

## PRORAČUN OTPORNOSTI GRAĐEVINSKIH KONSTRUKCIJA NA REALNI POŽAR REAL FIRE RESISTANCE CALCULATION OF BUILDING STRUCTURES

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK /UDC: 699.814

Rad primljen / Paper received:

Adresa autora / Author's address:

<sup>1</sup>) University of Niš, Faculty of Occupational Safety, Niš,  
[dušica.pesic@znrfak.ni.ac.rs](mailto:dušica.pesic@znrfak.ni.ac.rs)

<sup>2</sup>) Ministry of Finance, Tax Administration, Novi Sad

### Ključne reči

- građevinska konstrukcija
- noseća sposobnost
- Eurocode EN 1-1-2
- realni požar
- otpornost na požar

### Izvod

U radu je prikazan novi koncept proračuna otpornosti građevinskih konstrukcija na realni požar koji koristi računarske modele zasnovane na realnom požarnom opterećenju. Modeli su zasnovani na Eurocode EN 1991-1-2. Proračun ponašanja konstruktivnih elemenata u uslovima požara sastoji se iz sledećih faza: izbor scenarija požara, određivanje vrste požara, definisanje razvoja pretpostavljenog požara, toplotne i temperaturne analize u prostoriji i kroz konstruktivne elemente i mehaničke analize konstruktivnih materijala.

Na osnovu rezultata dobijenih termičkim i mehaničkim analizama i ulaznih podataka o konstrukciji, analizama konstrukcije se može izračunati smanjenje noseće sposobnosti njenih elemenata.

Kriterijum noseće sposobnosti konstruktivnog elementa se može izraziti kroz jedan od tri domena: vreme, čvrstoću i temperaturu. Kada su poznati toplotni efekti požara i mehanički odgovor objekta na dejstvo požara, moguće je projektovati građevinsku konstrukciju sa zahtevanom otpornošću na požar. Novi koncept proračuna otpornosti na požar omogućava stvaranje realnije slike o pouzdanosti građevinskog objekta u slučaju realnog požara.

### UVOD

Požari građevinskih objekata izazivaju ogromnu štetu. Oslobođanje velikih količina toplote koje su praćene visokim temperaturama utiče na noseću sposobnost građevinske konstrukcije. Velike količine dima koje nastaju pri požaru predstavljaju direktnu opasnost po ljude u objektu.

S obzirom na činjenicu da nije moguće predvideti gde i kada će nastati požari, u svetu su poslednjih godina prisutni veliki naučnoistraživački naponi da se shvati proces nastanka, razvoja i širenja požara. Danas postoji jedna grana nauke koja se naziva *Nauka o požarima*. Može se slobodno reći da je poslednjih godina skup znanja o požaru postao vrlo opsežan i da je prerastao u jednu novu inženjersku disciplinu pod nazivom *Požarni inženjering*. Požarni inženjering nudi sve savremenije metode predviđanja razvoja požara i njegovog uticaja na građevinske objekte, /7/.

### Keywords

- building structure
- load-bearing capacity
- Eurocode EN 1-1-2
- real fire
- fire resistance

### Abstract

This paper presents a new concept of real fire resistance calculation of structures using computational models based on real fire load. Models are based on Eurocode EN 1991-1-2. Behaviour calculation of structural members in a fire consists of several steps as follows: selection of a fire scenario, determination of fire type, determination of design fire scenario in a growth phase, analysis of thermal distribution in the compartment and through its structural members and mechanical characteristics analysis of structural materials.

On the basis of the results obtained by thermal and mechanical analysis and on the structural input data, the reduced load-bearing capacity of members can be calculated in the structural analyses.

Load-bearing capacity criterion of a structural member can be expressed in one of the three domains: time, strength and temperature. When the thermal effect of fire and mechanical response of buildings in case of fire are known, it is possible to design building construction with the required resistance to fire. The new concept of fire resistance calculation enables the creation of more realistic image of the reliability of the structure in case of a real fire.

### INTRODUCTION

In buildings, fires cause significant damage. The release of large amounts of heat accompanied by elevated temperatures, affects the bearing capacity of the building structure. Large amounts of smoke generated in a fire pose a direct threat to people present in the building.

With regard to the fact that it is not possible to predict where and when fires will occur, great scientific efforts have been made in recent years worldwide, aimed at understanding the process of ignition, development and spread of fire. Nowadays, there is a branch of science called *Fire Science*. It may be observed that the acquisition of knowledge about fire has become fairly extensive and has grown into a new engineering discipline called *Fire Engineering*. Fire Engineering offers all the sophisticated methods of predicting the growth of fire and its impact on building structures, /7/.

Direktna posledica navedenih istraživanja je donošenje evropskih normi u ovoj oblasti. Strukturni evrokodovi su evropski paket kodova za projektovanje konstrukcija koji su razvijeni tokom perioda od više od dvadeset godina. Prihvatanjem evropskih normi u građevinskoj regulativi definisana su, pored ostalog i opšta načela u delu projektovanja i građenja u oblasti zaštite od požara. One daju osnovne koncepte i pravila za opisivanje toplotnog delovanja požara na izloženu građevinsku konstrukciju i njenog mehaničkog odgovora na požar.

#### NOVI KONCEPT PRORAČUNA OTPORNOSTI KONSTRUKCIJA NA DEJSTVO REALNOG POŽARA

Savremene norme projektovanja naglašavaju činjenicu da otpornost konstruktivnih elemenata prema požaru zavisi od nivoa napona pri požaru. Zbog toga postoji *Koncept zaštite od realnog požara* na osnovu koga se vrši proračun konstrukcija izloženih požaru. On primenjuje računarske modele bazirane na realnom požarnom opterećenju. Proračun se vrši na osnovu Eurocode EN 1991-1-2 i sprovodi se dokazom u tri područja: vremenu, čvrstoći i temperaturi. Ova metodologija obuhvata statističke analize, u nekim slučajevima dopušta deterministički pristup, ali isto tako daje mogućnost primene savremenih probablističkih metoda.

Koncept zaštite od realnog požara je potpuno inženjerski koncept jer omogućava da se zaštita objekata od požara optimizira putem proračuna.

Koncept predlaže akcije koje treba razmotriti u proceni ponašanja objekta u slučaju požara. To su:

- toplotne akcije, od strane dizajniranog scenarija požara,
- mehaničke akcije, usled sopstvene težine, aktivnosti u objektu ili akcije izazvane direktno ili indirektno požarom.

Kada je poznato toplotno delovanje požara i mehanička akcija konstrukcije u slučaju požara, tada je moguće dimenzionisati građevinsku konstrukciju sa zahtevanom otpornošću na požar.

Analiza otpornosti konstrukcija na požar je komplikovan proces jer uključuje više promenljivih kao što su rast i trajanje požara, distribuciju temperature u konstruktivnim elementima, promene u karakteristikama materijala, interakciju između konstruktivnih elemenata i uticaj opterećenja na građevinsku konstrukciju. Generalno, proces uključuje tri različite komponente:

- analizu požarnog hazarda za identifikaciju scenarija požara i utvrđivanje uticaja svakog scenarija na susedne konstruktivne elemente,
- termičke analize za izračunavanje temperature tokom vremena u svakom konstruktivnom elementu,
- strukturne analize za utvrđivanje čvrstoće i napona u svakom elementu i verovatnoće da dođe do lokalnog ili progresivnog kolapsa konstrukcije tokom bilo kog scenarija požarnog hazarda.

Na slici 1 su prikazani zahtevi Eurocode EN 1-1-2 i njihovo uklapanje u proces projektovanja zaštite konstrukcija od požara.

Uopšteno, postoje šest koraka za projektovanje konstruktivnih elemenata za slučaj požara. Prva tri koraka i šesti korak procesa projektovanja obavljaju se isključivo u okviru zahteva navedenih u Eurocode EN 1-1-2. Korak četiri pod

A direct consequence of those studies is bringing European norms into this field. The Structural Eurocodes are a European suite of codes for structural design that have been developed over a period of more than twenty years. Acceptance of European norms in the construction regulations has defined, among other things, the general principles of the design and construction in the field of fire protection. They provide the basic concepts and rules for describing thermal effects of fire on the exposed building structure and its mechanical response related to fire.

