

■ TAKÁCS Lajos Gábor, SZIKRA Csaba¹

Műemlékek tűzvédelmi tervezése mérnöki módszerekkel

ESETTANULMÁNY – AZ OPERAHÁZ MŰHELYHÁZÁNAK TŰZVÉDELMI TERVEZÉSE

■ **Kivonat:** Épületeink egyre bonyolultabbak, összetettebbek, nemcsak a funkcióik, hanem az alkalmazott szerkezetek, megoldások tükrében is. Különösen igaz ez történeti épületekre, műemlékekre, főleg, ha rekonstrukciójuk során az eredetitől eltérő funkciót kapnak. Ezen épületek tűzvédelmét egyre kevésbé lehet megtervezni ún. leíró, azaz tételes előírásokon alapuló módszerekkel; helyettük egyre szélesebb körben terjednek a tűzvédelem mérnöki módszerei. Jelen cikkben a Kőbányai úton lévő egykori MÁV Északi Járműjavító legnagyobb és legfontosabb, műemléki státust élvező épülete, az egykori mozdonyjavító csarnok (Eiffel-csarnok) tűzvédelmi tervezési sajátosságait ismertetjük.

■ **Kulcsszavak:** tűzvédelem mérnöki módszerei, CFD modellezés, oltóberendezés, hő- és füstelvezetés

Bevezetés

■ Épületeink egyre bonyolultabbak, összetettebbek, nemcsak a funkcióik, hanem az alkalmazott szerkezetek, megoldások tükrében is. Különösen igaz ez történeti épületekre, műemlékekre, főleg, ha rekonstrukciójuk során az eredetitől eltérő funkciót kapnak. Ezen épületek tűzvédelmét egyre kevésbé lehet megtervezni ún. leíró (angolszász szóval preszkriptív), azaz tételes előírásokon alapuló módszerekkel; helyettük egyre szélesebb körben terjednek a tűzvédelem mérnöki módszerei (SZIKRA 2013). A leíró módszerek olyan egyszerű, tapasztalati képleteken vagy táblázatokon alapuló méretezések, amelyek jellegüknél fogva a biztonság javára jelentős tartalékokat tartalmaznak.

A leíró módszerekkel szemben a mérnöki tervezési módszerekben, így a cellamodellekben is az épület háromdimenziós modelljét – szerkezeteit, berendezéseit és a szerkezetek által határolt belső tereket – véges kiterjedésű cellákra osztjuk, amelyek cellahálót vagy cellahálókat alkotnak. Az épületmodellben az éghető anyagok, épületszerkezetek definiálása mellett különböző helyszíneken tűzfészek is elhelyezhetők. A modellek működésére a cellákra felírt mozgás, hő- és anyagátadási egyenletek numerikus megoldása jellemző. Ezek segítségével nemcsak meghatározható, hanem vizualizálható az épület és tűzvédelmi berendezéseinek tűzeseti viselkedése.

¹ TAKÁCS Lajos Gábor, okl. építészmérnök, dr., egyetemi docens a Budapesti Műszaki Egyetem Épületszerkezettani Tanszékén, Magyarország; SZIKRA Csaba, okl. épületgépész mérnök, tudományos munkatárs a Budapesti Műszaki Egyetem Épületenergetikai és Épületgépészeti Tanszékén, Magyarország.

The Fire Safety Design of Historic Buildings with Engineering Methods

CASE STUDY – THE FIRE SAFETY DESIGN OF THE WORKSHOP OF THE OPERA HOUSE

■ **Abstract:** Our buildings are becoming increasingly complex, not only in terms of their functions, but also regarding the applied structures and solutions. This is especially true of listed and unlisted historic buildings, especially if they gain a new function, different from the original one, during their conservation. The fire safety of these buildings can hardly be designed with so-called descriptive design methods that are based on compliance with prescriptive requirements; the fire safety engineering methods are increasingly spreading instead. In this article, we describe the fire safety design features of the largest and most important, listed historic building, the former locomotive repair workshop (the Eiffel Hall) of the former Northern Motive Power Depot of the Hungarian National Railway Company.

■ **Keywords:** engineering methods of fire safety, CFD modelling, fire extinguishing system, heat and smoke extraction

Introduction

■ Our buildings are becoming increasingly complex, not only in terms of their functions, but also regarding the applied structures and solutions. This is especially true of listed and unlisted historic buildings, especially if they gain a new function, different from the original one, during their conservation. The fire safety of these buildings can hardly be designed with so-called descriptive (the English version: prescriptive) design methods that are based on compliance with prescriptive requirements; the fire safety engineering methods are increasingly spreading instead (SZIKRA 2013). The descriptive methods are simple measurements based on empirical formulas or tables, which by their very nature contain significant reserves for safety.

¹ Lajos Gábor TAKÁCS, certified civil engineer, PhD, associate professor at the Budapest University of Technology and Economics, Department of Structural Engineering, Hungary; Gábor SZIKRA, certified building services engineer, research fellow at the Budapest University of Technology and Economics, Department of Building Energetics and Building Service, Hungary.

In contrast to the descriptive methods, in the engineering design methods, thus in cell models as well, the three-dimensional model of the building – its structures, fixtures, and interior spaces enclosed by structures – is divided into finite elements that form a network of cells or meshes. In the building model, besides the definition of flammable materials and building structures, seats of fire can be placed in different locations as well. The operation of the models is characterised by the numerical solution of motion, heat, and mass transfer equations prescribed for cells. These can be used not only to determine, but also to visualise the behaviour of the building and its fire safety equipment in the case of a fire. Cell models are suitable not only for the fire safety design of buildings, the evaluation regarding the cooperation of the active fire safety systems (fire alarm systems, smoke and heat extraction systems, built-in fire extinguishing systems), but also for the precise determination of the fire's thermal effects on the load-bearing structures (SZIKRA & TAKÁCS 2016).

This is valid in particular for the conservation of the former Northern Motive Power Depot of the Hungarian National Railway Company (MÁV) on Kőbányai Road, in the 10th district of Budapest, the new function of which is the rehearsal and workshop space of the Hungarian State Opera House and the Erkel Theatre. The building ensemble consists of the following elements:

- Building A, the Eiffel Hall,
- Building B, the so-called Opera Studio,
- Building C, the Scene Dock,
- Building D, the Operation Building.

In this article, we describe the fire safety design features of the largest and most important, listed historic building, the former locomotive repair workshop (the Eiffel Hall) from this building ensemble.

A cellmodellek nemcsak épületek tűzvédelmi tervezésére, az aktív tűzvédelmi berendezések (tűzjelző rendszerek, hő- és füstelvezetés, beépített ol-tóberendezések) együttműködésének vizsgálatára alkalmasak, hanem a tartószerkezetekre jutó tűzeseti hőmérsékleti hatások pontos meghatározására is (SZIKRA & TAKÁCS 2016).

Fentiek különösen érvényesek a főváros X. kerületében, a Kőbányai úton lévő egykori MÁV Északi Járműjavító rekonstrukciójára, amelynek tervezett új funkciója a Magyar Állami Operaház és az Erkel Színház új műhelyháza és próbacentruma. Az épületegyüttes az alábbi elemekből áll:

- A épület Eiffel-csarnok,
- B épület ún. Operastúdió,
- C épület Jelmezraktár,
- D épület Üzemeltetés épülete.

Jelen cikkben az épületegyüttes legnagyobb és legfontosabb, műemléki státust élvező épülete, az egykori mozdonyjavító csarnok (Eiffel-csarnok) tűzvédelmi tervezési sajátosságait ismertetjük.

