1-2 sadrži korisne temperaturne profile u različitim vremenskim okvirima, za neke uobičajene dimenzije elemenata, kao što su ploča izložena požaru sa jedne strane i pojedini pravougaoni i kružni poprečni preseki elemenata izloženi požaru sa svih strana. Aneks B sadrži dve pojednostavljene računске metode za betonske elemente: metod izoterme na 500°C i zonski metod.

Metod izoterme na 500°C se zasniva na hipotezi da se beton na temperaturi višoj od 500°C zanemaruje u proračunu kapaciteta nosivosti, a ispod 500°C, pretpostavlja se da je zadržan pun kapacitet, kao pri ambijentalnoj temperaturi. Ovaj metod je primenjiv na armiranobetonske i prethodno napregnute poprečne preseke u zavisnosti od aksijalne sile i momenta savijanja. Postupak proračuna može se sprovesti na sledeći način:

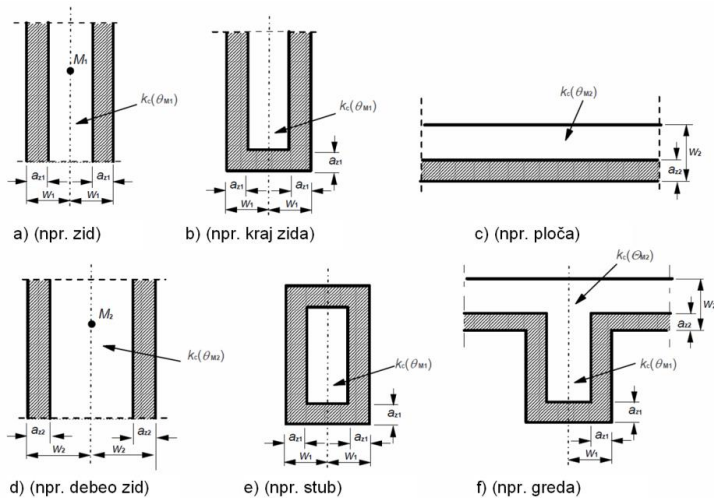
- Prvo se određuje izoterma na 500°C (korišćenjem Aneksa A u EN 1992-1-2 ili pomoću vremenske termičke analize korišćenjem MKE), za određenu izloženost standardnom ili parametarskom požaru (primenjuju se pojedina ograničenja),
- Na osnovu pozicije izoterme, definiše se nova efektivna širina i visina preseka, redukcijom oštećenog sloja betona debljine prosečne dubine izoterme na 500°C,
- Temperatura armaturnih šipki u zategnutoj i pritisnutoj zoni se određuje. Temperatura pojedinačne armaturne šipke može se proceniti na osnovu temperaturnih profila u Aneksu A i usvaja se kao temperatura u središtu šipke. Pojedine šipke mogu biti i izvan zone redukovano poprečnog preseka. Uprkos tome, mogu se obuhvatiti u proračunu graničnog kapaciteta nosivosti preseka,
- Na osnovu temperatura u armaturnim šipkama, određuje se redukovana čvrstoća čelika prema Slici 6,
- Za dimenzije redukovano poprečnog preseka i armaturu sa redukovanom čvrstoćom, primenjuje se uobičajena procedura za određivanje graničnog kapaciteta nosivosti elementa,
- Poređenje graničnog kapaciteta nosivosti i proračunskog uticaja usled opterećenja izvodi se za zahtevanu požarnu otpornost.



Slika 6. Redukcija čvrstoće pri povišenim temperaturama za armaturni čelik klase N

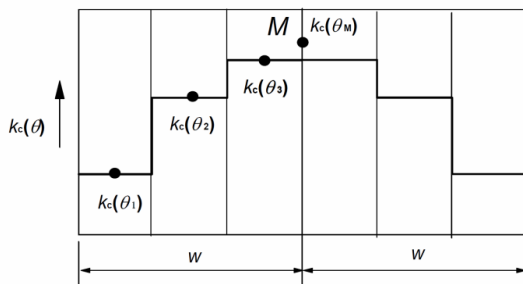
Hipoteza metoda izoterme na 500°C je relativno gruba aproksimacija degradacija mehaničkih svojstava betona, koja pretpostavlja diskretno smanjenje čvrstoće od 0 do 100% pri dostizanju temperature od 500°C. Nivo degradacije čvrstoće sa porastom temperature je znatno složeniji, što naravno utiče na tačnost predloženog metoda. Ako je potrebniji tačniji model, na račun složenijeg postupka proračuna, može se koristiti zonski metod, ali samo u slučaju primene standardne požarne krive temperatura-vreme.

Zonski metod se zasniva na podeli poprečnog preseka na nekoliko zona jednakih dimenzija, gde se za svaku pojedinačnu zonu procenjuje srednja temperatura i odgovarajuća srednja čvrstoća pri pritisku i modul elastičnosti. Poprečni presek oštećen tokom požara se redukuje uz zanemarenje oštećenih zona debljine a_z uz površine elemenata izložene požaru (Slika 7).

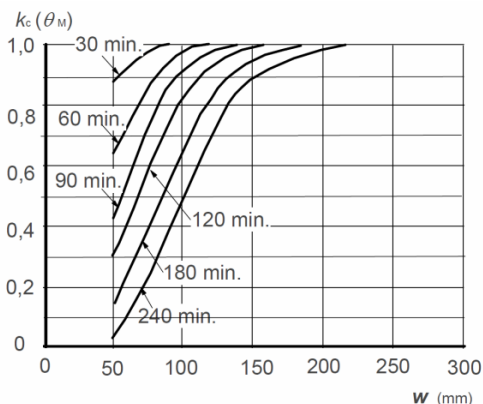


Slika 7. Redukcija čvrstoće i poprečnog preseka za elemente izložene požaru

Referenca se odnosi na ekvivalentni zid. Tačka M je proizvoljna tačka na srednjoj liniji ekvivalentnog zida koja se koristi za određivanje redukovane čvrstoće pri pritisku za ceo redukovani poprečni presek. U slučaju obostrane izloženosti požaru, pretpostavlja se da je širina $2w$. Za pravougaoni poprečni presek izložen sa jedne strane, pretpostavlja se širina w . Ovo je predstavljeno širinom zida jednakom $2w$. Flanša se odnosi na prvi ekvivalentni zid, a rebro na drugi. Za donji deo i krajeve pravougaonih preseka izloženih požaru, gde je širina preseka manja od visine, pretpostavlja se da je vrednost a_2 ista kao i vrednost sračunata za bočne strane. Redukcija poprečnog preseka se zasniva na oštećenoj zoni debljine a_2 na površinama izloženim požaru. Oštećena zona, a_2 , se procenjuje na ekvivalentnom zidu izloženom sa obe strane. Polovina debljine zida podeljena je na n paralelnih zona jednake debljine, gde je $n \geq 3$ (Slika 8). Temperatura se izračunava za sredinu svake zone. Odgovarajući koeficijent redukcije čvrstoće pri pritisku, $k_c(\theta_i)$ određuje se na osnovu Slike 9.



Slika 8. Podela zida izloženog požaru sa obe strane na zone, za proračun redukcije čvrstoće i vrednosti a_2



Slika 9. Redukcija čvrstoće pri pritisku za redukovani poprečni presek od betona sa silikatnim agregatom

w se procenjuje kao:

- Debljina ploče
- Debljina zida ili stuba izloženog sa jedne strane
- Pola debljine rebra grede
- Pola debljine zida ili stuba izloženog sa dve strane
- Pola najmanje dimenzije stuba izloženog sa svih strana

Srednji koeficijent redukcije za određeni poprečni presek može se izračunati približno koristeći sledeći izraz:

$$k_{c,m} = \frac{1 - \frac{0,2}{n}}{n} \sum_{i=1}^n k_c(\theta_i) \quad (13)$$

gde je:

- n broj paralelnih zona u odnosu na širinu w ,
- w polovina ukupne širine,
- i broj zone.

Širina oštećene zone za grede, ploče i elemente u ravanskom smicanju računa se kao:

$$a_z = w \left[1 - \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right] \quad (14)$$

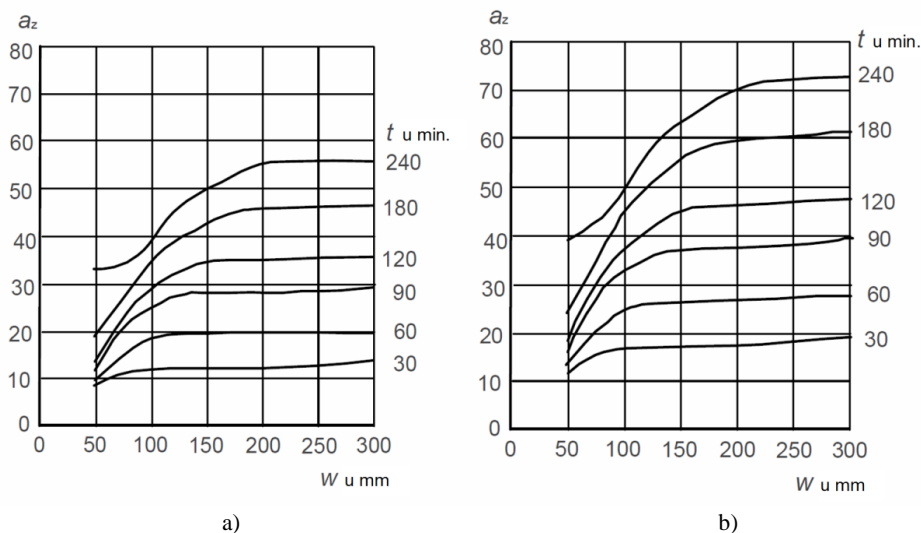
gde je:

- $k_c(\theta_M)$ koeficijent redukcije za beton u tački M .

Za stubove, zidove i druge noseće elemente gde uticaji drugog reda mogu biti značani, širina oštećene zone računa se kao:

$$a_z = w \left[1 - \left(\frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_M)} \right)^{1,3} \right] \quad (15)$$

Vrednosti za a_z mogu se odrediti na osnovu dijagrama na Slici 10. Vrednosti su sračunate za beton sa silikatnim agregatom i konzervativne su za većinu ostalih agregata. Kada se odredi redukovani poprečni presek i utvrde čvrstoća i modul elastičnosti za požarnu situaciju, dalje dimenzionisanje prati proceduru ustanovljenu za ambijentalnu temperaturu koristeći $\gamma_{M,fi}$ vrednosti.



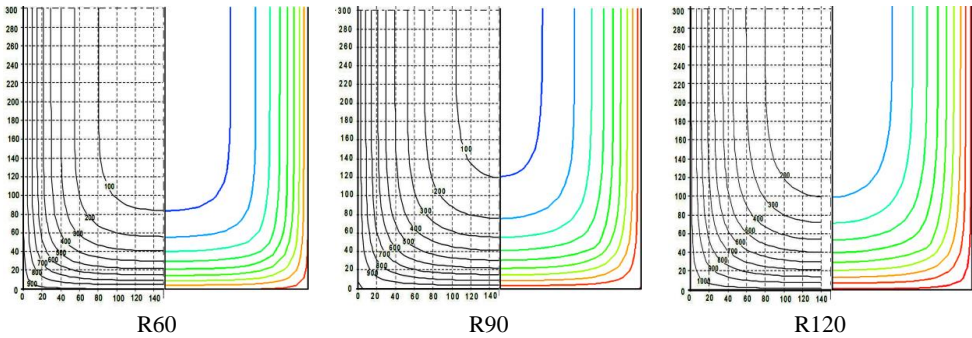
Slika 10. Redukcija poprečnog preseka a_z : a) grede ili ploče, b) stuba ili zida

Ako se zahteva detaljnija analiza (npr. za složene oblike poprečnih preseka ili u slučajevima kada pojednostavljena metoda proračuna nije primenjiva), može se koristiti napredni metod proračuna za verifikaciju požarne otpornosti elementa/dela/celokupne konstrukcije. Računske metode požarnog inženjerstva mogu se klasifikovati u tri kategorije prema sofisticiranosti i složenosti postupka proračuna:

- pojednostavljeni proračuni zasnovani na analizi graničnog stanja (opisani iznad),
- termo-mehanička analiza primenom metode konačnih elemenata,
- sveobuhvatna termo-hidro-mehanička analiza primenom metode konačnih elemenata.

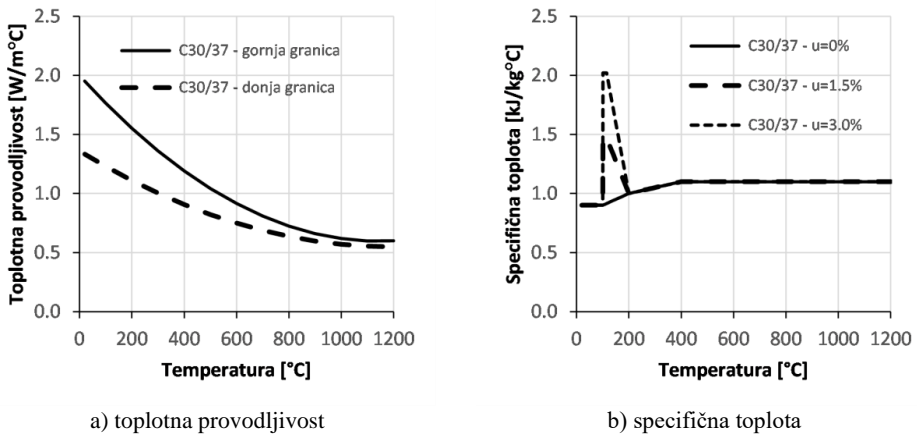
Kada se otpornost na požar procenjuje na osnovu proračuna, prvi korak je određivanje termičkog odgovora u obliku vremenski zavisne raspodele temperature u betonskoj konstrukciji. Kod integriranih modela, raspodela temperature se izračunava zajedno sa hidralnim i mehaničkim stanjem u svakom vremenskom koraku. Termički odgovor daje konačan odgovor samo po pitanju funkcije termičke izolovanosti, a ne i za funkcije nosivosti i razdvajanja (integriteta).

Poznavanje razvoja temperaturne preraspodele u betonskim konstrukcijama je prvi ključni korak u razumevanju ponašanja konstrukcija tokom požara. Temperatura vazduha u požarima može dostići 900°C. Međutim, dobra izolaciona svojstva betona znače da je temperaturni gradijent velik i da je samo temperatura spoljašnjeg sloja betona značajno povišena, dok je temperatura u unutrašnjosti betona relativno niska (Slika 11).



Slika 11. Temperaturni profili nakon 60, 90 i 120 minuta: EN 1992-1-2 (levo) i ANSYS MKE termički model (desno) [10]

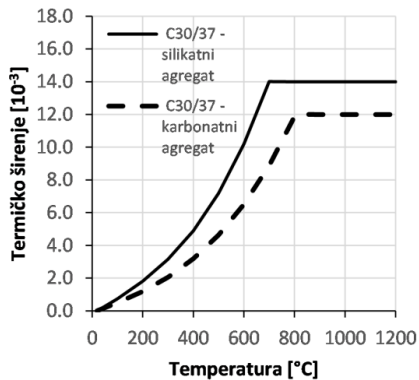
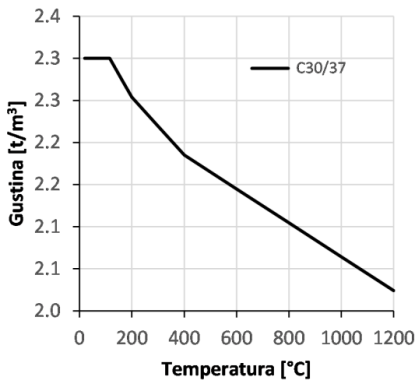
Termička i mehanička analiza su obično sekvencijalno povezane i nisu integrisane. Najpre se izvršava termička analiza, a zatim se rezultati prenose u program za mehaničku analizu radi dobijanja konstrukcijskog odgovora. Uticaji vlage se najčešće ne analiziraju eksplicitno, već su obuhvaćeni modifikovanom specifičnom toplotom betona pri povišenim temperaturama. Bez obzira na to, korišćenjem takvih modela, deformacije jednostavnih elemenata mogu zadovoljavajuće tačno da se procene, pod uslovom da su termičke dilatacije izazvane opterećenjem (LITS) implementirane u modelu. Odsustvo analize kretanja vlage unutar preseka podrazumeva da se porni pritisci i eksplozivno pucanje betona ne mogu na taj način predvideti. EN 1992-1-2 sadrži temperaturno zavisna svojstva betona koja se mogu koristiti ako je neophodna napredna računaska analiza (Slika 12), gde veze između napona i dilatacija u betonu implicitno sadrže uticaje LITS-a.



a) toplotna provodljivost

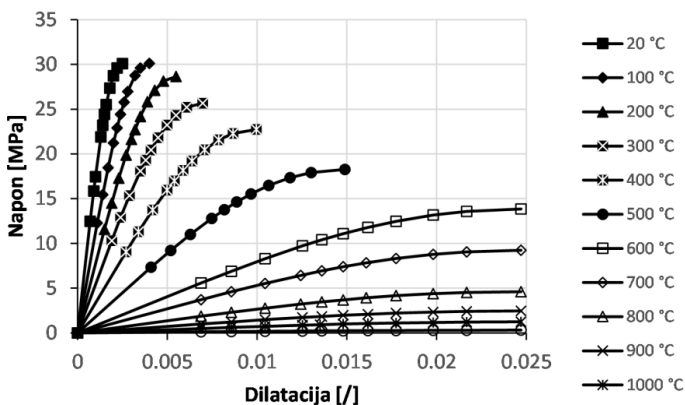
b) specifična toplota

Slika 12. Temperaturno zavisna termička, fizička i mehanička svojstva betona

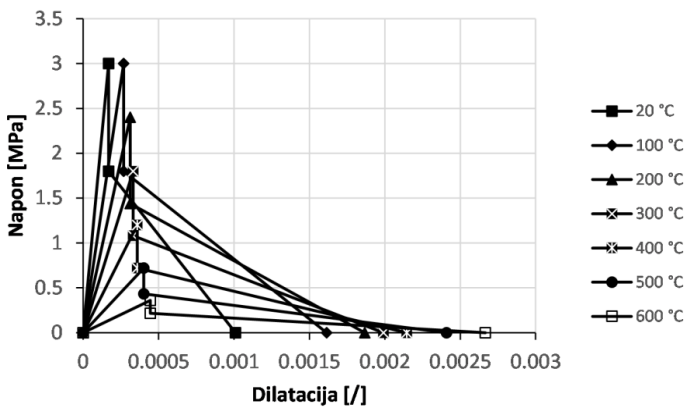


c) gustina

d) termičko širenje



e) veze napon-dilatacija pri pritisku



f) veze napon-dilatacija pri zatezanju

Slika 12. Temperaturno zavisna termička, fizička i mehanička svojstva betona (nastavak)

Sveobuhvatna analiza bi obuhvatila termičku, hidro i mehaničku analizu u potpuno integrisanom modelu kojim bi se moglo predvideti eksplozivno pucanje betona ili migracija vlage unutar betona, npr. kod nuklearnih reaktora. U većini praktičnih slučajeva, međutim, jednostavnije metode su adekvatnije za analizu konstrukcija u požaru.

3.2. Čelične konstrukcije

U protekle dve decenije ostvaren je veliki napredak u razumevanju ponašanja čelika u požaru, i sada se opravdano može tvrditi da se o čeliku zna više nego o bilo kom drugom konstrukcijskom materijalu u požaru. Čelik je izotropni homogen materijal. Za razliku od betona, koji se sastoji od agregata i cementne paste i ispoljava znatno drugačije ponašanje pri zatezanju i pritisku, na koje utiču različiti parametri (vodocementni faktor, veličina zrna agregata, itd.), ili drveta, koje ima drugačije mehaničko ponašanje u paralelno i upravno na pravac vlakana, svojstva čelika na mikro i makro nivou su ista.

Požarna otpornost čeličnih konstrukcijskih elemenata zavisi od dimenzija poprečnog preseka, stepena izloženosti požaru i intenziteta spoljašnjeg opterećenja. Čvrstoća vruće valjanog konstrukcijskog čelika opada sa porastom temperature. Nakon niza standardnih požarnih testova kvantifikovan je pad čvrstoće. Nedavna istraživanja ukazuju da granična temperatura (loma) nosećeg čeličnog elementa nije fiksna, već varira u zavisnosti od dva faktora, temperaturnog profila i opterećenja.

Za vruće valjane preseke malih dimenzija, opterećene u punom iznosu i izložene požaru sa sve četiri strane, otpornost na požar bez dodatnih mera zaštite može biti i samo 12 minuta. Za veoma velike vruće valjane preseke, lagano opterećene i sa delimičnom zaštitom gornjih flanši od betonskih međuspratnih ploča, to može biti i do 50 minuta. Ako se obim zagrevanja može dalje redukovati tipom konstrukcijskog sistema (npr. sistemi plitkih podova), može se postići požarna otpornost do 60 minuta. To je značajno manje u poređenju sa konstrukcijama od armiranog betona. Željena požarna otpornost čelika se ne postiže na materijalnom nivou, već primenom pasivnih (zaštitne obloge i premazi) i aktivnih mera zaštite ("sprinkler" sistemi). Ipak, ove mere mogu ali i ne moraju biti dovoljne u suzbijanju širenja požara i ostvarivanja njegovog punog potencijala. Ako se požar ne suzbije tokom faze rasta, svakako će nastupiti „flashover“ (ako postoji dovoljno kiseonika i požarnog opterećenja), što će izazvati redukciju mehaničke otpornosti čeličnih elemenata, što može uticati na stabilnost i nosivost konstrukcije.

Za svakodnevnu inženjersku praksu razvijene su pojednostavljene metode za analizu otpornosti konstrukcija na požar, koje uzimaju u obzir degradaciju čvrstoće i krutosti na povišenim temperaturama.

Prema EN 1993-1-2 [11], proračunske vrednosti termičkih i mehaničkih materijalnih svojstava su definisane kao i u EN 1992-1-2, npr. izrazi (5)-(12) takođe se primenjuju i za materijalna svojstva čelika. Kao pojednostavljenje, može se koristiti preporučena vrednost $\eta_{fi} = 0,65$ za čelične konstrukcije, osim za kategorije opterećenja za zone koje su podložne nagomilavanju opterećenja, kao što su pristupne zone, gde je preporučena vrednost $\eta_{fi} = 0,7$.

Za brzine zagrevanja između 2 i 50°C/min (što odgovara većini požara u zgradama), čvrstoća i deformaciona svojstva čelika pri povišenim temperaturama se određuju iz veza napona i dilatacija datim u EN 1993-1-2. Ove veze koriste se za određivanje otpornosti pri zatezanju, pritisku, savijanju i smicanju. Koeficijenti redukcije za veze napon-dilatacija su definisane na sledeći način:

$$k_{y,0} = f_{y,0} / f_y \quad (16)$$

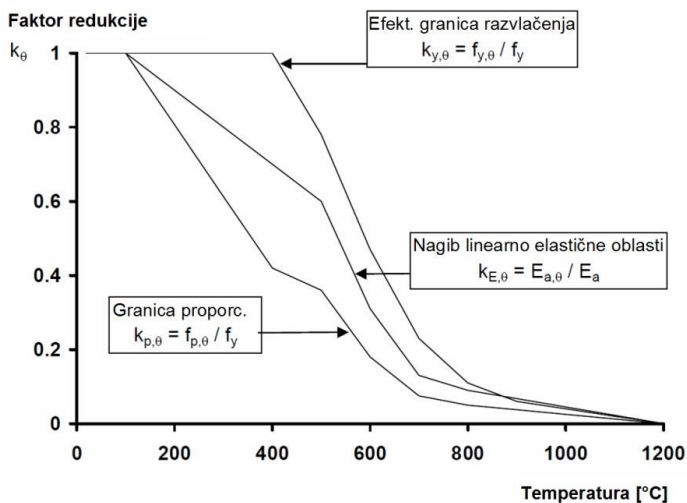
$$k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y \quad (17)$$

$$k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a \quad (18)$$

gde:

- $k_{y,\theta}$ odgovara efektivnoj čvrstoći pri razvlačenju, relativno u odnosu na 20°C,
- $k_{p,\theta}$ odgovara granici proporcionalnosti, relativno u odnosu na 20°C,
- $k_{E,\theta}$ odgovara nagibu linearno elastične oblasti, relativno u odnosu na 20°C.

Temperaturna zavisnost koeficijenta redukcije je prikazana na slici 13. Iako se pri temperaturama nižim od 400°C, granica proporcionalnosti linearno elastičnog odgovora, kao i krutost čelika, smanjuju sa povećanjem temperature, čvrstoća ostaje kao na nivou ambijentalne temperature. Međutim, nakon prekoračenja 400°C, kapacitet nosivosti naglo opada, i to do 77% u temperaturnom opsegu 400-700°C. Prema tome, pri projektovanju čeličnih konstrukcija na požar, osnovna ideja je da se porast temperature iznad 400°C odloži za potrebno vreme požarne otpornosti, najčešće ili dodavanjem termičke izolacije oko potencijalno izloženih površina požaru, ili nanošenjem premaza otpornih na požar, čime se površine čelika štite od direktnog izlaganja.



Slika 13. Koeficijenti redukcije za veze napon-dilatacija čelika pri povišenim temperaturama [EN 1993-1-2]

Proračunska otpornost $R_{d,t,i}$ (izraz (8)) u trenutku t određuje se najčešće uz hipotezu ujednačene temperature unutar poprečnog preseka, modifikovanjem proračunske otpornosti prilikom dimenzionisanja nosača pri normalnim temperaturama prema EN 1993-1-1, kako bi se uzela u obzir mehanička svojstva čelika pri povišenim temperaturama. Ako se koristi neujednačena raspodela temperature, proračunska otpornost pri ambijentalnoj temperaturi se modifikuje u zavisnosti od te preraspodele. Alternativno, ukoliko se koristi ujednačena raspodela temperature, verifikacija se može izvršiti u temperaturnom domenu.

Lom preseka na mestu rupa za spojna sredstva nije potrebno razmatrati, pod uslovom da se spojno sredstvo nalazi u svakoj rupi, jer je temperatura čelika na spojevima niža zbog prisustva dodatnog materijala. Požarna otpornost veze sa zavrtnjima ili zavarene veze može se smatrati dovoljnom ako važi sledeće:

- Termička otpornost $(d_f/\lambda_f)_c$ pri zaštiti veze od požara je veća od najmanje vrednosti termičke otpornosti $(d_f/\lambda_f)_m$ zaštite od požara koja se primenjuje na svaki element u vezi,
- Iskorišćenost veze je manja od najveće vrednosti iskorišćenja svakog elementa veze,
- Otpornost veze pri ambijentalnoj temperaturi zadovoljava preporuke date u EN 1993-1-8 (Projektovanje veza),

gde je:

- d_f debljina zaštitnog materijala od požara ($d_f = 0$ za nezaštićene elemente),
- λ_f efektivna toplotna provodljivost zaštitnog materijala.

Klasifikacija poprečnih preseka obavlja se kao pri normalnom temperaturnom režimu projektovanja bez razmatranja promena nastalih povećanjem temperature [11]:

- Preseci klase 1 su preseci kod kojih je moguće formiranje plastičnog zgloba sa kapacitetom rotacije na osnovu plastične analize bez redukcije otpornosti,
- Preseci klase 2 su preseci kod kojih može doći do dostizanja plastičnog momenta otpornosti, ali poseduju ograničen kapacitet rotacije usled lokalnog gubitka stabilnosti,
- Preseci klase 3 su preseci kod kojih napon u krajnjem pritisnutom vlaknu čeličnog elementa može dostići granicu razvlačenja, pod pretpostavkom elastične preraspodele napona, ali kod kojih lokalni gubitak stabilnosti može da spreči dostizanje plastičnog momenta otpornosti,
- Preseci klase 4 su preseci u kojima će do gubitka lokalne stabilnosti doći pre dostizanja napona razvlačenja u jednom ili više delova poprečnog preseka.

Proračunska otpornost $N_{f,t,Rd}$ zategnutog elementa sa uniformnom temperaturom θ_a određuje se na osnovu:

$$N_{f,t,Rd} = k_{y,\theta} N_{Rd} [\gamma_{M,1} / \gamma_{M,fi}] \quad (19)$$

gde je:

- $k_{y,\theta}$ koeficijent redukcije čvrstoće pri razvlačenju čelika pri temperaturi θ_a , dostignutoj u trenutku t ,
- N_{Rd} proračunska otpornost poprečnog preseka pri ambijentalnoj temperaturi.

Proračunska otpornost $N_{f,t,Rd}$ u trenutku t zategnutog elementa sa neujednačenom raspodelom temperature unutar poprečnog preseka može se odrediti kao:

$$N_{f,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i k_{y,\theta,i} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (20)$$

gde je:

- A_i površina elementa unutar poprečnog preseka sa temperaturom θ_i ,

- k_{y,θ_i} koeficijent redukcije za čvrstoću čelika pri razvlačenju pri temperaturi θ_i ,
- θ_i temperatura elementa A_i .

Proračunska otpornost $N_{fi,t,Rd}$ u trenutku t zategnutog elementa sa neujednačenom raspodelom temperature može se konzervativno usvojiti kao proračunska otpornost $N_{fi,\theta,Rd}$ zategnutog elementa sa uniformnom temperaturom čelika θ_a jednakom maksimalnoj temperaturi čelika $\theta_{a,max}$ dostignutoj u trenutku t .

Proračunska otpornost pri izvijanju $N_{b,fi,t,Rd}$ u trenutku t pritisnutog elementa sa poprečnim preseccima klase 1, klase 2 ili klase 3, sa uniformnom temperaturom θ_a određuje se kao:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (21)$$

gde je:

- χ_{fi} koeficijent redukcije za savojno izvijanje u požarnoj situaciji,
- $k_{y,\theta}$ koeficijent redukcije čvrstoće čelika pri razvlačenju na temperaturi θ_a dostignutoj u trenutku t .

Vrednost χ_{fi} treba uzeti kao manju od vrednosti $\chi_{y,fi}$ i $\chi_{z,fi}$ prema:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_0 + \sqrt{\varphi_0^2 - \bar{\lambda}_0^2}} \quad (22)$$

gde je:

$$\varphi_0 = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_0 + \bar{\lambda}_0^2 \right] \quad (23)$$

i:

$$\alpha = 0.65 \sqrt{235 / f_y} \quad (24)$$

Bezdimenziona veličina vitkosti $\bar{\lambda}_0$ pri temperaturi θ_a je data kao:

$$\bar{\lambda}_0 = \bar{\lambda} \left[k_{y,\theta} / k_{E,\theta} \right]^{0.5} \quad (25)$$

Dužina izvijanja stuba u požarnoj situaciji se obično određuje kao i pri ambijentalnoj temperaturi, osim u slučaju spregnutog okvira gde se uvode dodatna razmatranja (videti EN 1993-1-2).

Proračunska otpornost $N_{b,fi,t,Rd}$ u trenutku t pritisnutog elementa sa neujednačenom raspodelom temperature može se smatrati jednakom proračunskoj otpornosti $N_{b,fi,\theta,Rd}$ pritisnutog elementa sa ujednačenom temperaturom čelika θ_a jednakoj maksimalnoj temperaturi čelika $\theta_{a,max}$ dostignutoj u trenutku t .

Proračunska momentna otpornost $M_{fi,\theta,Rd}$ preseka klase 1 i klase 2 sa uniformnom temperaturom θ_a određuje se prema:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} M_{Rd} \left[\gamma_{M,1} / \gamma_{M,fi} \right] \quad (26)$$

gde je:

- M_{Rd} plastična momentna otpornost bruto poprečnog preseka $M_{pl,Rd}$ pri ambijentalnoj temperaturi, prema EN 1993-1-1, ili redukovana momentna otpornost pri ambijentalnoj temperaturi, obuhvatajući i uticaje od smicanja ako je potrebno.

Proračunska momentna otpornost $M_{fi,t,Rd}$ u trenutku t preseka klase 1 ili klase 2 sa neujednačenom raspodelom temperature određuje se kao:

$$M_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i z_i k_{y,\theta,i} f_{y,i} / \gamma_{M,fi} \quad (27)$$

gde je:

- z_i rastojanje od plastične neutralne ose do težišta površine elementa A_i ,
- $f_{y,i}$ nominalna čvrstoća pri razvlačenju f_y površine elementa A_i usvojena kao pozitivna na pritisnutoj strani plastične neutralne ose i negativna na zategnutoj strani.

Alternativno, proračunska momentna otpornost može se odrediti i iz izraza:

$$M_{fi,t,Rd} = M_{fi,\theta,Rd} / \kappa_1 \kappa_2 \quad (28)$$

gde je:

- $M_{fi,\theta,Rd}$ proračunska momentna otpornost poprečnog preseka na koji nema termičkog uticaja oslonaca,
- κ_1 faktor adaptacije za neujednačenu temperaturu unutar poprečnog preseka,
- κ_2 faktor adaptacije za neujednačenu temperaturu duž grede.

Proračunska bočna torziona otpornost na izvijanje $M_{b,fi,t,Rd}$ u trenutku t bočno nepridržane grede sa poprečnim presekom klase 1 ili klase 2 određuje se na osnovu:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{pl,y} k_{y,\theta,com} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (29)$$

gde je:

- $\chi_{LT,fi}$ koeficijent redukcije za bočno torziono izvijanje u proračunskoj požarnoj situaciji,
- $k_{y,\theta,com}$ koeficijent redukcije za čvrstoću čelika pri razvlačenju pri maksimalnoj temperaturi u pritisnutoj flanši $\theta_{a,com}$ dostignutoj u trenutku t .

Vrednost $\chi_{LT,fi}$ se određuje na osnovu:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{[\phi_{LT,\theta,com}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}]^2}} \quad (30)$$

gde je:

$$\phi_{LT,\theta,com} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2 \right] \quad (31)$$

i:

$$\alpha = 0.65\sqrt{235/f_y} \quad (32)$$

Bezdimenziona vitkost $\bar{\lambda}_0$ pri temperaturi θ_a je data kao:

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} \left[k_{y,\theta,com} / k_{E,\theta,com} \right]^{0.5} \quad (33)$$

gde je:

- $k_{E,\theta,com}$ koeficijent redukcije nagiba linearno elastične oblasti pri maksimalnoj temperaturi čelika u pritisnutoj flanši $\theta_{a,com}$ dostignutoj u trenutku t .

Proračunska otpornost pri smicanju $V_{fi,t,Rd}$ u trenutku t preseka klase 1 ili klase 2 određuje se kao:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,web} V_{Rd} \left[\gamma_{M,1} / \gamma_{M,fi} \right] \quad (34)$$

gde je:

- V_{Rd} otpornost pri smicanju bruto poprečnog preseka pri ambijentalnoj temperaturi,
- θ_{web} prosečna temperatura u rebu preseka,
- $k_{y,\theta,web}$ koeficijent redukcije za čvrstoću pri razvlačenju čelika pri temperaturi čelika θ_{web} .