#### NEW CONCEPT OF NATURAL FIRE RESISTANCE CALCULATION FOR STRUCTURES

Contemporary norms emphasize the fact that fire resistance of structural elements depends on the level of stress in a fire. Today there is the *Natural Fire Safety Concept* that calculates structures exposed to fire. It applies computational models based on real fire load. The calculation is based on Eurocode EN 1991-1-2 and conducted by providing proof in three domains: time, strength, and temperature. This methodology includes statistical analysis, occasionally allowing a deterministic approach, but it also allows the application of modern probabilistic methods.

The Natural Fire Safety Concept is completely an engineering concept, because it allows optimization of buildings' fire protection through calculation.

The concept proposes actions to be considered when assessing the behaviour of a building in case of fire. These are:

- thermal actions, from the designed fire scenario,
- mechanical actions, due to deadweight, activities in the building, or actions induced directly or indirectly by the fire.

When the thermal effect of fire and mechanical action of building in case of fire are known, it is possible to calculate characteristics of a building construction with the required fire resistance.

The analysis of structural fire resistance is a complicated process because it involves many variables such as fire growth and duration, temperature distribution in structural members, changes in material properties, interaction between structural members, and the influence of loads on the structural system. The process generally includes three distinct components:

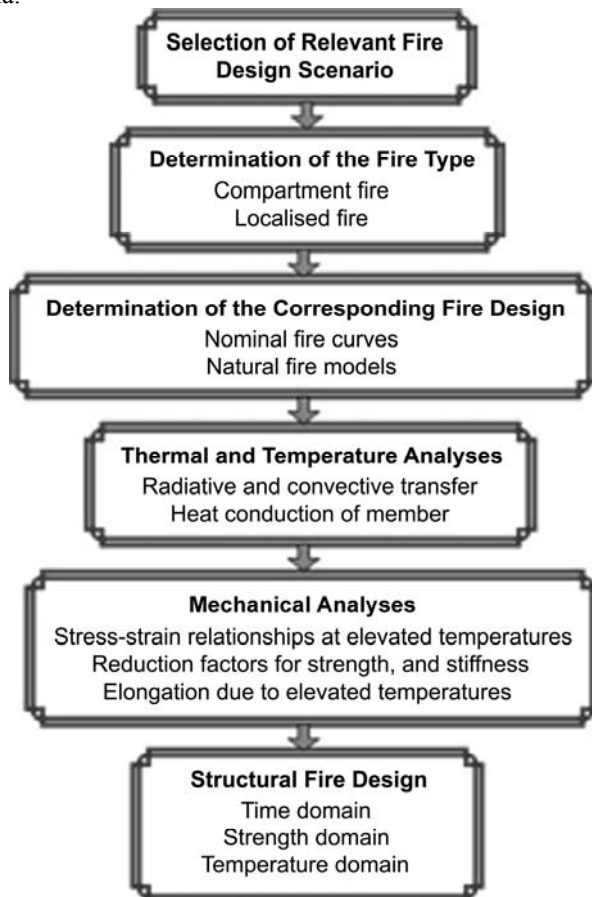
- fire hazard analysis to identify fire scenarios and determine the impact of each scenario on adjacent structural members,
- thermal analysis to calculate the temperature over time in each member,
- structural analysis to determine the strength and stresses in each member, and the probability of a local or progressive collapse of the structure during any of the fire hazard scenarios.

Figure 1 provides an overview of Eurocode EN 1-1-2 clauses and shows how it fits into the overall structural fire design process.

Generally, there are six steps for the design of structural members in fire. The first three steps and the sixth step of the design process are carried out solely within the confines of the clauses set out in Eurocode EN 1-1-2. Step four involves a combination of EN 1-1-2 with the corresponding

razumeva kombinaciju EN 1-1-2 sa odgovarajućim akcijama požara koje su obuhvaćene kodovima materijala (Evrokodova 2 do 6 i Evrokod 9). Peti korak se vrši prvenstveno u okviru granica kodova materijala.

fire actions provided in the material codes (Eurocodes 2 to 6 and Eurocode 9). The fifth step is carried out primarily within the confines of the material codes.



Slika 1. Koncept proračuna otpornosti konstrukcije na dejstvo realnog požara  
Figure 1. The concept of calculating the real fire resistance of the structure.

#### *Izbor relevantnog scenarija požara*

Prvi korak u procesu dizajniranja požara je definisanje akcidentne situacije u kojoj relevantni scenariji požara treba da budu determinisani na osnovu usvojene strategije zaštite od požara.

Definisanje odgovarajućeg scenarija požara je ključni aspekt projektovanja zaštite od požara. Dizajn scenarija požara je kvalitativni opis požara u vremenu i prostoru. On razmatra izvor i mehanizam paljenja, razvoj i širenje požara i interakciju požara sa okruženjem, kao i njegovu fazu stišavanja i gašenje.

Postoji beskonačan broj mogućih scenarija požara u svakom objektu. Nemoguće je da se analiziraju svi verovatni scenariji čak i uz pomoć najsavremenijih računarskih resursa. Ovaj veliki skup mogućnosti treba da bude sveden na konačan skup scenarija požara koji su pogodni za analizu. Dizajn scenarija požara za analizu treba da se zasniva na optimalnom broju najgorih scenarija požara.

U požarnom inženjeringu postoji širok spektar numeričkih računarskih modela, manje ili više komplikovanih za dizajn požara. Numerički modeli treba da razmotre potpuni skup parametara požara. Nivo preciznosti metoda za proračun zavisi od dizajna scenarija i njegovih ciljeva.

#### *Selection of relevant fire design scenario*

The first step in the fire design process is to define the accidental situation in which the relevant fire scenarios should be determined based on an adopted fire safety strategy design.

The specification of adequate fire scenario is a crucial aspect of fire safety design. A fire scenario design is a qualitative description of fire with respect to time and space. It considers the source and mechanism of ignition, growth of fire, the spread and interaction of fire with its environment, and its decay phase and extinction.

There are an infinite number of possible fire scenarios in each building. It is impossible to analyze all possible scenarios even by means of the most sophisticated computing resources. This huge set of possibilities needs to be reduced to a finite set of fire scenario designs which are suitable for analysis. Fire scenario designs for analysis should be based on the optimal number of worst-case fire scenarios.

In fire engineering, there is a wide range of more or less complicated numerical computational models for fire design. Numerical models should consider the complete range of fire variables. The accuracy of the applied method depends on the scenario design and the design objectives.

Za predviđanje dinamike požara u objektima koriste se:

- deterministički modeli koji se baziraju na korišćenju poznatih fizičkih i hemijskih zakona,
- probabilistički modeli koji predviđaju razvoj požara na osnovu zakona verovatnoće.

Tipični deterministički modeli su modeli numeričke simulacije: zonski modeli (dvo- i jednozonski modeli) i modeli polja (CFD modeli).

Dvozonski model je baziran na pretpostavci akumulacije toplih produkata sagorevanja u sloju ispod plafona, iznad hladnog sloja. U toplom gornjem sloju pretpostavljaju se uniformne karakteristike gasa. Ostale zone (donji sloj, požar i njegov plamen, vazduh i konstrukcije) su definisane. Razmena mase, energije i produkata se izračunava između ovih različitih zona. Model predstavlja *pre-flashover* uslove požara (*flashover* je definisan kao tačka vremena u kojoj sve materije u prostoriji spontano sagorevaju).

Generalno, jednozonski model se primenjuje za razvijeni *post-flashover* požar. Homogene osobine gasovitih produkata (temperatura, optička svojstva i sastav) se pretpostavljaju. Temperatura se izračunava uzimajući u obzir održanje mase i energije tokom požara. Prenos mase sa spoljašnjim vazduhom se ostvaruje preko otvora. Energija oslobođena iz procesa sagorevanja se provodi kondukcijom kroz okolne zidove i podove i prenosi kroz otvore (konvekcijom i radijacijom).