Az Eiffel-csarnok általános építészeti és tűzvédelmi jellemzői

■ Az Eiffel-csarnok 1883–85 között épült, feltehetően FEKETEHAZY János tervezte, nem az általános hiedelem szerinti Eiffel-iroda. A tervezett felújítást követően két fő részből áll majd: az üzemi (tárolási és műhely) részből és a közönségforgalmi részből. A csarnok 214 m hosszú, 96 m széles, ötha-jós. Tartószerkezete szegecselt acél rácsos tartókeretekből áll (2. kép), amelyeken jelenleg deszkaburkolat és trapézlemez fedés található. A homlokzat nyerstégla architektúra (1. kép). Az épület létesítését követően számos átalakítást, bővítést ért meg, jelenlegi állapota leromlott.

Az épületben a tervezett felújítást követően az alábbi kockázati egységek és egyben tűszakaszok különíthetők el:

1. Előcsarnok, színpadok – közönségforgalmi rész (Q–Y tengelyek között az épület teljes szélességében),
2. Műhelyek (C–Q/6–9 tengelyek között),
3. Díszlet- és egyéb raktárak (C–Q/6*–9 tengelyek között),



■ 1. kép: Az Eiffel-csarnok látványterve a felújítást követően © Közti Zrt., Marosi Stúdió

■ Photo 1. Architectural visualization of the Eiffel Hall after the renovation © Közti co. Ltd., Marosi Studio



■ **2. kép:** Az Eiffel-csarnok felújítás előtti belső képe © KAKASY László, BME Épületszerkezettani Tanszék
 ■ **Photo 2.** The interior of the Eiffel Hall before the renovation © László KAKASY, BUTE Department of Structural Engineering

4. Rekreációs terület (A–Q/1–4 tengelyek között),
5. Gépészeti terület (C–Q/4–6 tengelyek között).

Az épület meglévő műemléki tartószerkezete szegecselt acél keretállásokból áll, amelyek nem hegeszthető összetételű acél anyagból készültek; megerősítésük emiatt is kerülendő volt. A homlokzati falak téglából készültek. A tetőfödém térelhatároló szerkezete acél fegyverzetű szendvicspanel, általánosságban B-s1, d0 tűzvédelmi osztályú PIR vagy fenolhab maghőszigeteléssel (eltérési engedély alapján), a tűzszakaszhatárok vonalában, illetve a tűzterjedés ellen védett követelményű területeken kőzetgyapot maghőszigeteléssel. Az éghető maghőszigetelésű tetőpanelek azért kerültek kiválasztásra, mert azonos hőtechnikai jellemzők mellett sokkal könnyebbek, mint a kőzetgyapot maghőszigetelésű típusok, így elkerülhető a szegecselt acél tartószerkezet megerősítése, amely a műszaki problémák mellett műemlékvédelmi szempontból is kerülendő. A rekonstrukció révén az épületben monolit vasbeton falak és födémekek készülnek; a tűzgátló szerkezetek is monolit vasbetonból lesznek. A tető-felülvilágítók B-s1, d0 tűzvédelmi osztályú polikarbonát szerkezetek.

Az épület beépített tűzjelző berendezéssel és beépített oltóberendezéssel van ellátva. Az 1200 m²-nél nagyobb alapterületű helyiségek (1. kép) hő- és füstelvezetéssel ellátottak, ahol az elvezetés természetes úton, a tetőbe épített füstelvezetőkkel biztosított; a légpótlást részben természetes úton, de a védett homlokzat okozta korlátok miatt többnyire gépi úton biztosítják.

Az Eiffel-csarnok CFD modellezése

■ A tűzvédelemben alkalmazott CFD-modellek általában kis sebességű turbulens és lamináris áramlások kezelésére alkalmasak, tehát alapvetően áramlási modellek (HESKESTAD 1995). Napjainkra azonban alkalmassá váltak épületek komplex modellezésére (MCGRATTAN et al. 2014a, 2014b; Database.data file...), az alábbi jellemzőkkel, sajátosságokkal:

- Az épületek háromdimenziós modellként ábrázolhatók a térben (2. ábra). Az épületszerkezetek, illetve egyes rétegeik, komponenseik a szokásos CAD szoftverektől eltérően hőtani jellemzőikkel együtt ábrázolhatóak (sűrűség, hővezetési tényező és annak hőmérsékletfüggő

General architectural and fire safety features of the Eiffel Hall

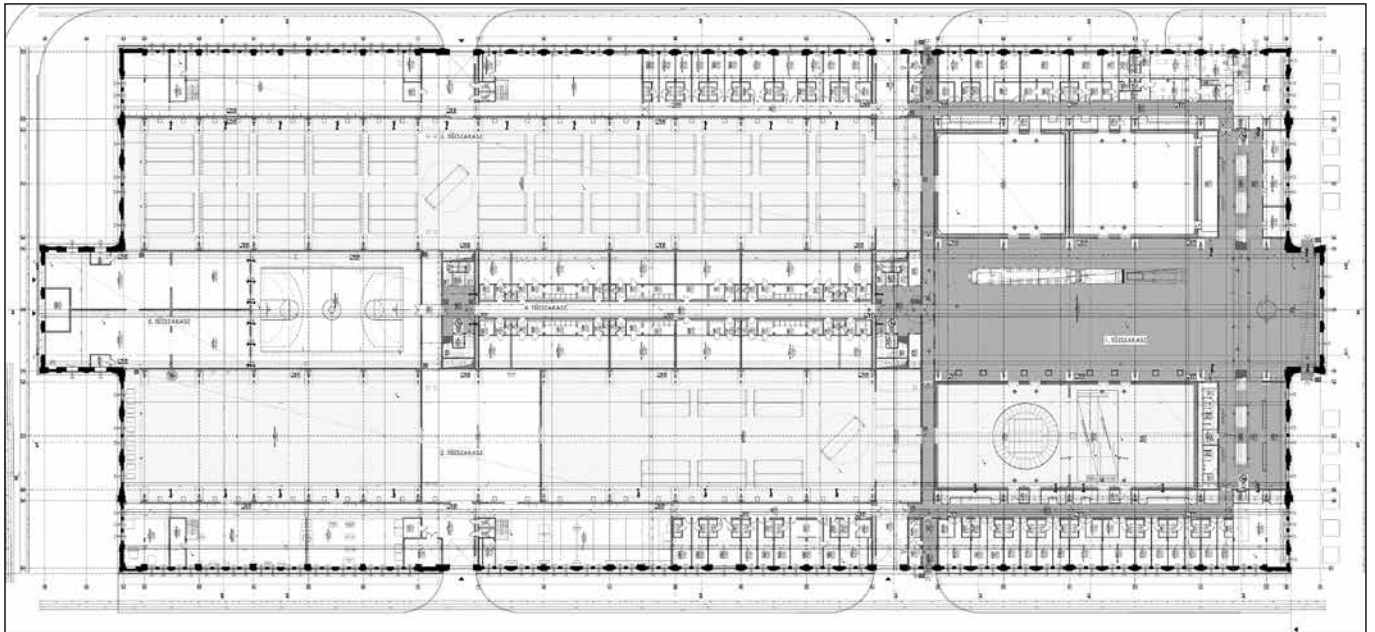
■ The Eiffel Hall was built between 1883 and 1885, presumably designed by János FEKETEHEÁZY, not by the Eiffel Office as it was generally thought. Following the renovation, it will consist of two main parts: the operating area (storage and workshop) and the public access area. The hall is 214 metres long and 96 metres wide, with five aisles. Its load-bearing structure consists of riveted steel truss frames (Photo 2), which is currently covered with planks and corrugated metal sheeting. The elevation presents brickwork surfaces (Photo 1). Following its construction, the building underwent various modifications, expansions; its current state has deteriorated.