Vrednosti faktora adaptacije za neujednačenu raspodelu temperature unutar poprečnog preseka se usvaja na osnovu vrednosti datih u Tabeli 3.

Tabela 3

Vrednosti faktora adaptacije za neujednačenu raspodelu temperature unutar poprečnog preseka

opis	κ_1 ili κ_2
za gredu izloženu sa sve četiri strane	$\kappa_1 = 1,0$
za nezaštićenu gredu izloženu sa tri strane, sa spregnutom ili betonskom pločom na četvrtjoj	$\kappa_1 = 0,70$
za zaštićenu gredu izloženu sa tri strane, sa spregnutom ili betonskom pločom na četvrtjoj	$\kappa_1 = 0,85$
u zonama oslonaca statički neodređene grede	$\kappa_2 = 0,85$
u svim ostalim slučajevima	$\kappa_2 = 1,0$

Proračunska momentna otpornost $M_{fi,t,Rd}$ u trenutku t preseka klase 3 sa ujednačenom temperaturom određuje se kao:

$$M_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} M_{Rd} \left[\gamma_{M,1} / \gamma_{M,fi} \right] \quad (35)$$

gde je:

- M_{Rd} elastična momentna otpornost bruto poprečnog preseka $M_{el,Rd}$ pri ambijentalnoj temperaturi ili redukovana momentna otpornost, obuhvatajući i uticaje od smicanja ako je potrebno.

Proračunska momentna otpornost $M_{fi,t,Rd}$ u trenutku t preseka klase 3 sa neujednačenom raspodelom temperature određuje se kao:

$$M_{fi,t,Rd} = k_{y,0,max} M_{Rd} \left[\gamma_{M,1} / \gamma_{M,fi} \right] / (\kappa_1 \kappa_2) \quad (36)$$

gde je:

- M_{Rd} elastična momentna otpornost bruto poprečnog preseka,
- $k_{y,0,max}$ koeficijent redukcije čvrstoće čelika pri razvlačenju pri maksimalnoj temperaturi čelika $\theta_{a,max}$ dostignutoj u trenutku t .

Proračunska momentna otpornost pri izvijanju $M_{b,fi,t,Rd}$ u trenutku t bočno nepridržane grede sa poprečnim presekom klase 3 određuje se kao:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{L,T,fi} W_{el,y} k_{y,0,com} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (37)$$

Proračunska otpornost pri smicanju $V_{fi,t,Rd}$ u trenutku t preseka klase 3 određuje se kao:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,0,web} V_{Rd} \left[\gamma_{M,1} / \gamma_{M,fi} \right] \quad (38)$$

Za elemente izložene kombinovanom dejstvu savijanja i aksijalnog pritiska, čitalac se upućuje na EN 1993-1-2.

Za elemente sa poprečnim presecima klase 4, osim pri zatezanju, može se pretpostaviti da je izraz (8) ispunjen ako u trenutku t , temperatura čelika nije viša od 350°C.

Kao alternativa, verifikacija se takođe može izvršiti i u temperaturnom domenu. Osim kada kriterijumi deformacije ili stabilnost konstrukcije moraju da se uzmu u obzir, kritična temperatura $\theta_{a,cr}$ čelika u trenutku t za uniformnu raspodelu temperature unutar elementa može se odrediti za bilo koji stepen iskorišćenja μ_0 u trenutku $t=0$ koristeći izraz:

$$\theta_{a,cr} = 39.19 \ln \left[\frac{1}{0.9674 \mu_0^{3.833}} - 1 \right] + 482 \quad (39)$$

Za elemente sa poprečnim presecima klase 1 i klase 2, kao i za zategnute elemente, stepen iskorišćenja u trenutku $t=0$ može se odrediti kao:

$$\mu_0 = E_{fi,d} / R_{fi,d,0} \quad (40)$$

gde je:

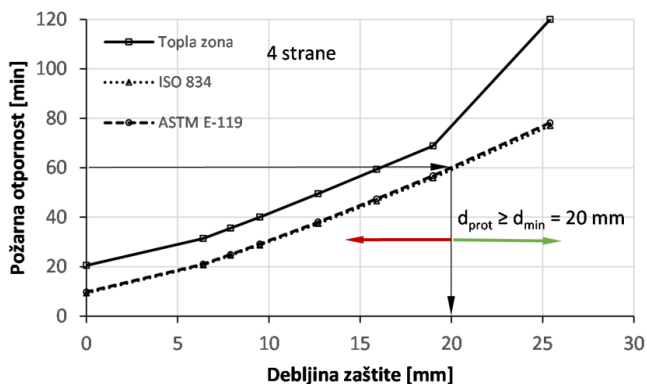
- $R_{fi,d,0}$ vrednost $R_{fi,d,t}$ u trenutku $t=0$.

Specijalizovan softver OZone, prethodno korišćen za proračun razvoja temperature gasa u ranije analiziranoj stambenoj jedinici, može takođe da se koristi za proračun otpornosti na požar čeličnih konstrukcijskih elemenata, na osnovu standardne požarne izloženosti ili razvoja temperature tople zone određenog na osnovu zonskog modela. Pored toga, element može biti izložen sa tri ili sa sve četiri strane i može se analizirati kao nezaštićen ili zaštićen dodatnim izolacionim materijalom.

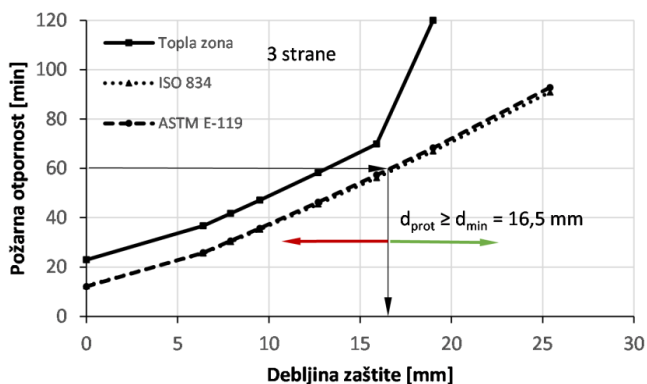
Posmatrajući čeličnu prostu gredu (klase 1) i uzimajući u obzir trajna i povremena dejstva prilikom dimenzionisanja, usvojen je čelični profil IPE 220. Uticaj šupljeg oblaganja zaštitnim pločama od gipsa na požarnu otpornost prikazana je u Tabeli 4. Kako bi se ispunili očekivani kriterijumi požarne otpornosti, debljina izolacionog sloja u ovim slučajevima može se odrediti iz dijagrama na Slici 14.

Tabela 4
Požarna otpornost čelične proste grede i uticaj zaštitne obloge od gips ploča

IPE 220	Debljina obloge [mm]	Izloženost sa četiri strane			Izloženost sa tri strane		
		Zonski model	ISO 834	ASTM E119	Zonski model	ISO 834	ASTM E119
Nezaštićen	n/a	20,55	9,36	9,78	22,97	12,38	12,07
	6,4	31,43	20,69	21,02	36,67	25,59	25,8
	7,9	35,54	24,57	24,91	41,70	30,26	30,56
Zaštićen (šuplje oblaganje)	9,5	40,06	28,74	29,18	47,13	35,26	35,71
	12,7	49,52	37,4	38,07	58,25	45,50	46,31
	15,9	59,33	46,58	47,40	69,83	56,20	57,31
	19,0	68,82	55,92	56,77	> 120	66,97	68,29
	25,4	> 120	77,02	78,16	> 120	90,62	92,74



a) greda izložena sa četiri strane

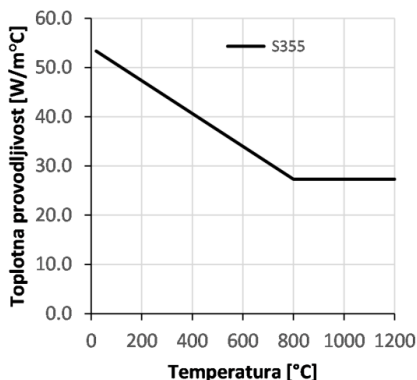


b) greda izložena sa tri strane

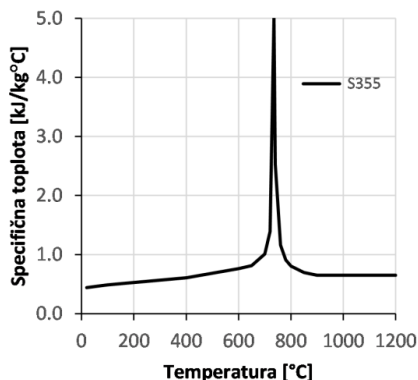
Slika 14. Požarna otpornost čeličnog nosećeg elementa u zavisnosti od debljine zaštitne obloge

Kao što je i očekivano, požarna otpornost sračunata za ISO 834 i ASTM E119 požarnu krivu je praktično identična. U slučaju zonskog modela, za ovu konkretnu stambenu jedinicu, dobijena je veća požarna otpornost. Ako je potrebna otpornost, na primer, R60 (otpornost na požar u trajanju od 60 minuta za standardnu izloženost), debljina zaštitne obloge treba da iznosi najmanje 20 mm i 16,5 mm, u slučaju kada je element izložen sa četiri, odnosno tri strane, redom.

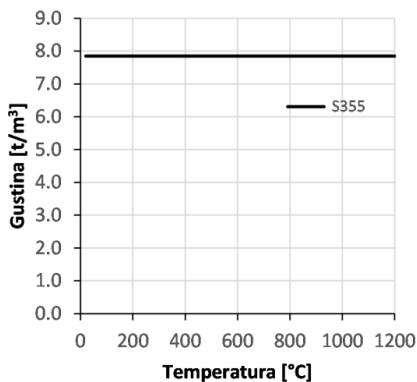
Ako se požarna otpornost određuje na osnovu naprednog metoda proračuna, termička i mehanička svojstva čelika moraju se definisati u celokupnom opsegu očekivanih temperatura tokom požara. EN 1993-1-2 sadrži informacije o svojstvima, predstavljenim na Slici 15. Za razliku od betona i drveta, koji gube masu pri zagrevanju, gustina čelika ostaje konstantna pri povišenim temperaturama.



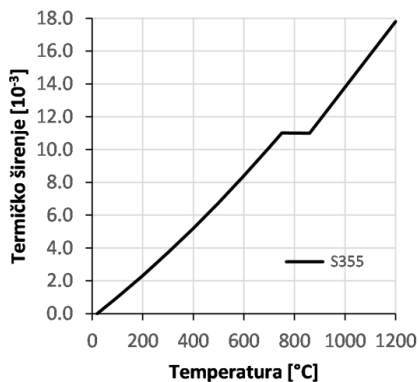
a) toplotna provodljivost



b) specifična toplota

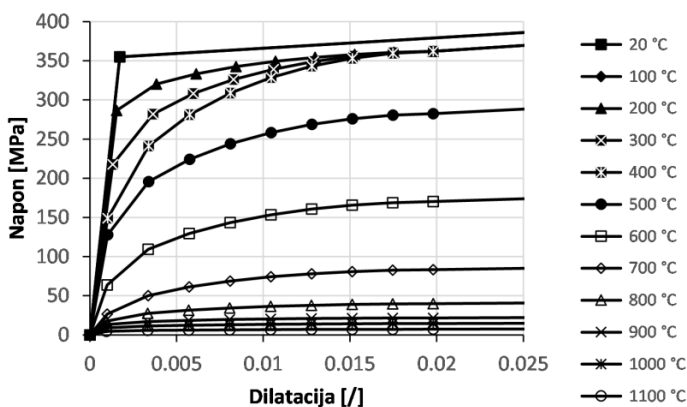


c) gustina



d) termičko širenje

Slika 15. Temperaturno zavisna termička, fizička i mehanička svojstva čelika



e) veza napon-dilatacija pri pritisku i zatezanju

Slika 15. Temperaturno zavisna termička, fizička i mehanička svojstva čelika (nastavak)

3.3. Drvene konstrukcije

Drvo se može smatrati najstarijim konstrukcijskim materijalom. U posljednja dva veka savremenog doba, drugi konstrukcijski materijali, poput betona i čelika, postali su dominantni zbog svojih visokih performansi i trajnosti. Proizvodnja betona i čelika, međutim, dovodi do velikih emisija CO₂ u atmosferu, što postaje sve značajnije s obzirom na uticaj CO₂ na klimatske uslove. Posljednjih godina građevinska industrija pokušava da smanji nivo emisija, promovišući upotrebu drveta kao konstrukcijskog materijala, što je dovelo do porasta broja projekata objekata od drveta širom sveta. Ovim je otvoren niz potencijalnih problema koji mogu nastati u slučaju požara u drvenim objektima, s obzirom da, za razliku od betona i čelika, drvo predstavlja gorivi materijal i doprineće povećanju ukupnog požarnog opterećenja.

Automatski sistem prskalica „sprinkler“ je najefikasniji način za poboljšanje požarne bezbednosti svih zgrada. Naročito se preporučuju za implementaciju u visokim drvenim zgradama. U pojedinim slučajevima, neophodno je i oblaganje drvenih elemenata, delimično ili potpuno. Potpuno oblaganje gips-kartonskim pločama dovoljne debljine ili drugim materijalom, sprečava razvoj karbonizovanog sloja u slučaju potpunog izgaranja, čime se obezbeđuje isti nivo požarne otpornosti kao u slučaju potpuno negorivog materijala. Delimično oblaganje je ekonomičnije rešenje kojim se sprečava učešće konstrukcijskog drveta u požaru do određenog trenutka, ali se ne može garantovati potpuno izgaranje bez oštećenja u smislu pojave karbonizovanog sloja. Takođe, moguće je i slojevito oblaganje, koje se odnosi na konstrukcijske elemente sastavljene od slojeva drveta i negorivih materijala, kako bi se poboljšao izgled i požarna otpornost.

Glavni rizik za eksterno širenje požara potiče od velikih plamenova koji izlaze kroz prozore potpuno razvijenih požara i šire se vertikalno naviše duž fasade. Ne postoji konsenzus ili procedura za određivanje rizika od eksternih plamenova koji dostižu dve etaže iznad požarnog sektora. Za drvene konstrukcije, osnovni cilj je verifikovati upotrebu drvene fasade u smislu požarne otpornosti, kao i fasadne obloge na npr. betonskim zgradama [12].

Kada se utvrde požarni scenario i proračunski požar, odgovor konstrukcije na požar može se sračunati korišćenjem pojednostavljenih ili naprednih računskih. Pojednostavljeni

metod koji je trenutno veoma rasprostranjen je metod redukovanog poprečnog preseka i redukovanih svojstava materijala, predložen u EN 1995-1-2 [13].

Kada se požar razvije, direktno izloženi elementi počinju da se zagrevaju, kao posledica dejstva toplotnog fluksa na površine elemenata. Toplota prodire unutar poprečnog preseka elemenata mehanizmima prenosa toplote. Prodor toplote je relativno spor, s obzirom na niske vrednosti toplotne provodljivosti drveta. Kada temperatura drveta dostigne vrednosti između 250 i 350°C (obično se usvaja granična vrednost 300°C), dolazi do karbonizacije drveta. Karbonizacija je hemijski proces nepotpunog sagorevanja određenih čvrstih tela izloženih visokoj toploti. Zagrevanjem dolazi do isparavanja vodene pare i organskih materija iz matrice. Ostaci crnog ugljenisanog materijala predstavljaju čađ, koja se razlikuje od svetlije obojenog pepela. Iako sloj čađi ne doprinosi nosivosti, on štiti preostali poprečni presek, delujući u svojstvu izolacije i usporavajući proces prodiranja toplote. Ukoliko se očuva integritet tog sloja, jezgro poprečnog preseka ostaje relativno hladno, zadržavajući mehanička svojstva na ambijentalnom nivou. Pored sloja čađi, formira se i dodatni prelazni sloj između čađi i neoštećenog sloja, sa degradiranim mehaničkim svojstvima.

Za standardnu požarnu izloženost, efektivni poprečni presek nezaštićenih elemenata određuje se redukovanjem početnog poprečnog preseka za debljinu karbonizovanog sloja d_{ef} (Slika 16), koja se određuje na osnovu sledećeg izraza:

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0 \quad (41)$$

gde je:

- $d_0 = 7 \text{ mm}$,
- k_0 se određuje kao:

$$k_0 = \begin{cases} t/20 & \text{za } t < 20 \text{ min} \\ 1,0 & \text{za } t \geq 20 \text{ min} \end{cases} \quad (42)$$

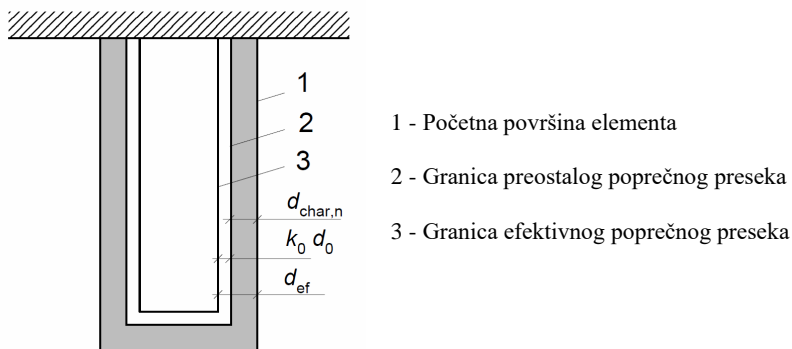
- $d_{char,n}$ se određuje prema:

$$d_{char,0} = \beta_0 t \quad (43)$$

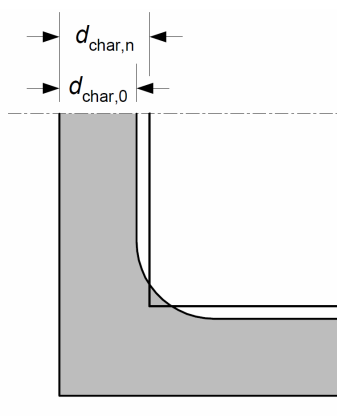
$$d_{char,n} = \beta_n t \quad (44)$$

gde je:

- $d_{char,0}$ proračunska debljina čađi pri jednodimenzionalnoj karbonizaciji,
- $d_{char,n}$ preporučena proračunska debljina čađi, koja obuhvata uticaje zaobljenja uglova,
- β_0 jednodimenzionalna proračunska brzina karbonizacije pri standardnoj izloženosti požaru (Slika 17),
- β_n preporučena proračunska brzina karbonizacije, koja obuhvata uticaje zaobljenja uglova i pukotine (Slika 17),
- t vreme izloženosti požaru u minutima.



Slika 16. Definicija preostalog i efektivnog poprečnog preseka



Slika 17. Debljina sloja čađi $d_{char,0}$ pri jednodimenzionalnoj karbonizaciji i preporučena debljina čađi

$d_{char,n}$

Proračunska svojstva čvrstoće i krutosti efektivnog poprečnog preseka se računaju sa $k_{mod,fi} = 1,0$.

Može se primeniti jednodimenzionalna proračunska brzina karbonizacije ukoliko je veća brzina uzeta u obzir u uglovima pravougaonih poprečnih preseka, b_{min} , gde je:

$$b_{min} = \begin{cases} 2d_{char,0} + 80 & \text{za } d_{char,0} \geq 13 \text{ mm} \\ 8,15d_{char,0} & \text{za } d_{char,0} < 13 \text{ mm} \end{cases} \quad (45)$$

Ako je najmanja širina poprečnog preseka manja od b_{min} , treba primeniti preporučene brzine karbonizacije. Za poprečne preseke koji su sračunati korišćenjem jednodimenzionalnih proračunskih brzina karbonizacije, poluprečnik zaobljenja u uglovima treba usvojiti jednak debljini sloja čađi $d_{char,0}$. Za površine drveta, nezaštićene u toku izloženosti, proračunske brzine karbonizacije su date u Tabeli 5. Proračunske brzine karbonizacije za puno tvrdo drvo, izuzev bukve, karakteristične gustine između 290 i 450 kg/m³, mogu se odrediti na osnovu linearne interpolacije između vrednosti datih u Tabeli 5. Brzinu karbonizacije za bukvu treba usvojiti kao što je dato i za puno meko drvo. Proračunske brzine karbonizacije za panele na bazi drveta odnose se za karakterističnu

gustinu od 450 kg/m³ i debljinu panela od 20 mm. Za ostale karakteristične gustine i debljine panela manje od 20 mm, brzina karbonizacije se računa kao:

$$\beta_{0,\rho,t} = \beta_0 k_\rho k_h \quad (46)$$

i:

$$k_\rho = \sqrt{\frac{450}{\rho_k}} \quad (47)$$

$$k_h = \sqrt{\frac{20}{h_p}} \quad (48)$$

gde je:

- ρ_k karakteristična gustina [kg/m³],
- h_p debljina panela [mm].

Tabela 5
Proračunska brzina karbonizacije drveta β_0 i β_n

	β_0 [mm/min]	β_n [mm/min]
a) Meko drvo i bukva		
Lamelirano lepljeno drvo sa karakterističnom gustinom ≥ 290 kg/m ³	0,65	0,7
Puno drvo sa karakterističnom gustinom ≥ 290 kg/m ³	0,65	0,8
b) Tvrdo drvo		
Puno ili lamelirano lepljeno tvrdo drvo sa karakterističnom gustinom 290 kg/m ³	0,65	0,7
Puno ili lamelirano lepljeno tvrdo drvo sa karakterističnom gustinom ≥ 450 kg/m ³	0,50	0,55
c) LVL (laminirani furnir)		
Sa karakterističnom gustinom ≥ 480 kg/m ³	0,65	0,7
d) Paneli (characteristic density of 450 kg/m³)		
Drvene obloge	0,90	n/a
Šperploča	1,00	
Paneli na bazi drveta i ostale šperploče	0,90	

Za zaštićene površine, dodatne informacije mogu se pronaći u EN 1995-1-2.

Metod redukovanih svojstava može se primeniti za pravougaone poprečne preseke od mekog drveta izložene požaru sa tri ili četiri strane i za okrugle poprečne preseke izložene po celom obimu.

Za verifikaciju mehaničke otpornosti, proračunske vrednosti svojstava čvrstoće i krutosti se određuju kao:

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (49)$$

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (50)$$

gde je:

- $f_{d,fi}$ proračunska čvrstoća u požaru,
- $S_{d,fi}$ proračunsko svojstvo krutosti (modul elastičnosti $E_{d,fi}$ ili modul smicanja $G_{d,fi}$) u požaru,
- f_{20} 20% fraktil svojstva čvrstoće pri ambijentalnoj temperaturi,
- S_{20} 20% fraktil svojstva krutosti (modul elastičnosti ili modul smicanja) pri ambijentalnoj temperaturi,
- $k_{mod,fi}$ korekcionni koeficijent u požaru,
- $\gamma_{M,fi}$ parcijalni koeficijent sigurnosti za drvo u požaru.

Preporučeni parcijalni koeficijent sigurnosti za svojstva materijala u požaru je $\gamma_{M,fi} = 1,0$. Korekcionni koeficijent uzima u obzir redukciju svojstava čvrstoće i krutosti pri povišenim temperaturama i zamenjuje korekcionni koeficijent pri ambijentalnoj temperaturi. Za $t \geq 20$ minuta, korekcionni koeficijent u požaru $k_{mod,fi}$ treba usvojiti na sledeći način:

- za čvrstoću pri savijanju:

$$k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{200} \frac{p}{A_r} \quad (51)$$

- za čvrstoću pri pritisku:

$$k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{125} \frac{p}{A_r} \quad (52)$$

- za čvrstoću pri zatezanju i modul elastičnosti:

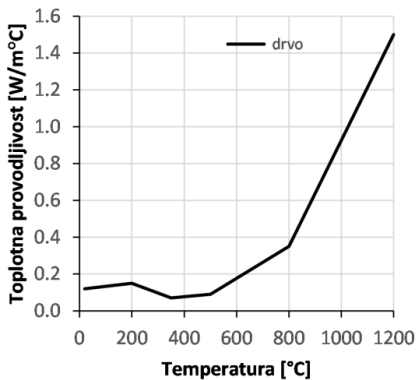
$$k_{mod,fi} = 1,0 - \frac{1}{330} \frac{p}{A_r} \quad (53)$$

gde je:

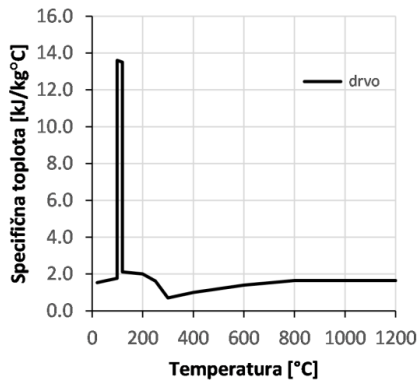
- p obim preostalog poprečnog preseka izloženog požaru [m],
- A_r površina preostalog poprečnog preseka [m²].

Za $t = 0$ minuta, korekcionni koeficijent u požaru treba usvojiti kao $k_{mod,fi} = 1,0$ a za $0 \leq t \leq 20$ minuta, može se koristiti linearna interpolacija.

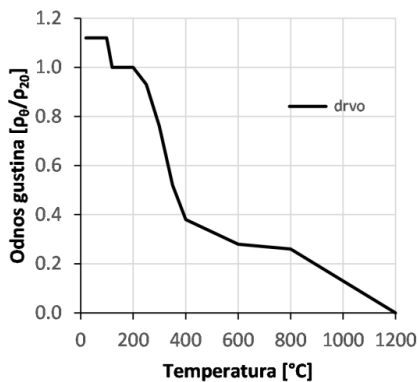
Ako je potrebno sprovesti detaljniju analizu, može se koristiti metod naprednog proračuna, bilo za pojedinačne elemente, delove i celokupne konstrukcije. Napredne metode mogu se primeniti za određivanje debljine karbonizovanog sloja, razvoj i raspodelu temperature unutar konstrukcijskih elemenata i procenu ponašanja konstrukcije. Termički model odgovora treba da obuhvati promenu termičkih svojstava materijala u odnosu na temperaturu, dok mehanički odgovor treba da obuhvati promene mehaničkih svojstava sa promenom temperature, kao i vlažnosti. Termička i mehanička temperaturno zavisna svojstva, preporučena prema EN 1995-1-2, prikazana su na Slici 18.



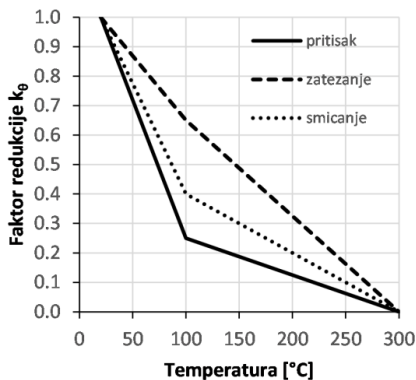
a) toplotna provodljivost



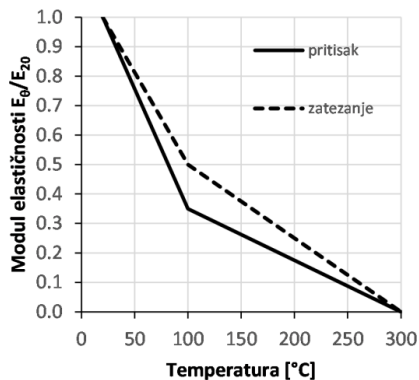
b) specifična toplota



c) gustina



d) koeficijent redukcije čvrstoće paralelno vlaknima za meko drvo



e) uticaj temperature na modul elastičnosti paralelno vlaknima za meko drvo

Slika 18. Temperaturno zavisna termička, fizička i mehanička svojstva drveta

Poslednjih godine postignut je napredak u numeričkom modeliranju konstrukcijskog odgovora tokom požara, koristeći prednost računarskih resursa koji se neprestano razvijaju.

Konstruktivski materijali poput betona, čelika i drveta koriste se istovremeno i u kombinaciji kako bi se iskoristile prednosti svakog pojedinačnog materijala. Savremeni konstruktivski sistemi, poput spregnute međuspratne tavanice drvo-beton, sastoje se od betonske ploče (dominantno opterećene na pritisak), oslonjene na drvenu gredu (koja ima veću čvrstoću pri zatezanju u odnosu na beton i dominantno je opterećena na zatezanje), sa vezom između ta dva u obliku čeličnih zavrtneva ili ploča (čime se obezbeđuje smičuća veza između ploče i grede). Kompleksno ponašanje materijala i realistično modeliranje odgovora konstrukcije dodatno je usložnjeno uvođenjem povišenih temperatura, što predstavlja izazov inženjerima i istraživačima u toj oblasti. Dodatne informacije o naprednom numeričkom modeliranju takvih sistema mogu se naći u [14].

4. LITERATURA

- [22] *EN 1992-1-2*, "Design of Concrete Structures, General Rules, Structural Fire Design", European Committee for Standardization, 2004.
- [23] *EN 1991-1-2*, "Actions on Structures, General Actions, Actions of Structures Exposed to Fire", European Committee for Standardization, 2002.
- [24] *CEB-FIP*, "Fire Design of Concrete Structures - Materials, Structures and Modelling", Bulletin 38, International Federation for Structural Concrete (fib), 2007.
- [25] *ISO 834*, "Fire Resistance Test - Elements of Building Construction", International Standard 834, 1975.
- [26] *ASTM E-119-08a*, "Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials", American Society for Testing and Materials, 2008.
- [27] J.-F. Cadorin, J.-M. Franssen, "A Tool to Design Steel Elements Submitted to Compartment Fires – Ozone V2. Part 1: Pre- and Post-Flashover Compartment Fire Model", *Fire Safety Journal*, vol. 38, pp. 395-427, 2003.
- [28] J.-F. Cadorin, D. Pintea, J.-C. Dotreppe, J.-M. Franssen, "A Tool to Design Steel Elements Submitted to Compartment Fires – Ozone V2. Part 2: Methodology and application", *Fire Safety Journal*, vol. 38, pp. 429-451, 2003.
- [29] A.H. Buchanan, "The Challenges of Predicting Structural Performance in Fires", *Ninth International Symposium on Fire Safety Science*, Karlsruhe, Germany, pp. 77-90, 2008.
- [30] S. Shihada, "Effect of Polypropylene Fibers on Concrete Fire Resistance", *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 17, no. 2, pp 259-264, 2011.
- [31] I. Džolev, M. Cvetkovska, Đ. Ladinović, V. Radonjanin, A. Rašeta, "Fire Analysis of a Simply Supported Reinforced Concrete Beam", *8th Symposium Association of Structural Engineers of Serbia*, Zlatibor, Serbia, pp 322-327, 2016.
- [32] *EN 1993-1-2*, "Design of Steel Structures, General Rules, Structural Fire Design", European Committee for Standardization, 2002.
- [33] A. Buchanan, B. Östman, A. Franghi, "Fire Resistance of Timber Structures", A report for the National Institute of Standards and Technology, NIST, 2014.
- [34] *EN 1995-1-2*, "Design of Timber Structures, General Rules, Structural Fire Design", European Committee for Standardization, 2003.
- [35] Ch. Bedon, C. Chifliganec, I. Džolev, R. Pečenko, T. Hozjan, *Numerical Modelling of Timber Concrete Composite Structures in Fire - Guidance Document*, ETH Zürich, Switzerland, 2018.

Deo II

Procena stanja i sanacija konstrukcija

OŠTEĆENJA ARMIRANOBETONSKIH KONSTRUKCIJA UZROKOVANA POŽAROM I MOGUĆNOSTI SANACIJE

Mirjana Malešev, Vlastimir Radonjanin

1. UVOD

Pravilno projektovanje i uspešno izvođenje radova na sanaciji armiranobetonske (AB) konstrukcije, koja je oštećena u požaru, može se obezbediti samo ako su prethodno obavljena detaljna terenska i laboratorijska ispitivanja i tačna procena preostale nosivosti konstrukcije. Preporuke dostupne iz različitih izvora (knjige, propisi, stručni i naučni radovi itd.) mogle bi pomoći u odabiru odgovarajućeg rešenja iz širokog spektra dostupnih metoda sanacije i materijala koji se koriste za sanaciju, ali treba imati na umu da je u praksi svaki objekat, koji je oštećen u požaru, jedinstven [20]. Za realnu procenu AB konstrukcije nakon požara potrebno je da se poznaje ponašanje betona i armaturnog čelika na visokim temperaturama, da se prepoznaju vrste i stepeni oštećenja usled požara i da se razdvoje od sličnih oštećenja koja nastaju od ostalih uzroka. Armirani beton se smatra za materijal koji pokazuje prihvatljivu otpornost na visoke temperature, što omogućava upotrebu AB elemenata bez potrebe za dodatnom zaštitom. Glavni razlog za ovu činjenicu su sledeća svojstva betona: negorivost, mala toplotna provodljivost i male dilatacije pri rastućim temperaturama. Osim toga, zahvaljujući dimenzijama i oblicima poprečnog preseka, unutar AB elemenata ostaje neoštećeni deo betonskog preseka koji nastavlja da prenosi opterećenje. S druge strane, armatura u AB konstrukcijama je osetljiva na visoke temperature i mora se zaštititi zaštitnim slojem betona. Relativno niska toplotna provodljivost betona takođe dovodi do sporog razvoja hemijskih transformacija sastojaka betona, koje se događaju na određenoj temperaturi. Međutim, niska toplotna provodljivost betona izaziva veliki termički gradijent, koji indukuje unutrašnje napone u betonskoj masi i razvojem unutrašnjih pukotina [1]. Dugotrajno izlaganje armiranog betona visokim temperaturama dovodi do fizičko-hemijskih promena koje uzrokuju smanjenje mehaničkih svojstava i betona i armaturnog čelika, pa samim tim i do smanjenja nosivosti i bezbednosti konstrukcije.

2. MEHANIZMI OŠTEĆENJA BETONA USLED DEJSTAVA POŽARA

Beton je kompozitni materijal, koji se sastoji od agregata mineralnog porekla, koji je povezan matricom od hidratirane cementne paste. Cementna matrica je veoma porozna i sadrži relativno veliku količinu slobodne vode. Kada je izložen toploti, beton reaguje fizički, na primer širenjem, ali se u njemu događaju i različite hemijske promene. Zbog toga je ponašanje betona, kao heterogenog materijala, u uslovima povišenih temperatura posebno složeno. Beton sadrži cementnu matricu i punilac-agregat, koji na različite načine reaguju u toku zagrevanja [7]. Glavne promene se dešavaju, pre svega, u cementnom kamenu. S porastom temperature betona na 100°C slobodna voda će ispariti iz kapilarnog sistema pora u cementnom kamenu. U opsegu od 100°C do 400°C, cementni kamen gubi fizički vezanu vodu, dok će se na temperaturama iznad 400°C izgubiti i hemijski vezana voda. Sledeće hemijske transformacije mogu se pojaviti sa povećanjem temperature: raspadanje etringita, na temperaturama između 500°C i 1100°C, endotermička dehidratacija $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na temperaturama 450°C-550°C i dehidracija kalcijum-silikat-hidrata na temperaturi od 700°C [2]. Gubitak porne vode i hemijske transformacije su praćeni skupljanjem cementnog

kamena. Sa druge strane, zbog porasta temperature, krupan agregat se širi - povećava svoju zapreminu, pa se narušava adhezija između cementnog kamena i krupnog agregata. U slučaju armiranog betona, isti mehanizam dovodi do narušavanja adhezije između armature i betona [20].