Modeli polja dele prostor zahvaćen požarom na male zapremine i numerički rešavaju diferencijalne jednačine koristeći ulazne vrednosti termodinamičkih i aerodinamičkih parametara prostora. Metodi turbulencije se najčešće koriste za CFD proračune uključujući metod *Reynolds Averaged Navier-Stokes* jednačina (RANS), Veliku Edi Simulaciju (LES) i Direktnu Numeričku Simulaciju (DNS) /6/. Izlazni podaci obuhvataju vrednosti temperature i brzine i koncentracije produkata u celokupnoj zapremini prostora tokom požara. Složenost i vreme potrebno za proračun kada se koriste modeli polja ograničava primenu ovih proračuna za određivanje otpornosti na požar. Modeli polja se često koriste za početnu fazu i fazu razvoja požara. Oni ne pružaju zadovoljavajuće rezultate za potpuno razvijen *post-flashover* požar.

Svi modeli zahtevaju određene ulazne parametre, kao što su: geometrija objekta (površine, visina sprata, kompozicija zidova i podova, veličine otvora, tip zastakljivanja), vrsta i količina masenog požarnog opterećenja (zapaljivog materijala), stepen oslobađanja toplote iz požarnog opterećenja (iz literature ili *ad hoc* testa), ponašanje konstruktivnih elemenata na visokim temperaturama. Termički ulazni podaci su koeficijenti prenosa toplote elemenata, toplotna provodljivost i toplotni kapaciteti materijala.

#### Određivanje vrste požara

U principu, vrsta požara zavisi od zapremine prostorije, vrste, količine i razmeštaja prisutnog masenog požarnog opterećenja, kao i odnosa površine prisutnih otvora i površine poda, tj. stepena otvorenosti. U zavisnosti od prethodno navedenih parametara, određuje se vrsta mogućeg požara u objektu.

Eurocode EN 1991-1-2 predviđa dve vrste požara:

- opšte požare u zatvorenom prostoru i
- lokalne požare u delu zatvorenog prostora.

Models for prediction of fire dynamics in buildings are:

- deterministic models based on the use of known physical and chemical laws,
- probabilistic models that predict fire growth on the basis of the laws of probability.

Typical deterministic models are numerical simulation models: zone models (two- and one-zone models) and field models (Computational Fluid Dynamics (CFD) models).

The two-zone model is based on the assumption of accumulated hot combustion products in a layer beneath the ceiling, above the cold layer. In this hot upper layer, uniform characteristics of the gas are assumed. Other zones (lower layer, fire and its plume, external gas and walls) are defined. The exchanges of mass, energy, and chemical species are calculated between these different zones. The model represents pre-flashover conditions (flash-over is defined as the time point at which all materials in the compartment spontaneously combust).

Generally, for a fully developed post-flashover fire, the one-zone model is applied. Homogeneous gas properties (temperature, optical properties and chemical composition) are assumed. The temperature is calculated by consideration of mass and energy conservation during the fire. Mass transfer occurs with external gases via openings. The energy released by the combustion process is transferred by conduction through surrounding walls and floors, and transports through the openings (by convection and radiation).

Field models divide the space of a fire compartment into small volumes and numerically solve differential equations using the input thermodynamic and aerodynamic variables for the compartment. Turbulence methods commonly used in CFD include Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation Method (RANS), Large Eddy Simulation (LES), and Direct Numerical Simulation (DNS) /6/. The output data include the temperature and velocity of the gas, and species concentration in all parts of the compartment during the fire. The complexity and the time needed for calculations using field models limit the application of such codes for fire resistance determination. Field models are often used for the early fire and fire growth phase. They are considered inaccurate for fully developed post-flashover fires.

All models require certain input parameters, such as: building geometry (surface area, storey height, wall and floor composition, size of openings, type of glazing), type and amount of fire load mass (flammable material), rate of heat release from fire load mass (from literature or *ad hoc* test results), thermal behaviour of boundary construction elements. Thermal input data include heat transfer coefficients at boundaries, thermal conductivity, and thermal capacity of the materials.

#### Determination of the fire type

In general, the type of fire depends on the volume of the compartment, type, quantity and placement of fire load mass, and on the ratio of the surface areas of the openings and the floor, i.e. the opening factor. Depending on the above mentioned parameters, the type of possible fire in the building is determined.

Eurocode EN 1991-1-2 prescribes two types of fires:

- compartment fires and
- localised fires.

Ako je pri bilo kojoj količini masenog požarnog opterećenja, površina poda zauzeta njime,  $A_{fl}$ , zadovoljava nejednačinu, /8/,

$$A_{fl} \leq \pi(v_{fm}t_{gp})^2 \quad (1)$$

opravdano je poći od hipoteze da može nastati isključivo lokalni požar.

Kada se maseno požarno opterećenje,  $m_{fl}$ , u količini

$$m_{fl} > \pi v_c v_{fm}^2 t_{gp}^3 \quad (2)$$

nalazi na površini poda

$$A_{fl} > \pi(v_{fm}t_{gp})^2 \quad (3)$$

treba poći od hipoteze da će u slučaju požara doći do *flashover*-a i opšteg požara.

U jednačinama (1)–(3) je  $v_{fm}$  – brzina kretanja plamena po površini opterećenja,  $t_{gp}$  – vreme trajanja faze razvoja požara,  $v_c$  – brzina sagorevanja požarnog opterećenja.

U prostoriji, lokalni požar obuhvata samo ograničenu površinu masenog požarnog opterećenja. Ukoliko postoji mala verovatnoća pojave *flashover*-a, strukturnom analizom treba da budu obuhvaćene toplotne akcije lokalnog požara.

U slučaju opšteg požara temperature gasovitih produkata treba da se odrede na osnovu fizičkih parametara uzimajući u obzir najmanje gustine požarnog opterećenja i uslove ventilacije.

Na osnovu utvrđenih uslova za razvoj očekivanog požara, usvaja se odgovarajući zakon brzine sagorevanja, odnosno, zakon oslobađanja toplote. Uniforma raspodela temperature kao funkcija vremena se pretpostavlja za opšte požare. Neuniformna raspodela temperature kao funkcija vremena se pretpostavlja za slučaj lokalnog požara, /5/.

#### Definisanje razvoja pretpostavljenog požara

Za proračun termičkih akcija građevinskih konstruktivnih elemenata mogu se koristiti sledeće vrste pretpostavljenih požara:

- podaci dobijeni na osnovu eksperimentalnih istraživanja požara, koji su u direktnoj vezi sa geometrijom i požarnim opterećenjem objekta,
- rezultati dobijeni numeričkim proračunima za simulirani požar,
- nominalni požar (standardna kriva temperatura–vreme, ugljovodonična kriva, eksterna kriva) kada su vrednosti parametara izraženi u funkciji trajanja požara,
- parametarski požar koji razmatra parametre koji imaju uticaj na temperaturu produkata. Parametarski požari su samo gruba aproksimacija realnih požara.

Vreme otpornosti na požar specificirano u većini nacionalnih građevinskih propisa se odnosi na testiranje performansi elemenata kada se zagrevaju u skladu sa krivom temperatura-vreme, definisane međunarodnim standardom ISO 834 (ili Eurocode-om EN 1991-1-2). Standardna kriva temperatura-vreme, dobijena ispitivanjem konstruktivnih elemenata u peći, može se prikazati jednačinom (4):

$$\theta_g = 20 + 345 \log(8t + 1) \quad (4)$$

gde je  $\theta_g$ –ambijentalna temperatura u požarom zahvaćenom prostoru,  $t$ –vreme.

Standardna otpornost se definiše kao sposobnost konstrukcije ili njenog dela da zadrži stabilnost tokom izlaganja

If at any quantity of fire load mass, the floor area occupied by it,  $A_{fl}$ , satisfies the inequality, /8/,

it is justified to start from the hypothesis that only a localised fire may occur.