After the planned renovation, the following risk units and fire sections can be separated in the building:

1. Lobby, stage areas – public access area (between the axes Q-Y, across the entire width of the building),
2. Workshops (between the axes C-Q/6-9),
3. Scene dock and other warehouses (between the axes C-Q/6*-9),
4. Recreation area (between the axes A-Q/1-4),
5. Technical space (between the axes C-Q/4-6).

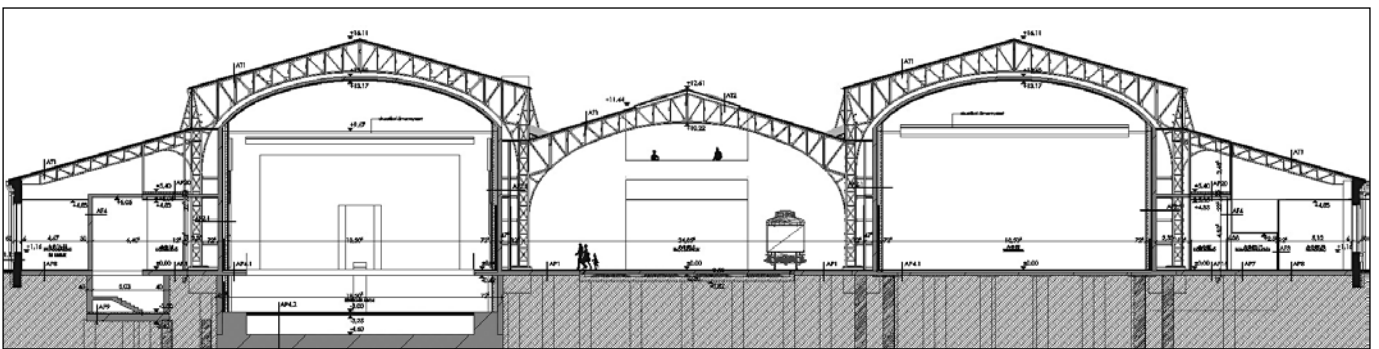
The existing historic load-bearing structure of the building consists of riveted steel frames made of non-weldable steel; their reinforcement should therefore be avoided. The elevations are made of bricks. The roof envelope system includes steel-faced sandwich panels, generally with PIR or phenolic foam core insulation (according to the deviation permit), with the reaction to fire classification B-s1, d0, and stone wool core insulation in the area of the fire section boundaries, as well as areas protected against the spread of fire. The flammable core insulated roof panels have been chosen because with the same thermal properties they are much lighter than the ones with stone wool insulation, so the reinforcement of the riveted steel load-bearing structure can thus be avoided, which, besides the technical problems, should be avoided with a view to historic building conservation as well. Through the conservation, the building will receive monolithic reinforced concrete walls and ceilings; the fire protection structures will also be made of monolithic reinforced concrete. The skylights are polycarbonate structures with the reaction to fire classification B-s1, d0.

The building is equipped with built-in fire alarm and fire extinguishing systems. Spaces with a floor area of over 1,200 square metres (Photo 1) are equipped with smoke and heat extraction systems, where the extraction is ensured by a natural exhaust system, i.e. smoke exhaust duct lines built in the roof, and the air supply is ensured partly in a natural way, but mostly mechanically due to the barriers set up by the protected status of the elevation.



■ 1. ábra: Az Eiffel-csarnok földszintjének átnézeti alaprajza. Sötét kiemeléssel a hő- és füstelvezetéssel ellátott területek jelöltek © Közti Zrt.

■ Figure 1. Overview of the Eiffel Hall ground floor plan. Areas equipped with smoke and heat extraction systems are highlighted in a darker colour © Közti co. Ltd.



■ 2. ábra: Az Eiffel-csarnok keresztmetszete az előcsarnokon keresztül © Közti Zrt.

■ Figure 2. The cross-section of the Eiffel Hall through the lobby © Közti co. Ltd.

CFD modelling of the Eiffel Hall

■ The CFD models used in fire safety are generally suitable for managing low velocity turbulent and laminar flows, so they are basically flow models (HESKESTAD 1995). Today, however, they have become suitable for the complex modelling of buildings (MCGRATTAN et al. 2014a, 2014b; Database. data file...), with the following features and characteristics:

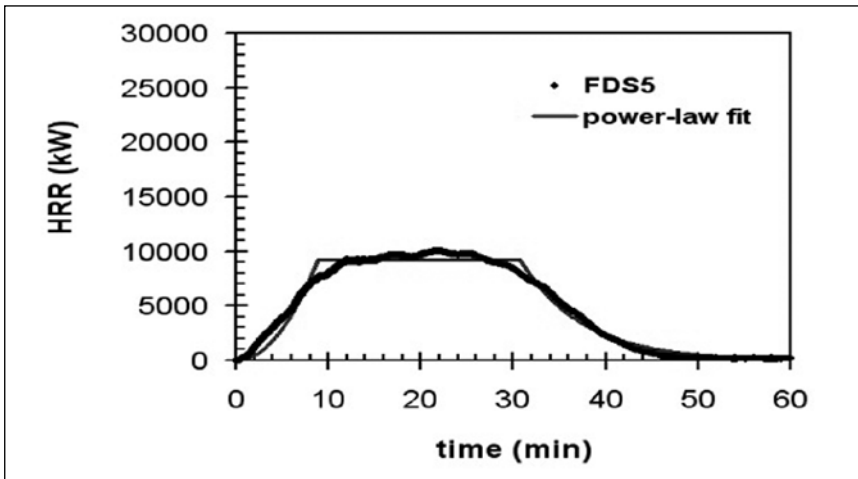
- Buildings can be represented as three-dimensional models in space (Figure 2). Building structures and some of their layers and components can be represented, contrary to the standard CAD software, together with their thermal characteristics (density, thermal conductivity factor and its temperature dependence, specific heat), which influence the temperature and flow conditions in the interior space, as well as their own warming (SZIKRA & TAKÁCS 2014a).
- The fires in the building can be described with a thermal development

alakulása, fajhő), amelyek befolyásolják a belső térben kialakuló hőmérsékleti és áramlási viszonyokat, továbbá a saját felmelegedésüket is (SZIKRA & TAKÁCS 2014a).

- Az épületben bekövetkező tüzek leírhatók valós léptékű tüztesztek során meghatározott hőfejlődési görbével (kW/m^2 , MW/m^2), megadható a tűz teljesítményének időbeni alakulása, de az éghető épületszerkezetek, illetve az épületekben tárolt éghető anyagok tűztechnikai tulajdonságainak meghatározása mellett egy adott gyújtóforrás esetén a tűz terjedése, illetve teljesítményének időbeni alakulása is modellezhető.

Az Eiffel-csarnok raktárterületeiben a VTT beépített oltóberendezéssel ellátott raktárakra javasolt tűzgörbét alkalmaztuk (HIETANIEMI & MIKKOLA 2010):

- Az automatikus tűzjelző rendszerek érzékelői a modellterbe helyezhetők, az érzékelési idejük vizsgálható.
- A beépített oltóberendezések (vízzel oltók, vízköddel oltók) fejei a modellekben rendkívül pontosan parametrizálhatók: a nyomás, a vízhozam, a kioldási hőmérséklet mellett a kioldási érzékenység, a cseppek eloszlása, szemmagysága egyaránt megadható.
- Gravitációs vagy gépi hő- és füstelvezetés, illetve légpótlás egyaránt megadható, amely befolyásolhatja az épületen belüli füstterjedést, a toxikus égéstermékek koncentrációját, illetve a láthatósági viszonyokat is. Ezen eszközök vezérelhetők is a modellben az automatikus tűzjelző