Na ponašanje betona na povišenoj temperaturi vrsta agregata ima veliki uticaj, pošto agregat zauzima najčešće 65 do 75% od ukupne zapremine betona. Najčešće korišćeni agregati za beton su termički stabilni do temperature 300°C-350°C. Sa aspekta ponašanja na visokim temperaturama, mineralni agregati koji se koriste u betonu se klasifikuju u tri grupe: karbonatni, silikatni i laki agregat (LWA). U karbonatne agregate se ubrajaju krečnjak i dolomit. Silikatni agregati obuhvataju materijale koji sadrže silicijum-dioksid, kao što su, na primer, granit i peščar. Laki agregati se obično proizvode zagrevanjem/pečenjem škriljaca ili gline.

Čvrstoća pri pritisku betona koji sadrži silikatni agregat počinje da opada na oko 400°C i smanjuje se na oko 55% na temperaturi od 650°C zbog promene kristalne strukture kvarcne α formacije u β formaciju [2]. Beton koji sadrži laki agregat ili karbonatni agregat zadržava većinu svoje čvrstoće pri pritisku do oko 650°C. Laki beton ima bolja izolaciona svojstva i sporije prenosi toplotu od betona normalne težine iste debljine, pa zato obezbeđuje povećanu otpornost na požar. Modul elastičnosti betona se smanjuje sa porastom temperature, bez obzira na vrstu upotrebljenog mineralnog agregata. Takođe, pri visokim temperaturama znatno se povećavaju tečenje i relaksacija betona. Boja betona se menja sa porastom temperature od normalne do ružičaste ili crvene (kada je beton zagrejan na 300-600°C), svetlo sive (600-900°C) do mrko žute (900-1000°C). Ako temperatura betona pređe 1300°C, doći će do omekšavanja i topljenja površinskog sloja betona [20]. Opisane fizičke i hemijske promene betona izazvaće i smanjenje njegove čvrstoće na zatezanje.

Najčešće beton zadržava svoju čvrstoću pri pritisku sve dok se ne postigne kritična temperatura iznad koje, čvrstoća počinje naglo da se smanjuje. Naglo smanjenje se obično pojavljuje na temperaturi oko 600°C [7]

Čelik za armiranje je mnogo osetljiviji na visoke temperature od betona. Oba materijala su negoriva, ali beton, zahvaljujući maloj toplotnoj provodljivosti, ima zaštitnu, tj. izolacionu ulogu u AB elementima. Vruće valjani čelici (armaturene šipke) zadržavaju veći deo svoje čvrstoće na zatezanje do oko 400°C, ali na temperaturama >600°C toplo valjani čelik gubi zaostalu čvrstoću. Hladno vučeni čelici (užad za prednaprežanje) pokazuju znatan gubitak čvrstoće na 200-400°C. Hladno oblikovani čelik gubi zaostalu čvrstoću na temperaturi >450°C. Smanjenje čvrstoće na zatezanje armature pri visokim temperaturama, obično je uzrok velikog trajnog ugiba konstrukcije.

Kada je beton izložen visokoj temperaturi, kao u slučaju požara, osnovna vidljiva oštećenja su termičko odvajanje i otpadanje i pucanje betona, ali dešavaju se i druge promene, poput pada čvrstoće i modula elastičnosti i promene boje. U većini slučajeva registruje se kombinacija ovih efekata požara.

Odvajanje i otpadanje manjih ili većih komada (Spalling) betona je opšti pojam, koji obuhvata određenu grupu oštećenja koja mogu nastati na betonskoj konstrukciji tokom požara [4]. Odvajanje i otpadanje manjih ili većih komada betona se može definisati kao opasno ili neopasno lomljenje fragmenata betona sa površine konstrukcijskog elementa tokom ili nakon što je bio izložen visokim i brzo rastućim temperaturama [13]. Odvajanje i otpadanje manjih ili većih komada betona može da bude uzrokovano različitim mehanizmima [4]:

- Povećanjem pornog pritiska zbog isparavanja vode kada temperatura počne da poraste;
- Naprežanjem na pritisak zagrejanog površinskog sloja betona zbog toplotnog gradijenta unutar poprečnog preseka;
- Pojavom unutrašnjih pukotina zbog razlike u toplotnom širenju agregata i cementnog kamena;
- Gubitkom čvrstoće zbog hemijskih promena tokom zagrevanja.

Postoji nekoliko glavnih teorija koje objašnjavaju mehanizme “spalling”-a [11, 12]:

- Teorija toplotnog naprežanja,
- Teorija pornog pritiska,
- Kombinacija pornog pritiska i termičkog odvajanja i otpadanja komada betona.

Tokom poslednjih nekoliko decenija razvijeno je i nekoliko specifičnih teorija [11]:

- Teorija potpuno zasićenog pornog pritiska,
- Teorija BLEVE,
- Sile trenja iz teorije protoka pare.

Sve ove teorije se temelje na fenomenima „kretanja toplote i/ili kretanja vlage“ koji izazivaju naprežanja. Nažalost, pomenute teorije nisu u potpunosti potvrđene kroz eksperimente, a takođe nisu potvrđene ni kroz numeričko modeliranje.

Pucanje betona – pukotine u betonu (Cracking of concrete) koji je izložen požaru nastaju zbog prekoračenja čvrstoće betona na zatezanje. Prsline i pukotine nastaju usled toplotnog širenja i dehidracije betona usled zagrevanja.

3. VRSTE I KLASIFIKACIJA OŠTEĆENJA

3.1. Vrste oštećenja

Izraz "spalling" obuhvata veliki broj oštećenja. Prve vrste “spalling”-a opisane su početkom 20. veka (eksplozivno, površinsko, agregatno i ugaono odvajanje i otpadanje komada betona). U narednim decenijama dodata su dva nova tipa (radikalno i nakon hlađenja) [4, 13]. Definicije za nabrojane vrste “spalling”-a su:

- **Eksplozivno odvajanje i otpadanje komada betona (Explosive spalling):** To je vrsta nasilnog odlamanja komada betona sa površina betonskog elementa, koja se pojavljuje u prvih 30 minuta požara. Uzrokovano je nedovoljnim oslobađanjem visokog pritiska vodene pare u porama cementnog kamena, velikim toplotnim naprežanjem betona i njihovom kombinacijom. Ova vrsta oštećenja najčešće se pojavljuje na konstrukcijskim elementima zagrejanim sa više strana, poput stubova i greda. Kada se kretanje vodene pare ka unutrašnjosti poprečnog preseka blokira, tada pritisak vodene pare u porama počinje naglo da raste i može da uzrokuje da se spoljašnji delovi poprečnog preseka odvajaju uz eksploziju.
- **Površinsko odvajanje i otpadanje komadića betona (Surface spalling):** Nasilno odvajanje, uglavnom sitnih komada betona, sa površine poprečnog preseka pri naglom porastu temperature. Tokom ovog procesa se oslobađa nakupljena energija kroz “odskakanje” sitnijih komada betona određenom brzinom. Obično se javlja u prvih 30 minuta požara.
- **Pucanje i ispadanje zrna agregata (Aggregate spalling):** Cepanje agregata zbog slabljenja kvaliteta i hemijskih promena na visokim temperaturama. Obično se dešava u prvih 30 minuta požara (Sl. 1).

- **Odvajanje i opadanje komada betona duž ivica elemenata (Corner spalling):** Oštećenje zaštitnog sloja betona duž ivica elemenata zbog istovremenog obostranog uticaja temperature. Ova vrsta oštećenja obično je povezana i sa pukotinama koje se javljaju zbog razlike u toplotnoj dilataciji betona i armature. Obično se ispoljava u prvih 90 minuta požara (Sl. 2).
- **Radikalno odvajanje i otpadanje komada betona (Sloughing off spalling):** To je oblik progresivnog postepenog i dubljeg odvajanja i otpadanja komada betona, koji je uzrokovan gubitkom čvrstoće betona usled unutrašnjih pukotina i hemijskih promena u cementnom kamenu. Ova vrsta "spalling"-a predstavlja nenasilno/spontano odlamanje betonskih fragmenata nakon dužeg izlaganja visokim temperaturama, kada beton izgubi čvrstoću (Sl. 3 i 4).
- **Odvajanje i otpadanje komada betona nakon hlađenja (Post-cooling spalling):** Nenasilno/spontano odlamanje fragmenata betona tokom hlađenja. Ova vrsta "spalling"-a primećena je kod betona koji sadrže karbonatni agregat. Uzrok je rehidracija CaO u Ca(OH)₂ nakon hlađenja, kada je vlaga ponovo prisutna na površini betonskog elementa. Širenje usled rehidracije uzrokuje snažno unutrašnje pucanje i samim tim potpuni gubitak čvrstoće betona. Komadi betona se odvajaju, sve dok u dehidriranoj zoni postoji voda za rehidraciju CaO (Sl. 5).

Termin "pucanje" obuhvata sledeće vrste oštećenja:

- **Ispresklost površine betona (Crazing):** mrežaste prsline i pukotine na površini betonskih elemenata (Sl. 6), nastale dodatnim skupljanjem cementnog kamena tokom isparavanja slobodne vode zbog uticaja visokih temperatura.
- **Pukotine uz ivice, duž glavne armature (Corner cracks along main reinforcement):** Ove pukotine nastaju usled razlike u toplotnom širenju/dilataciji između betona i armaturnih šipki. Najčešće se pojavljuju uz podužne ivice stubova i greda, koje su izložene požaru, na mestu i u pravcu glavne armature. Takođe su povezane sa odvajanjem i otpadanjem komada betona (corner spalling) i sa vidljivim armaturnim šipkama (Sl. 2).
- **Unutrašnja delaminacija betona (Inner delamination of concrete):** Ispoljava se kao unutrašnja pukotina i paralelna je sa površinom koja je izložena požaru (Sl. 7). Glavni uzrok ovog oštećenja je velika temperaturna razlika koja izaziva velike napone zatezanja između zagrejanog površinskog sloja i hladnije unutrašnje zone betona. Ova pojava je tipična za stubove. Pošto se unutrašnje pukotine ne mogu vizuelno registrovati, njihovo postojanje mora se proveriti vađenjem betonskih jezgara.

Pukotine na površini betona omogućavaju direktno i brže zagrevanje armaturnih šipki i unutrašnjeg betona (jezgra preseka), što može dovesti do većeg toplotnog naprezanja i progresije u pojavi pukotina.

Pad čvrstoće i gubitak duktilnosti armature su posledica uticaja visokih temperatura tokom požara. Vidljiva karakteristična oštećenja armature od požara su:

- Plastične deformacije usled ograničenog izduženja (Sl. 8).
- Pucanje šipki (Sl. 8) zbog gubitka duktilnosti čelika ili zbog lokalnog smanjenja preseka šipke zbog topljenja čelika.

Elementi od armiranog betona su u toku požara izloženi dodatnim naponima zbog ograničenih deformacija. U slučaju vitkih greda i ploča može doći do izvijanja ploča

povezanih sa ugitom. U uslovima požara, AB greda/ploča kojoj je sprečeno aksijalno pomeranje razvija velike ugibe u fazi nakon izvijanja [23].

Opseg i vrsta opisanih oštećenja elemenata AB konstrukcija uzrokovanih požarom zavise od brojnih parametara među kojima su najvažnija: veličina i raspodela požarnog opterećenja, trajanje požara, maksimalna temperatura koja se razvila u toku požara, oblik i dimenzije konstrukcijskih elemenata, postojanje i vrsta završne obrade RC elemenata, prisustvo defekata i/ili ranijih oštećenja, konstrukcijski i arhitektonski detalji i stvarni kvalitet betona.



Slika 1. Pucanje i ispadanje zrna agregata (Aggregate spalling)



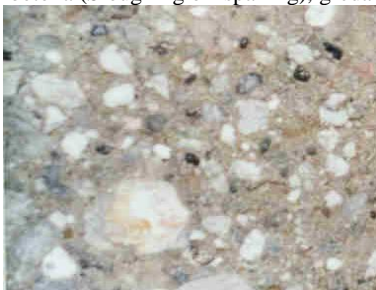
Slika 2. Odvajanje i opadanje komada betona duž ivica elemenata (Corner spalling), Pukotine uz ivice (Corner cracks)



Slika 3. Radikalno odvajanje i otpadanje komada betona (Sloughing off spalling), greda



Slika 4. Radikalno odvajanje i otpadanje komada betona (Sloughing off spalling), ploča





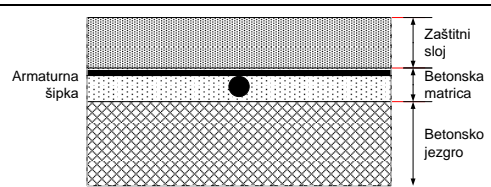
Slika 7. Unutrašnje raslojavanje betona (Inner delamination of concrete) u stubu



Figure 8. Plastične daformacije i pucanje šipki armature

3.2. Klasifikacija oštećenja

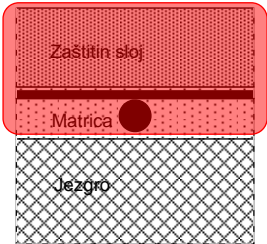

Među brojnim dostupnim klasifikacijama oštećenja betona usled požara, autori ovog rada izabrali su klasifikaciju koju su predložili Ingham i Tarada [10] i modifikovali je u odnosu na stepen pogođenog dela preseka RC elementa. Na slici 9 prikazani su delovi poprečnog preseka tipičnih RC elemenata koji se moraju uzeti u obzir prilikom izbora odgovarajuće metode za sanaciju. Predložena klasifikacija je data u Tabeli 1.



Slika 9. Karakteristični delovi poprečnog preseka AB elementa

Tabela 1
Klasifikacija oštećenja usled požara sa prikazom zahvaćenog dela poprečnog preseka

Stepen oštećenja	Zahvaćeni deo poprečnog preseka	Grafički prikaz zahvaćenog dela	Uočene promene/oštećenja
1	Tanki površinski sloj		<p>Manja isprskalost površine betona – mrežaste prsline i normalna boja betona</p> <p>Nije vidljivo odvajanje i otpadanje komada betona</p> <p>Šipke armature nisu vidljive</p>
2	Zaštitni sloj betona		<p>Umerena isprskalost površine betona (Crazing)</p> <p>Površinsko odvajanje i otpadanje komadića betona (Surface spalling)</p> <p>Pucanje i ispadanje zrna agregata (Aggregate spalling)</p> <p>Promenjena boja betona (ružičasta ili crvena)</p> <p>Šipke armature nisu vidljive ili su lokalno vidljive na mestima nedovoljne debljine zaštitnog sloja betona (vidljivo do 25% šipki)</p>

3	Betonska matrica	 <p>The diagram shows a cross-section of a concrete slab. It is divided into three horizontal layers: a top layer labeled 'Zaštitni sloj' (protective layer) with a dotted pattern, a middle layer labeled 'Matrica' (matrix) with a solid red color and a central black circle, and a bottom layer labeled 'Jezgro' (core) with a cross-hatched pattern.</p>	<p>Izražena- opšta isprskalost površine betona (Crazing) Odvajanje i opadanje komada betona duž ivica elemenata (Corner spalling) i pojava pukotina duž šipki armature (Corner cracking) Radikalno odvajanje i otpadanje komada betona (Sloughing off spalling) Promenjena boja betona (ružičasta/crvena/svetlo siva) Do 50% šipki armature je vidljivo. Pad čvrstoće betona pri pritisku Manji uglob AB elemenata</p>
4	Betonsko jezgro	 <p>The diagram shows a cross-section of a concrete slab, similar to the one above, but with a more extensive red area covering the 'Zaštitni sloj' and 'Matrica' layers, indicating more severe damage or delamination.</p>	<p>Duboko, progresivno odvajanje i otpadanje komada betona (Sloughing off spalling) Više od 50% šipki armature je vidljivo Promenjena boja betona (svetlo siva/mrko žuta) Moguće topljenje betona (dugotrajni požari) Unutrašnje raslojavanje betona Narušena athezija između betona i armature Povećanje ugloba/deformacije AB elemenata Smanjenje mehaničkih karakteristika armaturnog čelika Moguće izvijanje i pucanje šipki armature</p>

4. POVREDIVOST BETONSKIH KONSTRUKCIJA IZLOŽENIH DEJSTVU POŽARA

Prema EN 1992-1-2 [5] projektovanje konstrukcije sa aspekta požarne otpornosti zahteva prethodnu analizu na tri nivoa:

- Analiza elementa konstrukcije,
- Analiza dela konstrukcije, i
- Analiza konstrukcije kao celine.

Pored brzine zagrevanja, trajanja požara i maksimalne temperature tokom požara, povredivost AB konstrukcija izloženih dejstvu požara, na nivou analize pojedinačnih elemenata konstrukcije, zavisi od velikog broja dodatnih faktora, kao što su:

- Vrsta betona (obični beton, laki beton, beton visoke čvrstoće, mikroarmirani beton, samougrađujući beton, itd.),
- Oblik i dimenzije elemenata konstrukcije (jednostavan/kompaktan ili složen poprečni presek),
- Konstrukcijski i arhitektonski detalji (debljina zaštitnog sloja betona, raspored armature, postavljanje instalacija itd.),
- Postojanje defekata i prethodnih oštećenja (betonska gnezda, nedovoljna debljina zaštitnog sloja betona, loše izvedeni prekidi i nastavci betoniranja, prsline i pukotine),
- Postojanje zaštitnih ili dekorativnih obloga na površini betona (gorivi ili negorivi materijali).

4.1. Analiza pojedinačnih elemenata konstrukcije

4.1.1. Vrsta betona

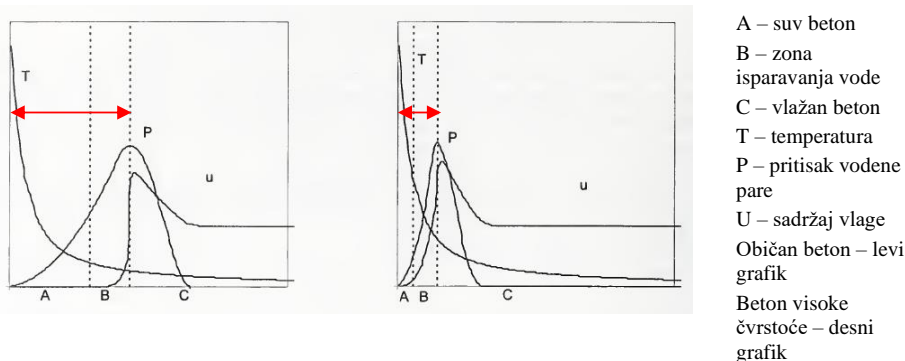
Svojstva *običnog betona* (betona normalne težine) u uslovima požara, kao i drugih vrsta betona, uglavnom zavise od tipa agregata, jer agregat zauzima 65-75% zapremine betona. U EN 1992-1-2 [5] agregat je podeljen u dve grupe, silikatni i karbonatni agregat. Karbonatni agregat je otporniji pod uticajem požara od silikatnog agregata. Neki autori predlažu posebnu klasifikaciju za silikatni agregat. Na primer, Khouri [14] je podelio silikatni agregat u dve grupe, sa boljom toplotnom stabilnošću (do 600°C), kao što su bazalt, granit i gabra i sa nižom termičkom stabilnošću (ispod 350°C), poput kvarca i rečnog agregata. Sa aspekta toplotne stabilnosti, najnepovoljniji su agregati dobijeni od stena metamorfnog porekla, pre svega od kvarcitnih stena. Naime, kvarcitna stena sadrži značajnu količinu minerala kvarca, koji se pri povišenim temperaturama smatra najkritičnijim mineralom čvrstih stena [3]. Uzimajući u obzir ponašanje betona na visokim temperaturama, pored termičke stabilnosti, pogodan agregat bi bio onaj koji ima: mali koeficijent termičkog izduženja, jer se u tom slučaju poboljšava termička kompatibilnost sa cementnim kamenom, hrapavu površinu, jer se tada poboljšava fizička veza sa cementnim kamenom i prisustvo reaktivnog silicijum-dioksida, koji poboljšava hemijsku vezu sa cementnim kamenom [14].

Lakoagregatni beton. Beton sa veštačkim mineralnim lakim agregatom, poput ekspandirane gline, najčešće je korišćen tip lakoagregatnog betona za konstrukcijske namene. Konstrukcijski lakoagregatni beton je povoljan u pogledu smanjenja stalnog opterećenja konstrukcija i bočnih opterećenja od zemljotresa. Pored manje zapreminske mase, ova vrsta betona ima nižu toplotnu provodljivost i sporije prenosi toplotu od običnog betona. Međutim, lakoagregatni beton ima smanjenu čvrstoću na zatezanje u odnosu na beton normalne težine, za istu vrednost čvrstoće na pritisak. Zamena tradicionalnih agregata lakim agregatom generalno dovodi do porasta pojave odvajanja i otpadanja komada betona na temperaturama iznad 350°C. Pojava odvajanja i otpadanja komada betona u elementima od lakoagregatnog betona je uslovljena nižom čvrstoćom na zatezanje, većim sadržajem vlage i razvojem veće temperaturne razlike tokom izlaganja toploti. U slučajevima kada se ne pojavi odvajanje i otpadanje komada betona (spalling), lakoagregatni beton se slično ponaša na povišenim temperaturama kao i beton normalne težine [25] ili ima i bolje ponašanje, zahvaljujući lakom agregatu koji je već bio izložen temperaturi >1000°C tokom proizvodnje. Njegova, zaostala čvrstoća je uglavnom veća nego u betonu normalne težine zbog veće toplotne kompatibilnosti komponenti lakoagregatnog betona. Pošto je razlika između koeficijenata toplotnog širenja agregata i cementne paste veća u običnom nego u lakoagregatnom betonu, beton normalne težine je skloniji pucanju. Takođe, lakoagregatni beton efikasnije štiti zategnute šipke armature od zagrevanja, i element konstrukcije zadržava nosivost bez obzira na dužinu trajanja požara [19].

Beton visoke čvrstoće. Zahvaljujući tehničkim i ekonomskim prednostima, beton visoke čvrstoće sve više postaje ključna komponenta u izgradnji objekata velikih dimenzija, od visokih poslovnih i stambenih zgrada do mostova, tunela i naftnih platformi u moru ili okeanima. Osnovna svojstva betona visoke čvrstoće su visoka čvrstoća pri pritisku i modul elastičnosti (krutost), smanjena propusnost i otpornost na abraziju. U situacijama kada je izložen požaru, beton visoke čvrstoće se drugačije ponaša u odnosu na običan beton. Zbog male propusnosti ove vrste betona, otežano je kretanje vodene pare i vlage, što može dovesti do pojave vrlo visokog pritiska vodene pare blizu površine betona [18]. To znači da postoji veći rizik od pojave odvajanja i otpadanja fragmenata betona visoke čvrstoće (spalling) u poređenju s običnim betonom. Pritisak vodene pare (linija P na slici 10) se u početku povećava sa udaljenjem od zagrejane površine betona, dostiže svoj maksimum na izvesnoj

udaljenosti i zatim počinje da se smanjuje u unutrašnjosti betona. Kritična udaljenost od zagrejane površine betona do mesta gde se dostiže maksimalni pritisak vodene pare, je mnogo manja za betone visokih čvrstoća i iznosi 5-10 mm u odnosu na obični beton kod koga kritično rastojanje iznosi 20-40 mm (Sl. 10). Iz testova simulacije požara, uočeno je da “spalling” betona visoke čvrstoće zahvata sloj od oko 5 mm betona koji otpada, a nakon toga novo nagomilavanje pare i stvaranje visokog pritiska pare može izazvati novi “spalling” u debljini od novih 5 mm, a na kraju ukupno odvajanje i otpadanje betona može dostići velike debljine [18]. Smanjivanje čvrstoće pri pritisku betona visokih čvrstoća počinje pri znatno nižim temperaturama u odnosu na običan beton. Na primer, na 150°C čvrstoća na pritisak je smanjena na 70% čvrstoće koju beton visoke čvrstoće ima na sobnoj temperaturi, dok je, pri istoj temperaturi, smanjenje čvrstoće pri pritisku običnih betona zanemarivo.

U betonima visoke čvrstoće, cementna matrica i krupan agregat su izloženi istom nivou napona, jer imaju slične vrednosti modula elastičnosti i čvrstoće pri pritisku. Pri povišenim temperaturama cementna matrica počinje da slabi pre krupnog agregata i izaziva preraspodelu unutrašnjih napona, pa se napon koncentriše samo u krupnom agregatu, što dovodi do značajnog smanjenja čvrstoće betona na pritisak. S druge strane, slabljenje cementne matrice usled zagrevanja izaziva samo neznatnu redistribuciju naprezanja i posledično, samo malo smanjenje čvrstoće na pritisak običnih betona [8]. Beton visokih čvrstoća pokazuje krto ponašanje ispod 600°C, a duktilnost iznad 600°C.



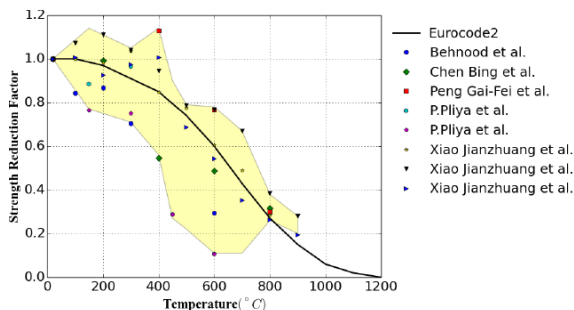
Slika 10. Grafički prikaz promene pritiska vodene pare, temperature i sadržaja vlage po dubini elementa od betona visoke čvrstoće i od običnog betona

Mikroarmirani beton. Mikroarmirani beton je beton koji sadrži vlaknasti materijal koji povećava njegov konstrukcijski integritet. Sadrži kratka diskretna vlakna koja su ravnomerno raspoređena i proizvoljno orijentisana. Kao mikroarmatura mogu da se koriste čelična vlakna, staklena vlakna, sintetička i prirodna vlakna. Čelična, staklena i druga mineralna vlakna su negoriva, dok su organska sintetička i prirodna vlakna goriva. Među navedenim vlaknima čelik i polipropilenska vlakna se najčešće koriste u betonu. Do sada su sprovedena brojna ispitivanja kako bi se istražilo eksplozivno odvajanje i otpadanje komada betona (Explosive spalling) sa PP-vlaknima ili čeličnim vlaknima ili čeličnim i PP-vlaknima (hibridnim vlaknima). Istraživanja su pokazala da se PP vlakna smatraju efikasnim u ublažavanju opasnosti od termičkog “spalling”-a zbog mikrokanala koji nastaju topljenjem PP vlakana (Sl. 11) [26]. PP vlakna se tope na oko 170°C i ostavljaju mrežu otvorenih pora, što olakšava evakuaciju pare i na taj način doprinosi smanjenju unutrašnjeg pritiska para [24]. U Eurokodu je naglašeno da dodavanje PP vlakna u količini od 3 kg/m³ može pomoći

u izbegavanju “spalling”-a. Prečnik, dužina i količina PP vlakana imaju značajan uticaj na smanjenje odvajanja i otpadanja komada betona u požaru, kao i na preostalu čvrstoću betona pri pritisku (Sl. 12) [27]. Za čelična vlakna su izvedeni različiti zaključci o efikasnosti u ublažavanju eksplozivnog “spallinga” u uslovima požara.



Slika 11. Izgled bloka od običnog betona (levo – eksplozivni spaling) i mikroarmiranog betona sa PP vlaknima (desno) nakon izlaganja požarnim temperaturama



Slika 12. Smanjenje čvrstoće pri pritisku, u zavisnosti od temperature betona sa karbonatnim agregatom i mikroarmaturom od PP vlakana

4.1.2. Konstruktivski i arhitektonski detalji

Raspored armature u elementima konstrukcije ima uticaj na stepen oštećenja usled dejstva požara. Armaturene šipke većeg prečnika i neodgovarajući armatureni detalji doprinose povećanju oštećenja usled požara, pogotovo u elementima konstrukcije manjih dimenzija i sa nedovoljnom debljinom zaštitnog sloja betona (Sl. 14). Karakteristična oštećenja u ovim situacijama su pucanje i otpadanje zaštitnog sloja betona i plastične deformacije ogoljene armature.

Postavljanje električnih i drugih instalacija unutar poprečnog preseka elemenata AB konstrukcije izaziva značajna lokalna oštećenja betona i armature. Instalacije u zgradama se najčešće postavljaju u plastične cevi. Ovakve cevi gore i tope se tokom požara, čime se dodatno zagreva beton, a kao posledica toga lokalna oštećenja se prostiru i u betonsko jezgro, uz pojavu lokalnih plastičnih deformacija armature. Na slici 15 je prikazano duboko oštećenje AB grede i ploče usled gorenja instalacija i plastičnih cevi tokom požara.

Nepravilno zaptivanje otvora za prolaz instalacija omogućava nekontrolisano i brzo širenje požara. Na slici 16 ilustrovano je širenje požara po vertikali u oba smera, koje je izazvano nezaptivenim otvorima za instalacije u međuspratnim konstrukcijama i fasadnim zidovima bez horizontalnih požarnih barijera.

4.1.3. Postojanje defekata i prethodnih oštećenja

Defekti (betonska gnezda, zone segregacije, nepravilno izvedeni prekidi i nastavci betoniranja, nedovoljna debljina zaštitnog sloja betona, neravne ivice betonskih elemenata, itd.) i oštećenja (prsline i pukotine), koji postoje u konstrukciji pre nastanka požara, utiču veoma nepovoljno na brzinu pojave i dubinu oštećenja. Kao posledica postojanja defekata, oštećenja usled destruktivnog dejstva požara se prostiru dublje u betonsku masu i najčešće zahvataju matricu betona, pa čak i betonsko jezgro. Karakteristična oštećenja u tim situacijama su pucanje i otpadanje debljih komada betona, narušavanje athezije između betona i armature, plastične deformacije armature, kao i lokalno smanjenje mehaničkih

karakteristika betona. Uticaj nepravilno izvedenih prekida i nastavaka betoniranja na stepen oštećenja usled dejstva požara, prikazan je na slici 17.

4.1.4. Postojanje i vrsta zaštitnih i dekorativnih obloga

Neorganske mineralne obloge na betonskim površinama (malter, gips-kartonske ploče, keramičke i kamene pločice) imaju veoma važnu ulogu u zaštiti elemenata AB konstrukcije od požara. Prednost primene ovih materijala je dvostruka. Oni su negorivi i imaju malu termičku provodljivost. Međutim, ovi materijali nisu vatrostalni i tokom požara mogu biti veoma ozbiljno oštećeni, pa čak i potpuno uništeni. Iako su obloge od ovih materijala relativno tanke (debljine 2-5 cm) one sprečavaju brzo zagrevanje betona u AB elementima konstrukcije, kao i pojavu većih oštećenja, odnosno posredno povećavaju njihovu požarnu otpornost. Nasuprot neorganskim materijalima, organske obloge (drvo, plastika, tekstil itd.) su gorivi materijali i doprinose lokalnom povećanju temperature na površini betona, što dovodi do intenzifikacije stepena oštećenja usled požarnog opterećenja. Uticaj vrste obloge na stepen oštećenja armiranobetonskih stubova ilustrovan je na slici 18.



Slika 13. Karakteristična oštećenja sitnorebraste tavanice usled požara



Slika 14. Karakteristična oštećenja AB rebra usled požara, izazvano nepravilnim rasporedom armature



Slika 15. Lokalno duboko otpadanje komada betona i deformisana šipka armature, usled topljenja instalacija unutar poprečnog preseka (levo – greda, desno – ploča)



Slika 16. Širenje požara po vertikalni u oba smera [9]



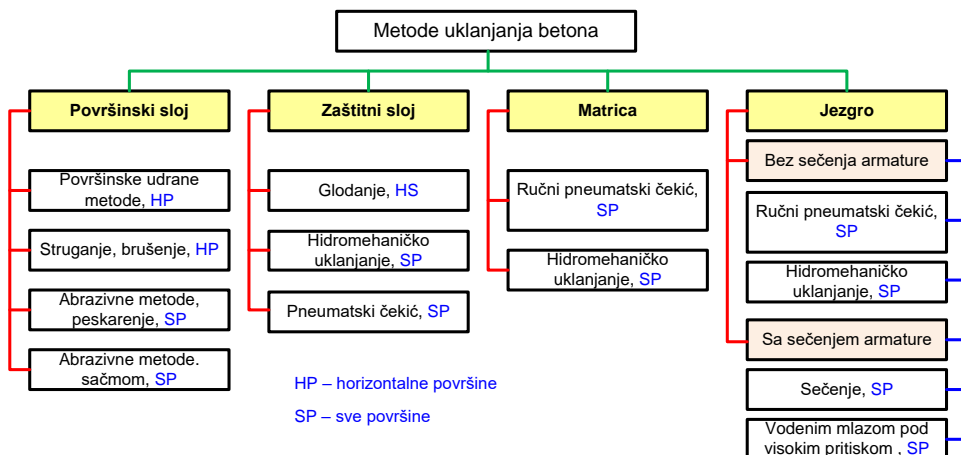
Slika 17. Uticaj defekata na stepen oštećenja sitnorebraste tavanice usled požara



Slika 18. Uticaj vrste dekorativne obloge na stepen oštećenja stubova usled požara

5. METODE ZA UKLANJANJE BETONA

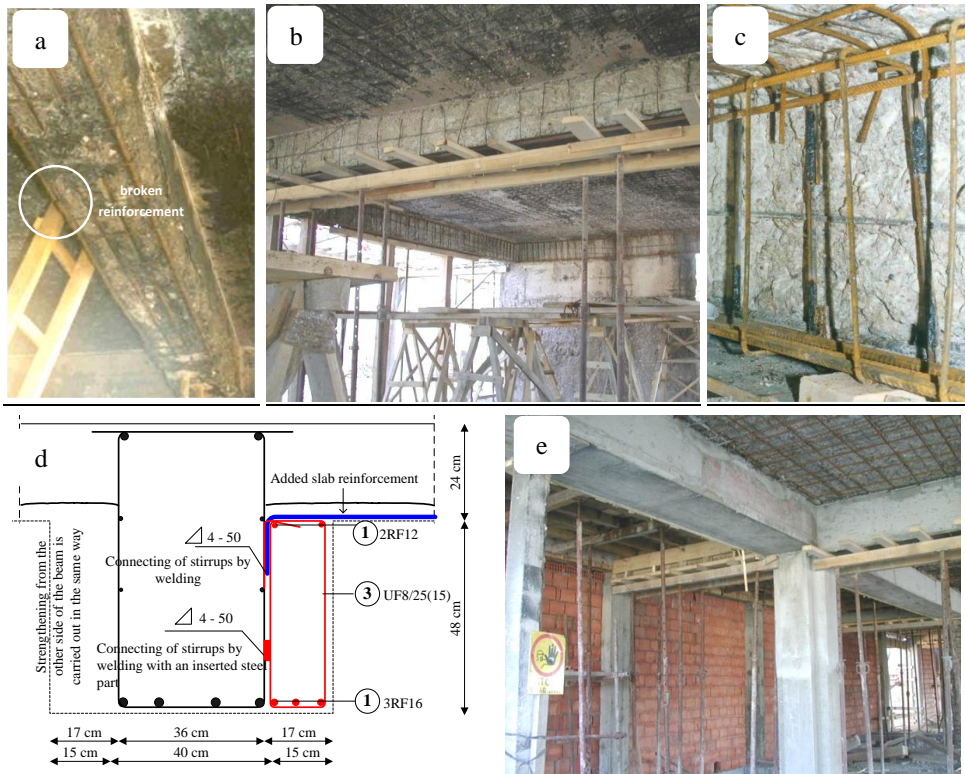
Pre početka sanacije i/ili pojačavanja konstrukcije potrebno je da se privremeno uklone sva dodatna opterećenja i da se podupre konstrukcija. Pored obezbeđenja stabilnosti konstrukcije tokom izvođenja sanacionih radova, nabrojane aktivnosti su važne u slučaju konstrukcijske sanacije, kada se očekuje da novi betonski slojevi preuzmu svoj deo opterećenja u saniranim elementima. U sklopu sanacionih radova veoma važnu ulogu ima izbor odgovarajuće metode za uklanjanje betona. Budući da postoji veoma puno različitih metoda za uklanjanje betona, koje se razlikuju u odnosu na njihove mogućnosti i ograničenja tokom primene, nije lako odabrati odgovarajuću metodu. Zbog toga su autori ovog rada predložili sledeće metode za uklanjanje betona, koje su povezali sa oštećenim delom betonskog preseka (Sl. 19).