When a quantity of the fire load mass,  $m_{fl}$ ,

is located on the floor area

it leads to the hypothesis that flashover and compartment fire

will occur in case of fire.

In Eqs.(1–3) are  $v_{fm}$  – the flame velocity of the fire load mass surface,  $t_{gp}$  – the time of the fire growth phase,  $v_c$  – the combustion velocity of fire load mass.

In the compartment, localised fire envelops only a limited area of the fire load mass. Where flashover is unlikely to occur, structural analysis should take into account the thermal actions of a localised fire.

In case of compartment fires, gas temperatures should be determined on the basis of physical parameters considering at least the fire load density and ventilation conditions.

On the basis of expected fire growth conditions, an appropriate combustion velocity law and a heat release law are adopted. A uniform temperature distribution as a function of time is assumed for compartment fires. A non-uniform temperature distribution as a function of time is assumed in case of localised fires, /5/.

#### Determination of the corresponding fire design

The following types of fire designs can be used to determine the thermal actions of the building structure components:

- data from an experimental fire, which are in direct conjunction with the layout of a relevant part of the building and with the fire load,
- numerical calculations results for simulated fire,
- nominal fire (standard temperature–time curve, hydrocarbon curve, external curve) when performance levels are expressed in terms of fire duration,
- parametric fire, taking into account the main parameters which affect the gas temperature. Parametric fires are only a rough approximation of real fires.

Fire resistance times specified in most national building regulations relate to performance testing which involves heating according to an internationally agreed temperature–time curve defined in ISO 834 (or Eurocode EN 1991-1-2). Standard temperature–time curve, obtained by examination of structural elements in the furnace, can be described by the following equation (4):

where  $\theta_g$ –ambient temperature in the compartment fire,  $t$ –time.

Standard fire resistance is defined as the ability of a structure or its part to keep the capacity during standard fire

standardnom požaru za standardni vremenski period (30, 60 ili 90 min, itd.). Prema konceptu ispitivanja otpornosti na dejstvo standardnog požara određuje se otpornost konstrukcije (F30, F60, itd.) bez obzira na karakteristike građevinskog objekta (namena, požarno opterećenje, preduzete preventivne tehničke mere zaštite od požara). Koncept se odlikuje i nedostacima u proračunu tokom projektovanja.

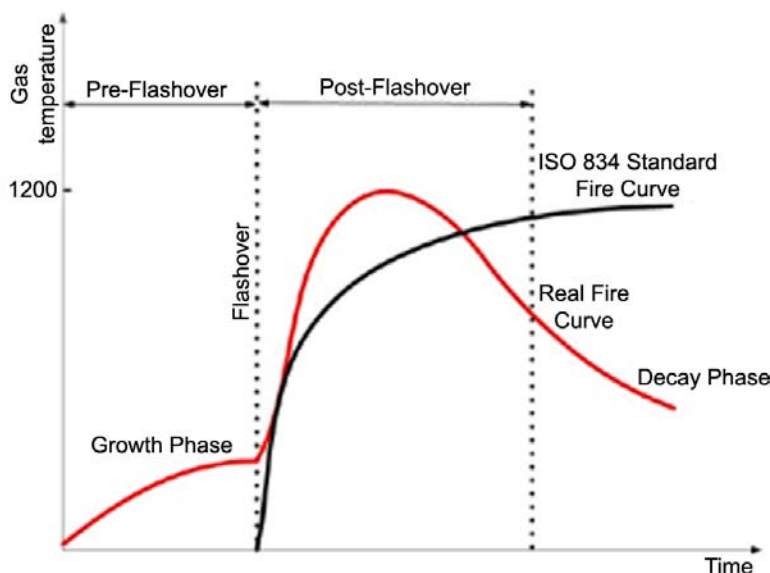
Alternativni metod u odnosu na metod određivanja vremena otpornosti na požar na osnovu kriva nominalnih požara, je pokušaj da se modeluje realni požar korišćenjem krive parametarskog požara. Ovo omogućava jednostavnije modelovanje temperature u fazi zagrevanja i fazi hlađenja *post-flashover* požara (početna faza razvoja se ne razmatra) i vremena za koje je postignuta maksimalna temperatura. Pri korišćenju parametarskih krivih neophodno je imati podatke o osobinama materijala (gustinu, specifičnu toplotu, toplotnu provodljivost) u prostoriji, gustinu požarnog opterećenja i površine ventilacionih otvora.

Nominalni i parametarski požari ne predstavljaju nijednu vrstu realnog požara građevinskog objekta.

exposure, for a standard time period (30, 60, 90 minutes etc.). According to the concept of testing resistance to the effects of standard fire, the construction resistance is determined (F30, F60, etc.), regardless of the building characteristics (purpose, fire load, preventive technical measures of fire protection taken). This concept is also characterized by lacks in the calculation of the design.

An alternative method to the method for determining fire resistance times based on nominal fire curves is to attempt to model a real fire by use of a parametric fire curve. This enables simpler modelling of fire temperatures in the heating and cooling phases of a post-flashover fire (the initial growth phase will not be considered), and the time in which the maximum temperature is reached. When parametric fire curves are used, it is necessary to possess data on the properties of materials (density, specific heat, thermal conductivity) in the compartment, the fire load density, and ventilation surface areas.

Nominal and parametric fires do not represent any type of real building fire.



Slika 2. Faze realnog požara u poredenju sa temperaturom atmosfere prema ISO834 krivoj standardnog požara  
Figure 2. Phases of a real fire, comparing atmospheric temperatures with the ISO834 standard fire curve.

Realni požar u objektu se razvija i opada u skladu sa masenim i energetskim bilansom unutar prostorije u kojoj se pojavljuje (sl. 2), /1/. Oslobođena energija zavisi od količine i vrste masenog požarnog opterećenja i od preovlađujućih uslova ventilacije. Može se usvojiti da se realni požar sastoji od tri faze, koje se mogu definisati kao faza razvoja, razvijena faza i faza stišavanja. Najbrži rast temperature se javlja u periodu nakon *flashover*-a.

#### Termičke i temperaturne analize

Termička analiza obuhvata određivanje temperaturnih polja tokom vremena u prostoru i konstruktivnim elementima zahvaćenih pretpostavljenim požarom.

Analiza temperaturnog odgovora u konstruktivnom elementu se može podeliti na dva dela. Jedan je prenos toplote od požara na površinu elementa, koji je kombinacija konvekcije i zračenja i obično se tretira kao granični uslov.

A real fire in a building grows and decays in accordance with the mass and energy balance within the compartment in which it occurs (Fig. 2), /1/. The released energy depends on the quantity and type of fire load mass, and on prevailing ventilation conditions. It is possible to consider a real fire consisting of three phases, which may be defined as the growth phase, the full development phase, and the decay phase. The most rapid temperature rise occurs in the period following the flashover.

#### Thermal and temperature analyses

The thermal analysis comprises the determination of temperature fields versus time in the compartment and the structural members within the fire design.

The analysis of temperature response in a structural member can be divided into two parts. One part is the heat transfer from the fire into the surface of the structural member, which is a combination of convection and radiation and is

Drugi deo je provođenje toplote kondukcijom unutar konstruktivnog elementa.

#### *Prenos toplote do konstruktivnih elemenata*

Na osnovu određene temperatura-vreme termičke akcije, toplotni fluks do okolnih konstruktivnih elemenata se može izračunati korišćenjem jednačine prenošenja toplote. Jednačina mora da obuhvati relevantne parametre kao što su:

- konvektivni toplotni fluks  $i$
- radijacioni toplotni fluks.

Konvektivni toplotni fluks treba da se odredi na osnovu koeficijenta prelaza toplote konvekcijom, temperature gasa u okolini elementa izloženog požaru i temperature površine elementa.

Radijacioni toplotni fluks treba da se odredi na osnovu temperature zračenja u okolini elementa (temperatura plamena, temperatura gasa, granična temperatura), temperature na površini elementa, emisije i absorpcije od strane ozračenog elementa i ugaonog faktora između izvora toplote i elementa.