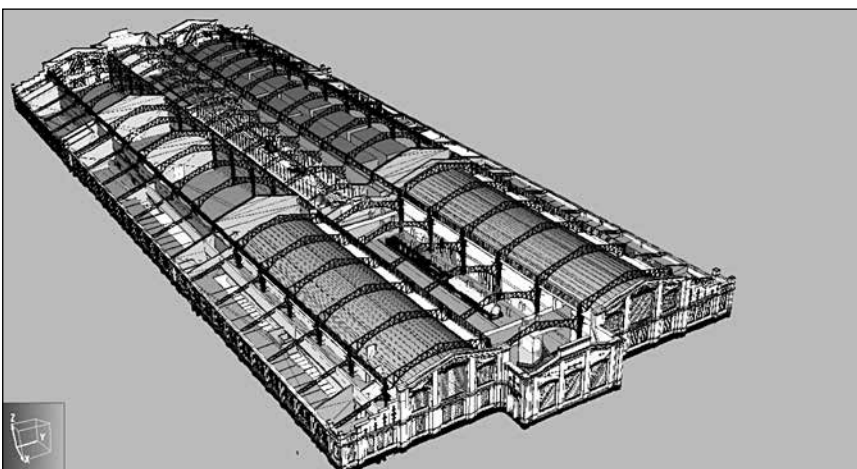


■ **3. ábra:** Az előcsarnokban, a raktárban és a tetőkeretre néző műhely szimulációja során alkalmazott HRR-görbe (hőfelszabadulás-idő függvény)
 ■ **Figure 3.** The HRR curve (heat release – time function) used in the simulation in the workshop overlooking the lobby, warehouse, and roof garden

rendszer érzékelőiről, hasonlóan a valós tűzjelző rendszerek vezérlési mátrixához (SZIKRA & TAKÁCS 2014b).

A numerikus hő- és füstterjedési szimuláció készítését az alábbiak indokolják:

- annak igazolása, hogy a tömeges emberi tartózkodásra szolgáló előcsarnokban a kiürítés számára szükséges három perc kiürítési szintidőn belül megfelelő a láthatóság és a hőmérséklet, a sugárzás-intenzitás (a jogszabály szerint megengedett kiürítési szintidő tűzmodellezés nélkül 1,5 perc lenne),
- a hő- és füstelvezetés hatékonyságának vizsgálata a raktárban és a tetőkertben a tervezett gravitációs hő- és füstelvezetés és gépi légpótlás, valamint füstkötenyek nélküli kialakítás mellett,
- a tetőfödém tartószerkezetére és térelhatároló szerkezetére jutó gáztéri hőmérsékletkitét meghatározása, különös tekintettel a tető szendvicspanelek éghető anyagú hőszigetelésének gyulladási hőmérsékletéhez képesti alakulására,



■ **4. ábra:** Az Eiffel-csarnok háromdimenziós modellje PyroSim környezetben, a tetőfödém térelhatároló szerkezete nélkül ábrázolva. Előtérben a főbejárat és az előcsarnok, háttérben a vizsgált raktárterület a konténerekkel
 ■ **Figure 4.** The three-dimensional model of the Eiffel Hall in a PyroSim environment, depicted without the envelope components of the roof slab. In the foreground the main entrance and the lobby, in the background the investigated warehouse with containers

curve (kW/m^2 , MW/m^2) defined in a real-scale fire test, the fire performance can be defined in time, but besides the fire properties of flammable building structures and flammable materials in the buildings, in the case of a particular ignition source, the spread of the fire and its performance can also be modelled in time.

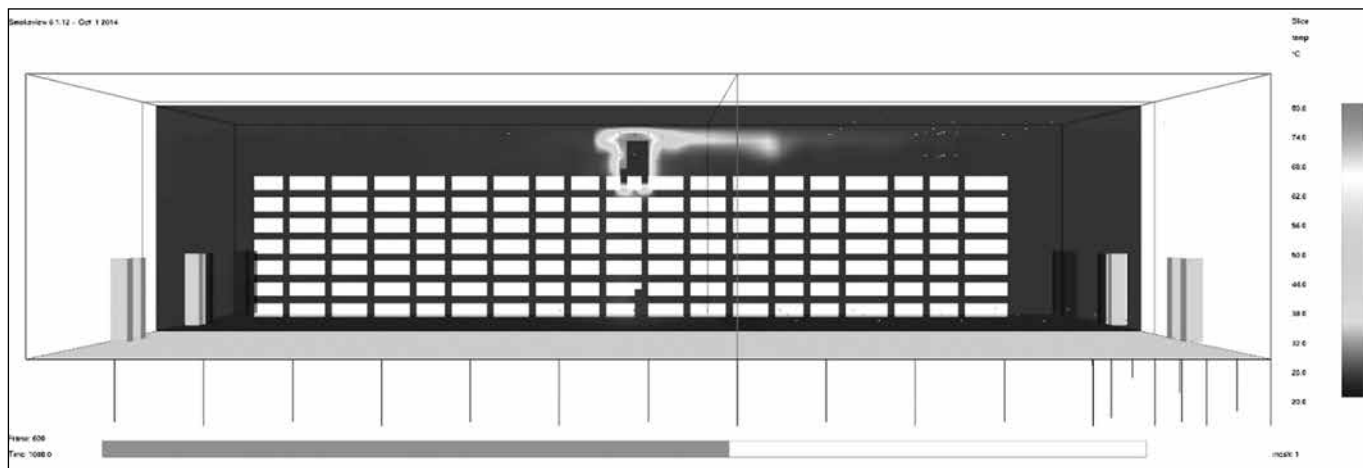
In the warehouse area of the Eiffel Hall, we used a fire curve recommended for warehouses with VTT built-in extinguishers (HETANIEMI & MIKKOLA 2010):

- The sensors of the automatic fire detection systems can be placed in the model space and their detection time can be examined.
- The heads of the built-in extinguishers (water and water mist extinguishers) can be accurately parametrised in the models: pressure, water flow, release temperature and sensitivity, the size and distribution of droplets can also be specified.
- Gravity or mechanical heat and smoke extraction, as well as air replacement can also be specified, which can affect the spread of smoke, the concentration of toxic combustion products, and the visibility conditions within the building. These devices can also be controlled from the sensors of the automatic fire alarm system in the model, similarly to the control matrix of real fire alarm systems (SZIKRA & TAKÁCS 2014b).

The numerical simulation of heat and smoke spread was necessary for the following reasons:

- to demonstrate that visibility, temperature, and radiation intensity in the lobby area accessed by large numbers of people are adequate for safe evacuation within the necessary evacuation time of three minutes (the evacuation time permitted by law would be 1.5 minutes without fire modelling),
- to examine the efficiency of the heat and smoke extraction in the warehouse and the roof garden with the designed gravity heat and smoke extraction, mechanical ventilation system, and without smoke curtains,
- to determine the gas temperature exposure of the load-bearing structure and envelope components of the roof structure, particularly taking into account the changes in relation to the ignition temperature of the flammable thermal insulation materials of the roof sandwich panels,
- and to investigate that the cooperation of certain active fire protection equipments – especially the sprinkler system and heat and smoke extraction system – do not undermine the efficiency of individual systems.

In the case of the Eiffel Hall, the model suitable for the implementation has been developed with the transformation and completion of the three-dimensional architectural model imported into the simulation software (Figure 2).



■ **5. ábra:** A nagy díszletraktár metszete CFD környezetben, a tárolás tetejére helyezett tűzfészekkel
 ■ **Figure 5.** Cross-section of the large scene dock in a CFD environment, with a seat of fire placed on top of the storage

Particular care should be taken when designing a CFD (computational fluid dynamics) simulation, used also to determine the temperature exposure of the load-bearing structures in case of a fire, when placing seats of fire. It is essential to know the properties and the spatial distribution of flammable materials within the examined space. In the case of warehouses, basic data include the storage system, the distribution of shelves, the maximum possible storage height, and distances from the load-bearing structures (pillars, beams and cross girders, slabs, etc.), the ceiling height being another important information.