Slika 19. Predlog metoda za uklanjanje betona

6. IZBOR METODE SANACIJE I SANACIONIH MATERIJALA

Na osnovu preporuka za sanaciju armiranobetonskih konstrukcija oštećenih usled požara u analiziranoj literaturi [6, 21, 22] i na osnovu sopstvenog profesionalnog iskustva autora ovog rada [15-17], odluka o opštoj strategiji sanacije (konstrukcijska ili nekonstrukcijska sanacija) uglavnom zavisi od dubine zahvaćenog dela poprečnog preseka elementa konstrukcije i stanja armature. Nekonstrukcijska sanacija je zadovoljavajući izbor, ako šipke armature nisu vidljive ili su samo lokalno otkrivene. U svim ostalim slučajevima neophodna je konstrukcijska sanacija: kada je vidljiva armatura, narušena adhezija između betona i armature, postoje plastične deformacije armature, konstrukcijski elementi imaju velike ugibe itd. Konstrukcijska sanacija je takođe obavezna, čak i kada nisu uočena prethodno nabrojana oštećenja, ali ako postoji unutrašnje raslojavanje betona u jezgru preseka. U nekim slučajevima, osnovni razlozi za odabir konstrukcijske sanacije je sumnja u preostali kapacitet nosivosti konstrukcije, kao i namera da se obezbedi dodatna konstrukcijska bezbednost tokom buduće eksploatacije. Za lakše donošenje odluke o izboru metode sanacije korisne mogu biti informacije u Tabeli 2. Jedan primer sanacionog rešenja za oštećenu armiranobetonsku gredu usled požara, prikazan je na slici 20.



Slika 20: Proces pojačavanja oštećene AB grede:
 a) Izgled AB grede, koja je oštećena usled dejstva požara,
 b) Podupiranje grede i uklanjanje oštećenog betona,
 c) Postavljanje nove armature,
 d) Detalj povećanja poprečnog preseka i rasporeda dodatne armature,
 e) Izgled grede nakon sanacije - pojačavanja

Tabela 2
Predloženi materijali i metode sanacije

Stepen oštećenja	Zahvaćeni deo poprečnog preseka	Opšti metod sanacije	Kratak opis
1	Tanak površinski sloj	Lokalna površinska sanacija	Nekonstrukcijski sanacioni malter (ručno nanošenje)
2	Zaštitni sloj betona	Novi zaštitni sloj betona sa/ili bez tanke mrežaste armature	Konstrukcijski sanacioni malter (nanošenje rukom ili tehnikom prskanja) Torkret beton sa mrežastom armaturom
3	Betonska matrica	Konstrukcijska sanacija i pojačanje konstrukcije manjeg obima	Ponovno formiranje osnovnog preseka betona sa ili bez delimične zamene oštećenih šipki armature (samougrađujući beton ili torkret beton sa mrežastom armaturom) Povećanje poprečnog preseka i dodavanje novih armaturnih šipki (samougrađujući beton ili torkret beton)
4	Betonsko jezgro	Značajne mere pojačavanja ili zamene AB elemenata	Povećanje poprečnog preseka i dodavanje novih armaturnih šipki (samougrađujući beton ili torkret beton) Novi AB elementi

7. ZAKLJUČCI

Autori ovog poglavlja su, kroz sažeto teorijsko razmatranje mehanizama oštećenja betona i armature usled požara, klasifikaciju oštećenja AB konstrukcija i moguće metode za sanaciju, uzimajući u obzir zahvaćeni deo poprečnog preseka, pokušali da pomognu inženjerima u praksi i studentima građevinarstva da razumeju kompleksno ponašanje armiranog betona pri visokim temperaturama i da lakše donesu odluku o mogućem sanacionom rešenju.

Nakon mnogo godina iskustva u proceni stanja i sanaciji konstrukcija nakon požara, kao i na osnovu analize povredivosti elemenata konstrukcije na nivou materijala, nivou pojedinačnog elementa i na nivou analize kompletne noseće konstrukcije, autori ovog rada zaključili su da armiranobetonske konstrukcije imaju zadovoljavajuću požarnu otpornost. Međutim, analizirani uticajni faktori, kao što su vrsta betona, oblik i dimenzije elemenata konstrukcije, defekti itd., mogu da smanje ili povećaju povredivost kompletne konstrukcije. Sa druge strane, spregnute ili prethodnonapregnute konstrukcije su osteljivije na visoke temperature u odnosu na armiranobetonske konstrukcije. Kada se projektuju spregnute konstrukcije ili kada se elementi noseće konstrukcije izvode kombinacijom različitih materijala, povredivost noseće konstrukcije u celini zavisi od povredivosti najosteljivijeg konstrukcijskog elementa. Zbog toga bi svi elementi primarne noseće konstrukcije trebalo da imaju isti stepen povredivosti, što se postiže adekvatnim izborom konstrukcijskog sistema, materijala za elemente konstrukcije i aktivnim merama zaštite od požara.

REFERENCES

- [36] Alonso, C., 2009, "Assessment of post-fire reinforced concrete structures: Determination of depth of temperature penetration and associated damage" Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II – Taylor & Francis Group, pp. 471-477.
- [37] Balázs, G. L., Lublóy, E., 2012, *Fire reinforced concrete structures in and after fire*, Concrete Structures, pp. 73-80.

- [38] Bilbija, N., Matović, V., 2009, *Primenjena petrografija - svojstva i primene kamena*, Beograd, Građevinska knjiga.
- [39] Breunese, A., Fellingner, J., 2004, *Spalling of Concrete—An Overview of Ongoing Research in the Netherlands*, Proceedings of the Third International Workshop: Structures in Fire, Ottawa, Canada, pp. 249–258.
- [40] CEN (2004). Eurocode 2: *Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design*.
- [41] Concrete Repair Manual, ACI, Volume 2, 2003, pp. 1837-1910.
- [42] Fletcher, I. et al., 2006, *Performance of concrete in fire: a review of the state of the art, with a case study of the Windsor tower fire*, Proceedings of the 4th International Workshop in Structures in Fire, Portugal, 2006, pp. 779-790.
- [43] Diederichs, U., Jumppanen, U. M., Penttala, V., 1989, *Behaviour of HSC at high temperatures*, Helsinki University of Technology, Report 92, 78.
- [44] Folić, R., Radonjanin, V., Malešev, M., 2002, *The assessment of the structure of Novi Sad open University damaged in fire*, J. Construction and Building Materials, No.16, pp. 427- 440.
- [45] Ingham, I., Tarada, F., 2007. *Turning Up the Heat – Full service fire safety engineering for concrete structures*, Proceedings “Concrete structures in fire”, pp. 27-30.
- [46] Jansson, R., 2013: Fire spalling of concrete – Theoretical and Experimental studies, Doctoral Thesis in Concrete Structures, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, pp. 154.
- [47] Keun Lee: *Behaviour of concrete Cylinder under elevated temperature - Focused on surface spalling*, University of Colorado, Boulder.
- [48] Klingsch, E. W. H., 2014.: *Explosive spalling of concrete in fire*, Doctoral Thesis, ETH, Zurich.
- [49] Khoury, G. A., 2000, *Effect of fire on concrete and concrete structures*, Imperial College, London, UK, Prog. Struct. Eng. Mater. 2, 429-447.
- [50] Malešev, M., Radonjanin, V., Folić, R., Lukić, I., 2008: Karakteristična oštećenja AB konstrukcija zahvaćenih požarom, Simpozijum DGKS, Zlatibor, Zbornik radova, pp. 365-372.
- [51] Radonjanin, V., Folić, R., Malešev, M., 2004, *Investigation, Evaluation and Repair of Reinforced Concrete Structures Damaged in Fire*, Workshop "Extreme Loadings, Aging and Durability of Concrete Structures", Hydro-Quebec, McGill University and Laboratoire de Beton, Montreal.
- [52] Radonjanin, V., Malešev, M., 2008.: *Repair of concrete structures in the light of new European standards*", Introductory report, Conference, Society of structural engineers of Serbia, Zlatibor, Proceedings, pp. 147-158.
- [53] Andberg, Y., 1997, *Spalling phenomena OF HPC and OC*, International workshop on fire performance of HSC", Proceedings, NIST, 69-75.
- [54] Felicetić, R., Gambarova, P.G., Bamote, P., 2013, *Thermal and mechanical properties of light-weight concrete exposed to high temperature*, FIRE AND MATERIALS Fire Mater. 37: 200–216.
- [55] Radonjanin, V., Malešev, M., Folić, R., 2013: *Repair of fire damaged RC structures*, Congress of Structural Engineers of Macedonia, Ohrid, Macedonia.
- [56] Raupach, M., 2006, *Concrete repair according to the new European standard EN 1504*, Concrete repair, rehabilitation and retrofitting, T & F Group, London, pp.1-10.
- [57] Repairability of fire damaged structures, CIB W 14 Report, May 1989.
- [58] Rotter, J.M. et al. 1999: Structural performance of redundant structures under local fires, Proceedings of Interflam 99, Edinburgh, pp. 12.
- [59] Hager, I., 2013, *Behaviour of cement concrete at high temperature*, Bulletin of the Polish Academy Of Sciences, Technical Sciences, Vol. 61, No.1.
- [60] Moreira de Oliveira Pino, E., 2013, *Behaviour of structural lightweight concrete subjected to high temperatures*, extended abstract of PhD, University of Lisboa, 12.

- [61] Smith, K., Atkinson, T., 2010, *PP fibres to resist fire-induced concrete spalling*, TunnelTalk.
- [62] Tan, K. T., Liu, J. C., Liu, J., 2015, *Fire performance of fiber-reinforced concrete: research needs*, Conference 4th International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, 20.

PROCENA STANJA I SANACIJA AB KONSTRUKCIJE OŠTEĆENE U POŽARU - STUDIJA SLUČAJA

Vlastimir Radonjanin, Mirjana Malešev

1. UVOD

Deo zgrade Novosadskog otvorenog univerziteta bio je zahvaćen požarom koji se desio 6 aprila 2000. godine (Sl. 1 i 2). Požar je izbio na XII spratu i veoma brzo se proširio na poslednjih 6 spratova zgrade. Usled požara, koji je trajao oko 6 sati i koji je uglavnom gašen vodom, noseća konstrukcija objekta je oštećena, dok su fasada, enterijer i instalacije potpuno uništeni na spratovima koji su bili zahvaćeni požarom.



Slika 1. Deveti sprat zahvaćen požarom



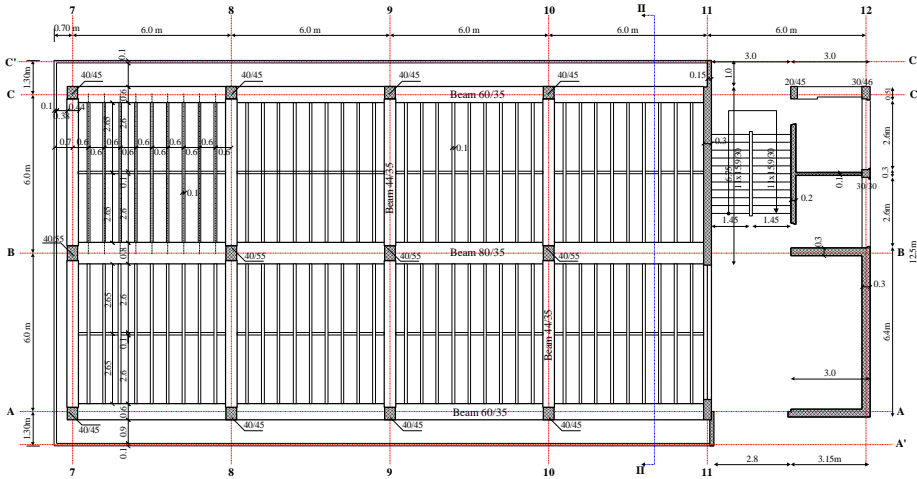
Slika 2. Izgled zgrade nakon požara

Nepovoljna struktura zgrade (nepostojanje vertikalnih požarnih barijera, neizolovani otvori instalacija i stepeništa), velika količina zapaljivih materijala u zgradi, kao i izuzetno velika brzina vetra (13 – 15 m/s) uzrokovali su brzo širenje požara i njegov istovremeni razvoj u vertikalnom i horizontalnom pravcu. Usled požara oštećeno je poslednjih 6 spratova zgrade, ukupne površine od cca 2.400 m².

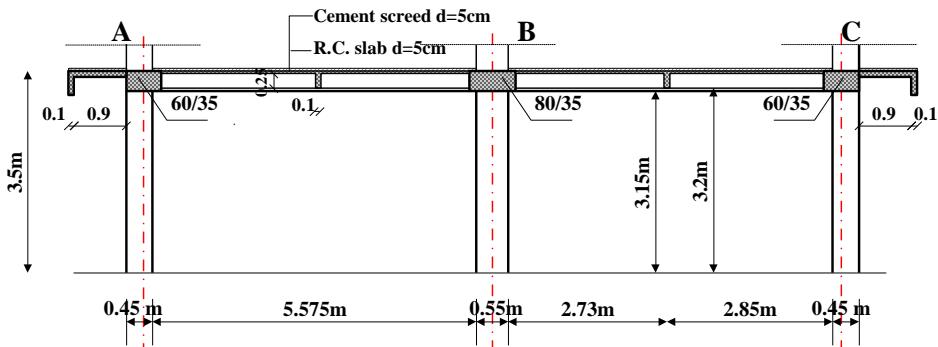
2. OSNOVNI PODACI O OBJEKTU

Zgrada Novosadskog otvorenog univerziteta je sagrađena 1966. godine. Sastoji se od podruma, prizemlja, mezanina i 13 spratova. Dimenzije objekta u osnovi su 30x15 m (Sl. 3), a ukupna visina je 54 m. Visina pojedinih spratova je: podrum – 2,6 m, prizemlje – 6,0 m, prvi sprat (mezanin) – 6,0 m, ostali spratovi – 3,5 m (poprečni presek prikazan na slici 4).

Noseća konstrukcija zgrade je armiranobetonski skelet, sa AB stubovima u rasteru od 6 m u podužnom i poprečnom pravcu i AB zidovima u stepenišnom prostoru.



Slika 3. Osnova tipskog sprata



Slika 4. Poprečni presek tipskog sprata

Osnovni elementi noseće konstrukcije su:

- Armiranobetonski stubovi pravougaonog poprečnog preseka, sa najvećim dimenzijama u prizemlju (50x90 cm i 50x76 cm) i najmanjim dimenzijama na XIII spratu (35x40 cm i 35x35 cm).
- Armiranobetonske podužne grede, raspona 6 m, sa pravougaonim poprečnim presekom promenljivih dimenzija, od VIII do XI sprata - 80x35 cm i 60x35 cm, na XII i XIII spratu - 35x45 cm.
- Armiranobetonske poprečne grede, raspona 6 m, sa pravougaonim poprečnim presekom, visine 35 cm i promenljive širine, 44 – 38 cm od VIII do XIII sprata.
- Armiranobetonski zidovi su izvedeni celom visinom objekta u stepenišnom prostoru i u prostoru za liftove, sa konstantnom debljinom od 30 cm.
- Armiranobetonski zidovi, koji su izvedeni samo u prizemlju i na prvom spratu.

- Armiranobetonska sitnorebrasta konstrukcija, sa pločom debljine 5 cm i rebrima 10x25 cm na međusobnom osovinskom rastojanju od 60 cm.
- Puna armiranobetonska ploča iznad prizemlja i mezanina.
- Armiranobetonske fasadne grede, dimenzija 10x32 cm.
- Armiranobetonsko dvokrako stepenište, izvedeno celom visinom objekta, sa AB pločom debljine 10 cm.
- Šipovi sa veznim temeljnim gredama.

Noseća čelična konstrukcija fasade zgrade je povezana sa armiranobetonskom konstrukcijom. Izvedena je samo na 3 fasade objekta i to od III sprata do vrha.

Pregradni zidovi od III do XII sprata su izvedeni kao lake pregrade sa drvenom ramovskom konstrukcijom i oblogom od ploča od iverice. Spušteni plafoni su izvedeni od perforiranih ploča na drvenoj podkonstrukciji. Unutrašnji deo fasadnih parapeta je obložen pločama od presovane iverice. Spušteni plafon na XIII spratu je izveden od maltera na žičanoj mreži. Na poslednjem (XIII spratu) AB stubovi su obloženi mermernim pločama postavljenim u cementni malter.

3. PROCENA STANJA KONSTRUKCIJE NAKON POŽARA

Radi procene stepena oštećenja elemenata noseće konstrukcije i fasade objekta, kao i da bi se odredio obim potrebnih sanacionih radova, urađena su sledeća ispitivanja i snimanja:

- Naknadno ispitivanje kvaliteta ugrađenih materijala (betona i armature),
- Detaljan vizuelni pregled AB betonske konstrukcije i čelične konstrukcije fasade objekta,
- Kontrolni proračun konstrukcije zgrade.

Naknadno utvrđivanje čvrstoće betona pri pritisku sprovedeno je primenom destruktivne i nedestruktivne metode ispitivanja. Broj i raspored mernih mesta odabran je sa ciljem da se utvrde moguće promene mehaničkih karakteristika betona usled destruktivnog dejstva visokih temperatura tokom požara. Zbog toga su ispitivanja obavljena na AB elementima koji su direktno bili izloženi požaru, kao i na elementima konstrukcije koji su bili zaštićeni malterom ili mermernim pločama.

Na svakom spratu koji je bio zahvaćen požarom svi elementi AB konstrukcije su detaljno pregledani, sa ciljem da se registruju:

- Defekti koji su posledica grešaka u fazi građenja objekta,
- Oštećenja koja su izazvana dejstvom požara.

3.1. Stanje elemenata noseće konstrukcije objekta od VIII do XIII sprata

U ovom poglavlju prikazani su samo zaključci o stanju konstrukcije zgrade nakon požara i fotografije karakterističnih oštećenja pojedinih elemenata konstrukcije. Detaljan opis stanja konstrukcije nakon požara i svi rezultati terenskih i laboratorijskih ispitivanja dati su u radovima [3, 5].

Opšti izgled jednog sprata nakon požara i raščišćavanja prikazan je na slici 5.



Slika 5. Izgled oštećene AB konstrukcije na VIII spratu nakon požara i čišćenja

Zaključci o stanju AB konstrukcije izložene visokim temperaturama tokom požara, izvedeni na osnovu analize rezultata ispitivanja i pregleda, su:

- Čvrstoća betona pri pritisku u AB stubovima, AB gredama i AB zidovima, koji su direktno bili izloženi požarnom opterećenju, bila je cca 30 MPa.
- Čvrstoća betona pri pritisku u sitnorebrastim tavanicama, koje su direktno bile izložene požaru, bila je oko 20 MPa.
- Ispitane armaturne šipke koje su bile izložene dejstvu požara, ali nisu imale vidljive deformacije, imale su mehaničke karakteristike, koje odgovaraju kvalitetu glatke armature GA 240/360.
- Smanjenje čvrstoće betona pri pritisku od cca 30% u odnosu na elemente koji nisu direktno bili izloženi požaru, kao i očuvanje mehaničkih karakteristika ugrađene glatke armature, potvrdili su teorijska saznanja o ponašanju betona i armature, kada su izloženi požaru.
- Armiranobetonska konstrukcija je bila izvedena sa brojnim defektima (betonska gnezda, nedovoljna debljina zaštitnog sloja betona, geometrijske imperfekcije, nepravilno izvedeni prekidi i nastavci betoniranja).
- Svi AB stubovi su bili oštećeni usled dejstva požara (karakterističan izgled je prikazan na slici 6). Površinski sloj betona, prosečne debljine 4 cm, bio je trošan, ispucao i delimično otpao. U unutrašnjosti betonskog preseka, na dubini od cca 12 cm, postojale su pukotine koje ukazuju na odvajanje spoljašnjeg dela betona od unutrašnjeg zdravog betonskog jezgra. Ivice stubova su ispucale duž glavne armature i beton se odvojio ili je otpao. Atehzija između betona i armature je narušena.
- Sve podužne i poprečne armiranobetonske grede su bile oštećene usled požara (karakterističan izgled dat je na slici 7). Površinski sloj betona na donjoj strani greda je bio trošan, ispucao i većim delom je otpao. Debljina ovog sloja iznosila je cca 5 cm. Beton duž ivica greda je ispucao ili je otpao čitavom dužinom, a šipke podužne armature su bile ogoljene. Na bočnim stranama greda uočene su vertikalne pukotine širine 0,5 mm i horizontalne prsline na spoju poprečnih greda i ploče. Atehzija između betona i armature u donjem delu greda je bila narušena.
- Sitnorebrasta tavanica je bila najoštećeniji element noseće konstrukcije zbog malih dimenzija i nepovoljnog položaja u odnosu na požarno opterećenje (karakterističan izgled prikazan je na slikama 8 i 9). Donji delovi rebara do visine od 15 cm su

većim delom otpali, dok su preostali delovi ispucali i bili su trošni. Armaturne šipke su bile ogoljene čitavom dužinom rebara i bila je narušena athezija između armature i betona. Registrovane su vertikalne i kose pukotine na delu rebara gde se armatura povija iz donje u gornju zonu, kao i horizontalne pukotine duž spoja rebara i ploče sitnorebraste tavanice. Na ploči, debljine 5 cm, postoje mrežaste prsline na donjoj strani. Sloj betona debljine 3 cm je trošan i delimično je otpao, a to je posebno izraženo na mestima skokovitih geometrijskih promena, kao i na mestima nepravilno izvedenih prekida i nastavaka betoniranja, gde su se oštećenja usled požara proširila celom debljinom ploče.

- Armiranobetonski zidovi u osi 11 su bili oštećeni na strani koja nije bila malterisana i koja je direktno bila izložena dejstvu požara. Na toj strani AB zida sloj betona, debljine 4 cm, je bio trošan, ispucao i otpao je delimično, naročito na mestima betonskih gnezda. Na površini zida uočene su mrežaste i vertikalne prsline. Armatura je delimično bila ogoljena.



Slika 6. Karakterističan izgled AB stuba nakon požara



Slika 7. Karakterističan izgled podužne grede nakon požara

3.2. Stanje elemenata konstrukcije na XIII spratu

- Čvrstoća betona pri pritisku u stubovima bila je oko 60 MPa.
- Čvrstoća betona pri pritisku u AB zidu u osi 11 bila je oko 30 MPa.
- Armiranobetonski stubovi nisu bili oštećeni usled dejstva požara zbog mineralne obloge koja je na njima postojala. Na stubovima je uočeno samo nekoliko lokalnih površinskih oštećenja betona.
- Na armiranobetonskom zidu u osi 11, na strani prema osi 10, koja nije bila omalterisana, uočena su ista oštećenja usled dejstva požara, kao i na donjim spratovima.
- Armiranobetonske grede i sitnorebrasta tavanica nisu bili oštećeni.



Slike 8 i 9. Karakterističan izgled sitnorebraste tavanice nakon požara

3.3. Stanje čeličnih elemenata fasade

- Karakteristično oštećenje elemenata čelične fasade je bilo izvijanje elemenata usled sprečenih temperaturnih dilatacija.

Nakon analize svih prikupljenih podataka zaključeno je da su registrovana oštećenja na elementima noseće armiranobetonke konstrukcije od VIII do XII sprata takva, da je ugrožena nosivost i stabilnost ovog dela objekta. Međutim, zaključeno je da se oštećeni elementi noseće konstrukcije mogu uspešno sanirati.

Nakon analize stanja čelične fasade objekta od VIII do XIII sprata, zaključeno je da je ona u potpunosti oštećena i da se, s obzirom da nije moguća sanacija, mora zameniti.

4. SANACIJA I POJAČAVANJE ELEMENATA NOSEĆE AB KONSTRUKCIJE

U ovom poglavlju ukratko su opisane primenjene mere sanacije i pojačavanja elemenata noseće konstrukcije, koje su odabrane u skladu sa vrstom i stepenom oštećenja, kao i sa vrstom elemenata noseće konstrukcije [4, 7].

4.1. AB stubovi

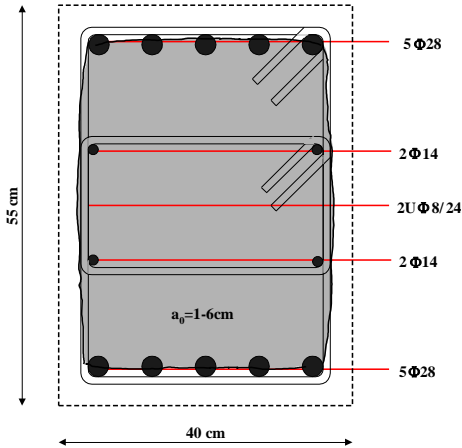
Prilikom izbora sanacionog rešenja za AB stubove od VIII do XIII sprata, uzeto je u obzir postojanje pukotina u unutrašnjem jezgru stubova, kao i oštećenja u površinskom sloju betona. Osim zamene oštećenog sloja betona, predviđeno je bilo i dodavanje nove podužne i poprečne armature, kao i povećanje poprečnog preseka stubova.

Sanacione mere su obuhvatile sledeće operacije:

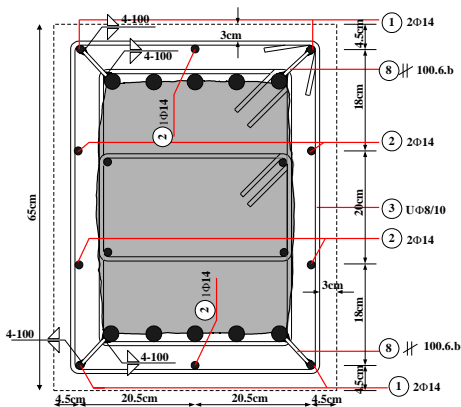
- Uklanjanje oštećenog, trošnog i ispucalog betonskog sloja, sve do „zdravog“ betona, uz otkrivanje šipki podužne armature (Slike 10 i 11),
- Postavljanje nove podužne armature $\varnothing 14$ mm i uzengija $\varnothing 8/10$ cm (Slike 12 i 13),
- Povezivanje nove podužne armature sa postojećom armaturom pomoću dodatnih čeličnih ploča i zavarivanja (Slika 12),
- Premazivanje površine postojećeg betona i armature sredstvom za vezu starog i novog betona,

- Izvođenje dodatnog betonskog sloja, primenom polimer-modifikovanog betona klase C40/50, u dve faze, gravitacionim nalivanjem kroz otvore u ploči iznad stubova (Slike 14-16).

Ovim rešenjem sanacije i pojačavanja oštećenih AB stubova, njihove dimenzije u poprečnom preseku su povećane za 10 cm.



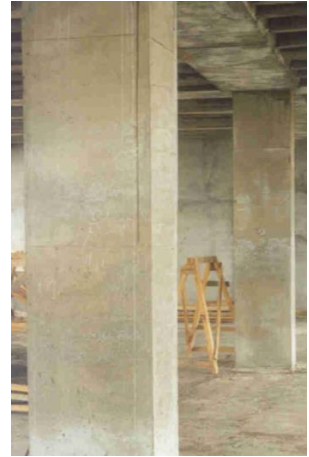
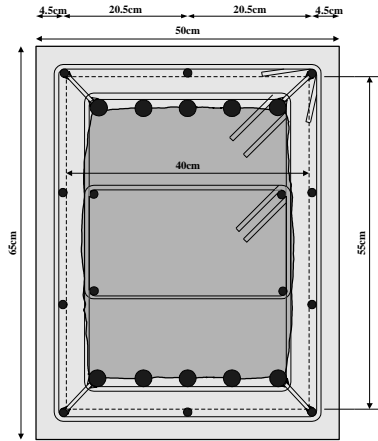
Slike 10 i 11. Uklanjanje oštećenog betonskog sloja sa stubova



Slike 12 i 13. Postavljanje nove dodatne armature stubova



Slika 14. Ugrađivanje betona

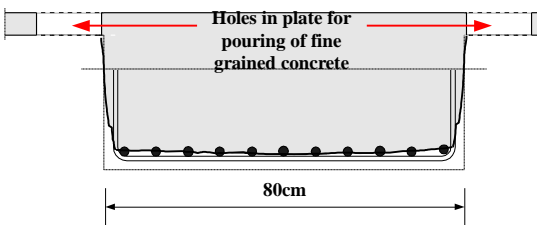


Slike 15 i 16. Saniran AB stub

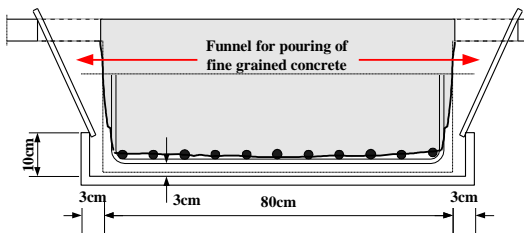
4.2. AB grede

Uzimajući u obzir činjenicu da su se oštećenja na AB gredama pojavila samo u zaštitnom sloju betona i da armatura nije bila oštećena, ovi elementi konstrukcije sanirani su samo zamenom oštećenog zaštitnog sloja betona. Sanacija AB greda se sastojala iz:

- Uklanjanja oštećenog, trošnog i ispucalog zaštitnog sloja betona sa donje i bočnih strana greda (sve do „zdravog“ betona, uz delimično otkrivanje podužne armature i uzengija (Slike 17 i 18),
- Ugrađivanja novog zaštitnog sloja betona, nalivanjem samorazlivajućeg reparaturnog maltera, kroz otvore u ploči sitnorebraste tavanice (Slike 19 i 20),
- Gornji delovi na bočnim stranama greda sanirani su ručnim nanošenjem polimer-modifikovanog cementnog maltera (Slika 21).



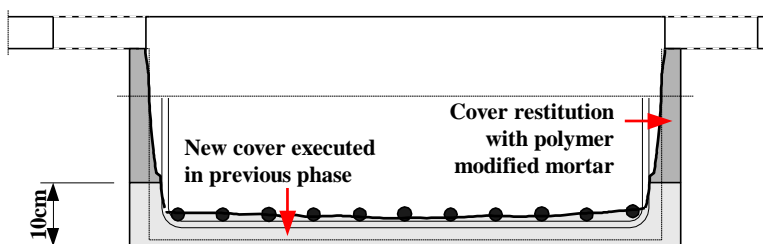
Slike 17 i 18. Uklanjanje oštećenog zaštitnog betonskog sloja i bušenje otvora u ploči sitnorebraste tavanice



Slika 19. Ugrađivanje novog zaštitnog sloja betona na donjoj strani greda



Slika 20. Izgled postojeće AB grede na kojoj je izveden novi zaštitni sloj betona na donjoj strani



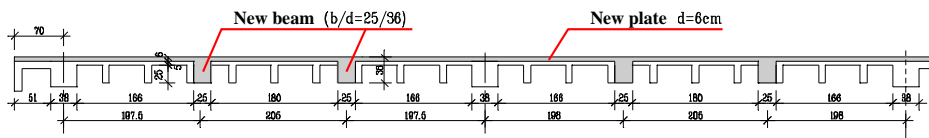
Slika 21. Izvođenje novog zaštitnog sloja betona na bočnim stranama greda

4.3. Sitnorebrasta međuspratna konstrukcija

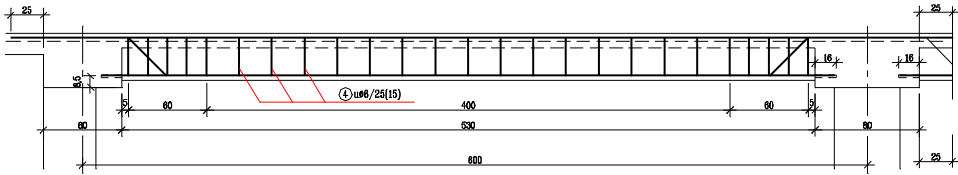
Sitnorebrasta tavanica je bila najoštećeniji element noće konstrukcije. Sanaciono rešenje, koje bi podrazumevalo vraćanje integriteta i nosivosti postojeće sitnorebraste tavanice, zahtevalo bi puno radnika i ručnog rada na sanaciji svakog pojedinačnog rebra sitnorebraste tavanice. Zbog toga, odlučeno je da se međuspratna konstrukcija sanira - pojača, bez uklanjanja sitnorebraste tavanice, izvođenjem novih AB greda u trećinama raspona i novom AB pločom debljine 6 cm iznad postojeće ploče (Slika 22). Na slikama 23 i 24 prikazani su podužni i karakteristični poprečni preseći novih AB greda sa detaljima armature.