Ukupni toplotni fluks,  $\dot{h}_{net}$ , do površine elementa se izračunava na osnovu jednačine

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad (5)$$

gde su

where

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad (6)$$

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \sigma \varepsilon_m \varepsilon_f [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (7)$$

gde je  $\dot{h}_{net,c}$  –konvektivni toplotni fluks,  $\dot{h}_{net,r}$  –radijacioni toplotni fluks,  $\alpha_c$  –koeficijent prenošenja toplote konvekcijom,  $\theta_g$  –temperatura okoline (gasa),  $\theta_m$  –temperatura površine elementa,  $\theta_r$  –temperatura zračenja plamena,  $\phi$  –konfiguracioni faktor,  $\sigma$  –Stefan-Boltzmann-ova konstanta,  $\varepsilon_m$  –koeficijent emisije površine elementa,  $\varepsilon_f$  –koeficijent emisije plamena požara.

#### *Provođenje toplote kroz konstruktivne elemente*

Apsorbovana toplota se sa površine konstruktivnih elemenata prenosi provođenjem u njihovu unutrašnjost. Provođenje toplote kroz građevinske elemente usled dejstva požara definiše se kao nestacionarni proces. Za izračunavanje toplote unutar građevinskog elementa primenjuje se nestacionarni nelinearni model provođenja toplote.

Provođenje toplote kroz elemente se može izraziti preko Fourier-ovog zakona:

$$q = -\lambda \nabla \theta \quad (8)$$

gde je  $q$  –protok toplote po jedinici površine,  $\lambda$  –koeficijent provođenja toplote,  $\nabla \theta$  –gradijent temperature.

#### *Temperatura u konstruktivnim elementima*

Primenom modela nestacionarnog nelinearnog provođenja toplote dobija se temperaturno polje u preseku elementa i u čitavom elementu. Tačno predviđanje promene temperature tokom vremena u okviru konstruktivnih elemenata je od suštinskog značaja za utvrđivanje osobina materijala na relevantnoj temperaturi i sprovođenje analize konstrukcije. U analizi raspodele temperatura koristi se metod konačnih elemenata. On je baziran na matricama i veoma je prilagodljiv za izračunavanje temperatura elemenata u požaru.

usually treated as boundary condition. The other part is the conductive heat transfer within the structural member.

#### *Heat transfer to structural members*

On the basis of defined temperature-time thermal action, the heat flux to surrounding structural members can be calculated by an adequate heat transfer equation. The equation has to involve the relevant parameters such as:

- the convective heat flux and
- the radiative heat flux.

The convective heat flux should be determined by taking into account the coefficient of convective heat transfer, gas temperature in the environment of the member exposed to fire, and the surface temperature of the member.

The radiative heat flux should be determined taking into account radiation temperature of the member's environment (flame-, gas-, and boundary temperature), the member surface temperature, emissivity and absorptivity of radiated member, and viewing angle factor between heat source and member.

The net heat flux,  $\dot{h}_{net}$ , to the surface of the member is defined by the following equation:

where  $\dot{h}_{net,c}$  –the net convective heat flux, and  $\dot{h}_{net,r}$  –the net radiative heat flux,  $\alpha_c$  –the convective heat transfer coefficient,  $\theta_g$  –the environment (gas) temperature,  $\theta_m$  –the member surface temperatures,  $\theta_r$  –the effective radiation temperature of the fire environment,  $\phi$  –the configuration factor,  $\sigma$  –Stefan Boltzmann's constant,  $\varepsilon_m$  –the emissivity of member surface,  $\varepsilon_f$  –the emissivity of fire flame.

#### *Heat transfer through structural members*

Absorbed heat from the surface of structural members is transferred by conduction into the interior of the members. Heat conduction in structural members due to effects of fire is defined as a nonstationary process. To calculate the heat inside the structural member, a nonstationary nonlinear model of thermal conductivity is applied.

Heat conduction through members may be represented by Fourier's law:

where  $q$  –heat flow per unit area,  $\lambda$  – thermal conductivity,  $\nabla \theta$  – temperature gradient.

#### *Temperature in structural members*

Application of the model of nonstationary nonlinear thermal conductivity gets the temperature field at the cross-section of the member and in the whole member. Accurate prediction of temperature fluctuations over time in structural members is essential for determining material properties at a relevant temperature and applying the analysis of structure. The finite element method is used in analysis of temperature distribution. It is based on matrices and is very adaptable to solving temperature in members exposed to fire.



Dobijene temperature u jednom elementu koriste se za analizu delovanja toplote požara na ostale elemente i na celu građevinsku konstrukciju.

#### Mehanički odgovor

Mehaničko ponašanje konstrukcije zavisi od termičkih akcija i njihovog toplotnog efekta na osobine materijala i indirektnih mehaničkih akcija, kao i direktnog efekta mehaničkih akcija, /2/.

Za procenu mehaničkog ponašanja konstrukcije u slučaju požara neophodno je:

- poznavati karakteristike materijala pri povišenim temperaturama,
- odabrati odgovarajuću metodu dimenzionisanja na osnovu primene jednostavnih i složenih procedura proračuna,
- odrediti mehaničko opterećenje koje deluje na konstrukciju izloženu požaru.

U principu, građevinski materijali gube čvrstoću i krutost na visokim temperaturama što dovodi do opadanja njihove noseće sposobnosti i povećanja deformacija, /2/.

Pri proračunu mehaničkog ponašanja treba da se uzmu u obzir relevantni podaci kao funkcije temperature za svaki materijal, kao što su odnos napon-istezanje na povišenim temperaturama, redukcioni faktori čvrstoće i krutosti i izduženje usled povišenih temperatura.

Proračun mehaničkog odgovora cele konstrukcije ili njenog elementa mora da se vrši odgovarajućom metodom proračuna (kao što je metoda konačnih elemenata). Jednostavni modeli ili tabelarni podaci mogu se koristiti samo za procenu pojedinačnih konstruktivnih elemenata. Ovi jednostavni modeli se uglavnom zasnivaju na ograničavanju vrednosti temperature koja se ne sme prekoračiti tokom požara.

Kada se razmatraju mehaničke akcije zbog primenjenih opterećenja, verovatnoća kombinovane pojave požara u objektu zajedno sa ekstremnim nivoom mehaničkih akcija može se smatrati zanemarljivom, jer je požar građevinskog objekta akcidentna akcija. U tom pogledu, nivo opterećenja koji se koristi za procenu ponašanja celog objekta ili konstruktivnog elementa mora da odgovara specifičnim faktorima sigurnosti, a ne onima koji se koriste pri projektovanju objekta. Opšta formula koja se može koristiti za izračunavanje relevantnih efekata mehaničkih akcija ima oblik, /2/:

$$E_{fi,d,t} = \sum \gamma_{GA} G_k + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} + \sum A_d(t) \quad (9)$$

gde je  $E_{fi,d,t}$ —efekat opterećenja,  $G_k$ —karakteristična vrednost stalnih akcija (*mrtvo opterećenje*),  $Q_{k,1}$ —karakteristična vrednost jedne (glavne) promenljive akcije,  $Q_{k,i}$ —karakteristična vrednost ostalih promenljivih akcija,  $A_d(t)$ —projektovane vrednosti akcija usled izloženosti požaru (uglavnom indirektno usled termičke ekspanzije, ako se ne uzimaju u obzir proračunski modeli),  $\gamma_{GA}$ —parcijalni faktor sigurnosti za stalne akcije u akcidentnoj situaciji (usvaja se vrednost 1.0),  $\psi_{1,1}$ ,  $\psi_{2,i}$ —kombinacioni koeficijenti objekta.