In the case of an examined space with built-in extinguisher, it is necessary to know the type of the extinguisher (sprinkler, water mist, other), the parameters of the extinguishers' heads (pressure, the distribution of droplets, activation temperature, detector response sensitivity – RTI, spray patterns, etc.), as well as the location of the built-in extinguisher (only ceiling-level or ceiling and in-rack sprinklers are installed).

Thus, the most important aspects in the selection of the real-scale fire test result for fire modelling from literature are the ceiling height of the examined space and of the fire section, including storage height and type, as well as the design of the built-in extinguisher. If the same test result is found in the proposed building, it can be a good basis for modelling. A typical test result is that the peak power of fires near the ceiling sprinklers is significantly lower than that of the fire occurring in the middle of the storage system, thanks to the rapid response of the sprinklers; the maximum expected peak power occurs in the event of a fire in the floor area (HIETANIEMI & MIKKOLA 2010).

For modelling with predetermined fire performance based on the above, the criteria for placing seats of fire are as follows:

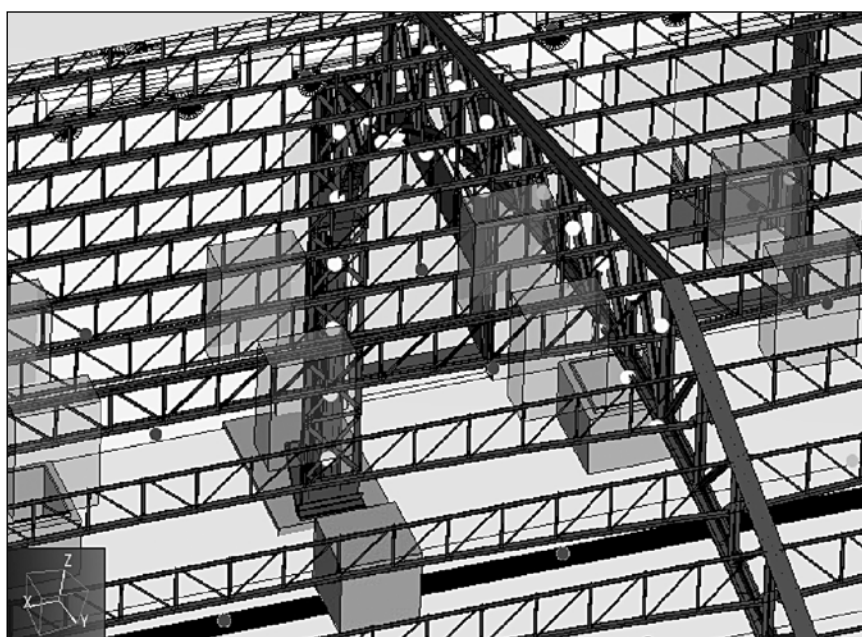
- on the floor surface – the highest level of fire performance can be achieved here,
- in the middle of the storage system,
- at the highest points of the storage system,

– továbbá annak vizsgálata, hogy az egyes aktív tűzvédelmi berendezések – főleg a sprinkler rendszer, valamint a hő- és füstelvezetés – együttműködése nem csökkenti az egyes rendszerek hatékonyságát.

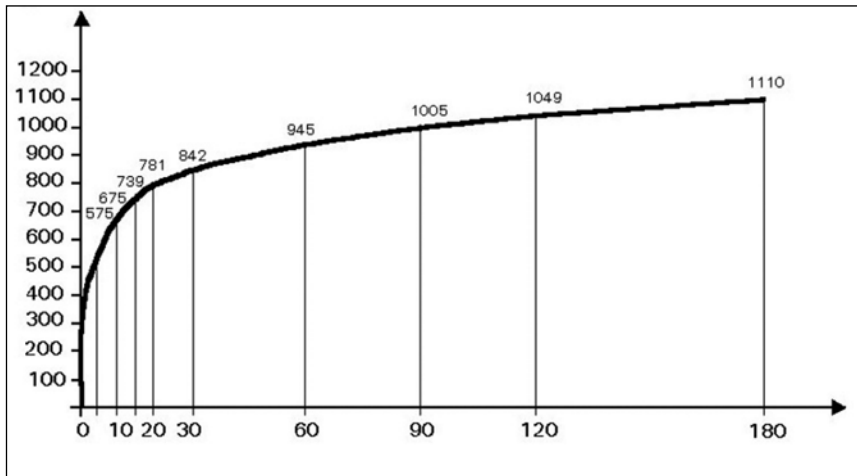
Az Eiffel-csarnok esetében a szimulációs szoftverbe importált 3D építészeti modell átalakításával, kiegészítésével készítettük el a futtatásokra alkalmas modellt (2. ábra).

Különös gondossággal kell eljárni a tartószerkezetekre jutó tűzeseti hőmérsékletkítét meghatározására is szolgáló CFD (számítógépes áramlási szimuláció) készítés esetében a tűzfészkek elhelyezésénél. Alapvetően ismerni kell a vizsgált térben található éghető anyagok tulajdonságait, továbbá térbeli eloszlását. Raktárak esetében alapadat a tárolási rendszer, a polcok kiosztása, a legnagyobb lehetséges tárolási magasság, illetve a távolságok a tartószerkezetektől (pillérek, fő- és fióktartók, födémelek stb.), amelyhez szintén fontos adat a belmagasság.

Beépített oltóberendezéssel ellátott vizsgált terület esetében ismerni kell az oltóberendezés típusát (sprinkler, vízköd, egyéb), az oltóberendezés



■ **6. ábra:** Az Eiffel-csarnok egyik keretállása, a tővében elhelyezett tűzfészekkel; a világos pontok hőmérsékletmérő műszerek
 ■ **Figure 6.** A frame of the Eiffel Hall, with a seat of fire placed at its base; the light-coloured dots are thermometers



■ **7. ábra:** Az ISO 834 szerinti hőmérséklet-idő kitéti görbe
 ■ **Figure 7.** The temperature/time curve specified in ISO 834

fejeinek paramétereit (nyomás, cseppeloszlás, aktiválási hőmérséklet, RTI (detektorérzékenység), szórás kép stb.), továbbá a beépített oltóberendezés elhelyezkedését (csak mennyezeti fejek vagy mennyezeti és polcközi fejek egyaránt léteznek).

A tűzmodellezéshez választandó valós léptékű tűzteszteredmény szakirodalomból történő kiválasztásánál tehát a vizsgált helyiség, tűzszakasz-belmagassága, azon belül a tárolási magasság és jelleg, valamint a beépített oltóberendezés kialakítása a legfontosabb szempontok. Ha a tervezett épülettel megegyező vizsgálati eredményt találunk, megfelelő alapja lehet a modellezésnek. Jellemző vizsgálati eredmény, hogy a mennyezeti sprinklerfejekhez közel keletkező tüzek csúcsteljesítménye lényegesen alacsonyabb, a gyorsan reagáló sprinklerfejeknek köszönhetően, mint a tárolási rendszer közepén keletkező tűzfészeknek; a várható legnagyobb csúcsteljesítmény a padló környezetében keletkező tűz esetén alakul ki (HIETANIEMI & MIK-KOLA 2010).

A fentiek alapján előre meghatározott tüzteljesítménnyel történő modellezésnél a tűzfészek elhelyezésének szempontjai az alábbiak:

- a padlófelületen – itt alakulhat ki a legnagyobb tüzteljesítmény,
- a tárolási rendszer közbenső részein,
- a tárolási rendszer legmagasabb pontjain,
- a hő- és füstelvezetéshez tartozó légpótló nyílásokhoz legközelebbi lehetséges éghető anyag előfordulási helyén – a beáramló levegő a sebességének függvényében eltérítheti a csóvát, csökkentve a beépített oltóberendezés, valamint a hő- és füstelvezetés hatékonyságát,
- ha éghető anyagok a falak vagy a falsarkok közvetlen környezetében is előfordulnak, ezeken a helyeken a csóva magassága nagyobb, mint a falaktól távolabb, növelve a hőmérsékletkitétet a tűzfészeknél magasabban lévő tartószerkezeteknél.