Redosled izvođenja sanacionih radova je:

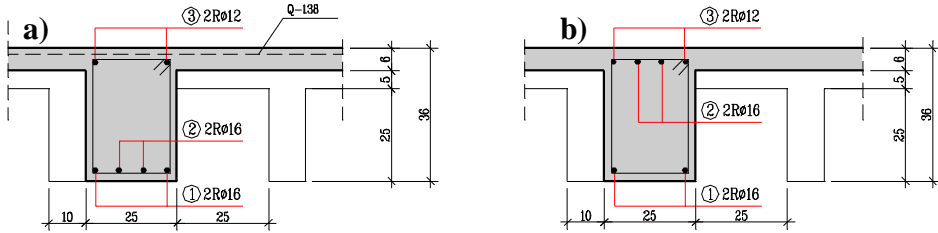
- Uklanjanje trošnih i ispucalih delova betona sa rebara i donje strane ploče, kao i uklanjanje cimente košuljice sa gornje strane,
- Podupiranje rebara sitnorebraste tavanice,
- Uklanjanja delova ploče radi formiranja prostora za nove AB grede (Slike 25 i 26),
- Ugradnja armature novih AB greda uz ankerisanje u postojeće podužne AB grede i postavljanje mrežaste armature nove ploče (Slika 27),
- Betoniranje novih AB greda i ploče betonom klase C30/37 (Slika 28).



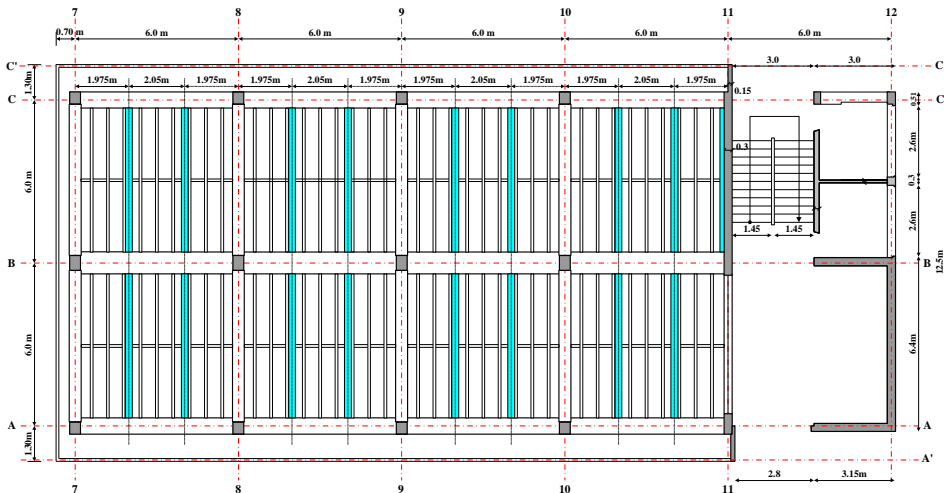
Slika 22. Sanaciono rešenje za sitnorebrastu tavanicu: položaj novih AB greda i dodatne AB ploče



Slika 23. Plan armature novih greda: podužni presek



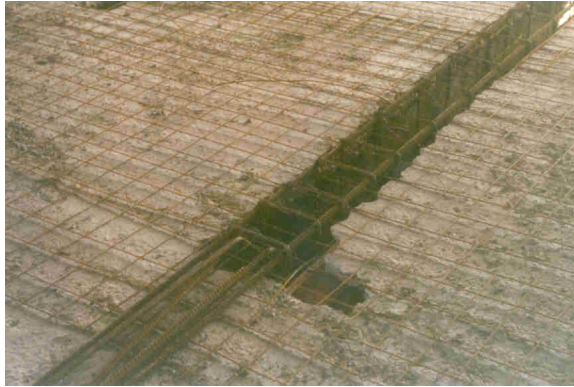
Slika 24. Plan armature novih greda: poprečni presek: a) u sredini raspona; b) u zoni oslonca



Slika 25. Raspored novih AB greda u postojećoj sitnorebrastoj tavanici



Slika 26. Postavljena armatura za nove greda



Slika 27. Postavljena mrežasta armatura za novu ploču



Slika 28. Betoniranje nove ploče

REFERENCES

- [63] Bungey, J. H. 1982. The testing of concrete in structures. New York.
- [64] Damage Classification 1992. RILEM TC 104 DCC. Proceeding.
- [65] Folić, R., Radonjanin, V., Malešev, et al, 2000, Study about assessment of load-bearing structure of Novi Sad Open University building after fire, E-031-700/145, Novi Sad, pp.1-145.
- [66] Folić, R., et al, 2000. Repair project of damaged load-bearing structure of Novi Sad Open University building after fire. Faculty of technical sciences, Institute for architecture and civil engineering. Novi Sad.
- [67] Folić, R., Radonjanin, V., Malešev, M., 2002. *The assessment of the Structure of Novi Sad Open University Damaged in Fire*. Journal "Construction and Building Materials", No. 16. Elsevier Science. pp.427 - 440.
- [68] Radonjanin, V., Malešev, M. 1997. Diagnosis of industrial buildings state. Contemporary civil engineering practice '97. Proceedings. DGITNS,. Novi Sad. pp.105 - 123.

- [69] Radonjanin, V., Folić, R., Malešev, M., Pavlović, P., 2002. *The Rehabilitation and Strengthening of the High Building Structure Damaged in a Fire*. The Seventh International Scientific Conference. Kosice. Slovakia.

Deo III

Zakonodavstvo zapadnog Balkana i studije slučaja

PERSPEKTIVE INŽENJERSTVA BEZBEDNOSTI OD POŽARA NA ZAPADNOM BALKANU

Jelena Marković, Edisa Nukić

1. Bosna i Hercegovina, studije slučaja

U nastavku su predstavljena tri karakteristična požara, nedavno zabilježena u BiH, sa različitim uzrocima i izvorima paljenja. Dva analizirana požara desila su se u trgovinskim centrima a, kako je vještačenjima utvrđeno, za uzrok su imali: prvi požar kvar na električnoj instalaciji i uređaju, drugi požar je podmetnut - namjerno paljenje; dok je požar u stambenom objektu posljedica eksplozije metana usljed nepropisno izvedenih kanalizacionih instalacija i septičke jame predmetnog objekta.

1.1. Požar u trgovinskom centru „Bingo“ Opština Lukavac

Dana 27. 7. 2014. godine oko 12,28 sati u poslovnom objektu trgovinskog centra „Bingo“, Opština Lukavac, dogodio se požar u dijelu objekta gdje se nalazi magacinski prostor koji je u cjelosti izgorio (slika 1). Požar je započeo na malom cijevnom ventilatoru koji se nalazio u gornjem dijelu zida između magacinskog prostora i sanitarnog čvora (WC-a).

Uzrok požara je, prema nalazima vještaka, strujno preopterećenje ili indirektni (nepotpuni) kratak spoj Cu provodnika priključnog kabla (P/L-2'0,75 mm²) cijevnog ventilatora, koji se nalazio u gornjem dijelu zida između magacinskog prostora i sanitarnog čvora (WC-a) [1].

U požaru nije bilo ljudskih žrtava, nije bilo pojava eksplozija, kako u opožarenom objektu tako ni u bližem okruženju opožarenog objekta. Materijalna šteta koju je izazvao predmetni požara je veoma velika.



Slika 1. Požar u TC „Bingo“ Lukavac

Detalji nastanka i razvoja požara prikazani su na slici 2, video snimka je preuzeta s nadzorne kamere u opožarenom magacinskom prostoru dobijenog od zaštitarske agencije „Flek“ koja vrši materijalno obezbjeđenje poslovnog objekta, gdje se tačno vidi mjesto početka i sam razvoj požara.



Slika 2. Detalji nastanka i razvoja požara

Uzrok velikog broja požara u stambenim, poslovnim i javnim objektima kako u svijetu tako i u BiH, su kvarovi na električnim instalacijama. Budući da broj navedenih objekata u BiH konstantno raste, kao i ukupan broj električnih potrošača u njima, povećava se i broj lokacija na kojima može doći do požara uzrokovanih kvarovima na električnim instalacijama. Ako se tome dodaju i činjenice da se na našem tržištu pojavljuju nekvalitetni

električni proizvodi, čije se karakteristike ne podudaraju sa deklarisanim, kao i da veliki broj neovlašćenih lica vrši izvođenje, popravke i prepravke električnih instalacija i uređaja, dolazi se do zaključka da je vjerovatnoća nastanka požara usljed kvarova na električnim instalacijama u našoj zemlji veća nego u zemljama sa strožijom zakonskom regulativom.

Iz navedenog se vidi potreba za donošenjem strožije zakonske regulative u BiH, koja se odnosi na: kriterijume za periodičnost pregleda električne instalacije, dozvole za plasiranje električnih proizvoda na tržište i kaznene mjere pojedincima koji neovlašćeno vrše izvođenje, popravke i prepravke električnih instalacija i uređaja. Pored toga, potrebno je organizovati programe usmjerene ka edukaciji stanovništva, u okviru kojih bi se ukazalo na potencijalne posljedice nepoštovanja zakonske regulative iz pomenute oblasti. U svim navedenim naporima, snage treba da udruže naučno-istraživačke ustanove, kako bi zajedno sticali nova iskustva o najčešćim uzrocima požara uzrokovanih kvarovima na električnim instalacijama i na osnovu stečenih saznanja radili na unapređenju zakonske legislative.

1.2. Požar u trgovinskom centru „Škafa“ Opština Ilidža

Dana 27. 7. 2014. godine oko 22,50 sati u poslovnom objektu Trgovinskog centra „ŠKAFA“, Opština Ilidža, dogodio se požar, koji je imao veoma razorno dejstvo. Uzrok požara: požar pripada kategoriji podmetnutih, odnosno namjerno izazvanih požara [2].

U požaru nije bilo ljudskih žrtava, nije bilo pojava eksplozija, kako u opožarenom objektu tako ni u bližem okruženju opožarenog objekta. Objekat tržnog centra „ŠKAFA“ potpuno je uništen u predmetnom požaru.

Na slikama od 3 do 6 prikazane su fasade i izgled opožarenog objekta, nakon razornog djelovanja požara.



Slika 3. Ulaz u Halu 1. sa ulice



Slika 4. Desna fasada TC u odnosu na glavni ulaz



Slika 5. Lijeva fasada TC u odnosu na glavni ulaz



Slika 6. Ulaz u suteran Hale 2 (suprotno glavnom ulazu)

Detaljnim opservacijama objekta TC, a posebno požarišta, nedvojbeno se može utvrditi da je kompletan radni prostor TC (hala 1 i hala 2) i dio koji je izgrađen od čeličnih konstrukcija, koji spaja ove dvije Hale TC, predstavljao jedan požarni sektor.

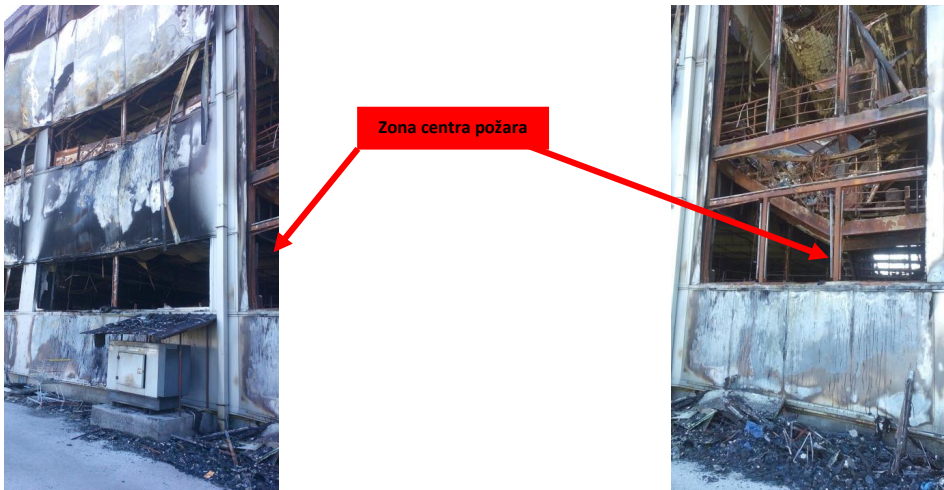
U Elaboratu zaštite od požara navedeno je da se u hali 2, na koti 4,70 m ugrađuju požarna vrata otpornosti 60 minuta. Uzimajući u obzir činjenicu da svi unutrašnji prostori TC predstavljaju jedan vazdušni prostor, ova požarna vrata nemaju nikakav značaj, a ne postoji ni dokaz da su ista ugrađena iako postoji atest o njihovoj vatrootpornosti.

Požarna vrata su inače nepropisno projektovana u Elaboratu jer nisu predviđena za ugradnju u požarni zid čije dimenzije prelaze vanjske dimenzije objekta i potpuno odvajaju požarne sektore u objektu TC. Zbog toga bi i ugradnja istih na projektovanom mjestu bila beskorisna.

Centar požara je sasvim pouzdano bio u veznom dijelu hale 1. i hale 2. gdje se nalazila velika količina uskladištenog platnenog materijala, slike 7, 8 i 9.



Slika 7. Zona centra požara posmatrana iz suterena Hale 2.



Slika 8. Zona centra požara posmatrana sa vanjske – fasadne strane TC



Slika 9. Zona centra požara posmatrana iz suterena Hale 2.

Pošto je centar početka požara bio u dijelu objekta koji spaja dvije hale, da je zid u kojem su projektovana požarna vrata bio izgrađen na propisan način, kao protivpožarni zid, tada sigurno, u vremenu vatrootpornosti protivpožarnih vrata (60 min) ne bi došlo do prenošenja požara iz prostora gdje se nalazio centar početka požara u prostore hale 2. Propusti vlasnika poslovnog objekta u kojem je došlo do pojave i razornog djelovanja požara ogledaju se u sljedećem:

- cijela unutrašnjost TC bila je jedan požarni sektor,
- u objektu nisu bile izvedene instalacije za automatsko gašenje požara,
- u objektu nisu bile izvedene instalacije vatrodojave, koje bi blagovremeno dojavile požar vatrogasnim jedinicama,
- u objektu se odlagao zapaljivi materijal bez zona požarnog odvajanja istog,
- požar je neblagovremeno dojavljen vatrogasnim jedinicama (jer čuvar nije imao kredita u mobitelu),
- stručna lica zaštitarske službe, kada su dobila signal o provali u objekt, nisu pregledala unutrašnjost objekta nego samo ulazna vrata objekta TC,
- akcija gašenja je bila neefikasna zbog nedostatka vode za gašenje požara itd.

Požar je imao sve uslove da se razvija do krajnjih granica ovog požarnog sektora, odnosno do vanjskih konstrukcija objekta pa i iznad njega.

1.3. Eksplozija metana dospjelog iz septičke jame u stan koji se nalazio na IV-tom spratu stambeno – poslovnog objekta u Bijeljini

U kanalizacionim instalacijama, posebno u septičkim jamama, odvijaju se procesi aerobne i anaerobne razgradnje otpadnih materija, koje se transportuju i odlažu u ovakve sisteme. Aerobna razgradnja se odvija u prisustvu vazduha i karakteriše se izdvajanjem ugljendioksida, dok anaerobna razgradnja nastaje uslijed djelovanja mikroorganizama prisutnih u septičkoj jami u uslovima bez prisustva kiseonika. Ovi procesi se karakterišu dominantnim izdvajanjem metana i ugljen dioksida, te nešto manje količine amonijaka. Zbog prisustva ovih gasova u slučaju nepravilne eksploatacije kanalizacijskog sistema, postoji potencijalna opasnost od nastanka zapaljivih i eksplozivnih gasnih smjesa.

Dana 01.05.2010. godine oko 19:20 sati došlo je do snažne eksplozije metana u stambeno – poslovnom objektu u Bijeljini koja je izazvala značajna oštećenja stana broj 9 [3].

Uzrok je bilo nakupljanja i eksplozije metana u kupatilu ovog stana koje je posljedica nepropisno izvedenih kanalizacionih instalacija i septičke jame predmetnog objekta. Prospekcijom septičke jame je utvrđeno da je uronjena cijev u sadržaj septičke jame omogućavala dotok otpadne vode u jamu, koja se uslijed brzine dotoka i gravitacijske sile uspješno ulijevala u jamu, ali je sprječavala provjetranje ovog kanala. Rezultat ovakvog stanja je bilo nakupljanje biogasa, koji je nastajao u dijelu kanalizacijske cijevi koji je ispunjen sadržajem septičke jame.

Do eksplozije gasa u kupatilu došlo je neposredno nakon uključivanja grijalice, koja se nalazila na mašini za pranje veša postavljenoj neposredno iza ulaznih vrata kupatila. Ulaskom vlasnice stana u kupatilo, došlo je do oticanja dijela biogasa iz kupatila, pri čemu je inicirano kretanje sloja biogasa uslojenog u prostoru kupatila i stvaranje uslova da biogas dođe u dodir s električnom grijalicom. Pošto je temperatura grijača električne grijalice bila bitno viša od temperature paljenja biogasa u kojem je dominantan sadržaj metana, došlo je do paljenja i eksplozije metana s razarajućim djelovanjem ograničenog intenziteta.

Pri eksploziji nije bilo ljudskih žrtava ali je načinjena znatna materijalna šteta.



Slika 10. Stan u kome je došlo do eksplozije i položaj septičke jame

Eksplozija je imala znatnu razornu snagu, koja se manifestovala visokim pritiskom na čelu udarnog vazdušnog talasa nastalog procesom eksplozije. Udarni vazdušni talas je izbio vrata kupatila, ulazna vrata stana, kao i ulazna vrata soba.

Pored navedenog, snaga eksplozije je izazvala pomjeranje zidnih pločica u kupatilu, pucanje pregradnog zida između kupatila i spavaće sobe te deformacije okvira vrata kupatila i spavaće sobe. Od prigušenog udarnog vazdušnog talasa, zbog kojeg je došlo do pucanja

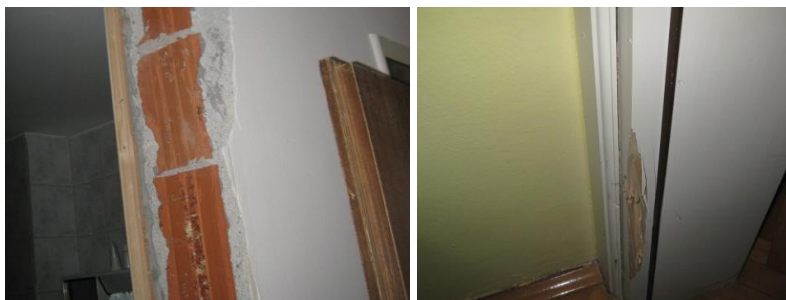
pregradnog zida između kupatila i spavaće sobe, došlo je do zakretanja ormara koji se nalazio uz taj zid.

Pritisak, koji je nastao na čelu vazdušnog udara, je izbio vrata kupatila i spavaće sobe tako da su se vrata zadržala na mjestima gdje je konstrukcijom stana i namještajem spriječeno njihovo dalje kretanje, a ulazna vrata stana su bila odbačena na vrh stubišta koje vodi na gornju etažu objekta.

Na slikama 11 i 12 prikazani su učinci eksplozije.



Slika 11. Pukotina na pregradnom zidu i ormar u spavaćoj sobi okrenut udarnim zračnim talasom



Slika 12. Otvor vrata kupaonice, s slomljenim dijelom i okvir vrata spavaće sobe

Prema učincima nastale eksplozije ocijenjeno je da je u momentu kontakta biogasa sa zagrijanom niti grijalice, došlo do “nadimanja” smjese biogasa i zraka. Koncentracija gorivih gasova u kupatilu je bila niska, blizu donje granice eksplozivnosti od 6%, i njihovo sagorijevanje je bilo kratkotrajno, onoliko koliko je trajao rad grijalice. Nastalo kratkotrajno sagorijevanje je bilo uz prisustvo viška kiseonika u odnosu na stehiometrijsku potrebnu količinu, pri kojem su nastali ugljen dioksid i voda, tako da su izostali uobičajeni učinci gorenja, kao što je nastajanje čađi. Termički efekti gorenja u smislu ostajanja tragova uslijed visokotemperaturnih djelovanja nisu uočeni, što se čini logičnim budući da je gorenje bilo kratkotrajno i u prostoriji u kojoj su svi zidovi obloženi glatkim keramičkim pločicama. Budući da je uslijed kratkog spoja grijalica prestala sa radom i izvor paljenja smjese biogasa i vazduha je brzo nestao.

Pravac rušilačkog djelovanja udarnog elastičnog talasa pokazuje da je centar početka eksplozije bio u kupatilu stana, odakle je, linijama najmanjeg otpora, rušilački djelovao prema hodniku, a odatle preko vrata spavaće i dnevne sobe, te ulaznih vrata stana na sve navedene strane.

Povećanjem zapremine prostorija u koje se širio udarni elastični talas te izbijanjem vrata između prostorija, udarni elastični talas je slabio na intenzitetu sve do granice kada se

pritisak na čelu elastičnog udarnog talasa nije doveo u granice pritiska vazduha u prirodnim uslovima.

Ovakva pojava, jačeg ili slabijeg intenziteta s većim ili manjim štetama pa i težim posljedicama, može se dogoditi u svako vrijeme i na svakom mjestu gdje je kanalizacijska mreža i septička jama izvedena na način kako je to učinjeno u predmetnom stambeno-poslovnom objektu.

2. LEGISLATIVA U BIH

Regulativu EU 89/106/EWG od 21. decembra 1988. god., kojom su usaglašene smjernice i primjena Direktiva EU na polju građevinskih proizvoda - CPD (Construction Products Directive) zamijenila je regulativa Europskog parlamenta i Vijeća EU od 9. marta 2011. za građevinske proizvode - EU CPR 305/2011 (Regulation on Construction Products), a koja je stupila na snagu sa 01. jula 2013. god [4].

Federacija BiH usvojila je zahtjeve CPD-e donošenjem Uredbe: “Uredba o tehničkim svojstvima koje građevine moraju zadovoljiti u pogledu sigurnosti te načina korištenja i održavanja građevina”.

Nakon donošenja Direktive za građevinske proizvode - EU CPR 305/2011, neophodno je usaglasiti domaću legislativu iz ove oblasti:

- Zakon o građevinskim proizvodima i
- Uredbu o tehničkim svojstvima koje građevine moraju zadovoljavati u pogledu sigurnosti, te načina korištenja i održavanja građevina

sa zahtjevima i odrednicama EU CPR 305/2011, kako bi se uredilo domaće tržište građevinskih proizvoda i radova, a time omogućilo proizvođačima iz Bosne i Hercegovine da izvoze svoje proizvode na tržište EU i šire.

U legislativu Federacije BiH, koja se odnosi na zaštitu objekata od požara, pored Uredbe kojom se prihvata Europska Direktiva o tehničkim svojstvima koje građevine moraju zadovoljiti u pogledu sigurnosti, odnosno sposobnosti građevine da izdrži sva predviđena djelovanja, a da pri tome zadrži sva bitna tehnička svojstva tokom predviđenog vremena trajanja, su i zaštita od požara. U četiri Pravilnika i jednu Uredbu ugrađene su važeće odredbe međunarodnih i usvojenih BAS standarda, a Metodologijom propisan je sadržaj i način izrade procjene ugroženosti od požara za područja kantona i opština, odnosno grada i pravnih lica.

Zakonska regulativa koja tretira područje zaštite od požara donosi se na nivou države Bosne i Hercegovine, dva entiteta, Brčko distrikta BiH i 10 kantona.

Na nivou države ova oblast uređena je “Okvirnim zakonom o zaštiti i spašavanju ljudi i materijalnih dobara od prirodnih ili drugih nesreća u BiH” (Sl. novine BiH 50/2008), dok se na nivou Federacije mogu izdvojiti:

- Zakon o zaštiti od požara i vatrogastvu (Sl. novine F BiH, 64/09) (osim Zakona na nivou Federacije i kantoni donose vlastite zakone o zaštiti od požara i vatrogastvu na svom području),
- Pravilnik za zaštitu visokih objekata od požara (Sl. novine F BiH, 81/11),
- Pravilnik o uslovima, osnovama i kriterijima za razvrstavanje građevina u kategorije ugroženosti od požara (Sl. novine F BiH, 79/11),
- Pravilnik o tehničkim normativima za vanjsku i unutrašnju hidrantsku mrežu za gašenje požara („Službene novine Federacije BiH“, br. 87/11),
- Pravilnik o zaštiti od požara građevina za javnu upotrebu (Sl. novine F BiH, 86/11),

- Pravilnik o izboru i održavanju aparata za gašenje početnog požara koji se mogu stavljati u promet sa garantnim rokom i rokom servisiranja („Službene novine Federacije BiH“, br. 46/11),
- Pravilnik o uslovima za vatrogasne pristupe i prolaze za stambene i druge zgrade i objekte i za sve prostore koji se smatraju građevinama („Službene novine Federacije BiH“, broj 70/12),
- Pravilnik o obimu i postupku provjere i ispitivanja ispravnosti i funkcionalnosti ugrađenog sistema aktivne zaštite od požara, uvjetima koje moraju ispunjavati pravna lica koja vrše poslove ispitivanja ispravnosti i funkcionalnosti, kao i programu i načinu polaganja stručnog ispita za obavljanje tih poslova („Službene novine Federacije BiH“, broj 69/13 i 2/18),
- Pravilnik o sadržaju i načinu vršenja inspeksijskog nadzora iz oblasti zaštite od požara i vatrogastva iz nadležnosti Federalne uprave civilne zaštite („Službene novine Federacije BiH“, broj 22/16),
- Uredba o sadržaju i načinu izrade planova zaštite i spašavanja od prirodnih i drugih nesreća i planova zaštite od požara (Sl. novine F BiH, 87/11),
- Metodologija za izradu procjene ugroženosti od požara (Sl. novine F BiH, 8/2011).

Pravilnikom za zaštitu visokih objekata od požara se propisuju odgovarajuće plansko-organizacijske, arhitektonsko-građevinske i tehničko-tehnološke mjere zaštite od požara za visoke objekte, koje smanjuju mogućnost za nastanak požara, odnosno pri njegovom nastanku omogućavaju sigurnu evakuaciju ljudi i imovine i sprečavaju njegovo širenje. Navedenim Pravilnikom propisane su mjere na izradi projektno-planske dokumentacije u skladu sa zakonskim propisima koji urađuju zaštitu od požara (izrada projekata zaštite od požara, izrada elaborata zaštite od požara i stručnih ocjena primjenjivosti mjera zaštite od požara na projektnu dokumentaciju, izrada pravilnika zaštite od požara, izrada procjene ugroženosti zaštite od požara, izrada plana zaštite od požara). U sklopu arhitektonsko-građevinskih mjera definisani su vatrogasni putevi i prilazi, požarni sektori, otpornost na požar primijenjenih građevinskih proizvoda, sigurnosno stepenište, putevi evakuacije i protivpožarna signalizacija. Tehničko-tehnološke mjere podrazumijevaju najmanje sve propisane mjere sa aspekta mašinskih i elektro instalacija i opreme ugrađene u građevinu primijenjene u svrhu preventivne zaštite od požara i eksplozije, kao što su: protupožarna vrata, žaluzine, roletne, kanali, klapne, dimovodi, sigurnosni liftovi, kotlovnica, redovno i rezervno napajanje energijom, električne instalacije i sistemi za ranu prevenciju i dojavu od požara i curenja gasa, aktivni i pasivni sistemi za gašenje požara vodom, pjenom i aerosolima i sl.

Pravilnikom o uslovima, osnovama i kriterijumima za razvrstavanje građevina u kategorije ugroženosti od požara se propisuju kategorije građevina, uslovi, osnove i kriterijumi za razvrstavanje građevina i građevinskih dijelova u kategorije ugroženosti od požara te se određuju minimalne zakonom propisane preventivne mjere zaštite od požara i eksplozije.

Pravilnik o zaštiti od požara građevina za javnu upotrebu propisuju odgovarajuće plansko-organizacijske, arhitektonsko-građevinske i tehničko-tehnološke mjere zaštite od požara za građevine javne namjene/upotrebe, koje smanjuju mogućnost za nastanak požara, odnosno pri njegovom nastanku omogućavaju sigurnu evakuaciju ljudi i imovine i sprečavaju njegovo širenje.

Pravilnik o uslovima za vatrogasne pristupe i prolaze za stambene i druge zgrade i objekte i za sve prostore koji se smatraju građevinama propisuje uslove koje moraju

zadovoljiti vatrogasni pristupi do građevine ili objekta kako bi se vatrogasnoj tehnici omogućio dohvat otvora na vanjskim zidovima radi spašavanja osoba i gašenja požara.

Pravilnikom o tehničkim normativima za vanjsku i unutrašnju hidrantsku mrežu za gašenje požara se propisuju tehnički normativi za ugradnju hidrantske mreže za gašenje požara u cilju zaštite građevina i/ili prostora, načini gašenja požara, njeno održavanje i proračun potrebne količine vode.

Uredbom o sadržaju i načinu izrade planova zaštite i spašavanja od prirodnih i drugih nesreća i planova zaštite od požara utvrđuje se sadržaj, način izrade, postupak usaglašavanja, donošenja, ažuriranja i čuvanja planova zaštite i spašavanja ljudi i materijalnih dobara od prirodnih i drugih nesreća i planova zaštite od požara u Federaciji Bosne i Hercegovine. U planu zaštite i spašavanja utvrđuje se organizacija i način provođenja mjera zaštite. U te mjere spadaju naročito: primjena propisa o građenju (urbanističko-prostorna i tehnička dokumentacija i dr.); tehničke mjere za izgradnju objekata na trusnim područjima; izgradnja objekata za zaštitu od klizišta, poplava (nasipa, akumulacija, retezija i sličnih objekata za zaštitu od poplava), izvođenje radova na regulaciji potoka i rijeka, uređenju bujica, izgradnja potpornih zidova.

Metodologijom za izradu procjene ugroženosti od požara propisuje se sadržaj i način izrade procjene ugroženosti od požara područja kantona i općina, odnosno grada i pravnih lica, kao i postupak usklađivanja, ažuriranja i čuvanja procjene ugroženosti od požara na svim nivoima izrade procjene ugroženosti od požara.

LITERATURA

- [1] S. Bajrić, A. Hodžić, "Vještačenje po Naredbi Kantonalnog tužilaštva TK - Naredba broj: T03 0 KTA 0040994 14 – "Bingo" Lukavac,- Vještačenje uzroka požara, koji se dogodio dana 27. 7. 2014. godine od 12,35 do 12,40 sati u poslovnom objektu Trgovinskog centra "Bingo", ulica Lukavačkih brigada, Lukavac, Općina Lukavac, u dijelu objekta gdje se nalazi magacinski prostor koji je u cjelosti izgorio", novembar 2014.
- [2] S. Bajrić, A. Hodžić, S.Mičević, "Vještačenje uzroka požara, koji se dogodio dana 27. 7. 2016. godine oko 22,50 sati u Tržnom centru "ŠKAFA", ulica Rakovička cesta broj 120, Rakovica, Općina Ilidža", Vještačenje po zahtjevu "UNIQA osiguranja" d.d. Sarajevo, oktobar 2016.
- [3] S.Mičević, "Eksplozija plina iz septičke jame u Bijeljini", Bilten Agencije za prostore ugrožene eksplozivnom atmosferom 2014, Zagreb, ISSN 1845-0172
- [4] T. Dreca, "Zaštita od požara objekata realizovanih u Sarajevu od kraja 19. stoljeća do danas", Magistarski rad, Sarajevo, 2013.

POŽARNA BEZBEDNOST FASADA – REGULATIVA U ZEMLJAMA ZAPADNOG BALKANA I U ZEMLJAMA EVROPSKE UNIJE

Olivera Bukvić, Suzana Draganić, Mirjana Laban, Vlastimir Radonjanin

1 ZNAČAJ POŽARNE BEZBEDNOSTI FASADA I HARMONIZOVANIH PROPISA U OBLASTI POŽARNE BEZBEDNOSTI

Bezbednost od požara predstavlja jedan od osnovnih zahteva koji zgrade moraju da zadovolje tokom perioda eksploatacije. Prema Statistici požara u svetu (World Fire Statistics), u 2017. godini, od ukupnog broja registrovanih požara, najveći procenat zauzimaju požari u zgradama (37,3%) [1]. Podaci o požarima u stambenim višespratnim zgradama, prikupljeni u Finskoj i Švedskoj (za period od 2004. do 2012. i 2004-2011. godine, respektivno), pokazuju da od prosečnih 508 požara godišnje u Finskoj, 10% predstavlja požare indukovane spolja, dok je u Švedskoj 9% takvih požara od prosečnih 2739 godišnje. Po statističkim podacima iz Sjedinjenih Američkih Država, od 177.833 požara, 68% su požari u stambenim objektima. Iako su požari na spoljašnjim zidovima zgrada (požari koji nastaju na spoljnom zidu) uzrok 1,3% - 3% požara od ukupnog broja požara i 2% od ukupnog broja požara u stambenim zgradama, zbog brzine širenja požara i povreda uzrokovanih gorivim fasadnim sistemima, proteklih godina požari na fasadama oduzeli su mnogo ljudskih života i uzrokovali velike materijalne štete [2]. Neke od nesreća uzrokovanih požarima na fasadama širom sveta, potvrđuju navedeno: Tamweel Tower u Dubaiju, Ujedinjeni Arapski Emirati (2012), Mermoz Tower, u Rubeu, Francuska (2010), stambena zgrada u Dižonu, Francuska (2010), stambena zgrada u Šangaju, Kina (2010), itd. [2]. Skorašnji događaj sa katastrofalnim posledicama, požar na Grenfell Tower-u u Londonu, Velika Britanija (2017), za posledicu je imao 72 smrtna slučaja [3].

Ponašanje građevinskih materijala koji su deo spoljnih zidova zgrada, a naročito njihova reakcija na požar, značajno utiču na mogućnost širenja požara na fasadi, kao i na prenos požara između susednih prostorija u zgradi. Minimalni tehnički zahtevi za fasade definisani su na različite načine u različitim državama. Iako je cilj definisanja tehničkih zahteva svuda isti - obezbediti potreban nivo požarne bezbednosti - struktura i primena regulative, kao i nivo razrade tehničkih zahteva, razlikuje se u regionima, pa čak i državama unutar regiona.