Za konstruktivne elemente, maksimalni nivo opterećenja tokom izloženosti požaru je 65–70% od noseće otpornosti na normalnoj temperaturi. Eurocode EN 1991-1-2 dozvoljava da efekti (akcije) opterećenja za otpor požaru budu jednaki delu efekta (akcije) ambijentalnog opterećenja, tako da je

$$E_{fi,d,t} = \eta_{fi} E_d \quad (10)$$

The obtained single member temperatures are used for analysis of the fire heat effects on the other members and the entire building structure.

#### Mechanical response

Mechanical behaviour of a structure depends on thermal actions and their thermal effect on material properties and indirect mechanical actions, as well as on the direct effect of mechanical actions, /2/.

To assess the mechanical behaviour of structures in case of fire, it is necessary to:

- know the characteristics of materials at elevated temperatures,
- choose an appropriate method of dimensioning, based on application of simple and complex calculation procedures,
- determine the mechanical load acting on the structure exposed to the fire.

In general, building materials lose strength and stiffness at elevated temperature, which leads to a decrease in their load-bearing capacity and an increase in deformation, /2/.

Mechanical behaviour calculations should take into account the relevant data as a function of temperature for each material, concerning stress-strain relationships at elevated temperatures, reduction factors for strength and stiffness, and elongation due to elevated temperatures.

Calculation of mechanical response of the whole structure or a part thereof needs to be performed with advanced calculation methods (such as those based on finite elements). Simplified models or tabulated data can only be used for the assessment of individual structural elements. These simple models are generally based on temperature limits which may not be exceeded during fire.

On consideration of mechanical actions due to the applied loads, the probability of combined occurrence of fire in a building, together with the extreme level of mechanical actions, can be considered negligible because fire on structures is an accidental action. In this respect, the load level used when assessing the fire behaviour of an entire building or a structural member has to correspond to specific safety factors and not those used for normal design of buildings. The general formula which can be used to calculate the relevant effects of mechanical actions is, /2/:

where  $E_{fi,d,t}$ —load effect,  $G_k$ —characteristic value of permanent action (*dead load*),  $Q_{k,1}$ —characteristic value of one (main) variable action,  $Q_{k,i}$ —characteristic value of other variable actions,  $A_d(t)$ — design values of actions from fire exposure (mainly indirect actions due to thermal expansion, if not taken into account by calculation models),  $\gamma_{GA}$ —partial safety factor for permanent actions in the accidental situation (a value of 1.0 is suggested),  $\psi_{1,1}$ ,  $\psi_{2,i}$ —combination coefficients for a building.

For structural members, the maximum load level during fire exposure is 65–70% of the total load-bearing resistance at normal temperature. Eurocode EN 1991-1-2 allows the load (action) effect required to be resisted in a fire to be set equal to a proportion of ambient load (action) effect, so that



gde je  $E_d$ —projektovana vrednost bitnih efekata akcija koje potiču od osnovne kombinacije,  $\eta_{fi}$ —redukциони faktor, čije se vrednosti uzimaju iz relevantnih kodova materijala. Vrednosti  $\eta_{fi}$  iznose 0.6–0.7 zavisno od tipa konstrukcije.

Prilikom procene otpornosti konstruktivnih elemenata na požar takođe treba razmotriti i druge mehaničke akcije izazvane požarom direktno ili indirektno:

- akcije usled pritiska koji se javlja tokom razvoja požara. U potpuno razvijenoj fazi požara vertikalni gradijent pritiska iznosi 8 Pa/m,
- sila i momenata izazvanih termičkim istezanjem ili skupljanjem okolnih konstruktivnih elemenata,
- deformacije pojedinačnog elementa (kao što su grede ili podovi) koje mogu dovesti do prenošenja opterećenja na nenoseće pregradne elemente,
- uticaje, ukoliko postoji opasnost od kolapsa okolnih elemenata na strani izloženoj požaru,
- uticaj vode za gašenje požara zbog moguće intervencije vatrogasaca.

## PROJEKTOVANJE KONSTRUKCIJE NA DEJSTVO POŽARA

Projektovanje građevinske konstrukcije na dejstvo požara uključuje implementaciju postupaka temperature analize i akcija za mehaničku analizu, [2]. Na osnovu dobijenih rezultata termičke i mehaničke analize i ulaznih podataka za konstrukciju, smanjenje noseće sposobnosti se može izračunati na osnovu analize konstrukcije. Ulazni podaci obuhvataju mehaničke karakteristike konstrukcije (čvrstoću, modul elastičnosti i odnos napon-deformacija) kao funkciju temperature i granične uslove.

### Principi projektovanja otpornosti na požar u Evrokodu

Proračun uticaja požara na noseće konstrukcije u Eurocode EN 1-1-2 zasniva se na polu-probabilističkom konceptu pouzdanosti konstrukcija u uslovima požara.

Projektovanje otpornosti konstruktivnog elementa na požar se vrši u skladu sa zahtevima nacionalnih građevinskih propisa, na osnovu njegovog izlaganja odgovarajućoj krivoj nominalnog požara tokom određenog vremenskog perioda.

Kriterijum noseće sposobnosti,  $R$ , znači da konstruktivni elementi moraju da zadrže noseću funkciju tokom zahtevanog vremena otpornosti na požar. Kriterijum noseće sposobnosti elementa se može izraziti na jedan od tri načina:

- Na osnovu vremena: Vreme trajanja otpornosti na požar treba da bude duže u odnosu na proračunato, za pretpostavljene zahteve korišćenja i tip objekta kada je opterećen projektovanim nivoom opterećenja i podvrgnut temperaturnoj krivoj požara:

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ} \quad (11)$$

- Na osnovu čvrstoće: Noseća sposobnost elementa treba da ima veću vrednost od vrednosti projektovanog opterećenja kada se zagreva zahtevano vreme:

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t} \quad (12)$$

- Na bazi temperature: Kritična temperatura elementa određena za projektovani nivo treba da prekorači projektovanu temperaturu koja nastaje pri zahtevanom izlaganju nominalnom požaru:

where  $E_d$ —the design value of the relevant effects of actions from the fundamental combination,  $\eta_{fi}$ —the reduction factor, values of which are given in relevant materials design codes. Typically  $\eta_{fi}$  takes values around 0.6–0.7 depending on the type of construction.

During the fire resistance assessment of structural members, other mechanical actions induced directly or indirectly by the fire should also be considered:

- actions due to pressure of fire growth. In a fully developed phase of fire the vertical pressure gradient is of the order 8 Pa/m,
- the forces and moments induced by thermal elongation or shrinkage of surrounding members,
- the deformation of single members (such as beams or floors) which can lead to the transfer of load to non-load-bearing separating members,
- impacts, if there is a risk of collapse of surrounding members on the fire-exposed side,
- effect of water for fire extinction due to a possible intervention by fire fighters.

## STRUCTURAL FIRE DESIGN

Structural fire design involves implementation of procedures for temperature analysis and actions for mechanical analysis, [2]. Based on the results obtained in the thermal and mechanical analysis and on the structural input data, the reduced load-bearing capacity can be calculated in the structural analysis. Structural input data include mechanical properties (strength, modulus of elasticity, and stress-strain relation) as a function of temperature and structural boundary conditions.

### Eurocode principles of fire resistant design

Calculating the impact of fire on bearing structures in Eurocode EN 1-1-2 is based on the semi-probabilistic concept of reliability of structures in fire.

Structural fire resistant design of a member is concerned with ensuring that it satisfies the requirements of national building regulations over a designated time period when subjected to the appropriate nominal fire curve.