Oszlopok, pillérek esetén a fentiek közül a legutóbbi a mértékadó; ennek megfelelően elhelyezett tűzfészeket látunk az Eiffel-csarnok egyik raktárában a 6. ábrán.

A tartószerkezetekre jutó hőmérsékletkitétet alakulása beépített oltóberendezéssel ellátott épületekben általában kedvezőbb, mint beépített oltóberendezés nélkülieknél. Ha nincs beépített oltóberendezés egy épületben vagy tűzszakaszban, akkor annak teljes területére kiterjedhet a tűz, így a tartószerkezetekre jutó hőmérsékletkitétet az ISO 834 szabvány szerinti hőmérséklet-idő kitéti görbéhez lesz közel, amellyel a tartószerkezetek kemencés tűzállósági vizsgálatait is végzik laboratóriumi körülmények között (7. ábra).

- at the place of occurrence of the possibly flammable material closest to the air supply openings of the heat and smoke extraction system – depending on its velocity, the incoming air can divert the fire, reducing the efficiency of the built-in extinguisher, as well as of the heat and smoke extraction system,
- if flammable materials occur in the immediate vicinity of walls or corners, the flame height here is greater than farther away from the walls, increasing the high temperature exposure of the load-bearing structures higher than the seat of fire.

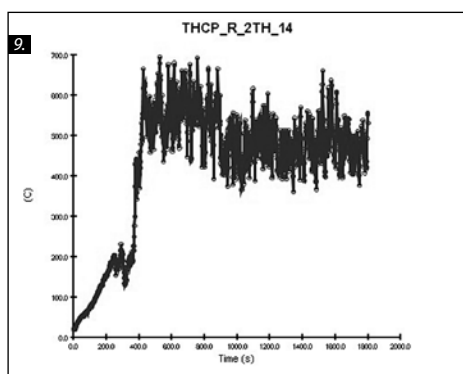
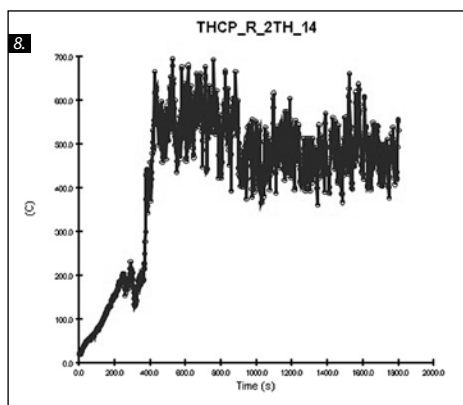
In the case of columns and pillars, the last of the above is to be considered; we can see a seat of fire placed according to this in one of the warehouses of the Eiffel Hall, in Figure 6.

The temperature exposure of load-bearing structures is generally more favourable in the case of buildings equipped with built-in extinguishers than in the case of those without such a system. If there is no built-in extinguisher in a building or fire section, the fire can spread over its entire area, so the temperature exposure of the load-bearing structures will be close to the temperature/time curve specified in ISO 834, which is used when testing the fire resistance of load-bearing structures in furnaces under laboratory conditions (Figure 7).

In buildings equipped with built-in extinguishers, more favourable, lower temperatures can be obtained in the CFD modelling than the above curves, due to the cooling effect of the built-in extinguishers. These fire scenarios are called localised fires. The temperature exposure is determined basically by the energy released during the fire. If in some cases the built-in fire extinguisher cannot extinguish the fire, it can prevent its spread and flashover development as well.

The temperature exposure of the load-bearing structures and its development in time depend on the following circumstances:

- the role and position of the load-bearing structure in the building (pillar, wall, or roof slab),
- the fire performance and its development in time (which, in addition to the characteristics of the flammable materials in the given room or fire section, depends to a large extent on the built-in extinguisher and its effectiveness),
- the ceiling height of the room affected by the fire (the greater the ceiling height, the more likely that certain structures, usually the roof slab or its bracing structures will not be in the flame zone),
- ventilation conditions (the temperature exposure of the load-bearing structures can also be reduced with the heat and smoke extraction system, which in Hungary is obligatory in the case of rooms on the basement level, escape routes, and rooms with a floor area larger than 1200 square metres),
- last but not least, the built-in extinguisher and its effectiveness – the traditional sprinkler system typically



■ **8–9. ábra:** A díszletraktár 2 sz. tűzhelysín feletti tartó alsó (+11,05 m) és felső (+13,25 m) övében a termoelem által mért hőmérséklet időbeli alakulása. Az átlaghőmérséklet 550 °C, illetve 350 °C körül alakul, ezért ezen helyeken nem kerülhető el a kiegészítő, tűzállóságot növelő védelem alkalmazása az acélszerkezeteken

■ **Figure 8–9.** The development in time of the temperature measured by a thermocouple in the lower (+11.05 m) and upper (+13.25 m) register of the load-bearing structure above fire location no. 2 in the scene dock. The average temperature is around 550 °C and 350 °C, thus the additional fire protection of steel structures cannot be avoided in these places

localises the seat of fire, it does not allow the fire to spread in the building, while gas and water mist extinguishers are able to completely extinguish a fully developed fire.

Figures 8 and 9, respectively 10 and 11 show the temperature exposure and its development in time in the case of the steel ceiling beams of the storage room from Figure 6, with the seats of fire placed at the highest point of the storage system. The average temperature does not exceed 180°C anywhere. Much more favourable temperature conditions are achieved during the fire resistance performance of the structures, thanks to the built-in fire extinguishing system and the heat and smoke extraction system, which does not restrict the effective operation of the built-in extinguisher. These results can now be used as input data in the case of measurements for fire loads according to the Eurocodes (Figure 12).

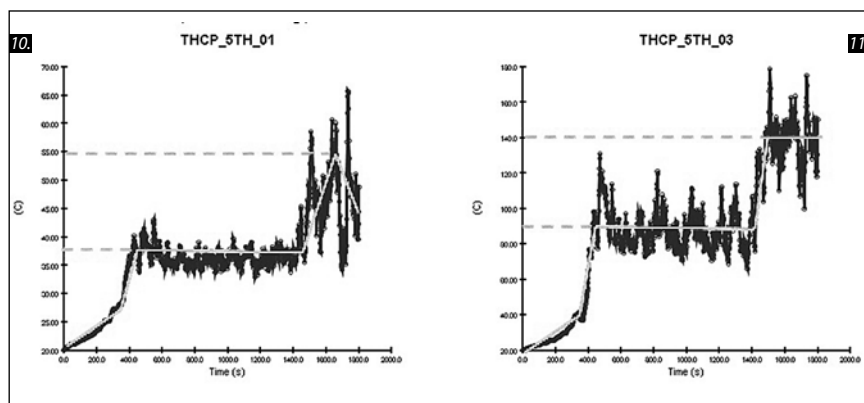
Under Hungarian regulations, the efficiency of the heat and smoke extraction should be examined in two periods:

Beépített oltóberendezéssel ellátott épületekben a fenti görbéknel sokkal kedvezőbb, alacsonyabb hőmérsékleti viszonyokat kaphatunk CFD-modellezés során, a beépített oltóberendezések hűtő hatásának következményeképp. Ezeket a tűzleflyásokat lokalizált tüzeknek hívjuk. A hőmérsékleti kitétet alapvetően a tűz során felszabadult energia határozza meg. Ha a beépített oltóberendezés bizonyos esetekben nem tudja eloltani a tüzet, meg tudja akadályozni annak szétterjedését, a flashover kialakulását.