U cilju definisanja jedinstvenih minimalnih tehničkih zahteva koji moraju biti implementirani u nacionalnu regulativu u oblasti zaštite od požara zemalja članica, Evropska Unija (EU) donela je Zakon o građevinskim proizvodima [4]. Međutim, prethodna istraživanja pokazuju da postoje značajne razlike u zahtevima bezbednosti od požara čak i u regulativi zemalja članica EU [5], [6], iako se u svim zemljama EU primenjuje Zakon o građevinskim proizvodima, kao i pravila za projektovanje objekata - Evrokodovi. Ovi pravilnici nisu potpuno jednaki u svim državama, zbog potrebe da se prilagode specifičnostima pojedinih država i njihovoj postojećoj regulativi u oblasti projektovanja. Zemlje Zapadnog Balkana su uglavnom u procesu pridruživanja EU, zbog čega su u procesu tranzicije između nacionalne i evropske regulative. Sa druge strane, zemlje Zapadnog Balkana koje su već u EU, implementirale su deo EU regulative, ali u različitom obimu. Predmet ovog poglavlja knjige jeste analiza regulative zemalja Zapadnog Balkana kroz komparativnu analizu požarne bezbednosti fasada, kao bitnog faktora požarne bezbednosti zgrada. Razlike u strukturi i zahtevima ukazuju na probleme primene jedinstvene regulative u praksi, dok sličnosti ističu potencijal za buduću saradnju i razvoj regulative u oblasti

zaštite od požara na isti način, za ceo region. Važnost jedinstvenih pravilnika i propisa u ovoj oblasti ogleđa se u činjenici da je veliki broj kompanija u oblasti projektovanja i izgradnje, kao i kompanije koje se bave proizvodnjom građevinskih materijala, prisutan na tržištu svih zemalja Zapadnog Balkana. Komparativna analiza prikazana u ovom poglavlju urađena je za regulativu u Srbiji i regulativu dve zemlje bivše Jugoslavije - Hrvatsku i Sloveniju.

2 STUDIJA SLUČAJA: KOMPARATIVNA ANALIZA REGULATIVE U OBLASTI POŽARNE BEZBEDNOSTI FASADA U SRBIJI, HRVATSKOJ I SLOVENIJI

Srbija, Hrvatska i Slovenija su implementirale Zakon o građevinskim proizvodima u nacionalnu regulativu - Hrvatska i Slovenija kao članice EU, a Srbija kao deo procesa pridruživanja EU. Bez obzira na navedeno i činjenicu da su propisi sve tri države bili isti i da su se razvijali na isti način do 90-tih godina prošlog veka, postoje razlike u tehničkim zahtevima za zaštitu od požara, pa čak i definicijama određenih pojmova u ovoj oblasti.

Struktura i sistem regulative u sve tri analizirane države bazirani su na istim principima. Osnovni pravni dokument koji definiše opšte principe zaštite od požara u sve tri države je Zakon o zaštiti od požara. Detaljni tehnički zahtevi dalje su propisani podzakonskim aktima, preporukama i standardima [7-9]. U Hrvatskoj, to je podzakonski akt "Pravilnik o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara" (u daljem tekstu Pravilnik). Slovenački podzakonski akt, Rules on fire safety in buildings, propisuje obaveznu primenu dokumenta "Tehničke preporuke TSG-1-001: 2019 Pravilnik o bezbednosti zgrada od požara" (u daljem tekstu Tehničke preporuke), pri projektovanju zaštite od požara [10]. Ovim dokumentima, (između ostalog), propisani su zahtevi za požarnu bezbednost u odnosu na namenu objekata kao i u odnosu na požarnu bezbednost fasada [11,12]. U regulativi Srbije, "Pravilnik o tehničkim normativima za zaštitu od požara stambenih i poslovnih objekata i objekata javne namene" propisuje zahteve za bezbednost od požara stambenih zgrada u smislu pristupa projektovanju, zahtevanih performansi, itd. Požarna bezbednost fasada regulisana je posebnim dokumentom: "Pravilnik o tehničkim zahtevima bezbednosti od požara spoljnih zidova zgrada" (u daljem tekstu Pravilnik o fasadama) [13]. Pored toga, dok su u Srbiji i Sloveniji tehnički zahtevi za požarnu bezbednost visokih zgrada regulisani posebnim dokumentom, u Hrvatskoj regulativi su ti zahtevi deo Pravilnika [11], [13-15]. U sve tri države, požarna klasifikacija građevinskih proizvoda i konstruktivnih elemenata bazirana je na EU standardu EN 13501-1:2010 Požarna klasifikacija građevinskih proizvoda i elemenata zgrade - Deo 1: Klasifikacija na osnovu podataka dobijenih ispitivanjem reakcije na požar, čineći bazu za poređenje zahteva u pogledu ponašanja materijala i konstruktivnih elemenata. Generalno, nacionalni standardi analiziranih zemalja jesu usvojeni evropski standardi, dok se razlike u regulativi oslikavaju u podzakonskim aktima, prilagođenim nacionalnim specifičnostima.

Komparativna analiza regulative u oblasti požarne bezbednosti u ovom poglavlju zasnovana je na pravilnicima koji propisuju zahteve za požarnu bezbednost fasada, čija je primena obavezna: *Pravilnik o tehničkim zahtevima bezbednosti od požara spoljnih zidova zgrada* (Srbija, "Službeni glasnik" br. 59/2016, 36/2017 i 6/2019), *Pravilnik o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara* (Hrvatska, "Narodne novine" br. 29/13, 87/15) i *Tehničke preporuke TSG-1-001:2019 Pravilnik o bezbednosti zgrada od požara* (Slovenija) [11-13], uz ostale dopunske propise i preporuke u oblasti zaštite od požara (npr. kriterijum za definisanje visokih zgrada).

U svrhu analize trenutnog stanja u regulative sve tri države, kao primer, poređeni su zahtevi za požarnu bezbednost fasada stambenih zgrada, dok su objekti ostalih namena

izostavljeni. Pravilnici za projektovanje u sve tri zemlje upotrebljavaju klasifikaciju zgrada zasnovanu na EU klasifikaciji objekata [16], ali su u pravilnicima o bezbednosti od požara u upotrebi i dodatne klasifikacije [12], [13], [17], uzimajući u obzir karakteristike zgrada relevantne za požarnu bezbednost fasada (npr. visina zgrade i bruto razvijena građevinska površina). U Tabeli 1 prikazane su kategorije zgrada navedene u pravilnicima i opisi stambenih zgrada svake kategorije. Srpskim Pravilnikom o fasadama zgrade su klasifikovane u 5 kategorija, izostavljajući visoke objekte na koje se primenjuje poseban pravilnik koji obuhvata ne samo fasade, već i sve ostale elemente konstrukcije [15]. Hrvatski Pravilnik prepoznaje isti broj kategorija, uz dodatnu kategoriju koja obuhvata visoke objekte, dok slovenačka Tehnička preporuka upotrebljava EU klasifikaciju objekata, a zatim dodatno klasifikuje zgrade po visini. Zbog početnog kriterijuma za izbor objekata koji će biti predmet ove komparativne analize, Tabela 1 prikazuje samo kategorije stambenih zgrada, iako se navedene kategorije u pravilnicima odnose i na objekte drugih namena.

Tabela 1
Klasifikacija zgrada u srpskim, hrvatskim i slovenačkim pravilnicima [11–14]

Srbija		
Kategorija	Opis	
A	ne obuhvata stambene zgrade	
B	Stambene, stambeno-poslovne i poslovno-stambene zgrade, maksimalne bruto razvijene građevinske površine najviše 400 m ² .	
V1	Stambene, stambeno-poslovne i poslovno-stambene zgrade, bruto razvijene građevinske površine od 400 m ² do 2000 m ² i visine najviše 15 m.	
V2	Stambene, stambeno-poslovne i poslovno-stambene zgrade, bruto razvijene građevinske površine preko 2000 m ² ili visine od 15 m do 22 m.	
G	Stambene, stambeno-poslovne i poslovno-stambene zgrade, visine od 22 m do 30 m.	
Hrvatska		
ZPS 1	Izdvojene zgrade sa najmanje tri strane dostupne vatrogascima za gašenje požara s nivoa terena, koje sadrže do tri nadzemne etaže s kotom poda najviše etaže za boravak ljudi do 7,00 m mereno od kote spoljašnjeg terena s kojeg je moguća intervencija vatrogasaca, odnosno evakuacija ugroženih osoba i koje sadrže jedan stan, bruto površine do 400 m ² i do ukupno 50 korisnika.	
ZPS 2	Izdvojene zgrade i zgrade u nizu, koje sadrže do tri nadzemne etaže, s kotom poda najviše etaže za boravak ljudi do 7 m mereno od kote spoljašnjeg terena s kojeg je moguća intervencija vatrogasaca, odnosno evakuacija ugroženih osoba i koje sadrže najviše tri stana, bruto površine do 400 m ² i do ukupno 100 korisnika.	
ZPS 3	Zgrade koje sadrže do tri nadzemne etaže, s kotom poda najviše etaže za boravak ljudi do 7 m mereno od kote spoljašnjeg terena s kojeg je moguća intervencija vatrogasaca, odnosno evakuacija ugroženih osoba, u kojima se okuplja manje od 300 osoba i koje nisu obuhvaćene kategorijama ZPS 2 i ZPS 3.	
ZPS 4	Zgrade koje sadrže do četiri nadzemne etaže, s kotom poda najviše etaže za boravak ljudi do 11 m mereno od kote spoljašnjeg terena s kojeg je moguća intervencija vatrogasaca, odnosno evakuacija ugroženih osoba i koje sadrže jedan stan bez ograničene bruto površine ili više stanova pojedinačne bruto površine do 400 m ² i ukupno do 300 korisnika.	
ZPS 5	Zgrade s kotom poda najviše etaže za boravak ljudi do 22 m mereno od kote spoljašnjeg terena s kojeg je moguća intervencija vatrogasaca, odnosno evakuacija ugroženih osoba, a koje nisu razvrstane u kategorije ZPS 1, ZPS 2, ZPS 3 i ZPS 4, kao i zgrade koje se pretežno sastoje od podzemnih etaža, zgrade u kojima borave nepokretne osobe i osobe smanjene pokretljivosti.	
ZPS 6	Visoke zgrade (> 22 m)	
Slovenija		
11	Stambeni objekti	Do 10 m visine; od 10 m visine do visokih zgrada (> 22 m)
111	Objekti sa jednom stambenom jedinicom	
112	Objekti sa dve ili više stambenih jedinica	
11301	Domovi za stare	
11302	Ostali zajednički stambeni objekti	

Pravilnici su zasnovani na istom pristupu u sve tri države. Visina zgrade je prepoznata kao bitan faktor za procenu rizika od požara u svim pravilnicima, što je rezultiralo klasifikacijom zgrada u zavisnosti od njihove visine. Visina je definisana kao visinska razlika između kote terena na kojoj je moguće vršiti vatrogasnu intervenciju do najviše etaže na kojoj borave korisnici objekta [11], [12], [15]. Slovenačke Tehničke preporuke odnose se samo na zgrade visine do 10 m i preko 10 m, a visoke zgrade definišu se visinom preko 22 m [12]. Srpski Pravilnik o fasadama definiše kategorije zgrada u odnosu na visinu zgrada postavljajući granice maksimalnih visina na 15 m, 22 m i 30 m, a hrvatski Pravilnik na 7 m i 22 m (videti Tabelu 1). Ove granice su u skladu sa definicijom visokih zgrada u pravilnicima ove dve države (srpski > 30 m, hrvatski > 22 m) [11], [15]. Pojedinačna bruto površina etaže definisana je samo u hrvatskom Pravilniku, dok je razvijena bruto građevinska površina zgrade definisana srpskim Pravilnikom o fasadama, gde, zajedno sa visinom, opisuje kategorije zgrada. Broj stambenih jedinica po spratu relevantan je u slovenačkim i hrvatskim pravilnicima. Pored toga, hrvatski Pravilnik uzima u obzir i broj korisnika u zgradi i položaj u odnosu na okolne zgrade (izdvojene zgrade i zgrade u nizu) [11-13], [17]. Ovakvi kriterijumi za klasifikaciju postoje i u drugim srpskim pravilnicima [18], ali nisu navedeni u Pravilniku o fasadama. Ova analiza klasifikacije zgrada pokazuje potencijalne poteškoće u preciznom poklapanju kategorija zgrada iz različitih pravilnika, usled nedoslednosti kriterijuma za klasifikaciju.

Nakon definisanja kategorija stambenih zgrada koje će biti predmet analize, bilo je potrebno definisati kriterijume za analizu. Da bi se zadovoljili opšti zahtevi koji obezbeđuju potreban nivo požarne bezbednosti zgrada (npr. nosivost konstrukcije tokom požara, sprečavanje širenja požara, bezbedna evakuacija ljudi, itd.) propisuje se niz zahteva u pogledu ponašanja građevinskih materijala i elemenata. To su reakcija na požar primenjenih materijala, otpornost na požar konstruktivnih elemenata, horizontalne i vertikalne požarne barijere, bezbednosno rastojanje zgrada, itd. [7,8], [19]. Kao kriterijum za analizu izdvojena je reakcija na požar građevinskih materijala, jer je ključni aspekt svakog pravilnika i ima značajan uticaj na požarnu bezbednost i ponašanje fasada [20]. Navedene su i opšte napomene o horizontalnim i vertikalnim fasadnim požarnim barijerama.

2.1 Zahtevi u pogledu reakcije na požar

Reakcija na požar je ponašanje materijala prilikom požara, u smislu doprinosa materijala razvoju požara svojom razgradnjom prilikom izloženosti požaru. U pravilnicima sve tri države, ponašanje materijala prilikom požara klasifikovano je prema evropskom sistemu za klasifikaciju reakcije na požar (Euroclass), definisanom u evropskom standardu EN 13501-1: Požarna klasifikacija građevinskih proizvoda i elemenata zgrade - Deo 1: Klasifikacija na osnovu podataka dobijenih ispitivanjem reakcije na požar, usvojenom kao nacionalni standard. Postoji sedam klasa gorivosti - A1, A2, B, C, D, E i F gde klase A1 i A2 predstavljaju negorive materijale. Pored toga, postoje tri klase emisije dima kao karakteristika reakcije na požar - s1, s2 i s3, od s1 koja predstavlja malu količinu dima emitovanu tokom požara do s3 - značajna količina dima. Dalje, karakteristika otkapavanja i/ili druga očekivana svojstva koja ugrožavaju evakuaciju, definisana je sa 3 klase: d0, ako nema kapljica u periodu od 600 s; d1, ako se kapljice formiraju u periodu od 600 s, ali ne gore i ne otpadaju duže od 10 s; d2, ako nije naznačeno specifikacijom materijala ili materijal ne spada u klasu d0 i d1 [21]. Detaljni zahtevi za reakciju na požar, u zavisnosti od kategorije zgrade i tipa fasade, dati su u Tabeli 2, Tabeli 3 i Tabeli 4, za svaku državu.

Tabela 2
Zahtevi za reakciju na požar fasada - srpski propisi [13]

Tip fasade	Kategorija zgrade			
	B	V1	V2	G
Zidani (opeka, blokovi i sl.) ili betonski (prefabrikovani ili liveni na licu mesta) sa toplotnoizolacionim slojem i spoljnim zidanim, betonskim i drugim sličnim slojem za zaštitu od dejstva atmosferilija - bez ventilisanog vazdušnog sloja; samonoseći prefabrikovani fasadni paneli				
Spoljni zid (sistem)	C-s2, d2	B-s1, d1	A2-s1, d1	A2-s1, d1
Komponente spoljnog zida:				
Spoljni sloj/slojevi	B-s2, d1	B-s2, d1	A2-s1, d1	A2-s1, d0
Toplotnoizolacioni sloj	E-s2, d2	E-s2, d1	D-s2, d1	C-s2, d1
Zidani (opeka, blokovi i sl.) ili betonski (prefabrikovani ili liveni na licu mesta) sa toplotnoizolacionim slojem i spoljnim zidanim, betonskim i drugim sličnim slojem za zaštitu od dejstva atmosferilija - sa uključenim ventilisanim vazdušnim slojem				
Spoljni zid (sistem)	C-s2, d2	B-s2, d1	A2-s1, d1	A2-s1, d0
Komponente spoljnog zida:				
Spoljni sloj/slojevi	C-s2, d2	B-s2, d1	A2-s1, d1	A2-s1, d0
Potkonstrukcija:				
Linijski element veze	C	B	A2	A2
Tačkasti element veze	A2	A2	A2	A2
Toplotnoizolacioni sloj	B-s2, d1	A2-s1, d0	A2-s1, d0	A2-s1, d0
Zidani (opeka, blokovi i sl.) ili betonski (prefabrikovani ili liveni na licu mesta) zidovi sa ETICS izolacionim sistemom				
Spoljni zid (sistem)	D-s2, d2	B-s2, d1	B-s1, d1	A2-s1, d0
Komponente spoljnog zida:				
Završni sloj/slojevi	C-s2, d1	B-s2, d1	B-s1, d1	A2-s1, d0
Toplotnoizolacioni sloj	E-s2, d2	B-s2, d1	A2-s1, d1	A2-s1, d0

Tabela 3
Zahtevi za reakciju na požar fasada - Hrvatska [11], [17]

Delovi konstrukcije	Kategorija zgrada					
	ZPS1	ZPS2	ZPS3	ZPS4	ZPS5	High-rise
Ovešeni ventilisani elementi fasada						
Klasifikovani sistem	E	D-d1	D-d1	C-d1	B-d1	A2-d1
Izvođenje sa klasifikovanim komponentama:						
Završni sloj	E	D	D	A2-d1 ili B-d1	B-d1	A2-d1
Potkonstrukcija:						
Štapasta	E	D	D	D	D	A2
Tačkasta	E	D	A2	A2 ili A2	A2	A2
Izolacija	E	D	D	B	A2	A2
Kontaktna termalna fasada (ETICS)						
Klasifikovani sistem	E	D	D-d1	C-d1	B-d1	A2-d1
Sklop slojeva sa klasifikovanim komponentama:						
Završni sloj	E	D	D	C	B-d1	A2-d1
Toplotnoizolacioni sloj	E	D	C	B	A2	A2

Tabela 4
 Zahtevi za reakciju na požar fasada - Slovenija [12]

Kategorije (stambenih) zgrada	Visina zgrade	
	do 10 m	od 10 m do visokih zgrada
Obloge spoljnih zidova		
Objekti sa jednom stambenom jedinicom	D-s3,d2	B-d0
Objekti sa dve ili više stambenih jedinica	D-s3,d2	B-d0
Domovi za stare	prizemne zgrade D-d0, zgrade sa više nadzemnih etaža B-d0	A1 ili A2
Ostali zajednički stambeni objekti	prizemne zgrade D-d0, zgrade sa više nadzemnih etaža B-d0	A1 ili A2
Sendvič paneli sa metalnom oblogom sa obe strane		
Stambene zgrade	A2-s1, d0	
Kompozitni sistemi (ETICS) sa gorivom izolacijom		
nije navedeno	B-d1	A1 ili A2
Ventilisane fasade (izolacija)		
nije navedeno	A1 ili A2-s1, d0	A1 ili A2-s1, d0

Tipovi fasada u srpskim i hrvatskim pravilnicima definišu se na isti način, razmatrajući mogućnost njihove primene kao sistema ili kao odvojenih klasifikovanih komponenti. Dok se srpski Pravilnik o fasadama odnosi na neventilisane, ventilisane i ETICS (višeslojni zidovi sa spoljnom termoizolacijom) fasadne sisteme, hrvatski Pravilnik propisuje zahteve za ventilisane i ETICS fasadne sisteme. Iako kategorije zgrada mogu biti poređene jer se barem jedan kriterijum za klasifikaciju preklapa, različite vrednosti intervala upoređivanih karakteristika uzrokuju nejednaku kategorizaciju. Zbog toga poređenje nije potpuno transparentno. Tipovi fasada u slovenačkim propisima nisu definisane kao sistem i komponente, kao u srpskim i hrvatskim propisima, što za posledicu ima nemogućnost egzaktnog poređenja zahteva.

Primena materijala F klase nije dozvoljena ni u jednom od pomenutih pravilnika. Najniža dozvoljena klasa materijala koja se može primenjivati je E u Srbiji i Hrvatskoj i D u Sloveniji. Zahtevi za klase emisije dima i okapavanje su u srpskom Pravilniku o fasadama definisane za sve tipove fasadnih sistema i komponenti (dozvoljena je primena samo materijala klase d0 i d1), osim za elemente potkonstrukcije. U hrvatskom pravilniku, zahtevi u pogledu emisije dima nisu definisani, a za neke fasadne elemente, definisana je samo klasa gorivosti. (videti Tabelu 4). Slovenačkim Tehničkim smernicama propisana je obavezna primena negorivih materijala za termoizolacioni sloj ventilisanih fasada, bez obzira na klasu i visinu zgrade. Ovakav kriterijum propisan je za V1, V2 i G kategoriju zgrada u srpskom Pravilniku o fasadama i za kategorije zgrada ZPS 4, 5, 6 u hrvatskom Pravilniku. Primena negorivih materijala zahtevana je i za: zgrade visine veće od 15 m u srpskim propisima (V2 i G kategorija zgrada, osim za termoizolacioni sloj neventilisanih i ETICS fasada, kada su izvedeni kao fasadni sistemi), u hrvatskim za neke elemente konstrukcije čak i kada je visina zgrade do 7 m (npr. za tačkastu potkonstrukciju) (kategorije ZPS3, ZPS4, ZPS5 i visoke zgrade) i u slovenačkim uglavnom za zgrade visine veće od 10 m, sa izuzetkom sendvič panela (nezapaljivi materijali se ovde primenjuju u zgradama visine manje od 10 m).

Uzimajući u obzir nabrojane razlike, zahtevi za reakciju na požar materijala u srpskim, hrvatskim i slovenačkim propisima mogu se porediti, uz određeno prilagođavanje kriterijuma za klasifikaciju zgrada. Posledice razlika u klasifikacijama, zahtevima za reakciju na požar i uzajamnim uticajem ova dva kriterijuma objašnjeni su na sledećem primeru. U Tabeli 5, navedene su karakteristike tri zgrade. Zgrade su klasifikovane u skladu sa kriterijumima pravilnika svake države. Za svaku kategoriju zgrade, definisani su zahtevi za reakciju na požar ETICS fasadnih sistema.

Tabela 5
Razlike u klasifikaciji zgrada i zahtevima u pogledu reakcije na požar u Srbiji, Hrvatskoj i Sloveniji - primer

Opis zgrade	Zgrada 1:		Zgrada g 2:		Zgrada 3:	
	• H=9,5m		• H=12,5m,		• H=25 m	
Država	• četiri nadzemne etaže,		• pet nadzemnih etaža,			
	• četiri stambene jedinice na svakom spratu,		• četiri stambene jedinice na svakom spratu,			
	• 64 korisnika		• 80 korisnika			
	• bruto površina sprata: 250 m ²		• bruto površina sprata: 250 m ²			
	• bruto razvijena građevinska površina: 1000 m ²		• bruto razvijena građevinska površina: 1250 m ²			
	sistem: B-s2, d1		sistem: B-s2, d1		sistem: A2-s1, d0	
Srbija	V1	završni sloj: B-s2, d1 izolacija: B-s2, d1 sistem: C	V1	završni sloj: B-s2, d1 izolacija: B-s2, d1 sistem: B-d1	G	završni sloj: A2-s1, d0 izolacija: A2-s1, d0 sistem: A2-d1
Hrvatska	ZPS4	završni sloj: C izolacija: B sistem: B-d1	ZPS5	završni sloj: B-d1 izolacija: A2 sistem: A1, A2	ZPS6	završni sloj: A2-d1 izolacija: A2-d1 sistem: A1, A2
Slovenija	112	nije navedeno	112	nije navedeno	high-rise	nije navedeno

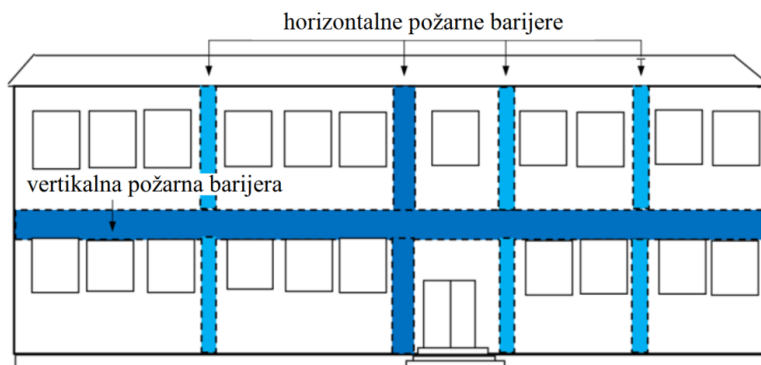
Tabela 5 pokazuje da nivo preklapanja zahteva za reakciju na požar uglavnom zavisi od visine zgrade. Za zgradu 1, srpski i slovenački propisi propisuju istu klasu B za fasadne sisteme, iako je klasa emisije dima definisana samo u srpskom Pravilniku o fasadama (videti Tabelu 5). Zahtevi u hrvatskom Pravilniku nisu toliko strogi, dozvoljavaju primenu, C-d1 klase za fasadu kao sistem. Za komponente fasade, srpski Pravilnik o fasadama propisuje klasu B za završni sloj i sloj izolacije, dok je u hrvatskom Pravilniku klasa C dozvoljena za završni sloj, a B za izolacioni sloj. Kako je zgrada 2 veće visine, drugačije je klasifikovana u odnosu na zgradu 1, u hrvatskom i slovenačkom pravilniku, zbog dodatnog kriterijuma, a u srpskom pravilniku je iste kategorije kao zgrada 1. Propisana reakcija na požar za fasadni sistem je ista u Srbiji i Hrvatskoj (klasa B), dok slovenački propis zahteva primenu materijala klase A1 ili A2. Za komponente fasade, Hrvatski pravilnik zahteva strožije

kriterijume za izolacioni sloj, propisujući klasu gorivosti A2. Konačno, potpuno poklapanje je moguće za zgradu 3 (tj. zgrade visine veće od 22 m), gde sva tri propisa zahtevaju primenu materijala klase gorivosti A1 ili A2 (negorivi materijali), sa izuzetkom srpskog Pravilnika o fasadama, koji propisuje i klasu za emisiju dima i klasu za otkapavanje. Ovim se ističe različitost zahteva u pogledu reakcije na požar, više u striktnosti, nego u opštem konceptu požarne bezbednosti.

2.2 Horizontalne i vertikalne požarne barijere - opšte napomene

Verikalne i horizontalne požarne barijere se primenjuju u cilju sprečavanja širenja požara na fasadama [11-13], [20]. Minimalni zahtevi se razlikuju u dimenzijama vertikalnih i horizontalnih barijera, dok je koncept isti u svim državama - oko otvora se na fasadu ugrađuju negorivi materijali, a između susednih etaža se ugrađuju kontinualni horizontalni pojasevi radi sprečavanja vertikalnog širenja požara. Debljina ovih pojaseva mora biti barem jednaka širini termoizolacionog sloja fasadnog sistema. Horizontalno širenje požara se sprečava ugrađivanjem negorivih vertikalnih barijera.

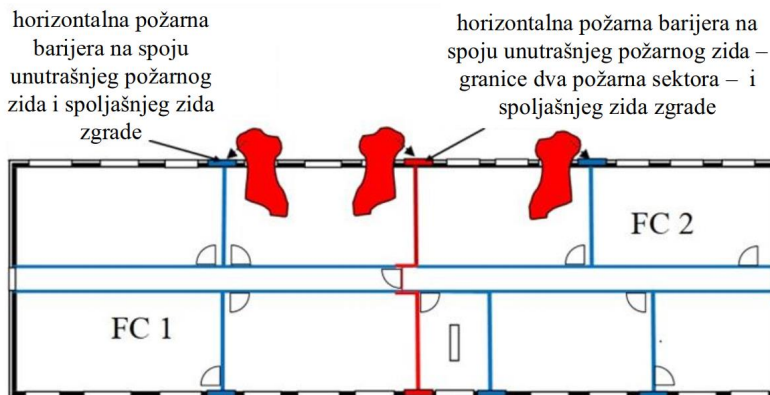
U cilju sprečavanja prenosa požara sa jednog požarnog sektora na drugi, srpski “Pravilnik o tehničkim zahtevima bezbednosti od požara spoljnih zidova zgrada” propisuje projektovanje horizontalnih i vertikalnih požarnih barijera, ukoliko fasada nije potpuno izvedena od negorivih materijala. Barijere moraju biti izvedene na granicama požarnih sektora i duž spojeva spoljašnjeg sa unutrašnjim zidovima. Šematski prikaz ovog koncepta prikazan je na Slici 1 i Slici 2. Klasa reakcije na požar barijere definisana je u zavisnosti od njenog položaja. Klasa A1 obavezna je na granicama požarnih segmenata (deo objekta koji se sastoji od jednog ili više požarnih sektora), a klasa A2 na granicama požarnih sektora.



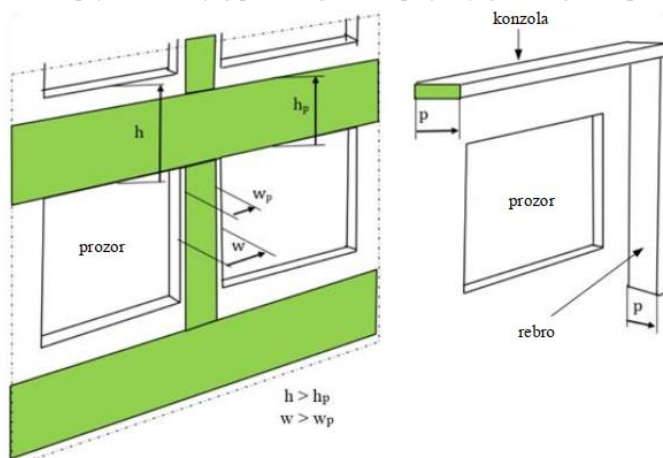
Slika 1. Horizontalne i vertikalne požarne barijere na granicama požarnih sektora (tamno plavo) i na spojevima spoljašnjeg sa unutrašnjim zidovima (svetlo plavo) [13].

Propisani su i minimalni zahtevi za dimenzije barijera. Minimalna visina (h_p) i širina (w_p) vertikalnih i horizontalnih požarnih barijera je 1 m. Alternativno, ove dimenzije se mogu smanjiti izvođenjem negorive konzole i rebra, minimalne širine $p > 0,5$ m (Slika 3). Strožiji kriterijumi moraju biti ispunjeni kada se rekonstruiše postojeća fasada - ako ETICS fasadni sistem koji se postavlja nije u celini od negorivog materijala, u nivou međuspratne konstrukcije svakog sprata mora se ugraditi vertikalna požarna barijera.

Minimalna visina ovakvih barijera je 1 m, a klasa reakcije na požar mora biti A1, ili u skladu sa zahtevima za sistem ili komponente sistema fasade propisanim za prvu višu kategoriju zgrade (Tabela 2) [13].



Slika 2. Vertikalna požarna barijera na spoju dva požarna sektora i spoljašnjeg zida zgrade (crveno) i na spoju unutrašnjeg požarnog zida i spoljašnjeg zida zgrade (plavo) [13].

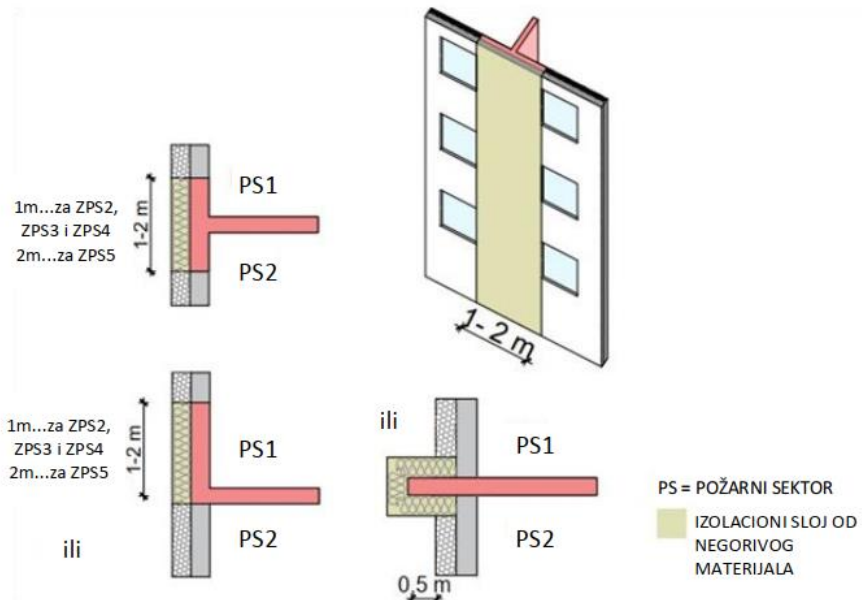


Slika 3. Horizontalne i vertikalne požarne barijere na fasadi - kontinualni pojas (levo) i kontinualna konzola oslonjena na vertikalno rebro (desno) [13].

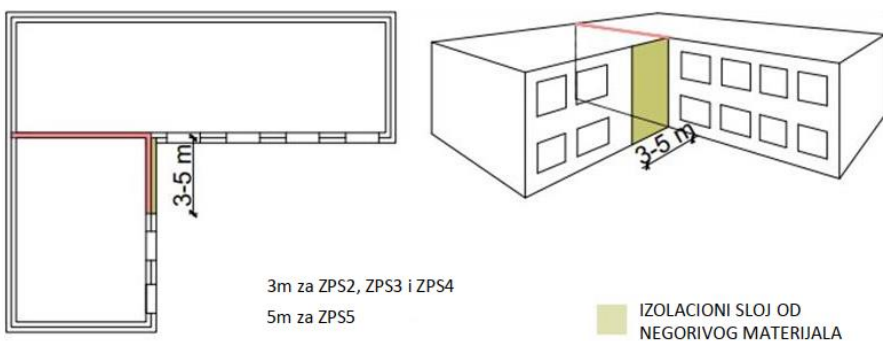
Zaštita od vertikalnog prenosa požara krovnog pokrivača ili strehe izrađenih od gorivih materijala ugrađivanjem horizontalnog pojasa klase reakcije na požar A1 iznad otvora najviših spratnih etaža, minimalne širine 1 m i 0,5 m sa obe strane otvora. Ovaj zahtev nije obavezan ukoliko su gorivi krovni pokrivač ili streha prekriveni negorivom oblogom.

Hrvatski Pravilnik propisuje klasu A1 ili A2-s1, d0 za barijere koje sprečavaju horizontalno i vertikalno širenje požara. U slučaju primene ETICS fasadnih sistema sa termoizolacionim slojem od gorivih materijala, požarne barijere moraju biti izvedene na konstruktivnim elementima otpornim na požar namenjenim za sprečavanje horizontalnog i vertikalnog širenja požara (npr. požarni zidovi i parapet između otvora različitih požarnih sektora) [11]. Ilustrovani prikaz zahteva - u smislu položaja i minimalnih dimenzija u zavisnosti od kategorije zgrade (pogledati Tabelu 1) - prikazani su na Slici 4. Na sprečavanje horizontalnog širenja požara odnosi se i zahtev za spojeve dva požarna sektora.

Minimalna propisana širina je 3 m ili 5 m, zavisno od kategorije zgrade, kao što je prikazano na Slici 5. Slično kao i u srpskim propisima, hrvatskim Pravilnikom se zahteva zaštita krova zgrade od širenja požara. Obavezno je postavljanje negorivog izolacionog materijala na završetak požarnog zida (Slika 6).