Load-bearing criterion,  $R$ , means that structural members must maintain their load-bearing function during the whole required fire resistance time. Load-bearing capacity criterion of a structural member can be expressed in one of the three ways:

- On a time basis: The fire resistance time should exceed the requirement for building usage and type when loaded to the design load level and subjected to a fire temperature curve:

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ} \quad (11)$$

- On a strength basis: The load-bearing resistance of the member should exceed the design loading when it has been heated for the required time:

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t} \quad (12)$$

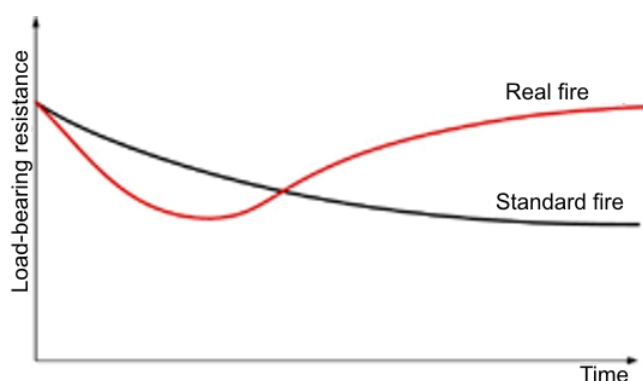
- On a temperature basis: The critical temperature of a member loaded to the design level should exceed the design temperature associated with the required exposure to the nominal fire:

$$\theta_d \leq \theta_{cr,d} \quad (13)$$

gde je  $t_{fi,d}$ —projektovana vrednost vremena otpornosti elementa na požar,  $t_{fi,requ}$ —zahtevano vreme otpornosti na požar,  $R_{fi,d,t}$ —projektovana vrednost otpornosti na požar,  $E_{fi,d,t}$ —projektovana vrednost relevantnog efekta opterećenja,  $\theta_d$ —projektovana vrednost temperature materijala,  $\theta_{cr,d}$ —projektovana vrednost kritične temperature materijala elementa.

#### Određivanje otpornosti na požar

Noseća sposobnost građevinske konstrukcije u realnom požaru se razlikuje od noseće sposobnosti određene na osnovu standardnog požara. Naime, sa porastom temperature u realnom požaru konstrukcija gubi svoju čvrstoću, ali nakon određenog vremena njena čvrstoća raste. Otpornost na požar konstruktivnih elemenata u standardnom i realnom požaru je prikazana na sl. 3.



Slika 3. Otpornost konstruktivnih elemenata u standardnom i realnim požarima

Figure 3. Fire resistance of structural members in standard and real fires

Razvoj numeričkih metoda i poznavanje termičkih i mehaničkih osobina materijala na povišenim temperaturama su omogućili da se proračunom utvrdi otpornost različitih konstruktivnih elemenata na požar.

Precizniji pristup za određivanje otpornosti konstrukcije na požar, ili tačnije, pojedinih elemenata koji je čine, razmatrani individualno, može biti definisan na osnovu dijagrama toka prikazanog na sl. 4.

Kao što je prikazano na sl. 4, na osnovu propisa se određuje zahtevano vreme otpornosti elementa na požar. Projektovano vreme otpornosti na požar se određuje na osnovu kodova ili standardnih testova. Zatim se proverava da li je zadovoljen uslov  $t_{fi,requ} > t_{fi,d}$ . Preskriptivni metod može obezbediti potrebne požarne performanse u slučaju betona i čeličnih konstrukcija nižeg stepena zaštite od požara ili kada uopšte nema zaštite od požara. Treba napomenuti da je ovaj metod još uvek dozvoljen u većini kodova, uključujući i Evrokodove.

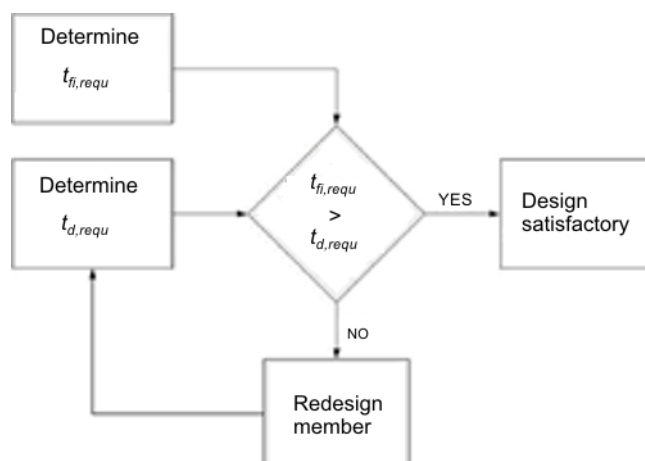
#### KONCEPT POUZDANOSTI KONSTRUKCIJE PRI POŽARU

U zaštiti od požara, veoma bitan aspekt ponašanja konstrukcije pri požaru je njena pouzdanost. Globalni koncept određivanja pouzdanosti konstrukcije u uslovima požara se sastoji od sledećih postupaka:

where  $t_{fi,d}$ —design value of fire resistance time of member,  $t_{fi,requ}$ —required fire resistance time,  $R_{fi,d,t}$ —design value of the fire resistance,  $E_{fi,d,t}$ —design value of relevant load effect,  $\theta_d$ —design value of material temperature,  $\theta_{cr,d}$ —design value of critical material temperature of member.

#### Determination of fire resistance

Load-bearing resistance of the structure in a real fire is different from the load-bearing resistance determined on the basis of standard fire. In fact, with increasing temperature in a real fire the structure loses its strength, but after a while its strength increases. Fire resistance of structural members in standard and real fires is shown in Fig. 3.



Slika 4. Preskriptivni pristup za određivanje otpornosti konstruktivnih elemenata na požar

Figure 4. Prescriptive approach for determining the fire resistance of structural members.

The development of numerical methods and knowledge of thermal and mechanical properties of materials at elevated temperatures have made it possible to determine the fire resistance of various structural members by calculations.

The prescriptive approach for determining the fire resistance of a structure, or more correctly, the assemblage of members comprising the structure considered individually, can be defined based on the flow diagram shown in Fig. 4.

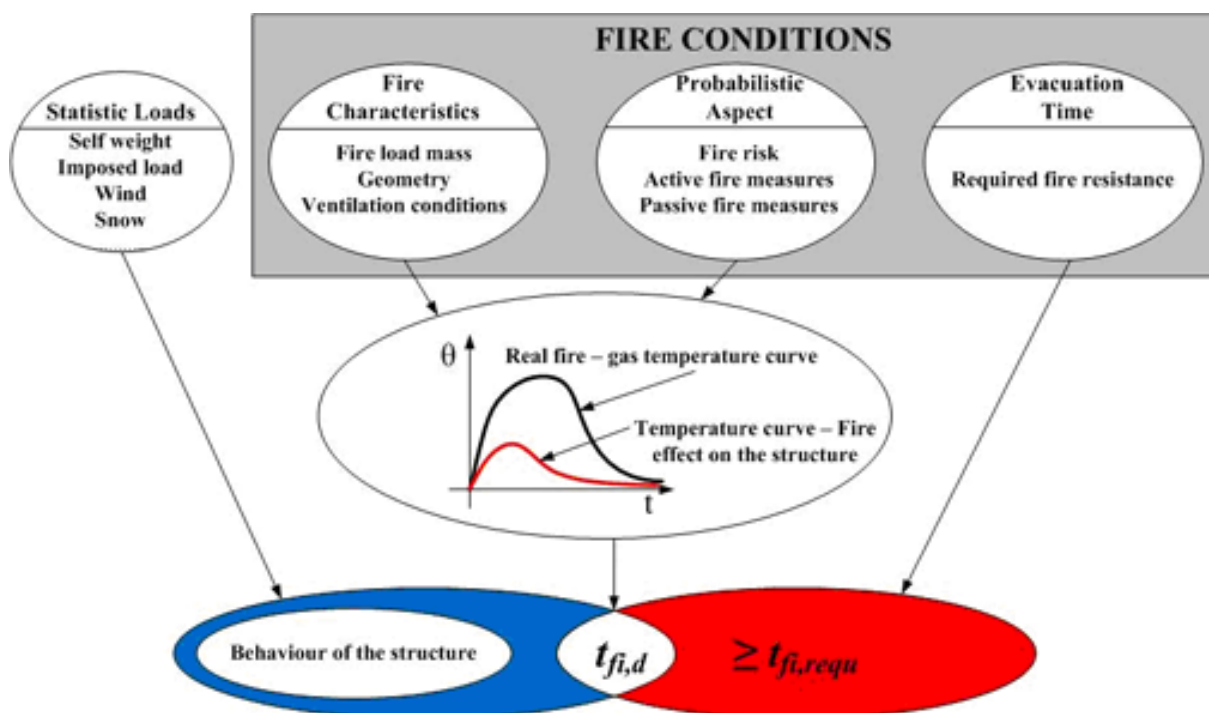
As shown in Fig. 4, the required fire resistance time of a member is determined on the basis of regulations. The designed fire resistance time is determined based on design codes or standard tests. This is followed by the verification whether the condition  $t_{fi,requ} > t_{fi,d}$  is satisfied. The prescriptive method can provide the necessary fire performance in the case of concrete and structural steel with a lower level of fire protection or no fire protection whatsoever. It should be noted that this method is still allowed under most design codes including Eurocode.

#### CONCEPT OF RELIABILITY STRUCTURE IN FIRE

In fire protection, a very important aspect of a structure's behaviour in fire is its reliability. Global design concept for determining the reliability of structures in a fire consists of the following procedures:

- Polazi se od činjenice da su karakteristike građevinskih objekata (geometrija, požarno opterećenje, predviđeni požarni sektori, uslovi ventilacije) relevantne za usvojeni scenario požara.
  - Rizik od nastajanja i širenja požara se povećava sa veličinom požarnog sektora, ali takođe i sa smanjenjem nivoa aktivnih i pasivnih mera (tehničkih i organizacionih) preduzetih u cilju zaštite ljudi i objekata u slučaju požara.
  - Analiza rizika od požara se bazira na statističkim podacima, kao i na pretpostavkama i simulacijama požara.
  - Na osnovu usvojenog scenarija požara određuje se kriva temperatura-vreme realnog požara kao funkcija prisutnog požarnog opterećenja.
  - Globalno ponašanje konstrukcije pod uticajem krive temperatura-vreme realnog požara i pod uticajem ostalih statičkih opterećenja konstrukcije (vlastita težina, dodatno stalno opterećenje, atmosferski uticaji, tj. vetar i sneg) se analizira.
  - Vreme otpornosti konstrukcije na dejstvo realnog požara  $t_{fi,d}$  se određuje. Vrednost  $t_{fi,d}$  može biti beskonačna kada konstrukcija ima takvu otpornost da može da izdrži statička opterećenja i nakon požara.
  - Određuje se zahtevano vreme otpornosti konstrukcije na realni požar,  $t_{fi,requ}$ . Zahtevano vreme otpornosti mora da obezbedi bezbednu evakuaciju ljudi i imovine, kao i rad vatrogasnih i specijalnih jedinica za intervencije u slučaju požara. Ovaj parametar se posmatra kao aspekt pouzdanosti konstrukcija pri požarima.
  - Definiše se vreme pouzdanosti konstrukcije u požaru na osnovu odnosa  $t_{fi,d} > t_{fi,requ}$ .
- Globalni koncept pouzdanosti građevinskih objekata u požaru prikazan je na sl. 5.

- We start from the fact that the characteristics of buildings (geometry, fire load mass, designed fire sectors, ventilation conditions) are relevant to the adopted fire scenario.
  - The risk of emergence and spread of fire increases with the size of the fire sector area, but also with the decreasing levels of active and passive measures (technical and organisational) taken to protect people and buildings in case of fire.
  - The fire risk analysis is based on statistical data, as well as on assumptions and fire simulations.
  - Based on the adopted fire scenario, the temperature-time curve of a real fire, as a function of the present fire load mass, is determined.
  - Global behaviour of structures under the influence of real fire temperature-time curves and of other static loads of the structural system (dead load, additional constant load, elements, i.e. wind and snow) is analysed.
  - The value of real fire resistance time of a member,  $t_{fi,d}$ , is determined. The value of  $t_{fi,d}$  can be infinite when the structure has such resistance that it can withstand static loads even after the fire.
  - The required fire resistance time of structures to the real fire,  $t_{fi,requ}$ , is determined. In case of fire, the required fire must provide safe evacuation of people and property and enable the intervention of fire fighters and special emergency units. This parameter is viewed as an aspect of structural reliability in fires.
  - Reliability time of a structure in a fire on the basis of the relation  $t_{fi,d} > t_{fi,requ}$ , is determined.
- The global concept of structural system reliability in a fire is shown in Fig. 5.



Slika 5. Koncept pouzdanosti konstrukcije u požaru  
Figure 5. Concept of the reliability of a structure in the fire.

## ZAKLJUČAK

Zaštita građevinskih objekata od požara, u praksi se najčešće sprovodi ograničavanjem upotrebe i smanjivanjem količine zapaljivih materijala i primenom građevinskih konstrukcija zahtevane otpornosti na dejstvo požara. Primenom građevinskih konstrukcija sa odgovarajućim nivoom otpornosti na požar obezbeđuje se očuvanje osnovnih funkcija njihovih konstruktivnih elemenata u požaru, bezbedna evakuacija ljudi i bezbedna akcija lokalizacije i gašenja požara.

Analiza nosivosti konstrukcija u požaru zasniva se na konceptu proračuna kao i za normalne temperature. U statička opterećenja građevinskog objekta uračunava se i požarno opterećenje kao akcidentno opterećenje. Uticaj delovanja požara na konstrukcije određuje se maksimalnom vrednošću prostorne temperature dostignute u zavisnosti od požarnog opterećenja, veličine prostora i uslova ventilacije. Delovanje realnog požara na konstrukcije izražava se parametarskom krivom temperatura-vreme koja se određuje na osnovu relevantnih fizičkih parametara. Otpornost konstrukcije u požaru se računa primenom računskih modela po načelima termodinamike.

Novi koncept proračuna otpornosti konstrukcije u požaru omogućava stvaranje realnije slike o pouzdanosti konstrukcija u slučaju delovanja realnog požara.

## LITERATURA – REFERENCES

1. Blagojević, M., Pešić, D., *A new curve for temperature-time relationship in compartment fire*, Thermal Science, Vol.15, No.2, 2011, pp.339-352.
2. Blagojević, M., Pešić, D., Mijalković, M., Glišović, S., *Jedinstvena funkcija za opisivanje naprežanja i deformacije betona u požaru*, Građevinar, Vol.63, broj 1, 2011, str.19-24.
3. EN 1991-1-2, Eurocode 1 – Actions on Structures - Part 1-2: General Actions - Actions on Structures Exposed to Fire, European Committee for Standardization, Brussels, 2002.
4. EN 1994-1-2, Eurocode 4 – Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-2 – General Rules – Structural Fire Design. CEN Central Secretariat, Brussels, 2005.
5. ISO 834, Fire Resistance Tests – Elements of Building Construction, ISO standard, 1975.
6. Jovanović, D., Tomanović D., *Dinamika požara*, Fakultet zaštite na radu, Niš, 2002, p.252.
7. Purkiss, J.A., *Fire Safety Engineering Design of Structures*, Elsevier Ltd, 2007, p.389.
8. Tomanović, D., *Integralni metod modelovanja temperaturskog režima požara u prostoriji*, doktorska disertacija, Fakultet zaštite na radu, Niš, 2005, p.154.

## CONCLUSION

Fire protection of buildings is usually implemented through limited use and reduced amount of flammable materials and through the use of structures with prescribed fire resistance time. The use of structures with the appropriate level of fire resistance preserves the basic functions of their structural members during fire, safe evacuation of people, and safe localization and extinction of fire.

Analysis of load-bearing ability of structures in a fire is based on the concept of calculation, the same as for normal temperatures. Fire load, as an accidental action, is included in static structural system loads. The effect of fire on the structure is determined by the maximum value of the spatial temperature reached depending on fire load mass, compartment dimensions, and ventilation conditions. The real fire impact on structures is expressed by the parametric temperature-time curve, which is determined on the basis of relevant physical parameters. Fire resistance of a structure is calculated by means of calculation models based on the principles of thermodynamics.

The new concept of fire resistance calculation paints a more realistic picture of the reliability of structures in case of a real fire.