A tartószerkezetekre jutó hőmérsékletkitétet és annak időbeni alakulása az alábbi körülményektől függ:

- a tartószerkezet épületen belüli szerepe, pozíciója (pillér, fal vagy tetőfödém),
- a tűz teljesítménye, annak időbeni alakulása (ez az adott helyiségben, tűzszakaszban előforduló éghető anyagok jellemzői mellett nagymértékben függ a beépített oltóberendezéstől és annak hatékonyságától is),
- a tűzhatással érintett helyiség belmagassága (minél nagyobb a belmagasság, annál valószínűbb hogy egyes szerkezetek, általában a tetőfödém vagy annak merevítő szerkezetei nem kerülnek lángzónába),
- szellőzési viszonyok (hő- és füstelvezetéssel is csökkenthető a tartószerkezetekre jutó hőmérsékletkitétet, amely Magyarországon többek között a pinceszinti helyiségekben, a menekülési útvonalakon és az 1200 m²-nél nagyobb alapterületű helyiségekben kötelező),
- végül, de nem utolsósorban a beépített oltóberendezés és annak hatékonysága – hagyományos sprinklerrendszer a tűzfészket jellemzően lokalizálja, nem engedi a tüzet szétterjedni az épületben, a gázzal és a vízköddel oltók ugyanakkor képesek egy kialakult tüzet teljesen eloltani.

A 8–9. és a 10–11. ábrákon a 6. ábrán látható raktárhelyiség acél födémgerendáira jutó hőmérsékletkitétet és annak időbeni alakulását láthatjuk, a tárolási rendszer legmagasabb pontján elhelyezett tűzfészkekkel. Az átlagos hőmérséklet sehol sem haladja meg a 180 °C-t. A szerkezetek tűzállósági teljesítménykövetelmény időtartama alatt jóval kedvezőbb hőmérsékleti viszonyok alakulnak ki, köszönhetően a beépített oltóberendezésnek és a beépített oltóberendezés hatékony működését nem korlátozó hő- és füstelvezetésnek. Ezen eredmények már felhasználhatók az Eurocode szabványsoportok szerinti tűzterherre történő méretezés bemenő adataiként (12. ábra).



■ **10–11. ábra:** Az 5 sz. tűzfészkek fölötti csóva tengelyében a termoelemek által mért hőmérséklet időbeli alakulása a 4. ábrán látható díszletraktár födém tartószerkezetének alsó, illetve felső síkjában. A lokális kitérések oka a tűzfészkek fölötti csóva turbulens viselkedése – a tartószerkezetekre jutó hőmérsékletkitétet meghatározása során kiátlagolható, ezt látjuk kiemelve. Az átlagos 55–40 °C, illetve 90 °C mellett biztosan kijelenthető a kiegészítő, tűzállóságot növelő védelem elhagyhatósága

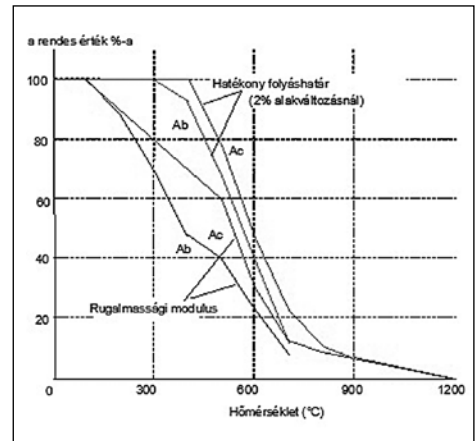
■ **Figure 10–11.** The development in time of the temperature measured by the thermocouples in the lower and upper register of the load-bearing structure of the slab in the scene dock shown in Figure 4, on the axis of the flame above fire source no. 5. The local deviations are caused by the turbulent behaviour of the flame above the seat of fire – it can be averaged when determining the temperature exposure of the load-bearing structures, this is highlighted. With the average 55–40 °C and 90 °C, it can safely be stated that the additional fire protection can be omitted

A hő- és füstelvezetés hatékonyságát a magyarországi szabályozás szerint két időszakban kell vizsgálni:

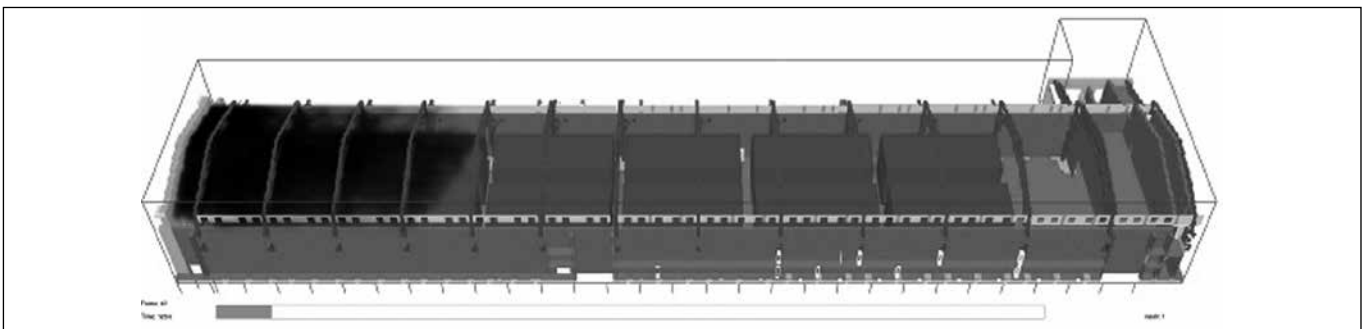
- a kiürítési szintidőn vagy tényleges kiürítési időn belül, amikor a kiürítési útvonalakon a látótávolság nem csökkenhet 25 m alá (ezen felül a hőmérsékletkitév és a menekülő személyeket érő sugárzás kitév is korlátozott),
- a beavatkozás meghatározott módon kiszámított időpillanatában a tűzfészek helyétől mérve 25 m-nél nagyobb távolságban a látótávolság 5 m-nél nem lehet kisebb abban az időpillanatban, amikor a kikerülő tűzoltóság elkezd a beavatkozást.

Összefoglalás

Az Eiffel-csarnok kedvezőtlen passzív tűzvédelmi adottságai (műemlékileg védendő szegecselte acélszerkezet) mellett a teljes körű tűzjelző rendszer, a beépített oltóberendezés és a betervezett hő- és füsttelleni védelem együtt-



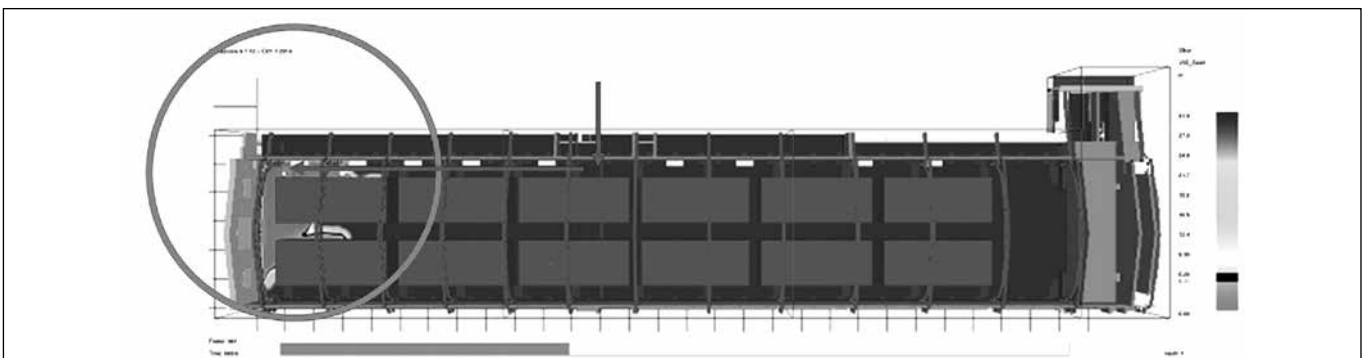
■ **12. ábra:** Acélszerkezetek hatékony folyáshatárának és rugalmassági modulusának csökkenése
 ■ **Figure 12.** Reduction of the effective yield strength and modulus of elasticity of steel structures