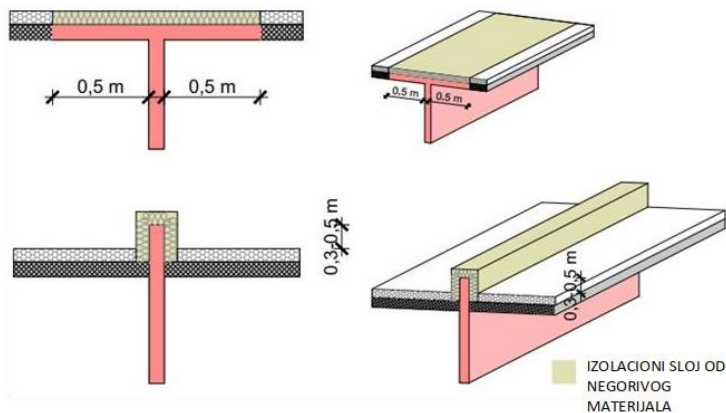


Slika 4. Primer sprečavanja horizontalnog širenja požara vertikalnim postavljanjem negorivog izolacionog sloja na požarni zid [17].

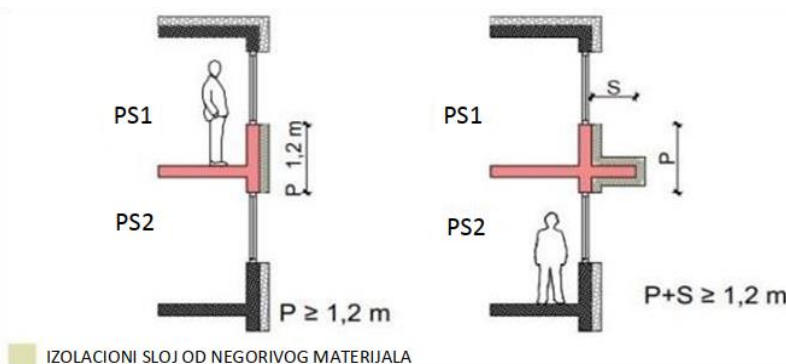


Slika 5. Horizontalna požarna barijera na spoju dva požarna sektora [17].

Vertikalno širenje požara između dve etaže koje pripadaju različitim požarnim sektorima postiže se izvođenjem horizontalne požarne barijere između otvora. Minimalne visine barijere prikazane su na Slici 7 [11], [17].

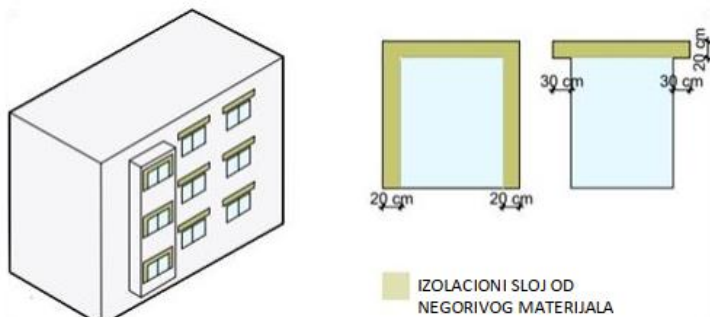


Slika 6. Zaštita krova - negorivi materijal na završetku požarnog zida [17].



Slika 7. Zahtevi za horizontalne požarne barijere [17].

Kako bi se sprečilo širenje požara na fasadi sa gorivom termoizolacijom u okviru istog požarnog sektora, za kategoriju ZPS4, izvode se požarne barijere oko otvora (Slika 8). Alternativno, horizontalni kontinualni pojasevi mogu se izvesti po obimu zgrade, na svakoj etaži, kako je prikazano na Slici 9.

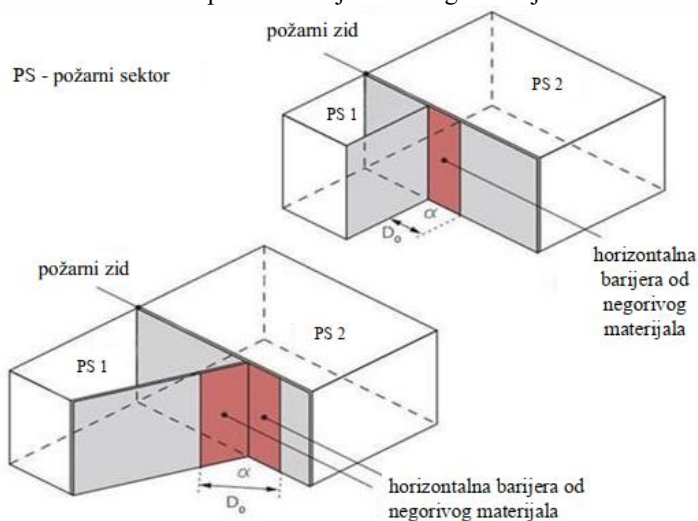


Slika 8. Požarne barijere oko otvora - sprečavanje širenja požara u okviru požarnog sektora [17].



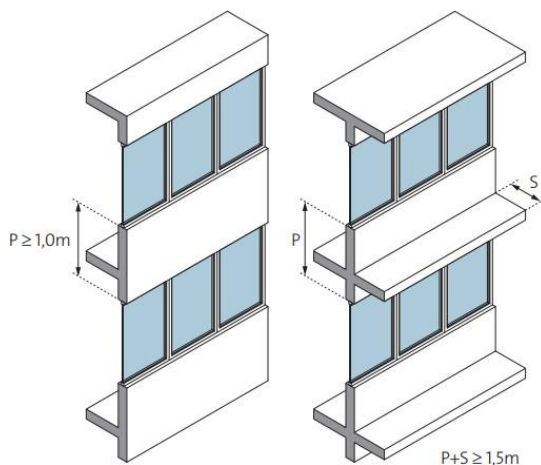
Slika 9. Sprečavanje vertikalnog širenja požara izvođenjem horizontalne požarne barijere na spoju međuspratne konstrukcije svake etaže i spoljašnjeg zida [17].

Slovenačke Tehničke preporuke propisuju za požarne barijere minimalnu klasu reakcije na požar A2-s1, d0. Osnovni zahtevi za sprečavanje širenja požara sastoje se u obezbeđivanju dovoljnog rastojanja - barijera - između prozora, obloženih negorivim materijalima. Unutrašnji uglovi spojeva požarnih sektora moraju biti zaštićeni horizontalnim požarnim barijerama, ako je ugao između spoljašnjih zidova požarnih sektora 135° ili manji (Slika 10). Rastojanja između ovih zidova, ili širina požarne barijere, zavisi od očekivanog požarnog opterećenja. Takođe, prisustvo automatskog sistema za gašenje požara prepoznato je kao bitan faktor. Za zgrade u kojima je ugrađen sistem za automatsko gašenje požara, minimalne širine horizontalne požarne barijere se mogu smanjiti.



Slika 10. Sprečavanje horizontalnog širenja požara između dva požarna sektora [12].

Na etažama koje nisu pristupačne vatrogasnoj službi, vertikalno širenje požara po fasadi mora se sprečiti horizontalnim požarnim barijerama postavljenim na parapete otporne na požar. Minimalni zahtevi u pogledu dimenzija prikazani su na Slici 11. Ukoliko je postavljen sprinkler sistem, projektovanje pomenutih barijera nije obavezno [12].



Slika 11. Sprečavanje vertikalnog širenja požara - minimalne dimenzije požarnih barijera na elementima otpornim na požar [12].

Pravilnici u sve tri države takođe postavljaju zahtev za projektovanje horizontalne požarne barijere za sprečavanje vertikalnog širenja požara ventilisanog sloja ventilisane fasade sa gorivim ili negorivim termoizolacionim slojem [11-13].

3 ZAKLJUČCI

Pregledom trenutnog stanja regulative u Srbiji, Hrvatskoj i Sloveniji, zaključeno je da je okvir i pristup bezbednosti od požara zasnovan na istim opštim principima u sve tri države. Svaka država primenjuje propise prilagođene nacionalnim specifičnostima, dok su EU standardi usvojeni kao nacionalni.

Propisi su analizirani na osnovu dva kriterijuma ponašanja fasada: reakcije materijala na požar i opštih zahteva za horizontalne i vertikalne požarne barijere. Ustanovljeno je da su razlike u klasifikaciji zgrada osnovni problem za praktičnu primenu propisa, jer klasifikovanje predstavlja prvi korak u definisanju zahteva ponašanja. Iako je podudaranje kategorija zgrada moguće uz određeno prilagođavanje, nije moguće uspostaviti konzistentan sistem, jer se kriterijumi klasifikacije u pravilnicima razlikuju od države do države. Nivo zahteva u pogledu reakcije na požar se razlikuje najviše u zavisnosti od visine analizirane zgrade. Dok srpski i slovenački pravilnici propisuju strožije kriterijume za niže zgrade, za zgrade veće visine strožiji kriterijumi su propisani hrvatskim i slovenačkim propisima. Potpuno podudaranje zahteva za reakciju na požar moguće je samo za zgrade visine preko 22 m. Pored toga, opisi i tipovi fasada se razlikuju u pomenutim pravilnicima. Zbog toga poređenje i primena različitih propisa nisu unificirani niti dovoljno precizni. Analizom minimalnih zahteva za horizontalne i vertikalne požarne barijere u pravilnicima sve tri države zaključeno je da je koncept projektovanja barijera isti. Postoje manje bitne varijacije dimenzija, ali svi pravilnici propisuju obaveznu primenu negorivih materijala za horizontalne i vertikalne barijere.

Studija prikazana u ovom poglavlju predstavlja početni korak ka poređenju srpskih, hrvatskih i slovenačkih propisa, dok je, za detaljniju analizu, potrebno sprovesti dodatne studije, uzimajući u obzir sve zahteve zaštite od požara. Ovakve analize za cilj imaju postavljanje temelja jedinstvenom tržištu u Srbiji, Hrvatskoj i Sloveniji, uz primenjeni Zakon o građevinskim proizvodima kao alat. Iako Zakon o građevinskim proizvodima već predviđa harmonizovane propise za tržište građevinskih materijala, pravilnici u ovim zemljama bi trebalo da pruže iste koncepte i nivo zahteva u oblasti zaštite od požara. U cilju podrške jedinstvenom tržištu, potrebno je omogućiti određeni nivo transparentnosti implementacije propisa, kako bi njihova primena na projektovanje i izvođenje u regionu bila jednostavnija.

REFERENCE

- [1] N. N. Brushlinsky, M. Ahrens, S. V. Sokolov, and P. Wagner, 'World Fire Statistics', Center of Fire Statistics, International Association of Fire and Rescue Services, 24, 2019.
- [2] N. White, M. Delichatsios, M. Ahrens, and A. Kimball, 'Fire hazards of exterior wall assemblies containing combustible components', MATEC Web Conf., vol. 9, p. 02005, 2013, doi: 10.1051/mateconf/20130902005.
- [3] M. Moore-Bick and Chairmen of the Inquiry, Grenfell Tower Inquiry: Phase 1 Report Overview. 2017.
- [4] Construction Products Regulation (CPR) - Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonized conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC', European Parliament, No 305/2011, Mar. 2011.
- [5] L. Sheridan, H. J. Visscher, and F. M. Meijer, Building regulations in Europe, Part 2 - A comparison of technical requirements in eight European countries, vol. 24. Delft, Netherlands: DUP Science, Delft University Press, 2003.
- [6] L. Boström et al., 'Development of a European approach to assess the fire performance of façades', p. 312.
- [7] 'Zakon o zaštiti od požara', Sl. glasnik RS, br. 1112009 202015 872018 872018, [Online]. Dostupno: https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_od_pozara.html.
- [8] 'Zakon o zaštiti od požara', Narodne novine Repb. Hrv. 9210, 2010, [Online]. Dostupno: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2010_07_92_2588.html.
- [9] Fire Protection Act', Off. Gaz. Repub. Slov. 32007, 2007.
- [10] Rules on Fire Safety in Buildings', Off. Gaz. Repub. Slov. 6117, 2017.
- [11] 'Pravilnik o otpornosti na požar i drugim zahtjevima koje građevine moraju zadovoljiti u slučaju požara', Narodne novine Repb. Hrv. 2913 8715, 2015.
- [12] Technical Guideline TSG-1-001:2019 for Fire Safety in Buildings', Off. Gaz. Repub. Slov. 6117 7217, 2019.
- [13] 'Pravilnik o tehničkim zahtevima bezbednosti od požara spoljnih zidova zgrada', Sl. glasnik RS, br. 592016 362017 62019, 2019, [Online]. Dostupno: https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik_o_tehnickim_zahtevima_bezbednosti_od_pozara_spoljnih_zidova_zgrada.html.
- [14] Smernice požarnovarnostnih ukrepov za visoke stavbe (h>22 m)', Inženirska zbornica Slovenije, Matična sekcija inženirjev tehnologov in drugih inženirjev, 2010.
- [15] 'Pravilnik o tehničkim normativima za zaštitu visokih objekata od požara', Sl. glasnik RS, br. 802015 672017 1032018, 2018.
- [16] Classification of Types of Construction - CC, final version', Eurostat, 1997.
- [17] M. J. Rukavina, M. Carević, and I. B. Pečur, FIRE PROTECTION OF FAÇADES - The Guidelines for Designers, Architects, Engineers and Fire Experts. Zagreb, Croatia: University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, 2017.
- [18] 'Pravilnik o tehničkim normativima za zaštitu od požara stambenih i poslovnih objekata i objekata javne namene', Sl. glasnik RS, br. 222019, 2019.

- [19] Building Act⁴, Off. Gaz. Repub. Slov. 11205 10207 10909 3810 6017, 2017, [Online]. Dostupno: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO7108>.
- [20] N. White and M. Delichatsios, 'Chapter 6 - Regulations', in Fire hazards of exterior wall assemblies containing combustible components, New York: Springer Verlag, 2015.
- [21] EN 13501-1:2010 Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests⁵, 2010.

DODATAK

POŽARNA BEZBEDNOST FASADA - REGULATIVA U ALBANIJI

Sokol Dervishi

1. UVOD

Pravni sistem u oblasti bezbednosti od požara sastoji se iz dve odluke:

- Odluka Ministarstva unutrašnjih poslova br. 424, 24.7.2015.: O odobrenju tehničkih propisa o zaštiti od požara i spašavanju u zgradama;
- Odluka skupštine br. 626, dana 15.7.2015 — O odobrenju pravilnika o projektovanju zgrada.

2. OPŠTI PRINCIPI PRAVNOG SISTEMA

Projektovanje zaštite od požara zgrada bazira se na razumevanju izvora požara, materijala i sistema koji uzrokuju nastanak i širenje požara. Preporuke i instrukcije pravnog sistema počivaju na stavu da je mala verovatnoća da će se, u normalnim okolnostima, požar desiti istovremeno na dva mesta u zgradi. Preporuke date u standardima su opšte i odnose se na sve mere i procedure zaštite od požara. U obzir se uzimaju specifičnosti svake zgrade ili kompleksa zgrada. Iste opšte preporuke se primenjuju na postojeće i nove objekte. Ipak, kod postojećih objekata, pogotovo objekata od istorijskog značaja, javljaju se problemi koji nisu karakteristični za novoizgrađene objekte. Standardom su predviđene preporuke i instrukcije za projektovanje, održavanje i eksploataciju ovih objekata, kako bi se, racionalno, zadovoljio određeni nivo bezbednosti od požara za sve korisnike objekta. Ovim standardnom nisu predviđeni propisi za porodične kuće. Struktura pravne regulative je takva da se može primenjivati na novoizgrađene objekte i različite tipove rekonstrukcije i nadogradnje objekata. Takođe propisuje instrukcije za kontinualno održavanje bezbednosti od požara tokom celog veka eksploatacije objekata, uključujući instrukcije za projektante, kako bi se obezbedilo da projekat same konstrukcije doprinosi upravljanju zaštitom od požara.

3. OTPORNOST NA POŽAR KONSTRUKCIJE

Zahtevi u pogledu otpornosti na požar konstruktivnih elemenata se procenjuje na bazi opisa i vrste testiranja, propisanim posebnim zakonskim odredbama i podzakonskim aktima, u zavisnosti od vrste primenjenog materijala, npr. beton, čelik, puno drvo, lamelirano drvo, kompozitni materijali, lakirani materijali). Za objekte sa posebnim požarnim rizikom, potrebno je primeniti posebne propise.

4. KONSTRUKTIVNE KARAKTERISTIKE

U Tabeli 6 prikazane su zahtevane REI karakteristike konstruktivnih i nekonstruktivnih elemenata zgrade, u zavisnosti od tipa zgrade, maksimalne površine zgrade i etaže i tipologije vertikalnih komunikacija.

Tabela 6

Klasifikacija tipova zgrada i njihove karakteristike otpornosti (REI)

Tip zgrade	Maksimalna visina (m) zgrade	Maksimalna površina (m ²) etaže (u zavisnosti od kategorije zgrade)	Tipologija vertikalnih komunikacija (najmanje jedno stepenište za svaki lift)	"REI" karakteristike zidova (stepenišnog prostora, liftovskog okna, filter za dim, požarnih vrata, pregradnih elemenata)
a	Od 12 m do 24 m	8000	500	60 (**)
			500	60
			550	60
			600	60
b	Od 24 m do 32 m	6000	500	60 (**)
			550	60
			550	60
			600	60
c	Od 32 m do 54 m	5000	500	90
d	Od 54 m do 80 m	4000	500	90
e	Preko 80 m	2000	350 (*)	120

(*) Sa minimum 2 stepeništa za svaki požarni sektor. Na krovnoj terasi mora biti obezbeđeno mesto za sletanje i uzletanje helikoptera prve pomoći, dostupno iz svakog ugla za helikoptere.

(**) Samo za pregradne elemente između prostorija.

Otpornost na požar pregradnih elemenata mora biti zadovoljena u skladu sa Tabelom 6. Posebni pravilnici primenjuju se na konstrukcije i sisteme u zonama specifičnog rizika, uključujući ulazna vrata i specijalne pregradne sisteme sa sistemima za zaključavanje. Propisane REI karakteristike u zavisnosti od klasifikacije zgrada prema spratnosti, prikazane su u Tabeli 7.

Tabela 7

Klasifikacija zgrada u odnosu na spratnost sa propisanim REI karakteristikama

Spratnost	REI
niža i srednja	REI 60-90;
zgrade visine u dometu vatrogasne brigade, do 24 m	REI 90
zgrade preko 24 m	REI 90-120

5. ZAKLJUČCI

Pravna regulativa uključuje analizu i procenu rizika mere za zaštitu od požara (npr. sisteme za detekciju i dojavu požara, evakuacione simbole, požarna vrata i liftove) i pravila pozicioniranja vertikalnih komunikacija za evakuaciju (stepeništa i liftova), efikasnost evakuacije, aktivne mere zaštite od požara.

Ipak, u regulative nedostaju informacije i smernice o požarnoj bezbednosti fasada, uključujući propise o primenjenim materijalima, u skladu sa standarima zaštite od požara. Stoga je potrebno sprovesti detaljnu analizu, u cilju unapređenja regulative.

ENERGETSKA REHABILITACIJA I BEZBEDNOST OD POŽARA FASADA VISOKIH STAMBENIH ZGRADA

Suzana Draganić, Mirjana Malešev, Olivera Bukvić, Mirjana Laban

1. UVOD

Sektor zgradarstva u Evropskoj Uniji (EU) je odgovoran za oko 40% ukupne potrošnje energije, a istovremeno i za oko 36% emisije CO₂, što ga čini najvećim pojedinačnim potrošačem energije u Evropi. Trenutno je oko 35% zgrada u EU starije od 50 godina, a skoro 75% građevinskog fonda je energetska neefikasna, dok se samo 0,4-1,2% građevinskog fonda obnavlja svake godine [1]. Shodno tome, potencijalne uštede energije u sektoru zgradarstva su veće nego u bilo kom drugom sektoru, dok je unapređenje energetske performansi zgrada jedan od presudnih faktora za smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte.

Energetska rehabilitacija spoljnih zidova (fasada) zgrada je jedna od ključnih mera za unapređenje energetske performansi postojećih zgrada. Istovremeno, instalacija dodatnog sloja termoizolacije na spoljne zidove predstavlja integrativni faktor obnove i unapređenja kvaliteta i bezbednosti zgrade i njenih stanara [2].

Prethodnim istraživanjima o mogućnostima poboljšanja energetske efikasnosti u zgradama [3] identifikovana je potreba za energetske sanacijom fasada, kojom bi se uticalo na smanjenje potrošnje energije za grejanje do 60%, i kojom bi se zadovoljile potrebe za poboljšanjem stambenog komfora i bezbednošću zgrade od požara.

Bezbednost u slučaju požara i ušteda energije i zadržavanje toplote predstavljaju dva od sedam osnovnih zahteva koje građevinski proizvodi i zgrade moraju da zadovolje u ekonomski prihvatljivom vremenu upotrebe, uz redovno održavanje, a isti zahtevi se odnose i na postojeće objekte koji se podvrgavaju obnovi [4], [5]. Kako su problemi termičke obnove zgrada usko povezani sa problematikom bezbednosti od požara, primenjena rešenja istovremeno moraju da ispune i zahteve energetske efikasnosti i zahteve bezbednosti od požara.

Osnovni zahtev bezbednosti od požara je ispunjen ukoliko je u slučaju izbijanja požara [4]-[6]:

- (1) nosivost konstrukcije očuvana tokom određenog perioda;
- (2) nastajanje i širenje požara i dima u objektu ograničeno;
- (3) širenje požara na susedne objekte ograničeno;
- (4) omogućeno da korisnici napuste objekat ili budu spaseni na drugi način;
- (5) uzeta u obzir bezbednost spasilačkih timova.

Oblikovanje i materijalizacija spoljnih zidova zgrada imaju značajan uticaj na zahteve usmerene ka sprečavanju nastanka i širenja požara i dima u objektu i na susedne objekte. Pri energetske sanaciji spoljnih zidova zgrada, odabir materijala sa zadovoljavajućim termičkim ali lošim performansama reakcije na požar može da doprinese ostvarenju hazarda požara sa katastrofalnim posledicama – što se i pokazalo kroz povećan broj požara na zgradama u svetu.

Ukupan broj stanova u Republici Srbiji iznosi 3.23 miliona [6], na osnovu čega je jasno vidljiv potencijal uštede energije u stambenim zgradama. Stambeni fond izgrađen u drugoj polovini XX veka građen je prema danas energetske zastarelim propisima i to je

doprinelo da potrošnja energije u takvim zgradama u Republici Srbiji iznosi i preko 150 kWh/m² na godišnjem nivou, dok razvijene evropske zemlje troše i manje od 50 kWh/m² [8]. Dodatno, regulativa u oblasti zaštite od požara u ovom periodu je bila dosta skromna, bez detaljnijih odrednica, te danas ovi objekti predstavljaju poseban problem kada je u pitanju preduzimanje zaštitnih mera u cilju smanjenja rizika od pojave požara i njegovog širenja kada do požara dođe. U cilju poboljšanja trenutne situacije, potrebno je da Srbija ubrza aktivnosti koje se odnose na dostizanje standarda koji važe u EU.

U Novom Sadu je u drugoj polovini XX veka izgrađeno preko 41.223 stambene jedinice. Najveći broj zgrada je izgrađen primenom industrijskih sistema izgradnje (50%), dok su ostale zgrade izgrađene na klasičan način (36%) ili primenom unapređene tehnologije gradnje (14%) [9]. Više od 70 zgrada su visoke slobodnostojeće stambene zgrade (zgrade spratnosti P+10 i više), većinom izgrađene primenom industrijskog montažnog sistema izgradnje - IMS. Ranija istraživanja [10] su pokazala da je požarna bezbednost visokih stambenih zgrada na veoma niskom nivou. Prikupljeni i obrađeni statistički podaci nastanka požara ukazuju na stalni porast broja požara u višespratnim stambenim zgradama, kao i porast procentualnog učešća požara u stambenim zgradama u ukupnom broju svih nastalih požara [11]. Nakon višegodišnje eksploatacije objekata, usled nezadovoljavajućeg tehničkog stanja fasadnih elemenata, kao i neredovnog održavanja, izražena je potreba za obnovom i unapređenjem performansi fasada, radi usklađivanja sa zahtevima savremenih tehničkih propisa i standarda.

2. BEZBEDNOST OD POŽARA FASADA VISOKIH STAMBENIH ZGRADA

Bezbednost od požara visokih zgrada u Republici Srbiji je regulisana *Zakonom o zaštiti od požara* [6] **Error! Reference source not found.**, kao i *Pravilnikom o tehničkim normativima za zaštitu visokih objekata od požara* [12]. Ispunjenost osnovnog zahteva bezbednosti od požara u slučaju obnove dokazuje se izradom *Elaborata zaštite od požara* koji je sastavni deo tehničke dokumentacije koja se prilaže uz zahtev za izdavanje rešenja kojim se odobrava izvođenje radova na energetske sanaciji [12].

Tokom druge polovine XX veka Zakon [6] je više puta menjan i inoviran [14], [15].

Prvi propis koji se odnosio isključivo na visoke zgrade [15] je usvojen 1984. godine. Visoki objekti su u to vreme definisani kao *zgrade sa prostorijama za boravak ljudi čiji se podovi najvišeg sprata nalaze najmanje 22 m iznad najniže kote terena na koji je bio moguć pristup vatrogasnim vozilima i na kome je bila moguća intervencija uz korišćenje automehaničkih lestava*. Zahtevalo se da noseći i ojačani spoljni zidovi zgrada budu od negorivog materijala i otporni prema požaru najmanje 1,5 h. Izolacioni materijal na spoljnim stranama zidova je mogao biti goriv pod uslovom da je nalepljen na zid i pričvršćen tako da ne otpada u slučaju požara i da je sa spoljne strane obložen negorivim materijalom otpornim prema požaru najmanje 1 h. Ukoliko se izolacioni materijal postavljao sa unutrašnje strane zida, morao je biti negoriv. U suprotnom, zahtevalo se da bude zaštićen oblogom otpornom prema požaru najmanje 1,5 h. Dodatno, zahtevalo se da fasada objekta bude izvedena od materijala koji ne pospešuju prenos požara s jednog sprata na drugi, dok je između otvora na dva susedna sprata moralo postojati prekidno rastojanje visine najmanje 1 m. Ukoliko je ovo rastojanje iznosilo manje od 1 m, u nivou svakog sprata se zahtevalo izvođenje konzolnih delova konstrukcije čime bi se put plamena između dva sprata produžio.

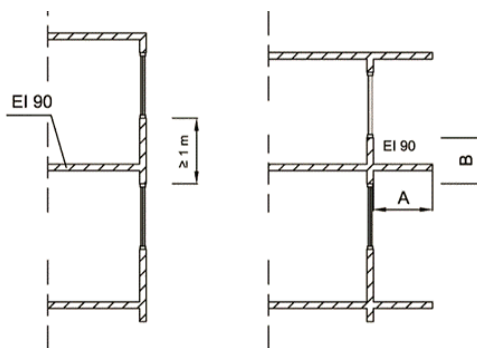
Usled modifikacije Pravilnika [16], 2011. godine visina visokih objekata je povećana na 30 m, a 2015. Pravilnik je zamenjen novim koji je u narednom periodu dva puta korigovan [12].

Aktuelni Pravilnik [12] propisuje tehničke zahteve bezbednosti od požara koji moraju biti ispunjeni prilikom projektovanja, izgradnje, rekonstrukcije i dogradnje visokih objekata.

U slučaju rekonstrukcije objekta zahtevi se odnose na deo objekta koji je predmet rekonstrukcije uz napomenu da se požarna bezbednost postojećeg objekta ne sme umanjiti rekonstrukcijom.

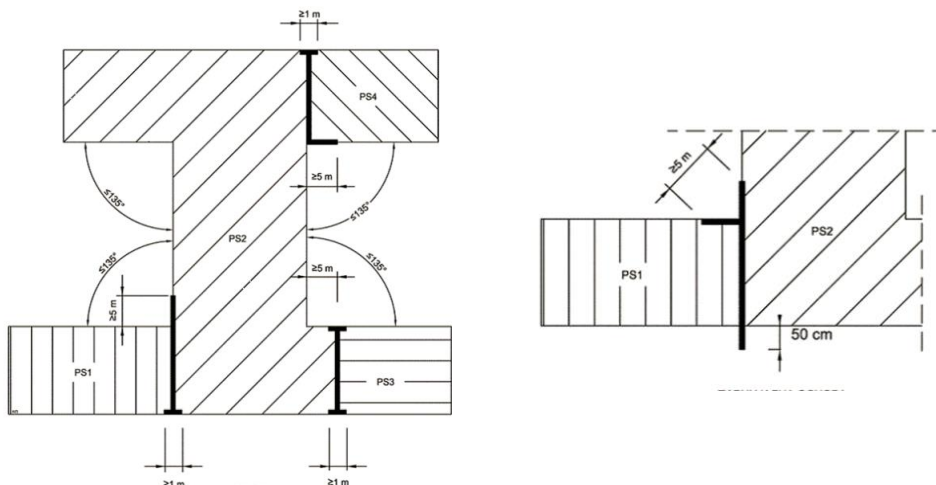
Zahteva se da spoljni noseći zidovi zgrade budu otporni prema požaru 2,0 h (RE-M 120), izvedeni od građevinskih materijala karakteristike reakcije na požar najmanje A2-s1,d0, prema *SRPS EN 13501-1* standardu [16]. Klasifikacija spoljnih zidova zgrada i materijala koji ulaze u sastav zidova, u kontekstu karakteristika reakcije na požar, je usklađena sa evropskom klasifikacijom.

Prenos požara sa sprata na sprat putem fasade ograničava se izvođenjem vertikalnog građevinskog elementa (prekidnog rastojanja) otpornog na požar najmanje 1,5 h. Zahteva se da ovaj element bude visine najmanje 1 m ili dužine najmanje 1,4 m ukoliko se put plamena između dva sprata sprečava postavljanjem konzolnih ploča u nivou međuspratne konstrukcije (Slika 1).



$$A+B \geq 1,40 \text{ m}$$

Slika 1. Vertikalno prekidno rastojanje [12]



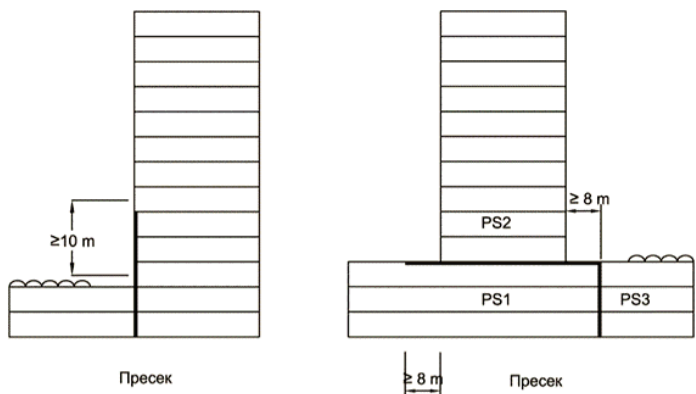
Slika 2. Horizontalno prekidno rastojanje [12]

Horizontalno širenje požara na fasadi na granici požarnog sektora sprečava se horizontalnim prekidnim rastojanjem (Slika 2), tako što se na mestu sučeljavanja izvodi deo fasadnog zida, u ukupnoj širini od minimum 1 m, iste otpornosti prema požaru kao i unutrašnji požarni zid sa kojim se sučeljava. Horizontalno prekidno rastojanje može se postići i na način da unutrašnji požarni zid na mestu sučeljavanja izlazi van fasade najmanje 0,50 m. Kod objekata složenog oblika kod kojih se požarni sektori spajaju pod uglom koji je jednak ili manji od 135°, radi sprečavanja horizontalnog širenja požara iz jednog požarnog sektora u drugi, na mestu ugla izvodi se zid iste otpornosti prema požaru kao i zid na granici požarnog sektora u dužini od 5 m mereno od unutrašnjeg ugla u kojem se spajaju požarni sektori.

Kod objekata čiji su pojedini delovi različite visine, kao i kod susednih prislonjenih objekata različitih visina (Slika 3), na zidu višeg dela, na visini najmanje 10 m iznad najviše tačke nižeg dela, ne sme biti nikakvih otvora ukoliko:

- se na krovu nižeg dela nalaze otvori na udaljenosti manjoj od 8 m od fasadnog zida višeg dela, ili
- međuspratna, odnosno krovna konstrukcija sa krovnim pokrivačem nižeg dela, nema otpornost prema dejstvu požara najmanje 2 h.

Granični zid mora imati otpornost prema požaru 2 h (REI-M 120) i mora biti izveden od građevinskih proizvoda karakteristike reakcije na požar najmanje klase A2-s1,d0.



Slika 3. Prislonjeni objekti različitih visina [12]

Zahtevi u kontekstu reakcije na požar spoljnih zidova visokih zgrada su takođe modifikovani nekoliko puta (Tabela 1).

Tabela 1
Evolucija zahteva za spoljne zidove visokih zgrada u kontekstu reakcije na požar [12]

SPOLJNI ZIDOVI	2015	2017		2018 (aktuelni)
	30 m i više	30 m - 40 m	40 m i više	30 m i više
Sistem zida	A1	A2-s1,d0	A1	A2-s1,d0
Komponente zida				
Spoljni sloj/slojevi	A1	A2-s1,d0	A1	A2-s1,d0
Potkonstrukcija	nije definisano	nije definisano		A2
Toplotno-izolacioni sloj	A1	A1	A1	A1

Kao što se može videti iz Tabele 1, u slučaju projektovanja, izgradnje i rekonstrukcije visokih zgrada, sve komponente spoljnih zidova moraju biti negorive. Od 2015. godine do danas zahtevi reakcije na požar su neznatno smanjeni (od A1 do A2-s1,d0). Modifikacijom iz 2017. godine uvedene su dve kategorije visokih zgrada. Poslednjom modifikacijom ova kategorizacija je isključena i definisani su dodatni zahtevi za elemente potkonstrukcije.

Potreba za unapređenjem bezbednosti od požara u postojećim i novim zgradama, kao i obaveza usaglašavanja domaćih tehničkih propisa sa propisima EU, inicirale su izradu *Pravilnika o tehničkim zahtevima bezbednosti od požara spoljnih zidova zgrada* [17]. Pravilnikom su propisani tehnički zahtevi bezbednosti od požara koje građevinski proizvodi u sastavu spoljnih zidova moraju ispuniti prilikom projektovanja, rekonstrukcije, izgradnje, dogradnje, adaptacije, upotrebe i održavanja zgrada. Propis klasifikuje zgrade u pet kategorija – A, B, V1, V2 i G, što odgovara klasifikaciji datoj *Pravilnikom o klasifikaciji zgrada* [18]. Od stupanja na snagu 2016. godine do danas Pravilnik [17] je dva puta revidiran i inoviran. Visoki stambeni objekti prvenstveno su (2016) svrstavani u kategoriju G (zgrade visine preko 22 m) sa zahtevom da sistem zida, kao i sve njegove komponente, budu negorivi (Tabela 2).

Tabela 2

Evolucija zahteva za građevinske proizvode u sastavu spoljnog zida u kontekstu reakcije na požar [17]

Kategorizacija zgrade	G (2016)	G (2017)
Samonoseći prefabrikovani fasadni paneli i zidani/betonski zidovi sa toplotnoizolacionim slojem i spoljnim zidanim, betonskim i drugim sličnim slojem za zaštitu od dejstva atmosferilija, bez ventilisanog vazdušnog sloja		
Spoljni zid	A1	A2-s1,d1
Komponente zida		
Spoljni sloj/slojevi	A2-s1,d1	A2-s1,d0
Izolacioni sloj	A2-s1,d1	B-s2,d1
Zidani (opeka, blokovi i sl.) ili betonski (liveni na licu mesta ili prefabrikovani) zidovi sa toplotno-izolacionim slojem i spoljnim zidanim, betonskim ili bilo kojim drugim slojem za zaštitu od dejstva atmosferilija, sa uključenim ventilisanim vazdušnim slojem/međuprostorom		
Spoljni zid	A1	A2-s1,d0
Komponente zida		
Spoljni sloj/slojevi	A1	A2-s1,d0
Potkonstrukcija		
- linijski element veze	A1	A2
- tačkasti element veze	A2	A2
Izolacioni sloj	A1	A1
Zidani ili betonski zidovi sa kontaktnim toplotno - izolacionim sistemom (ETICS)		
Spoljni zid	A1	A2-s1,d0
Komponente zida		
Spoljni sloj/slojevi	A2-s1,d1	A2-s1,d0
Izolacioni sloj	A1	A1

Prva modifikacija je dovela do smanjenja kriterijuma za ceo sistem zida, kao i komponenti sistema gde se u pojedinim slučajevima dozvoljava ugradnja gorivih komponenti (kod sendvič zidova izolacioni sloj može biti goriv, klase reakcije na požar B-s2,d1). Poslednjom modifikacijom, kategorija G je ograničena na 30 m, u pogledu visine objekata koji joj pripadaju, čime su visoke zgrade isključene iz kategorizacije.

3. ENERGETSKA EFIKASNOST I TERMIČKA ZAŠTITA ZGRADA

Od 2012. godine primena evropskog zakonodavstva u oblasti energetske efikasnosti zgrada u Srbiji je obezbeđena kroz *Pravilnik o energetske efikasnosti* [19] i *Pravilnik o uslovima, sadržini i načinu izdavanja sertifikata o energetskim svojstvima zgrada* [20]. Pri obnovi postojećih zgrada dozvoljena vrednost koeficijenta prolaza toplote spoljnih zidova zgrada je ograničena na 0,4 W/m²K, dok je energetska efikasnost zgrade ostvarena ako su obezbeđeni minimalni propisani uslovi komfora i ako potrošnja energije za grejanje ne prelazi 70 kWh/m² korisne površine.

Utvrđivanje ispunjenosti uslova energetske efikasnosti vrši se izradom *Elaborata energetske efikasnosti*, koji je sastavni deo tehničke dokumentacije pri energetske sanaciji [12].

U Tabeli 3 dat je pregled evolucije graničnih vrednosti koeficijenata prolaza toplote spoljnih zidova zgrada.

Tabela 3
Evolucija zahteva za spoljne zidove zgrada u kontekstu koeficijenata prolaza toplote [20], [22], [24]-[28]

Koeficijent prolaza toplote (W/m ² K)	Godina donošenja propisa					
	1967	1970	1980	1987	1988	2011
I klimatska zona	1,79	1,69	1,225	1,20	1,10	
II klimatska zona	1,55	1,45	0,93	0,90	0,90	postojeće zgrade: 0,40 nove zgrade: 0,30
III klimatska zona	1,37	1,10	0,83	0,80	0,80	

Prvi zahtevi za termičku zaštitu spoljnih zidova zgrada definisani su 1967. godine kroz *Pravilnik o minimalnim tehničkim uslovima za izgradnju stanova* [21]. Zahtevi su se odnosili na maksimalne vrednosti koeficijenata prolaza toplote za obimne zidove za tri klimatske zone. Do ovog trenutka, koeficijent prolaza toplote za spoljni zid nije bio ograničavajući parametar, već je proračun (prema *DIN 4701/1947* standardu [21]) bio usmeren ka ispunjenju zahteva toplotnog komfora u prostorijama.

Tri godine kasnije, 1970. godine, donet je *Pravilnik o tehničkim merama i uslovima za toplotnu zaštitu zgrada* [23], prvi propis koji se isključivo odnosio na toplotnu zaštitu zgrada. Pravilnikom je definisan način određivanja koeficijenta prolaza toplote, a istovremeno su pooštrene granične vrednosti.

Deceniju kasnije, 1980. godine, termička zaštita zgrada je podignuta na viši nivo usvajanjem U.J5 serije obavezujućih standarda *Toplotna tehnika u građevinarstvu*:

- U.J5.600 - Tehnički uslovi za projektovanje i građenje zgrada [24]
- U.J5.510 - Metode proračuna koeficijenta prolaza toplote u zgradama [25]
- U.J5.520 - Proračun difuzije vodene pare u zgradama [26]
- U.J5.530 - Proračun faktora prigušenja i proračun kašnjenja oscilacija temperature kroz spoljašnje građevinske pregrade zgrada u letnjem razdoblju [27].

Pored pooštavanja graničnih vrednosti koeficijenata prolaza toplote, novim standardima su u termički proračun uvedeni parametri difuzije vodene pare i tretmana letnjeg režima.

U narednom periodu navedeni standardi su više puta preispitivani i modifikovani, rezultujući smanjenjem dozvoljenih vrednosti koeficijenata prolaza toplote i uvođenjem dve nove kategorije u termički proračun: kategorije specifičnih toplotnih gubitaka zgrade i kategorije specifičnih toplotnih gubitaka za karakteristične prostorije u objektu.

4. STUDIJA SLUČAJA

Tri slobodnostojeće visoke stambene zgrade S9, S10 i S11 (Slika 4) locirane su u Novom Sadu, u gradskoj četvrti Novo naselje (poznato i kao Bistrica). Trinaestospratne zgrade projektovao je arhitekta Miodrag Milidragović i izgrađene su tokom 80-ih godina XX veka. U svakoj zgradi postoji 75 stanova.

Konstrukcija zgrada je tipska, montažna, sistema IMS, sa osovinskim rasterom stubova 4,8 m x 4,2 m. Sistem je skeletna konstrukcija sastavljena od montažnih troetažnih, dvoetažnih i jednoetažnih stubova poprečnog preseka 38 x 38 cm i tavaničnih ploča. Sve montažne tavanice su kasetirane sa finiliziranim plafonom, debljine 22 cm. Kasete su ispunjene pločama od ekspaniranog polistirena (EPS) $d = 15$ cm kao izgubljenom oplatom. Konzolne tavanice su raspona 150 cm. Skeletna konstrukcija je ukružena montažnim AB platnima debljine $d = 15$ cm, sem u nivou tehničke etaže i krovne konstrukcije gde su platna livena na licu mesta. Izuzev same konstrukcije, prefabrikacijom su obuhvaćeni i spoljna fasada, delovi ograda lođa, žardinjere, kupatilske kabine, kao i WC kabine [28].

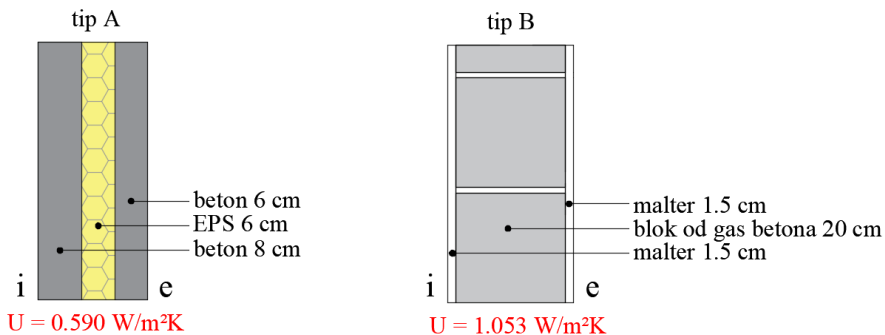


Slika 4. Analizirane visoke slobodnostojeće stambene zgrade S9, S10 i S11

Analizirana su dva tipa spoljnih zidova ka grejanom prostoru (Slika 5):

- tip A – fasadni paneli i
- tip B – fasadni zidovi u lođama.

Fasadni paneli su prefabrikovani betonski paneli sa ispunom od EPS-a kao termoizolacijom. Svi glavni delovi fasade su izvedeni od montažnih betonskih panela, izuzev zidova nestambenog dela prizemlja i tavanke etaže koji su izvedeni na licu mesta. Zidovi u lođama su izvedeni od gas betonskih blokova. Za oba tipa zidova određen je koeficijent prolaza toplote (Slika 5).



Slika 5. Analizirani spoljni zidovi: tip A – fasadni panel, tip B – zid u lođi

Na osnovu analize vrednosti koeficijenta prolaza toplote zaključeno je da fasadni zidovi ne zadovoljavaju trenutno važeće propise ($U_{2012} < 0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$). Shodno tome, u cilju unapređenja termičke zaštite, predložena je instalacija dodatnog sloja termoizolacije sa spoljašnje strane fasadnih zidova.

Pored poboljšanja energetske efikasnosti zgrade, postavljanje toplotne izolacije sa spoljne strane zidova ima i druge prednosti:

- štiti postojeće elemente fasade i značajno usporava proces deterioracije;
- sprečava kondenzaciju vodene pare i omogućava akumuliranje toplote u zidovima, doprinoseći i toplotnom komforu;
- omogućava kontinualnu termoizolaciju fasade, čime se sprečava pojava toplotnih mostova, itd.

Istovremeno, postavljanje dodatnog sloja toplotne izolacije sa spoljne strane zidova zahteva upotrebu skela što značajno povećava troškove u odnosu na slučajeve kada se izolacija postavlja sa unutrašnje strane zidova.

Pri odabiru termoizolacionih materijala, kako bi odabrana rešenja izuzev zahteva za termičkom zaštitom istovremeno zadovoljila i zahteve bezbednosti od požara (Tabela 1), razmatrani su samo negorivi termoizolacioni materijali. Fizička svojstva odabranih termoizolacionih materijala prikazana su u Tabeli 4.

Tabela 4
Fizička svojstva termoizolacionih materijala razmatranih u studiji slučaja

TERMOIZOLACIONI MATERIJAL	Kamena vuna	Staklena vuna	Čelijasti beton
Zapreminska masa (kg/m^3)	100	21	115
Toplotna provodljivost (W/mK)	0,035	0,034	0,045
Specifična toplota (kJ/kgK)	1	1	1,3
Faktor otpornosti na difuziju vodene pare	1	1	3
Klasa reakcije na požar	A1	A1	A1

Pored niske toplotne provodljivosti, *mineralna vuna* ima visoku otpornost na vlagu, dobre akustične performanse, nezapaljiva je i neće se topiti sve dok temperatura ne pređe 1000°C [30]. *Čelijasti beton* je ekološki, mineralni izolacioni materijal koji u osnovi čine pesak, kreč, cement i voda. Negoriv je, dimenziono stabilan i sprečava pojavu plesni. Materijal „diše” tako što privremeno akumulira vlagu, a zatim je ponovo oslobađa u okolni prostor [31].

Za oba tipa zidova predložena su tri rešenja obnove (Slike 6-8):

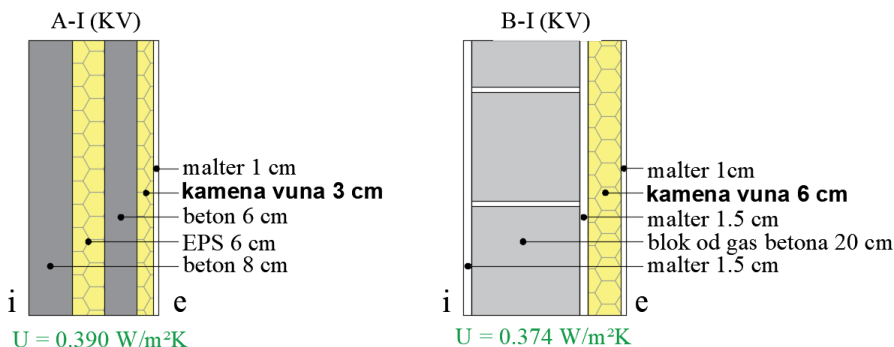
Rešenje I: ETICS sa kamenom vunom (A-I i B-I zidovi);

Rešenje II: sistem sa staklenom vunom (A-II i B-II zidovi);

Rešenje III: ETICS sa čelijastim betonom (A-III i B-III zidovi).

Za sve tri varijante i za obe vrste fasadnih zidova određena je minimalna debljina termoizolacionog sloja, potrebna da se zadovolje aktuelni zahtevi. Unapređene vrednosti koeficijenta prolaza toplote prikazane su na Slikama 6-8.

U varijanti I (Slika 6), fasadni termo-izolacioni sistem (ETICS) se sastoji od tvrdih ploča kamene vune, pričvršćenih za podlogu uz pomoć lepka i mehaničkih sredstava. Preko izolacije se nanosi tanak, armiran sloj i dodatni završni zaštitni sloj. Proračunom je utvrđeno da je za postizanje zadovoljavajućeg koeficijenta prolaza toplote potrebno 3 cm kamene vune za zidove tipa A i 6 cm za zidove tipa B.



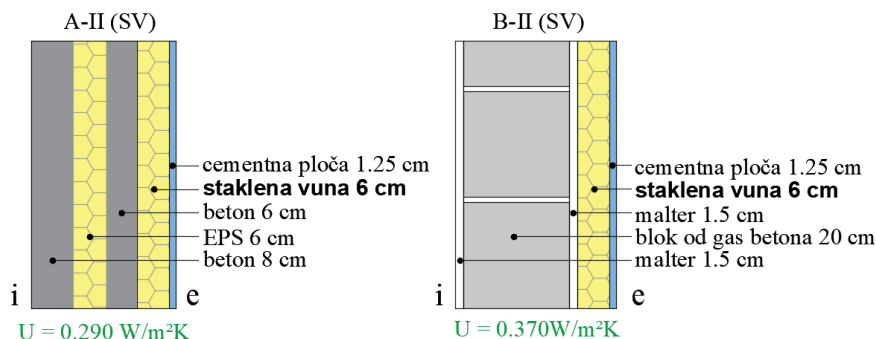
Slika 6. Predloženi fasadni sistem sa kamenom vunom – Rešenje I

U varijanti II (Slika 7) fasadni sistem se sastoji od metalne potkonstrukcije, polučvrstih izolacionih ploča od staklene mineralne vune i vodootpornih, nezapaljivih cementnih ploča ojačanih mrežom od staklenih vlakana, izrađenih od čistog mineralnog lakog betona.

Na postojeći zid se uz pomoć mehaničkih pričvršćivača prvo postavlja metalna potkonstrukcija, nakon čega se staklena vuna postavlja između nosača potkonstrukcije i učvršćuje na podlogu na isti način kao kamena vuna u varijanti I.

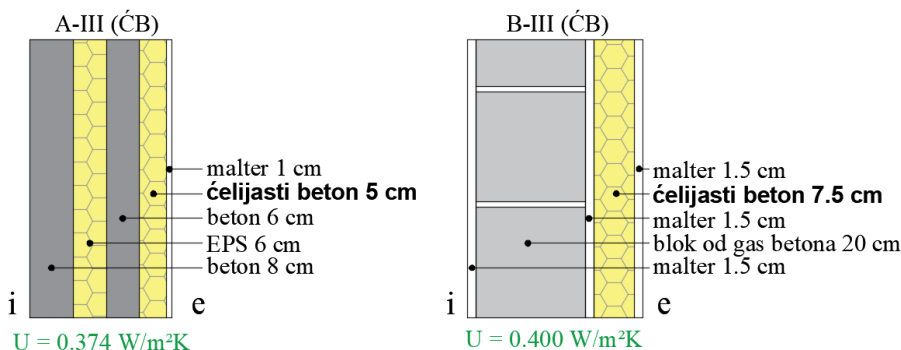
U poslednjem koraku cementne ploče se pričvršćuju za potkonstrukciju i nanosi se završni dekorativni sloj.

Proračunom je utvrđeno da je za postizanje zadovoljavajućeg koeficijenta prolaza toplote potrebno 5 cm staklene vune za obe vrste zidova. Međutim, kako je debljina ovog sloja uslovljena dimenzijama potkonstrukcije, usvojeno je 6 cm.



Slika 7. Predložen fasadni sistem sa staklenom vunom – Rešenje II

U varijanti III (Slika 8), ETICS je sastavljen od ploča ćelijastog betona i postavlja se slično kao i fasadni sistem predložen varijantom I. Proračunom je utvrđeno da je za postizanje zadovoljavajućeg koeficijenta prolaza toplote potrebno 5 cm toplotne izolacije za zidove tipa A i 7,5 cm za zidove tipa B.



Slika 8. Predložen fasadni sistem sa ćelijastim betonom – Rešenje III

U poslednjoj fazi predložena rešenja su analizirana u kontekstu:

1. načina postavljanja na postojeće zidove,
2. osetljivosti na mehanička oštećenja,
3. otpornosti na dejstvo vetra i
4. cene odabranih termoizolacionih materijala.

1. Vizuelnim pregledom fasadnih zidova uočena su određena oštećenja usled čega se nameće potreba za procenom fizičkog stanja podloge na koju će se primenjivati ETICS, kao i potreba za pripremom podloge. Postoji nekoliko metoda za ispitivanje pogodnosti podloge za primenu ETICS-a, a definisane su i mere koje se moraju sprovesti na postojećim zidovima pre postavljanja [32]. Ugradnja toplotne izolacije u varijanti II ne zahteva posebnu pripremu podloge, što daje prednost ovom sistemu u odnosu na ostala dva sistema.

2. Integritet predloženih sistema je ključan za postizanje željene efikasnosti zgrade i očekivanog nivoa performansi [33]. Čak i manja mehanička oštećenja (prouzrokovana vandalizmom, gradom ili drugim) na završnom sloju ETICS-a olakšavaju prodor vode u

strukturu zida i dovode do akumulacije vlage, usled čega se ubrzava proces njegove deterioracije i smanjuje efikasnost izolacije [34]. U kontekstu osetljivosti na mehanička oštećenja, fasadni sistem II ima prednost u odnosu na ostala dva sistema, zahvaljujući cementnim pločama koje ga štite od spoljnih uticaja.

3. Uticaj vetra predstavlja glavno opterećenje koje fasada mora da podnese. ETICS karakteriše određena osetljivost na dejstvo vetra. Naime, čupanje ETICS-a sa fasade zgrade najčešće je posledica loše adhezije između maltera i zida [35]. U kontekstu otpornosti na dejstvo vetra, varijanta II predstavlja optimalno rešenje uz uslov da dimenzije i poprečni preseki potkonstrukcije moraju odgovarati pritiscima i sišućem dejstvu vetra [36]. Nameće se potreba za sprovođenje dodatne analize uticaja vetra na predložene sisteme kako bi se obezbedila njihova stabilnost i pouzdanost.

4. Pored troškova termoizolacionog materijala, ukupni troškovi uključuju i troškove ostalih komponenti fasadnog sistema (proizvoda za lepljenje, mrežice, ankera, maltera itd.), kao i troškove ugradnje, koji zavise od tipa zgrade, njene kompleksnosti, položaja, pristupačnosti, fizičkog stanja podloge (postojećih zidova) i druge troškove. Pod pretpostavkom da bi troškovi ugradnje i troškovi ostalih komponenti fasadnog sistema za sva tri predložena rešenja bili slični, analizirani su samo troškovi izolacionog materijala, kao i troškovi dodatnog sloja (cementnih ploča) koji se pojavljuje u varijanti II (Tabela 5).

Tabela 5
Procenjeni troškovi za analizirane termoizolacione materijale i cementnu ploču

Fasadni sistem		V-I	V-II		V-III
Materijal		Kamena vuna	Staklena vuna	Cementna ploča	Ćelijasti beton
Zidovi tipa A	Debljina sloja	3 cm	6 cm	1,25 cm	5 cm
	Trošak	4 €/m ²	5.5 €/m ²	20 €/m ²	8 €/m ²
Zidovi tipa B	Debljina sloja	6 cm	6 cm	1,25 cm	7,5 cm
	Trošak	6.5 €/m ²	5.5 €/m ²	20 €/m ²	16.5 €/m ²
Rang predloženih rešenja		1	3	2	

Fasadni sistem V-II se nameće kao rešenje koje zahteva najvišu investiciju, jer je potrebno postaviti i nezapaljive panele čiji je zadatak da pridržavaju staklenu vunu koja se proizvodi u rolnama ili u obliku polukrutih panela te se ne može primeniti samostalno, u okviru ETICS-a. Ova varijanta je skoro 5 puta skuplja od varijante V-I i dvostruko skuplja od V-III varijante, dok je varijanta V-III 2 puta skuplja od V-I varijante. Analiza cena nameće kamenu vunu (V-I fasadni sistem) kao optimalan izbor za energetska sanaciju fasadnih zidova.

5. ZAKLJUČAK

Kako su potencijalne uštede energije u sektoru zgradarstva veće nego u bilo kom drugom sektoru, poboljšanje energetske performansi zgrada presudno je za postizanje klimatskih i energetske ciljeva koje je EU postavila za 2030. godinu.

Jedna od ključnih mera za unapređenje energetske efikasnosti zgrada jeste energetska rehabilitacija spoljnih zidova zgrada, instalacijom dodatnog sloja termoizolacije. Izolacioni materijali moraju garantovati prihvatljive performanse tokom celog životnog ciklusa zgrade, i termičke performanse nisu jedini parametar na koji treba obratiti pažnju prilikom odabira odgovarajućeg termoizolacionog materijala [37]. Ukoliko se problem posmatra

sveobuhvatno, izbor najpovoljnijeg rešenja zahteva analizu sa više različitih aspekata i primenu adekvatne metode optimizacije.

Evidentno je da je broj požara u visokim stambenim zgradama, koji su se širili putem fasade, poslednjih godina porastao, najviše kao posledica upotrebe zapaljivih materijala i neusklađenosti sa propisanim standardima i zakonskim propisima. Stoga, izbor materijala za energetske sanacije fasade ne sme ugroziti požarnu sigurnost zgrade, jer oblik i materijalizacija fasadnih elemenata pripadaju grupi ključnih faktora za razvoj požara i širenje vatre.

Oštriji zahtevi za energetske efikasne zgrade, obnavljanje postojećeg građevinskog fonda, primena novih materijala i posebno nedavni požari u svetu [38] iniciraju potrebu za detaljnijom analizom bezbednosti od požara fasada.

REFERENCES

- [1] Evropska Komisija 2020, Energy performance of buildings directive article, Pristupljeno: 2020-02-06
- [2] Laban, M. i drugi: Svojstva građevinskih proizvoda i osnovni zahtevi zaštite fasada od požara pri energetske obnovi stambenih zgrada, Tehnika – naše građevinarstvo, Vol. 69 (2015), str. 759-766
- [3] Laban, M i Folić, R.: Energy Efficiency of Industrially made buildings influenced by thermal properties of facades, Thermal science, Vol. 18, No. 2 (2014), str. 615-630
- [4] Zakon o građevinskim proizvodima ("Sl. glasnik RS", br. 83/2018)
- [5] The Construction Products Regulation No 305/2011
- [6] Zakon o zaštiti od požara ("Sl. glasnik RS", br. 111/2009, 20/2015, 87/2018 i 87/2018 - dr. zakoni)
- [7] Popis stanovništva, domaćinstva i stanova 2011. u Republici Srbiji, Usporedni pregled broja domaćinstava 1948-2011. i stanova 1971-2011., Republički zavod za statistiku, Beograd (2014)
- [8] Ćirović, N. i drugi: Energy efficiency on to examples of remote heating in Serbia, Zbornik radova sa 10. međunarodnog naučnog skupa Nauka i visoko obrazovanje u funkciji održivog razvoja, str. 56-65, ISBN 978-86-83573-90-5, Mećavnik-Drvengrad, Užice, Oktobar 2017
- [9] Laban, M.: Unapređenje performansi omotača višespratnih montažnih i polumontažnih stambenih zgrada u Novom Sadu, Doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad (2012)
- [10] Milanko, V. i drugi: Fire safety problems of residential towers, Zbornik radova sa 2. Međunarodnog naučnog skupa Požarno inženjerstvo, str. 255-261, ISBN 80-89241-03-4, Lučenec, Slovačka, October 2006
- [11] Vatrogasno-spasilačka jedinica Novi Sad, Uprava za vanredne situacije, Ministarstvo unutrašnjih poslova Srbije, 2018
- [12] Pravilnik o tehničkim normativima za zaštitu visokih objekata od požara ("Sl. glasnik RS", br. 80/2015, 67/2017 i 103/2018)
- [13] Pravilnik o sadržini, načinu i postupku izrade i načinu vršenja kontrole tehničke dokumentacije prema klasi i nameni objekata ("Sl. glasnik RS", br. 73/2019)
- [14] Zakon o zaštiti od požara ("Sl. glasnik FNRJ", br. 18/56 i "Sl. glasnik SFRJ", no. 25/70)
- [15] Zakon o zaštiti od požara ("Sl. glasnik SRS", br. 37/88 i "Sl. glasnik RS", bt. 53/93, 67/93 i 48/94)
- [16] Pravilnik o tehničkim normativima za zaštitu visokih objekata od požara ("Sl. list SFRJ", br. 7/84 i "Sl. glasnik RS", br. 86/2011)
- [17] SRPS EN 13501-1:2019 Požarna klasifikacija građevinskih proizvoda i elemenata zgrade – Deo 1: Klasifikacija na osnovu podataka dobijenih ispitivanjem reakcije na požar
- [18] Pravilnik o tehničkim zahtevima bezbednosti od požara spoljnih zidova zgrada ("Sl. glasnik RS", br. 59/2016, 36/2017 i 6/2019)
- [19] Pravilnik o klasifikaciji objekata („Sl.glasnik RS“, br. 22/2015)

- [20] Pravilnik o energetskejoj efikasnosti zgrada ("Sl. glasnik RS", br. 61/2011)
- [21] Pravilnik o uslovima, sadržini i načinu izdavanja sertifikata o energetskekim svojstvima zgrada ("Sl. glasnik RS", br. 69/2012 i 44/2018 - dr. zakon)
- [22] Pravilnik o minimalnim tehničkim uslovima za izgradnju stanova, Službeni list SFRJ br. 45/1967
- [23] DIN 4701: 1947 Heizungen - Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfes von Gebäuden
- [24] Pravilnik o tehničkim merama i uslovima za toplotnu zaštitu zgrada, Sužbeni list SFRJ br. 35/1970
- [25] SRPS (JUS) U.J5.600 (1980, 1987, 1989, 1998) Toplotna tehnika u građevinarstvu – Tehnički uslovi za projektovanje i građenje zgrada
- [26] SRPS (JUS) U.J5.510 (1980, 1987) Toplotna tehnika u građevinarstvu – Metode proračuna koeficijenta prolaza toplote u zgradama
- [27] SRPS (JUS) U.J5.520 (1980, 1997) Toplotna tehnika u građevinarstvu – Proračun difuzije vodene pare u zgradama
- [28] SRPS (JUS) U.J5.530 (1980, 1990, 1997) Toplotna tehnika u građevinarstvu – Proračun faktora prigušenja i proračun kašnjenja oscilacija temperature kroz spoljašnje građevinske pregrade zgrada u letnjem razdoblju
- [29] Projektno-tehnička dokumentacija za S9, S10 i S11 stambene zgrade na Novom naselju u Novom Sadu: Tehnički opis, Novi Sad (1982)
- [30] Abu-Jdayil, B. i drugi: Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview, *Construction and Building Materials*, Vol. 214 (2019), pp. 709–735, ISSN: 0950-061
- [31] Mineral insulation board, Pristupljeno: 2020-02-06
- [32] Evropska asocijacija za ETICS: European guideline for the application of ETICS, Pristupljeno: 2020-02-09
- [33] Tavares, J. i drugi: Computational models applied to the service life prediction of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS), *Journal of Building Engineering*, Vol. 27 (2020), pp. 1-12, E-ISSN: 2352-7102
- [34] Sudol i drugi: Impact resistance of external thermal insulation systems, *MATEC Web of Conferences*, Volume 163, 8th Scientific-Technical Conference on Material Problems in Civil Engineering, pp. 1-8, ISBN: 978-2-7598-9052-1, Cracow, Poland, June 2018, DOI: 10.1051/mateconf/201816308004
- [35] Adrian-Cosmin, B. i drugi: Alternative Solution for Thermal Rehabilitation of Buildings with Polystyrene Panels, *Procedia Engineering*, Vol. 181 (2017), pp. 712-717, ISSN: 1877-7058
- [36] Technical solutions for drywall exteriors, Knauf AQUAPANEL Exterior Wall, Pristupljeno: 2020-02-10
- [37] Schiavoni, S. i drugi: Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 62, (2016), pp. 988-1011, ISSN 1364-0321
- [38] The Guardian, Grenfell Tower fire, Accessed: 2020-02-10

ZAKLJUČNE NAPOMENE

Inženjeri koji se bave bezbednošću od požara moraju konstantno unapređivati svoja znanja vezano za razvoj tehnologija i materijala iz oblasti građevinarstva, kako bi bili sposobni da svojim razumevanjem, predviđanjima i reagovanjem, spreče katastrofalne događaje i narušavanje bezbednosti ljudi i imovine.

U okviru projekta K-FORCE uspešno su implementirani master programi (šest) u oblasti upravljanja rizikom od katastrofalnih događaja i požara na visokoškolskim institucijama u Albaniji, Bosni i Hercegovini i Srbiji. Takođe, u cilju obezbeđenja održivosti studija, tj. obezbeđenja nastavnog kadra za region zapadnog Balkana, i obrazovanje budućih nastavnika i naučnika, osnovane su multidisciplinarne doktorske studije u Srbiji, na Fakultetu tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu. Kreirani su i implementirani i novi programi celoživotnog učenja u ovoj oblasti, za stručnjake koji već rade u praksi (LLL kursevi). Zajedničkom saradnjom u okviru K-FORCE projekta, između projektnih partnera iz Evropske Unije i sa Balkana, ostvaren je zadati cilj pronalaženja najboljeg mogućeg obrazovnog modela, sa bogatim repozitorijem materijala za učenje, dostupnim u otvorenom pristupu na sajtu projekta www.k-force.uns.ac.rs.

Za inženjerima zaštite od požara je uvek postojala velika potražnja u industriji, osiguravajućim društvima, spasilačkim službama, obrazovnim institucijama, konsultantskim firmama i državnim telima širom sveta. Savremeno inženjerstvo upravljanja rizikom od katastrofalnih događaja i požara omogućava studentima da budu visoko kompetentni u ovoj oblasti i da kombinuju i primenjuju znanje iz različitih oblasti, kako bi građevinski objekat postao siguran po pitanju bezbednosti od požara i drugih uticaja prirodnih i antropogenih hazarda, uz istovremeno ispunjenje zakonskih normi, potreba investitora i projektanata.

Nadamo se da će naši studenti nastaviti da se usavršavaju i nakon studija i da će aktivno učestvovati u izgradnji zgrada i naselja otpornih na požare.

Urednici

Izvod iz recenzije

Knjiga *Bezbednost zgrada od požara, Pristup i praksa Zapadnog Balkana*, obuhvata sve bitne aspekte bezbednosti od požara. Kao suštinski aspekt inženjerstva bezbednosti od požara, definisane su mere koje je potrebno preduzeti u cilju postizanja zahtevanog nivoa požarne bezbednosti i date su osnove za projektovanje konstrukcija izloženih požaru.

Kako je požar, prema preporukama datim u Evrokodovima za proračun konstrukcija, identifikovan kao uticaj koji se mora uzeti u obzir kao akcidentno opterećenje, ova knjiga daje uvid u performanse građevinskih materijala pri izlaganju visokim temperaturama, kao i uputstva za projektovanje betonskih, čeličnih i drvenih konstrukcija otpornih na požar.

Problematika oštećenja građevinskih konstrukcija u požaru je posebno obrađena, kao i odgovarajuće metode za procenu stanja i sanaciju konstrukcija nakon požara. Dodatno je analiziran problem bezbednosti od požara pri energetske rehabilitaciji zgrada, sa akcentom na fasade.

U pogledu sadržaja ova knjiga u potpunosti obuhvata temu bezbednosti zgrada od požara i namenjena je inženjerima upravljanja rizikom od katastrofalnih događaja i požara, građevinskim inženjerima i arhitektama. Gradivo je izloženo jasno i sa dovoljno ilustracija i fotografija, a sadrži i kratak presek aktuelne legislative u ovoj oblasti na Balkanu, pa zbog svega rečenog predstavlja značajnu literaturu u oblasti inženjerstva bezbednosti od požara.

Podrška Evropske komisije za izradu ove publikacije ne predstavlja podršku sadržaju, koji odražava stavove samih autora, a Komisija ne može biti odgovorna za bilo kakvu upotrebu informacija sadržanih u ovoj publikaciji.

The European Commission support for the production of this publication does not constitute an endorsement of the contents which reflects the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.



Co-founded by the Erasmus+ Programme of the European Union

The European Commission support for the production of this publication does not constitute an endorsement of the contents which reflects the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

partners



UNIVERSITY OF NOVI SAD



HIGHER EDUCATION TECHNICAL SCHOOL OF PROFESSIONAL STUDIES



UNIVERSITY OF TRANA



UNIVERSITY OF BANJA LUKA



TURGUT OZAL EDUCATION SHA EPOKA UNIVERSITY



UNIVERSITY OF TUZLA



LUND UNIVERSITY



TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK



SS. CYRIL AND METHODIUS UNIVERSITY IN SKOPIE



AALBORG UNIVERSITY DENMARK
AALBORG UNIVERSITY



PROTECTION AND RESCUE DIRECTORATE OF THE REPUBLIC OF NORTH MACEDONIA



NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION RS



EUROPEAN YOUTH PARLIAMENT SRBIJA

associated



UNION OF CHAMBERS OF COMMERCE & INDUSTRY OF ALBANIA



MINISTRY OF SECURITY OF BOSNIA AND HERZEGOVINA
Protection and Rescue Sector,
Sector for International Cooperation and European Integrations

www.kforce.uns.ac.rs



РЕПУБЛИКА СРБИЈА
АУТОНОМНА ПОКРАЈИНА ВОЈВОДИНА

ПОКРАЈИНСКИ СЕКРЕТАРИЈАТ ЗА ФИНАНСИЈЕ