■ **13. ábra:** A dísztraktár tűzhelyszíne – a füst szétterjedése 120 s tűzjelzési + kiürítési szintidő végén
 ■ **Figure 13.** The location of the fire at the scene dock – the spread of smoke at the end of 120 s fire detection + evacuation time



■ **14. ábra:** A dísztraktár tűzhelyszíne – látható úthossz 2 m magas síkon, 120 s érzékelési idő + kiürítési szintidő végén. A fekete vonal a 15 m-nél kisebb látótávolság határát jelöli
 ■ **Figure 14.** The location of the fire at the scene dock – visible distance on a 2-metre high level, at the end of 120 s fire detection + evacuation time. The black line indicates the visibility limit below 15 metres



■ **15. ábra:** A dísztraktár tűzhelyszíne – látható úthossz 2 m magas síkon, 660 s beavatkozási időtartam pillanatában. A piros kör 25 m sugarat jelöl, a kép alján az osztások 5 m-t jelölnek. A piros nyilak a beavatkozás lehetséges irányait jelölik
 ■ **Figure 15.** The location of the fire at the scene dock – visible distance on a 2-metre high level at 660 s intervention time. The red circle indicates a radius of 25 metres, the divisions at the bottom of the figure show 5 metres. The red arrows indicate the possible directions of the intervention

- during evacuation or actual evacuation time, when visibility cannot drop below 25 metres on the evacuation routes (in addition, the temperature exposure and thermal radiation exposure of the people escaping are also limited),
- at a defined time of the intervention, measured from the location of the seat of fire at a distance of more than 25 metres, visibility shall not be less than 5 metres at the time when the fire fighters arriving at the scene begin the intervention.

Summary

■ In addition to the unfavourable passive fire safety features of the Eiffel Hall (with its riveted steel structure to be protected as part of the historic building), the complete fire alarm system, the built-in extinguisher, and the foreseen heat and smoke control system combined provide the most advanced level of protection. The aim of the numerical simulation was not only to increase the evacuation time in certain areas or to assist the design of the heat and smoke extraction and ventilation systems, but also to ensure proper cooperation between the various active fire safety equipments. The latter would not be ensured by compliance with the specific prescriptions alone; it can only be examined or optimised through engineering methods – in our case through numerical simulations on smoke and heat spread.

Another important goal was to determine the exact temperature exposure of the load-bearing structures, in order to avoid, where it is not necessary, any additional fire protection. The protection cannot be omitted on the pillars to a certain height, but it can be left out on the load-bearing structure of the roof slab, due to the fact that the roof slab will not be in the flame zone of a possible seat of fire.

The temperature exposure in case of fire and its development in time were particularly important in terms of whether flammable PIR or phenolic foam may be used as core material for sandwich insulation panels functioning as the roof slab's envelope, in order to be able to avoid the reinforcement of the non-weldable riveted steel load-bearing structure. Due to the built-in extinguishing and the heat and smoke exhaust systems, the low gas temperatures remained below the decomposition temperature of the PIR or phenolic foam in the examined areas, so it is not necessary to use stone wool, which would meet the prescriptive requirements, as core material for sandwich insulation panels, and thus the reinforcement of the historic structure can also be avoided.

tesen a legkorszerűbb védelmi szintet biztosítják. A numerikus szimuláció célja nemcsak egyes területeken a kiürítési szintidő növelése, vagy a hő- és füstelvezetés, valamint a légpótlás tervezésének segítése volt, hanem az egyes aktív tűzvédelmi berendezések megfelelő együttműködésének biztosítása is. Utóbbi ugyanis a tételes előírásoknak történő megfeleltetéssel önmagában nem lenne biztosítva, csak mérnöki módszerekkel – esetünkben numerikus füst- és hőterjedési szimulációkkal – vizsgálható, illetve optimalizálható.

Fontos cél volt ezen felül a tartószerkezetekre jutó hőmérsékletkitétel mi-nél pontosabb meghatározása is, annak érdekében, hogy ahol nem szükséges, ott ne készüljön kiegészítő, tűzállóságot növelő védelem. Bizonyos magasságig az oszlopokon a védelem nem hagyható el, a tetőfödém tartószerkezetén viszont nagy területeken elhagyható, köszönhetően annak, hogy a tetőfödém már nem kerül be egy esetleges tűzfészek lángzónájába.

A tűzeseti hőmérsékletkitétel és annak időbeni lefolyása különösen fontos volt abból a szempontból, hogy kerülhet-e éghető PIR- vagy fenolhab maghőszigetelésű szendvicspanel tetőfödém térelhatároló szerkezeteként alkalmazásra, annak érdekében, hogy a nem hegeszthető szegecselt acél tartószerkezet megerősítése elkerülhető legyen. Köszönhetően a beépített oltóberendezésnek és a hő- és füstelvezetésnek, az alacsony gáztéri hőmérsékletek a vizsgált területeken a PIR- vagy fenolhab bomlási hőmérséklete alatt maradtak, így nem szükséges a preszkriptív előírásoknak megfelelő kőzetgyapot maghőszigetelésű szendvicspanel alkalmazása, ennek révén elkerülhető a történeti szerkezet megerősítése is.

Bibliográfia/Bibliography

- *** Database.data file of NIST Fire Dynamics Simulator. 2006. U.S. Department Of Commerce.
- HESKESTAD, Gunnar. 1995. "Fire Plumes." *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Quincy, MA: National Fire Protection Association.
- HIETANIEMI, Jukka & Esko MIKKOLA. 2010. *Design Fires For Fire Safety Engineering*. VTT Working Papers 139. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland.
- MCGRATTAN, Kevin, Simo HOSTIKKA, Jason FLOYD, Howard BAUM & Ronald REHM. 2014a. *Fire Dynamics Simulator (Version 6) Technical Reference Guide*. Nist Technology Administration U.S. Department Of Commerce.
- MCGRATTAN, Kevin, Simo HOSTIKKA, Jason FLOYD, Howard BAUM & Ronald REHM. 2014b. *Fire Dynamics Simulator (Version 6) User Guide*. Nist Technology Administration U.S. Department Of Commerce.
- SZIKRA, Csaba. 2013. Mérnöki módszerek alkalmazása a hő- és füstelvezetésben. In *ÉPKO. XVII. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia*. Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság.
- SZIKRA, Csaba & Dr. TAKÁCS Lajos Gábor. 2014a. Cellamodellek alkalmazásának gyakorlati tapasztalatai a hő- és füstterjedés modellezésében. In *ÉPKO. XVIII. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia*. Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság.
- SZIKRA Csaba & Dr. TAKÁCS Lajos Gábor. 2014b. Approach to Define the Aerodynamic Free Area for Natural Smoke Vents in a CFD Simulation Environment. In *Proceedings. Fire and Evacuation Modeling Technical Conference (FEMTC)*. http://www.thunderheadeng.com/2014/10/femtc2014_d2-c-4_takacs/.
- SZIKRA Csaba & TAKÁCS Lajos Gábor. 2016. Tartószerkezetekre jutó tűzeseti hőmérséklet kitétel meghatározása CFD szimulációs környezetben, beépített oltóberendezéssel védett épületben. In *ÉPKO. XX. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia*. Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság.