

Óbudai Egyetem
Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai
Mérnöki Kar



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT
A MATEMATIKAI TŰZMODELLEK
VIZSGÁLATA

Szerző: Földi Gábor

biztonságtechnikai mérnök MSC. szak

Konzulens: Dr. Kovács Tibor

egyetemi docens

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés.....	3
2. A matematikai tűzmodellek elemzése.....	5
2.1. A tűz folyamata	5
2.2. Csoportosítás	6
3. A tűzmodellek összehasonlítása.....	10
3.1. Laboratóriumi vizsgálatok.....	10
3.2. Tűztér jellemzése.....	12
3.3. Tűz teljesítmény	14
3.4. Tűzhatás modellezése hőmérséklet-idő görbékkel.....	15
3.5. Számítások a füst hatásaira.....	19
4. Alkalmazhatóság	23
4.1. A hőkibocsátási tényező	23
4.2. A hőkibocsátási arány meghatározására a gyakorlatban:	25
4.3. Hőveszteség	27
4.4. Számítógépes CFD modellek	28
4.5. A Navier-Stokes egyenlet.....	29
4.6. FDS tűzmodellező program.....	30
4.7. Vizsgálati feladat egy irodatűzre	32
5. Összefoglalás.....	37
6. Irodalomjegyzék.....	39

1. Bevezetés

Van már lehetőség arra vonatkozóan, hogy egy épületen akár a tervezési szakaszában meg lehessen becsülni, mennyire lesz biztonságos a tűzvédelem szempontjából. Egy objektív értékelési rendszer kialakításával pontosabb és megbízhatóbb becslési módszerek adhatók már a tervezési fázisban, de jól használható akár meglévő épületek esetében is. A matematikai modellek szoftverek segítségével mutatják meg az égési folyamat lefolyását, valamint a tűz viselkedését, terjedését, veszélyeit. A vizsgálat során figyelembe veszik a tűz és füst terjedését, az épületek szerkezetének állékonyságát, a hőmérsékleti tényezőket. A számításokban változókként jelennek meg a tűzvédelmi berendezések is, mint a hő- és füstelvezető rendszerek, illetve a tűzvédelmi rendszerek is.

Ahhoz, hogy a biztonság mértékét meg lehessen határozni, szükséges a folyamat alátámasztása egy modell segítségével, amely átfogó képet ad a döntési lehetőségekről már a tervezési szakaszban. A logikai fák és a matematikai tűzmodellek alkalmazásával elméletileg is alátámasztható elemzést lehet készíteni. A jelen kornak a tűzvédelemre is hatása van. Napjainkban egyre inkább előtérbe kerül az a szemlélet, miszerint a lehető legnagyobb biztonságot a leggazdaságosabb kivitelezés mellett biztosítsuk, illetve optimális kompromisszumot találjunk e látszólag két ellentétes tényező között. A számítógépes tűzmodellek, áramlástani modellek szemléltetése hasznosak a tüzet irányító fizikai és kémiai folyamat szemléltetésére, amelyek segítségével költségkímélő megoldásokat lehet találni a tervezés folyamán, valamint biztonságosabbá tehetők a már meglévő épületek.

A tűzmodellek azonban jól használhatóak már megtörtént tüzesetek vizsgálatában is. A fizikai tűzmodellezést a legtöbb esetben csak laboratóriumi körülmények között lehetne megvalósítani, amelyek hatalmas hely- és költségigényűek lennének. Mivel a tűz lefolyása összetett folyamat, ezért ha bármilyen aprónak tűnő, de fontos tényezőt figyelmen kívül hagynak, nem lesz pontos a végeredmény, 1-1 új tényező megváltoztatásával az egész kísérletet előlről kellene kezdeni. A matematikai módszerekkel könnyen lehet változtatni egy tényezőt, hogy megvizsgáljuk a különböző végeredményeket.

Dolgozatomban szeretném megvizsgálni, hogy a matematikai tűzmodellek hogyan használhatóak a gyakorlatban és példákkal igazolni létjogosultságát.

A dolgozat elkészítésekor az alábbi célokat tűztem ki:

- megvizsgálni a matematikai tűzmodelleket, a különböző típusok elveit, működésüket;
- összehasonlítani a rendszer hatékonyságát az egyes modellek esetében;
- megvizsgálni, milyen gyakorlati alkalmazási lehetőségei vannak a matematikai tűzmodelleknek;
- példán keresztül szemléltetni, hogyan lehet használni és pontos, megbízható, felhasználható eredményekhez jutni.

Ennek megfelelően:

- ismertetem a matematikai tűzmodelleket, az azokat felépítő elemek részletes leírásával, valamint milyen speciális megoldásokat alkalmaznak;
- elemzést készítenek, hogy milyen előnyökkel és hátrányokkal;
- egy esetet megvizsgálva szemléltetem a gyakorlati alkalmazási lehetőségeket.

Az irodalom feldolgozását 2014. április 14-én zártam, az internetes források 2014. április 14-én elérhetőek voltak.

2. A matematikai tűzmodellek elemzése

A tűzmodellek többféle módszerekkel vizsgálják azt, hogy a tűz milyen hatást gyakorol épületszerkezetre, valamint az ott tartózkodó emberekre és az ott tárolt anyagi javakra. Dolgozatomban a tűzmodelleket mindenesetben zártterű tüzek tekintetében vizsgálom. A tűzmodelleket két nagy csoportba lehet besorolni, amelyeket további alcsoportokra lehet bontani. Az egyik a fizikai modellek, amelyek a tűz fizikai leképezései valódi vagy arányosan kicsinyített méretben, illetve laboratóriumi körülmények között végrehajtva. A valós méretek reprodukálásával a tűz viselkedése pontosabban megfigyelhető, felhasználhatóak a fizikai és a kémiai paraméterek mérésére. A törvényszerűségeket felhasználva egyenleteket állíthatunk fel, valamint következtetést vonhatunk le, hogy a matematikai tűzmodellek eredményei mennyire felelnek meg a valóságnak. A kapott egyenletek segítségével megbecsülhető, hogyan fog viselkedni a tűz a fizikai rendszerben. Felhasználásával a fizikai rendszer viselkedését előre meg lehet becsülni. Ezt írjuk le az idő és a tér függvényében matematikai eszközökkel.

2.1. A tűz folyamata¹

A tűz olyan kémiai folyamat, amely során hő, láng, füst, korom, és különféle égéstermékek keletkeznek. Az égés során az anyagok elemekre bomlanak, eközben új molekulák jönnek létre az atomok kombinációja során. Az égéshez 3 feltételre van szükség, az oxigénre, éghető anyagra és gyújtóforrásra. Az éghető anyag egyesül az oxigénnel, az égési folyamat anyagi és energiaállapota nagymértékben megváltozik. Az oxigén elsődleges forrása a légkör, ahol általában 21 %-ban van jelen, de a folyamat fennmaradásához elegendő a 14-16 % oxigénkoncentráció is. A folyamat kezdetén az anyag lassan felmelegszik, de a füst terjedését segítő hőmennyiség még nem szabadul fel. Ez a következő szakaszban kezdődik el, a füstképződés intenzívvé válik. A harmadik szakaszban az égés kiterjedté válik, mivel elegendő mennyiségű anyag éri el a gyulladási hőmérsékletet. A végső szakasz a hőfelszabadulás is intenzívvé válik, az égés folyamat is felgyorsul, mivel elegendő konvektív és sugárzó hő szabadul fel. Ha az intenzitás eléri egy szintet, a tűz fészektől távolabb eső tárgyak is meggyulladnak, ezt a folyamatot láncreakciónak nevezik.

¹[1]Dr. Simon Ákos – Török László Ervin: Alkalmazott kémia ZMNE/BMF Főiskolai jegyzet Budapest 2007

A tűz kialakulásakor az éghető anyag légnemű, folyékony, vagy szilárd halmazállapotban lehet jelen, de a hőmérséklet emelkedésével az anyagok halmazállapota megváltozhat, a folyadékok elpárologhatnak, a szilárd anyagok megolvadhatnak, kémiai bomlásnak indulhatnak. Zárt térben egyéb tényezőket is figyelembe kell venni a tűz terjedési sebességének meghatározásához, mivel befolyásolják a helyiség méretei (alapterület, belmagasság), a szellőzés intenzitása, az éghető anyag mennyisége, fajtája, elhelyezkedése, és a felület-tömeg aránya. A terjedési iránya magasabb hőmérsékletű ponttól az alacsonyabb hőmérsékletű közeg felé terjed.

A hőterjedés három módja:

Hővezetés: a hőterjedés olyan formája, amely a szilárd, a nyugalomban lévő folyékony vagy a légnemű halmazállapotú anyagokban az eltérő hőmérsékletű részecskék közötti belső energia átadása.

Hőáramlás: A hő terjedése felmelegedett folyadék, vagy forró gázok által. A hőáramlás vagy konvektív hőátadás a hőátadás olyan formája, amely során a hő közlése az azt hordozó anyag helyének a megváltozásából következik.

Hősugárzás: A hő elektromágneses hullámok formájában terjed a testek között, minden további szállító közeg nélkül.

2.2. Csoportosítás

Ahhoz, hogy a tűzmodelleket rendszerezni tudjuk, két nagy csoportra, valamint további alcsoportokra bonthatóak: ²

- Fizikai modellek:
 - valódi méretű teljes mértékben reprodukálják a tűz lefolyásának helyét, a méretek megfelelnek a valóságnak, továbbá felszerelik tűzjelző érzékelőkkel, mérőműszerekkel. Hátránya azonban, hogy a felállítási költsége magas;
 - kicsinyített méretű: a tűzhelyszínét arányosan mértékben lecsökkentik, de a hátránya, hogy nem lehet az összes tűzparamétert a megfelelő mértékben lekicsinyíteni;
 - laboratóriumi vizsgálatok: alapadatokat szolgáltat a matematikai modellek számára, mint például: gyulladási hőmérséklet, füstfejlődési sebesség, füstösszetétel.

²[3] Dr. Beda László: Tűzmodellezés, tűzkockázat-elemzés SZIE-YMMFK Budapest 1999

- Matematikai modellek:
 - Determinisztikus modellek: A folyamatok leírásához felhasználja az égés- és tűzfejlődés fizikai, kémiai, fizikai-kémiai törvényszerűségeit, továbbá az egyéb természeti törvényeket.
 - Zóna modellek: a használata arra a feltételezésre alapul, hogy a zárt térben a tűzfejlődés során két, egymástól jól elkülöníthető zóna alakul ki, egy meleg felső zóna és egy hidegebb alsó zóna.
 - Cellamodellek: elsősorban a füst terjedésének vizsgálatára szolgál, szimulációk futtatásával elemzi a fluidok áramlását, a vizsgált tér lehet tetszőleges méretű, alakú és akár több helyiség vizsgálatára is alkalmas, mivel a teret több ezer, kocka alakú cellára bontja fel;
 - Sztochasztikus modellek: valószínűség-számítás törvényszerűségeit és a statisztika eredményeinek segítségével, a származtatott adatok ismeretében mutatja be a tűzterjedést a helyiségekben és azok között.

A tűz értelmezhető sztochasztikus folyamatként is, amelynek modellezésében a valószínűségeket kell számolni és statisztikák eredményeit felhasználni, majd figyelembe venni azokat a bizonytalanságokat, amelyeket a tűzterjedésben tapasztalunk. A továbbfejlődés irányára nézve minden időpillanatban több lehetőség kínálkozik, azaz a tűzfejlődésben szerepe van a véletlennek. Ugyan világszerte rengeteg tüzesetet regisztrálnak, de megbízható statisztikai adatbázis nem áll rendelkezésre, amely hátránya a modell alkalmazásának. Szükséges meghatározni egy tűz kialakulásának valószínűségét, valamint a veszélyessé válásának bekövetkezési lehetőségét is.

Közelítéssel megállapítható egy valószínűségi érték egy épület tűzbiztonságára. A cél ebben az esetben, hogy elérjünk egy elfogadható értéket, amely meghatározza a biztonsági szintet. Ez az érték meghatározható a létező kockázatokkal való összehasonlításával, beleértve az épületszerkezeti összeomlását normális feltételek mellett. A cél érték, amelynek elérésére törekedni kell, $7,23 \cdot 10^{-5}$ az épület élettartamára vonatkoztatva és arra utal, hogy összeomlik egy szerkezet normális körülmények között. A tönkremenetel valószínűségének kisebbnek vagy egyenlőnek kell lennie az elérendő cél valószínűségének értékével.³

A determinisztikus modellezés során a törvények és a törvényszerűségek alapján már lehet következtetést levonni, hogy ha egy fizikai helyzet jól meghatározott és pontosan leírható,

³ [8] CEN; prEN1990, Eurocode – Basis of structural design, 2001

akkor a tűzfejlődés és a tűz viselkedése már a körülmények által meghatározott. Ezt a típust a zárt terekre használják, két altípusa a zóna- és cella modellek. Mindkét típusnál differenciálegyenlet rendszerekkel lehet leírni a folyamatot, de eltérő megközelítésben.

Az zóna típus alkalmazása arra a feltételezésre alapul, hogy a zárt térben a tűzfejlődés során alapvetően kialakul két zóna, egy meleg felső zóna és egy hidegebb alsó zóna. Felhasználásához továbbá feltételezni kell a hőmérséklet és a koncentrációk homogén eloszlását, valamint egyéb számos feltételt is ki kell kötni, amelyek korlátozzák a használhatóságukat. A zárt tér légterének hőmérséklete és nyomása a meggyulladás pillanatában a megegyezik a környezetével. Ha egy ott tárolt tárgy meggyullad, a tűz növekedésnek indul, a folyamat pedig addig tart, amíg elégséges az oxigénellátás és van éghető anyag. A folyamat a kialakulása után gyorsan terjed az égés, lángok keletkeznek, közben hő szabadul fel és füst termelődik. A füst toxikus és nem toxikus gázok keveréke.

A felszabaduló hő egy része visszakerül az égő anyag felületére, ezáltal az anyagból további gázok szabadulnak, a másik része pedig a füsttel felfelé áramlik. A felfelé áramló füst levegőt szív, ami az égéshez szükséges mennyiséghez képest többletben van, ezért megnöveli a felfelé irányuló tömegáramlást. „Az el nem égett gázok, a gáz halmazállapotú égéstermékek, valamint a beszívott levegő alkotják a plume-ot.”⁴A plume magyar megfelelője a füstcsóva, amiben energia és tömeg van jelen. Ezek a mennyiségek felfelé áramlanak és két tényező szabályozza, a beáramlott levegő mennyisége és maga az égés. Ha egy vízszintes felülettel találkozik, a felfelé tartó áramlás megszűnik és az iránya vízszintesre változik. A felület alatt a gázok összegyűlnek és az általuk szállított energia hőként jelenik meg, amely létrehozza a meleg réteget.

A cella modellek alkalmazásánál nem kell kikötéseket, feltételezéseket tenni. A vizsgált zárt terek alakja is tetszőleges, mivel azt több ezer, kocka alakú cellára osszák fel. Az eljárás alapelve az, hogy számítástechnikai eszközöket használnak fluidumok (folyadékok és gázok) áramlásának elemzésére (Computation Fluid Dynamics, a továbbiakban: CFD), a modell elsősorban füstterjedési problémák megoldására közkedvelt. Feltételezések alkalmazása helyet kiszámítják a füst mozgását. A modellezés során egy parciális differenciálegyenlet rendszert kell megoldani, adott peremfeltételekkel. A vizsgált teret több ezer cellára osztják fel, majd a cellák mindegyikére megoldják a felírt tömeg-, energia- és impulzusmérlegeket,

⁴[2] Dr. Beda László tű. ezredes: Épületek tűzbiztonságának műszaki értékelése Phd értekezés 2004

amely a következő⁵:

$$\frac{dX_i}{dt} = I_{konv} + I_{diff} + F_i$$

2.1. képlet: Egy cellára felírt differenciálegyenlet

ahol:

- dX_i : a cellában levő tetszőleges (X_i) extenzív mennyiség az idő függvényében;
- I_{konv} : a határfelületen bekövetkezett változás konvekcióval;
- I_{diff} : a határfelületen bekövetkezett változás diffúzióval;
- F_i : a határfelületen bekövetkezett keletkezés.

Parciális differenciálegyenleteket kell alkalmazni a tömeg és energia áramokra, amelyek megoldása numerikusan történik. Az egyenlet megoldásaként megkapható a hőmérsékletek és a füstkoncentráció változása az idő függvényében a vizsgált tér egy tetszőleges pontjában.

⁵ [2] Dr. Beda László tű. ezredes: Épületek tűzbiztonságának műszaki értékelése Phd értekezés 2004

3. A tűzmodellek összehasonlítása

Ebben a fejezetben összehasonlításra kerülnek, hogy az egyes modellek esetében milyen tényezőket és változókat használnak fel. Az egyes módszerek segítségével jobban megismerhető, hogy a tűz és a vele kapcsolatba kerülő anyagok viselkedése, az sok tényezőtől függ. A vizsgálatok ezért csak az ugyanolyan körülmények mellett elvégzett tesztek esetén szolgáltatnak hasznos információval az egyes anyagok tűzzel szembeni viselkedésének összehasonlítására, amitől a valós helyzetben az anyagok viselkedése nagyban eltérő lehet.

3.1. Laboratóriumi vizsgálatok

Elfogadott gyakorlatnak számít, hogy szimulációt futattunk a zárt téri tüzek elemzésére, melyet végezhetünk a hő- és füstelvezető berendezések hatékonyságának tesztelésére vagy utólagos tűzvizsgálatra. A fizikai tűzmodelleknél meg kell építeni a tűz helyszínét, amely lehet az eredetivel megegyező vagy annak arányosan csökkentett mása. A helyszín felépítése után fel kell szerelni a megfelelő mérőműszerekkel, továbbá be kell rendezni abban az elrendezésben és méretben, valamint azokból az anyagokból, ahogyan az eredetileg is volt, figyelembe véve a vizsgálati szempontokat is. Az 1:1 léptékű eljárással szereshető legtöbb információ, amit azonnal fel lehet használni, ugyanakkor a módszer meglehetősen magas költségigényű. A modellezés elvégezhető, ha arányosan lecsökkentik a tűzhelyszín eredeti méretét léptékhelyesen. A hasonlósági kritériumokat meg kell tartani az áramlástani, a termikus és a kémiai tulajdonságokra is. A kicsinyítés korlátokat is rejt magában a komplex tűzhelyszínek vizsgálatkor, mivel nem lehet minden vizsgált tűzparamétert a kívánt mértékre csökkenteni.

A modell elkészítésében nagy segítséget nyújtanak ezek a laboratóriumi vizsgálatok, továbbá fontos alapadatokat is szolgáltatnak, úgy, mint a gyulladási idő, hőfelszabadulási sebesség, füstfejlődési sebesség, füstösszetétel, toxicitás, amelyeket fel lehet használni a matematikai modellek számára. A vizsgálják az anyagok tűzállóságát és éghetőségét. Az előbbit a tűzzel szembeni ellenálló képesség megállapítására. Az épületszerkezetek esetében fontos, hogy tudják, a tűz terjedését milyen mértékben képes megakadályozni a zárt téren túlra és a teherhordó képességét meddig tartja meg. Az anyagok éghetősége esetén a tűzzel szembeni viselkedésüket vizsgálják. Ezek alapján meg lehet állapítani, hogy reagál az anyag az égésre és a hőre, valamint eközben milyen anyagok szabadulnak fel és milyen a füstképződés, továbbá ezek sebességét is meg lehet mondani.

A fenti vizsgálatok alapján megállapíthatóak az épület szerkezetekre a tulajdonságaik, amelyek az Országos Tűzvédelmi Szabályzatban is megtalálhatóak. Az R kritériumot az épületszerkezetek esetében alkalmazzák, míg az E,I kritériumot a vázkitöltő elemek esetében.

„R: Teherhordó képesség: a szerkezeti elemnek az a jellemzője, mely megmutatja, hogy az adott elem egy- vagy több oldali tűzhatással egyidejűleg fennálló mechanikai igénybevételnek az előírt időtartamig a szerkezet teherbírásának elvesztése nélkül ellenáll.

- E: Integritás: az épület egy szerkezeti elemének azon képessége, hogy elválasztó funkcióját betöltve az egyik oldalon tűznek kitéve ellenáll az előírt időtartamig a lángok és az égéstermékek másik oldalra való áttérjedése nélkül.

- I: Szigetelés: az épület egy szerkezeti elemének azon tulajdonsága, hogy az egyik oldalon tűznek kitéve ellenáll a tűzhatásnak anélkül, hogy jelentős hőátadás következne be a „mentett oldal” irányában, pontosabban az átlaghőmérséklet nem haladhatja meg a 140 °C-ot, valamint a maximum hőmérséklet nem emelkedhet 180 °C fölé.”⁶

Több tényező is közrejátszik a folyamatokban, amelyek a következők: meggyújthatóság gyulladási hőmérséklet, gyulladási idő, lángterjedés, hőfejlődés az égéstermékek (mérgező, láthatóságot csökkentő, korrozív stb.) felszabadulása⁷.

A területen jelenleg a következő eljárásokat alkalmazzák, amelyek megfelelnek a nemzetközi szabványoknak. Ezek a Cone-kaloriméteres vizsgálatok: a bútor kaloriméteres vizsgálatok és a szobasarak tesztek. A kapott eredmények megadhatóak matematikai egyenletek változóinak.

A változók a következők lehetnek:

- a vizsgált anyag tömeg [kg];
- a keletkezett korom tömege [g];
- az átadott hőfluxus [kW/m²];
- a meggyulladás idő [s];
- a folyamat lángolási időtartama [s];
- nyomáskülönbség;
- gázok koncentrációja: O₂, CO, CO₂ [%];

⁶ [6] 28/2011. (IX. 6.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról

⁷ [18] ISO 5660-1:2002 Fire Tests – Cone Calorimeter method

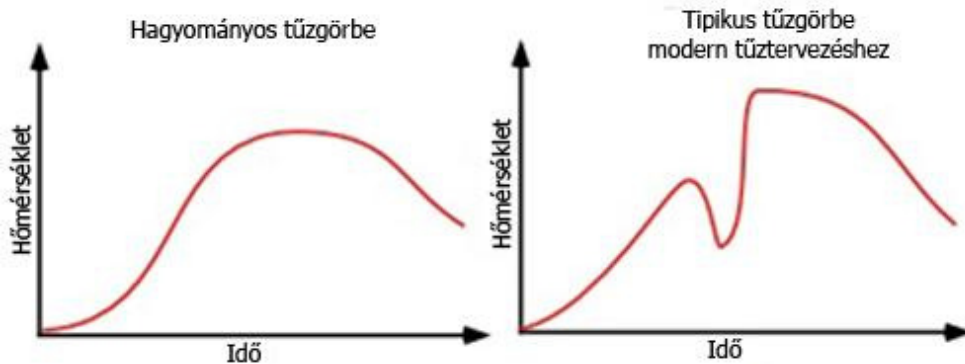
- gázok hőmérséklete [K] és nyomása [Pa] a kivezető nyílásnál.

A számítás elvégzését és az abból kapott pontos eredmények számítógépes tűzmodellezési szoftverek segítségével megkapható. Az eredmények alapján meghatározható a meneküléshez rendelkezésre álló időkeret, mielőtt a kiürítést teljesen megakadályozó tényezők (füstsűrűség, hősugárzás, toxikus anyagok jelenléte, oxigén koncentráció megléte stb.) kialakulnak. A modellezés során vizsgálni kell a hőmérséklet és a füst sűrűség alakulását az idő függvényében.

Egy ilyen program az FDS, amely egy CFD (Computational Fluid Dynamics) elvű tűzmodell. A program a változókat tartalmazó file alapján végzi el a számításokat, hasonlóan egy programozási nyelvben megírt programhoz. A számításokat elvégezve az eredményei alapján a Smokeview létrehoz egy három dimenziós ábrásort, mely az előre meghatározott időlépcsőnek megfelelően kép kockákon szemlélteti a különböző megjeleníteni kívánt eseményeket, értékeket. A tér több cellára van felosztva és a számítások során a cellák fizikai jellemzőit egymástól függetlenül számolja a geometriai középpontra nézve. A cellák közötti falon keresztüli áramlást is számolja, ahol figyelembe veszi a belsejében levő forrást vagy nyelőt is. A számításokat akár több tízezerszer megismétli, hogy megkapja a végeredményt. Modellezi az anyagok égésének folyamatát, valamint a füst és áramlások vizsgálatának lehetőségét is biztosítja, továbbá a tűzterjedést is elemezni lehet. A vizsgálat nem kötődik egy előre meghatározott hőfelszabadulási görbéhez, így a felszabaduló hőenergia a terjedés függvénye lesz. Ezen felül lehetőség van a tűzjelző- és sprinkler rendszerek szimulációjára is a zárt téri tűzmodellekkel, melyekre építve a tűz hő teljesítményének és füstfejlesztő képességének időbeli lefolyása is számítható.

3.2. Tűztér jellemzése

A tűztér jellemzésére használhatunk egy- vagy kétzónás modellt. Az egyzónást típust alkalmazzuk, ha hőmérséklet változását ábrázoljuk az idő függvényében. Felfogható egy indikátorként, amelyet számos tűztéri paramétert befolyásol.



3.1. ábra Tűzgörbe ábrázolása a hőmérséklet és az idő függvényében⁸

A tényezők a következők:

- tüzteljesítmény;
- helyiségtérfogat;
- épületszerkezet;
- levegőcsere.

A levegőcserének több tényezőre is hatása van, mivel a tüztéren kívülről érkező környezeti levegőtűztérben lévő gázokkal összekeveredik és azokat hűti, de az oxigénellátással hatással van az égés teljesítményére is. Minél kevesebb az oxigén, annál kisebb a teljesítmény is, így csökken a tér hőmérséklete is. Hő- és füstelvezetési rendszerek méretezésére mindkét zóna modell használható, de a lokalizált fűstrétegre inkább a kétzónás a megfelelőbb. Közös jellemzőjük, hogy a zónán belül a hőmérsékletet és a gázkeverék sűrűségét állandónak tekintjük. Az egy zónás modellek felhasználási köre elsősorban a tér hőmérsékletének modellezésére alkalmas.

Az egyzónás modell feltevései azokban az esetekben használható, amikor a tűz hőeloszlása egyenletes. A hőnövekedési sebességet tekintjük a tűzfejlődés fő paraméterének, vagyis az anyagnak azt a tulajdonságát, hogy milyen sebességgel ég el. Ezt a paramétert hőkibocsátási aránynak, RHR-nek (rate of heat release) jelöljük. Ez az arány jelentősen meghatározza a gázhőmérséklet alakulását. Az arány mértéke attól függ, hogy az égő anyag mennyi idő alatt ad le egy bizonyos energia mennyiséget.

⁸ [5] Dr. Takács Lajos Gábor, Szikra Csaba: Zóna- és cellamodellek alkalmazásának gyakorlati tapasztalatai hő - és füstterjedés modellezésében TSZVSZ Konferencia 2013. december 5.

3.3. Tűz teljesítmény

A következő rendkívül fontos bemeneti paraméter a tűz teljesítmény időbeli változása. A teljesítmény szempontjából négy szakaszra bontható, a korai parázsló szakasz, a fejlődő-, a stabil- és a hanyatló égés szakasza. Ezekből a számításoknál és ábrázolásoknál az első tényezőt elhanyagolják, a másik három azonban jól közelíthető függvényekkel és modellezhetőek is.

A hőnövekedést a kibocsájtás határozza meg, ami függ a helyiség méretétől és aktivitásától. valamint az időtől. A belobbanási szakasz előtt tűz egy lokalizált tűz, aminek jellemzése a tűz növekedése által történik, melyet mennyiségileg határoztak meg, mint a t^2 tűz feltételét. Tehát a hőfelszabadulás arányát egy parabolikus egyenlet alapján állítják fel.

A fejlődő szakasz esetében a következő függvény alkalmazható⁹:

$$\dot{Q} = \alpha t^2$$

3.1. képlet: a fejlődő szakasz egyenlete

ahol:

- α : fejlődő szakaszra jellemző paraméter;
- t : az idő.

Az α értékét meghatározzák egy adott éghető anyagra, objektum esetén pedig mérésel állapítják meg. Azonban a gyakorlatban egy helyiségben többféle anyag is megtalálható, ezért nem vagy csak nehezen határozható meg egy érték. Ehelyett kategóriákat állítanak fel, hogy jellemezzék az anyagokat az égés korai szakaszában. Az egyes kategóriák a következők: nagyon gyors ($\alpha=0,190$), gyors ($\alpha=0,047$), közepes ($\alpha=0,012$), lassú ($\alpha=0,03$). A besorolást a tűz helyének használati módja alapján végzik.

A következő szakasz stabil égés, amelyet az éghető anyagok tömegveszteségével modellezhetjük. A teljesítmény ebben a szakaszban közel állandó, illetve a stabil égés szakaszának ideje. A tömegveszteség sebességéből, a teljes égéshez tartozó hőfelszabadulás mértékéből és az égés hatékonyságából a felszabaduló teljesítmény és az égési idő is egyszerűen számítható. Mivel a hanyatló szakasz általában már nem képezi a mérnöki

vizsgálatok tárgyát, ezért a legegyszerűbb modell, ha a stabil égés maximális teljesítményével számolnak tovább ebben a tartományban is.

3.4. Tűzhatás modellezése hőmérséklet-idő görbékkel

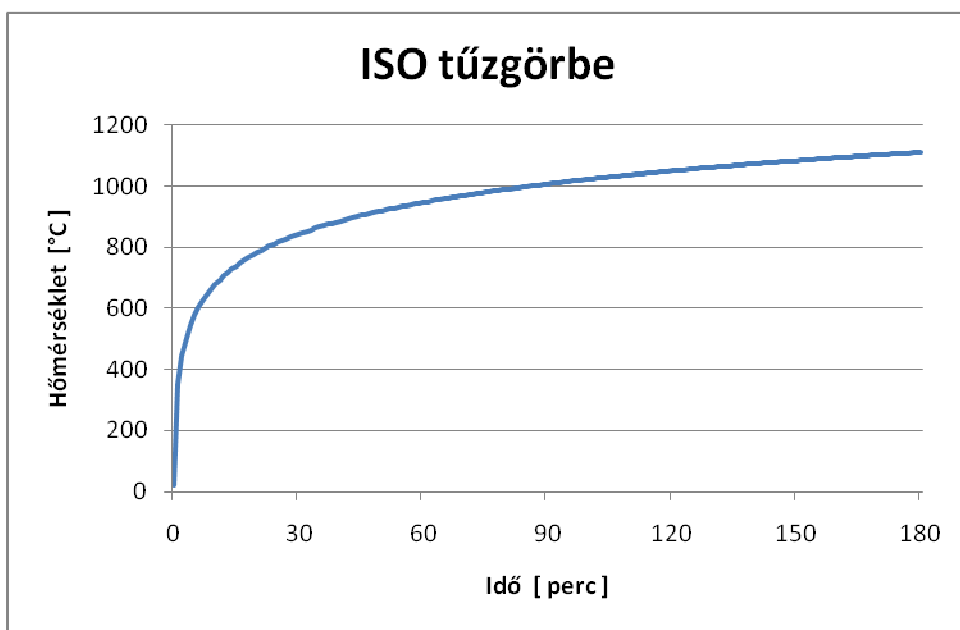
A tűzhatást az EN 1991-1-2 és az ISO 834 alapján lehet ábrázolni egyszabványos hőmérséklet-időgörbén a szabványban meghatározott képlet alapján, amely megadja a hőmérsékletváltozás és az idő kapcsolatát. A képlet a következő¹⁰:

$$T = 20 + 345 \log(8t + 1)$$

3.2. képlet: A tűzgörbe egyenlete

ahol:

- T a légtér hőmérséklete [°C];
- t az idő [min].



3.2. ábra: ISO tűzgörbe¹¹

Az egyenletet ábrázolva a fenti szigorúan monoton görbe rajzolódik ki. A szabvány képlete figyelmen kívül hagyja a belobbanás előtti és a lehülési szakaszt. Egy időértékhez tartozó hőmérséklet a zárt tér egészére vonatkozik, nem függ a szellőzöttségtől és a mérettől.

¹⁰ [9] ISO 834:2002 Fire resistance test

¹¹ [9] Saját ábra ISO 834:2002 - Fire-resistance tests alapján

Az egyenlet felírható a helyiségben lévő gázhőmérsékletre is:¹²

$$\theta_g = 20 + 1325(1 - 0,324e^{-0,2t} - 0,204e^{-1,7t} - 0,472e^{-19t})$$

3.3. képlet: Gázhőmérséklet egyenlete

ahol:

- θ_g : a gáz hőmérséklete a zárt térben [C];
- t idő [óra].

A hagyományos tűzkísérletek során használják a szabványos hőmérséklet-idő görbét, ami alapján elvégzik a különféle épületszerkezeti elemek minősítését. A tűzhatások viselkedésének pontosabban felrajzolásához a természetes tűzgörbét alkalmazzák, de használatuk sokkal bonyolultabb. Az alkalmazásukhoz több tényezőt is figyelembe kell venni:

- rendeltetése;
- nyílások méretei;
- határoló szerkezetek anyaga és vastagsága;
- aktív tűzvédelmi berendezések hatása.

A természetes tűzmodellek ábrázolása meghatározott matematikai és fizikai paraméterek alapján történik, de alkalmazhatósága korlátozott. Két típusa van a lokalizált- és a teljesen kifejtett tűz modell, előbbit a belobbanási előtti, utóbbit az ezt követő szakaszban lehet használni. A meghatározandó paraméterek közé tartozik a zárt térre, tűzszakaszra a tűzterhelést. A tűzterhelés az energia mennyiség, amely felszabadulhat tűz esetén. Az energia teljes mértékben felhasználódik a zárt tér hevítésére és nagy rész a nyílásokon át más terekbe is átjuthat. A szerkezeti elemek, mint a fal és a mennyezet, és a tér tartalma, mint a bútorok, képezhetik a tűz terhelését. A tűzszakasz: „az építmény, illetve szabadter tűzvédelmi szempontból meghatározott önálló egysége, amelyeket a szomszédos egységektől meghatározott éghetőségű és tűzállósági határértékű tűzgátló szerkezetek, illetve a jogszabályban nemzeti szabványban előírt tűztávolságok választanak el.¹³” Erre a részre, rendeltetési egységre a következő képlet alapján lehet kiszámolni a tűzterhelést az OTSZ

¹² [10] EN 1991-1-2 Eurocode 1 actions on structures - part 1-2 general actions - actions on structures exposed to fire

¹³ [6] 28/2011. (IX. 6.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról

alapján¹⁴:

$$p_v = p a$$

3.3. képlet: Tűzterhelés számítása

ahol:

- p a tűzterhelés;
- a : az anyagok égési sebességére jellemző adat, ami az anyag sűrűségétől és raktározási tömegétől függ.

Ezt követően a p tűzterhelést a következő képlettel lehet kiszámolni¹⁵:

$$p = p_n + p_s$$

3.4. képlet: Tűzterhelések összegzése

ahol:

- p_n az ideiglenes tűzterhelés;
- p_s : az állandó tűzterhelés.

„Az ideiglenes tűzterhelést a gyártási folyamatban előforduló éghető anyagok, valamint az éghető technológiai és egészségügyi-műszaki berendezések, szigetelések, raktári anyagkészletek, bútorok alapján kell meghatározni. Az állandó tűzterhelést az épületszerkezetek éghető anyagai alapján kell meghatározni.” A két változót a következő képlettel lehet meghatározni¹⁶:

$$a_n = \frac{\sum_{i=1}^j M_i H_i a_{mi8}}{\sum_{i=1}^j M_i H_i} \quad a_s = \frac{\sum_{i=1}^k M_i H_i a_{mi}}{\sum_{i=1}^k M_i H_i}$$

3.5. képlet: Tűzterhelések számítása

ahol:

- M_i – az épület adott zárt terében, tűzszakaszában jelenlévő és beépített anyagok mennyisége [kg];
- H_i – az épület adott zárt terében, tűzszakaszában jelenlévő és beépített anyagok fűtőértéke [MJ/kg].

¹⁴ [6] 28/2011. (IX. 6.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról

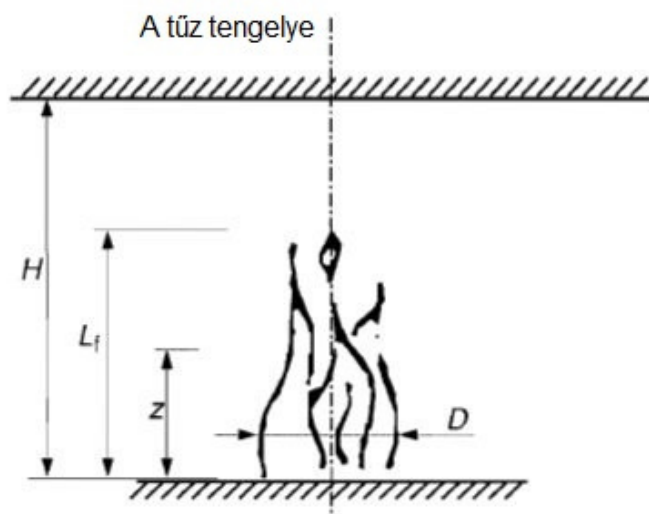
¹⁵ [6] 28/2011. (IX. 6.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról

¹⁶ [6] 28/2011. (IX. 6.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról

A fajlagos tűzterhelést egységnyi padlófelületre számítjuk ki, mértékegysége a MJ/m². Lokális tűz esetén különbséget kell tenni aszerint, hogy a tűz eléri avagy sem a mennyezetet. Ha nem éri el, vagyis az $L_f < H$, és D a tűzátmérője méterben, akkor a következő képlettel lehet meghatározni¹⁷:

$$L_f = -1,02D + 0,0148D^{\frac{2}{3}}$$

3.6. képlet: Fajlagos tűzterhelés



3.3. ábra Lokális tűz változói¹⁸

Abban az esetben, ha az $L_f > H$, akkor a számítás bonyolultabbá válik, ilyenkor a lángnyelvek neki csapódnak a mennyezetnek. A hőfluxussal adható meg az értéke, ami egy táblázati adat. Hogy hol keressük, azt egy paraméter adja meg:¹⁹

$$y = \frac{r + H + z}{L_k + H + z}$$

3.7. képlet: Hőfluxus paramétere

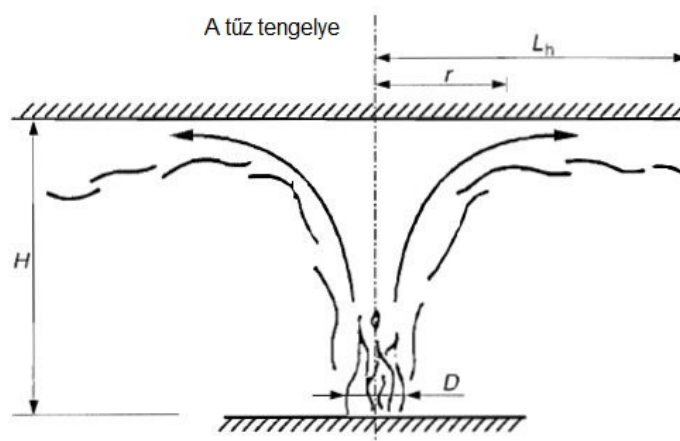
ahol:

r : a távolság a tűzfészkeire állított mérőleges egyenes és a fluxus kiszámítási pontja között.

¹⁷

¹⁸ [10] EN 1991-1-2 Eurocode 1 actions on structures - part 1-2 general actions - actions on structures exposed to fire

¹⁹ [10] EN 1991-1-2 Eurocode 1 actions on structures - part 1-2 general actions - actions on structures exposed to fire



3.4. ábra: Kifejlett tűz²⁰

Amikor a tűz a teljesen kifejlett szakaszba ér, akkor a parametrikus tűzgörbe alkalmazandó. Ebben csak a legfontosabb fizikai paramétereket veszi figyelembe és emellett számos feltételt kell figyelembe venni:

- a tér legfeljebb 500 m² alapterületű lehet;
- tetőnyílások figyelmen kívül kell hagyni;
- hőmérséklet eloszlás változatlanak kell tekinteni a teljes térre;
- maximális kamrabelmagasság 4 m.

3.5. Számítások a füst hatásaira

Az éghető anyag mennyisége jelentősen befolyásolja, hogy egy zárt tér mennyire veszélyes a tűz szempontjából és mekkora esély van a túlélésre. Egy átlagos zárt helyiségben az éghető anyag mennyisége 10 és 60 kg közé esik négyzetméterenként. Az égető anyagok füst égésekor keletkező mérgező anyagok laboratóriumi mérésekkel állapítják meg és az anyagra jellemző érték. Ezen felül már csak a szoba térfogatát kell ismerni, hogy meghatározható legyen a túlélési esély egy zárt helyiségben. Ezt az értéket nevezik a túlélhető mennyiségnek. A számítások alapján ez az érték 0,5 és 1 kg négyzetméterenként, tehát az értékből arra lehet következtetni, hogy a tüzet meg a kialakulása előtt meg kell előzni vagy a bekövetkezése esetén el kell hagyni a teret.

²⁰[10] EN 1991-1-2 Eurocode 1 actions on structures - part 1-2 general actions - actions on structures exposed to fire

Az épületekben bekövetkező tüzek jelentős hányadánál azonban a legfőbb halált okozó tényező a keletkezett füst miatti mérgezés, fulladás. A keletkezett toxikus gázok és a korom gátolja az épületben tartózkodók menekülését, korlátozza a látást és a láthatóságot. Ezen felül jelentősen megnehezíti a mentést, az oltást. Az emberi tényezőn felül az anyagi kár is jelentős lehet, mivel tönkreteszi a térben elhelyezett, működtetett gépeket, berendezéseket.

A keletkező füst összetétele bonyolult, tartalmaz párákat (gőzt), gázokat, lebegő részecskéket, mint a korom és a hamu. Számos teszt vizsgálja az anyagok égése során keletkező füstöt különböző szempontból, vonatkozhat ez a füst mennyiségére, átláthatóságára, sűrűségére valamint, hogy milyen mérgező anyagokat tartalmaz.

A zóna modellek esetében már bemutatásra került, hogy a tűz két réteget hoz létre egy zárt helyiségben. Ha a zóna kisebb térfogatú helyiségben jön létre, a felső rétegben egy magas hőmérsékletű rész jön létre, amely lefelé terjed. Ebben az esetben a lefelé áramló hő jelenti a veszélyforrást, a füst kémiai összetétele másodlagos veszélyforrás az emberre nézve. Nagyobb térfogatú térnél a hőmennyiség jobban eloszlik, ezért a felső réteg nem lesz olyan magas hőmérsékletű, mint az előző esetben, a felső réteg sem alakul ki mindig. Ebben az esetben a füst kémiai összetétele, toxikussága okozza a tér veszélyességét. Ezzel a tényezővel számolni kell az olyan terekben is, ahol égés nincs, de füst áttérjedése lehetséges.

A füstképződéssel kapcsolatban a veszélyesség szempontjából elfogadott a Haber-szabály, amely a következő²¹:

$$D = C \cdot t$$

3.8. képlet: Haber szabály

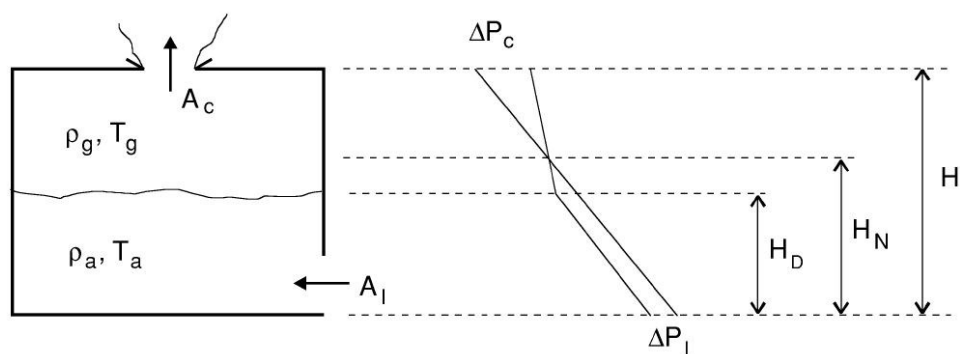
ahol:

- D: dózis;
- C: koncentráció;
- t az expozíciós idő.

Ebből az a következtetést vonták le, hogy mérgező hatás szempontjából a koncentráció és az expozíciós idő szorzata állandó kell, hogy legyen és egyenlő a dózis mennyiséggel. A füst elviselhetetlenségének mértékét a fejezik ki a dózissal, amely egy élő szervezetben

²¹ [4] Dr Beda László, Dr Bukovics István: A tűzben képződő füst veszélyességének jellemzése Védelem 3. szám 2004. 11. oldal

cselekvésképtelenséget okoz. A füst mindaddig képződik, amíg az égés tart, de hőmérséklet sosem emelkedik egy maximum érték fölé. A térben a füst koncentrációja egyre nagyobb lesz az idő elteltével. Az anyagra jellemző égési tulajdonságokból megállapítható a koncentráció időbeli változás, amely megadja azt az időt, amikor a D dózis érték az emberi szervezet számára elviselhetetlen lesz. A C és t tényezők közötti kapcsolat lineáris, tehát ahány szorosára emelkedik az egyik érték, annyival kell csökkenteni a másikat is, hogy a dózis változatlan legyen.



3.5. ábra: Hő- és füstelvezető rendszer paramétere²²

A védekezésben a hő-és füstelvezető rendszerek segítenek, amelyek kétzónás modellekben alkalmazhatóak, ahol van füsttel telített és füstmentes övezet. A feltételezésünk ezúttal is, hogy a zónán belül két érték, a hőmérséklet és a sűrűség állandó. A légkör egyensúlyfeltételéből lehet levezetni a tűztér és annak környezetnek nyomáseloszlási egyenleteit. A beáramló levegő tömege egyenlő a kupolán füstként kiáramló gázkeverék tömegével. Ha ismert a két zóna levegőjének sűrűsége, amelyeket az ideális gáztörvényből lehet megkapni, akkor a nyomáskülönbség kiszámítható, majd a hajtóerőkből a tömegáram egyenlet meghatározható. Ebből megkapható a természetes zóna magassága, ahol a külső környezet és a tűztér nyomása egyenlő. A felett túlnyomás, alatta alulnyomás alakul ki.

A számításokhoz szükségünk van a beáramló levegő tömegáram egyenletére, illetve az eláramló égéstermék egyenletére²³:

$$\dot{m}_t = \dot{m}_p = C_d A_t P_a \sqrt{\frac{2g(H_N - H_F)(P_a - P_g)}{P_a}}$$

²² [5] Dr. Takács Gábor, Szikra Csaba Zóna- és cellamodellek alkalmazásának gyakorlati tapasztalatai hő- és füstterjedés modellezésében TSVSZ Konferencia 2013. december 5.

²³ [5] Dr. Takács Gábor, Szikra Csaba Zóna- és cellamodellek alkalmazásának gyakorlati tapasztalatai hő- és füstterjedés modellezésében TSVSZ Konferencia 2013. december

$$\dot{m}_t = \dot{m}_p = C_d A_c P_g \sqrt{\frac{2g(H-H_N)(P_a-P_g)}{P_g}}$$

3.9. képlet: Tömegáram és égéstermék egyenletek

ahol:

- C_d : a keresztmetszeti tényező;
- H : belmagasság;
- H_D : füstmentes levegőréteg magassága;
- H_N : természetes zóna magassága;
- ΔP_i : a helyiségbe áramló levegő nyomása;
- ΔP_c : kupolán távozó levegő nyomása;
- A : levegőréteg áramlásához tartozó felületek.

A fenti egyenletek segítségével modellezhetővé válnak a hő- és füstelvezető rendszerek, alkalmasok a számítások elvégzésére. Az egyenletek segítségével megkapható, hogy mekkorára kell tervezni a füstelvezető nyílás méretét. Az $\dot{m}_t = \dot{m}_p$ jelentése, hogy a füstmentes levegőréteg határán a csóva tömege átlép füsttel telített zónába.

4. Alkalmazhatóság

A modellek alkalmazhatósági területe közül az egyik legfontosabb a szerkezetek tűzvédelmébe. Segítségükkel olyan megbízható számítási módszereket lehet kidolgozni, amelyekkel az épületek biztonságosabbá tehetőek tűz esetén. A tervezés esetén arra törekednek, hogy a szerkezetek ellenállása a tűzzel szemben nagyobb legyen, mint az előírt biztonsági ellenállás. Ehhez meg kell ismerni azokat az elvárásokat, amelyeknek eleget kell tenniük. Általában ezeket az értékeket az idő szerint vannak meghatározva. A kitűzött szempont, hogy a szerkezet teherhordó képessége, integritása, szigetelési (OTSZ szerinti R, I, E) értékek időben nagyobbak legyenek a természetes tűz várható időtartamánál. A szerkezetek tűz alatti viselkedésének vizsgálatok megengedhetők egy limitált deformáció vagy szerkezeti rongálódás. A kiválasztási szempont, hogy milyen következményekkel számolnak, ha a szerkezet elveszti valamely képességét. A módszerek kiválasztásához ismerni kell az épület jellemzőit, amelyet minden helyiségre külön kell alkalmazni. A zárt teret meg kell különböztetni a geometriája, a tűz energia felszabadulása és a nyitottság szerint, ez utóbbi biztosítja az oxigén ellátást.

4.1. A hőkibocsátási tényező

A szerkezeteket be lehet sorolni 4 csoportra a tűzterhelés sebessége alapján, amelyek a lassútól a nagyon gyorsig terjednek. Ahhoz, hogy megfelelő kategóriába tudják ezeket, ismerni kell az RHR és a tűz fejlődését a kitörési vagy annak kialakulási helyét. Az értékének megállapításához szükség van a tüzet tápláló anyagok égési sebességére. Ezeket nevezzük tűzterheknek. Az RHR értéket a tűz jellemzésére szolgáló tényezők közül az egyik legfontosabbnak tartják. Úgy lehet rá tekinteni, mint a tűz hajtóerejére, a leadott hő egyre több hőt termel. Minél magasabb az érték, a fenyegetettség annál nagyobb az életre, mivel a nagyobb értékhez magasabb hőmérséklet és hőfluxus érték társul. Az anyagokra jellemző táblázati értékek jelentősen módosulhatnak, ha az RHR nagy.

A gázok hőmérsékletének növekedése az RHR-t meghatározó tényező. A tűz kezdetben csak parázsként indul, a végbemenetele függ, hogy van-e elegendő oxigén az éghető anyagok környezetében. Ha mennyisége korlátlan, akkor a hőkibocsátási tényező csak a tűzterhektől függ. Az oxigén mennyisége szűk nyílások esetén korlátozott lehet, ebben az esetben a szellőztetés szabályozott. A zárt terekben a nyílások a nyílászárókból állnak. A számuk és

felületük meghatározza a tűz hevedését. Ha a nyílásuk egyszerű, kialakításuk vízszintes vagy függőleges, a tényezője meghatározható a következő képlettel²⁴:

$$Q = 0,1mHA_w\sqrt{H}$$

4.1. képlet: Nyílási tényező

ahol:

- Q: nyílások tényezője;
- A_w : nyílások keresztmetszet;
- H: nyílások magassága;
- m: égési paraméter a szabvány ajánlása alapján;
- H: a kaliometriás értéke.

Az égés csak egy bizonyos határig van növekedő fázisba, majd beáll egy állandó értékre, ami a tűzterhelés sűrűségének függvénye. A tűzterhelés sűrűségére statisztikai módszerekkel adható meg egy szám. A dimenziója MJ/m², a számítása az épületek minden tűzterhelésének összegzésével kapható meg, ezáltal egy közelítő érték állapítható meg. Alkalmazása korlátozott, csak azokra az esetekre érvényes, ahol a tűztér hasonló.

Meghatározása a következő képlet alapján lehetséges a szabvány alapján²⁵:

$$q_{f,d} = q_{f,k} m \delta_{q1} \delta_{q2} \delta_n$$

4.2. képlet: Tűzterhelés képlete

ahol:

- m: az égési tényező;
- $q_{f,k}$: karakterisztikus tűzterhelés sűrűsége egységnyi alapterülete
- δ_{q1} : a tűz kialakulásának veszélyességi paramétere a tér alapterületének függvényében;
- δ_{q2} : a tűz kialakulásának veszélyességi paramétere a tér rendeltetésének függvényében;
- $\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni}$: A különböző aktív tűzvédelmi eszközöket magába foglaló tényező.

²⁴ [5] Dr. Takács Lajos Gábor, Szikra Csaba: Zóna- és cellamodellek alkalmazásának gyakorlati tapasztalatai hő- és füstterjedés modellezésében TSZVSZ Konferencia 2013. december 5

²⁵ [10] EN 1991-1-2 Eurocode 1 actions on structures - part 1-2 general actions - actions on structures exposed to fire

Ehhez a szabvány meghatároz egy karakterisztikus tűzterhelést is²⁶:

$$Q_{f,i,k} = \sum M_{k,i} H_{ui} \psi_i$$

4.3. képlet: Karakterisztikus tűzterhelés

- $M_{k,i}$: Az éghető anyagok mennyisége [kg];
- H_{ui} : A kalorizált érték [MJ/kg];
- ψ_i : Az opcionális tűzterhelés becsült értéke.

4.2. A hőkibocsátási arány meghatározására a gyakorlatban:

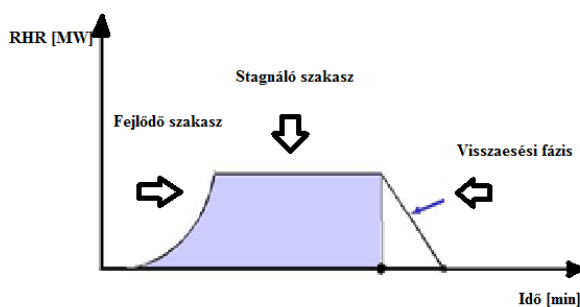
Az érték meghatározása a növekedő szakaszban a következőképlet alapján történik [W]²⁷:

$$RHR = 10^6 \left(\frac{t}{t_{\infty}} \right)^2$$

4.4. képlet: Hőkibocsátási arány képlete

ahol:

- t : az idő;
- t_{∞} idő állandó.



4.1. ábra: RHR alakulása az idő függvényében²⁸

²⁶ [10] EN 1991-1-2 Eurocode 1 actions on structures - part 1-2 general actions - actions on structures exposed to fire

²⁷ [10] EN 1991-1-2 Eurocode 1 actions on structures - part 1-2 general actions - actions on structures exposed to fire

A görbe három szakaszra osztható, az első növekedő szakaszt egy állandó követő, végük a csökkenő fázisba kerül. A növekedési paraméterei az EN 1991 1-2 szabvány szerint adottak. Tapasztalatok alapján megadható egyes zárt terekre rendeltetésük alapján egy érték, szintén a szabvány ajánlása során. Amennyiben a szellőztetés szabályozott, a táblázati értéket csökkenteni kell a nyílások paraméterével.

²⁸Saját ábra [13] O. Vassart, L.G. Cajot & M. Brasseur: Thermal & Mechanical Actions (Grand-Duchy of Luxembourg) alapján

4.1.

Rendeltetés	Növekedési sebesség	t_{∞}[s]	RHR_f[kW/m²]
Hálószoza	közepes	300	250
Hotel szoba	közepes	300	250
Könyvtár	gyors	150	500
Iroda	közepes	300	250
Tanterem	közepes	300	250

Táblázat: Tűznövekedési sebesség néhány zárt térre²⁹

4.3. Hőveszteség

A hőmérsékletek meghatározásához figyelembe kell venni a zárt tér hőveszteségét is. A jelenség a térhatárokon jön létre konvekcióval vagy sugárzással. Ehhez ismerni kell a fal termikus jellemzőit az anyagi környezetben, amelyek a következők:

- hőkapacitás: c_p ;
- sűrűség ρ ;
- vezetőképesség λ .

A köztük lévő kapcsolat pedig az alábbi szerint írható fel³⁰:

$$b = \sqrt{\lambda \rho c_p}$$

4.5. képlet: Hőveszteség képlete

A vezetőképesség és a hőkapacitás hőmérséklet függvényében változó tényezők. A termikus tehetetlenséget a b faktor adja meg. Ha a fal több anyagból is áll, akkor az erősebb anyag vagy burkolt, akkor mindkét anyagra figyelembe kell venni a paramétert.

²⁹[10] EN 1991-1-2 Eurocode 1 actions on structures - part 1-2 general actions - actions on structures exposed to fire

³⁰ 10] EN 1991-1-2 Eurocode 1 actions on structures - part 1-2 general actions - actions on structures exposed to fire

4.4. Számítógépes CFD modellek

A rövidítés a Computational Fluid Dynamic modellre utal, amely a tűz jellemzésére használt parciális differenciál egyenleteket numerikus módszerrel oldja meg figyelembe véve a tér paramétereit, valamint a termodinamikai és aerodinamikai változókat is. A számítógépes modellezés során meghatározható az áramlás, ebben az esetben a gázoké, valamint a hozzá tartozó paramétereket, mint a hőközlés és nyomás. Segítségével pontos kép kapható a tűz lefolyásáról minden szakaszban. Ugyanakkor hátránya, hogy a modellek felépítése bonyolult és hitelesíteni is kell valós kísérletek alapján, tehát nagy az erőforrás igénye.

Ahhoz, hogy egy CFD szimulációt lefutassunk, számos tényezőre szükség lesz a körülmények leírására, a megalkotásához szükség van bizonyos feltételekre. A szoftvernek megadva ezeket pontos számításokat kaphatunk:

- Épületszerkezetek esetében (anyagok hőtani tulajdonságaival),
 - a tér geometriájára;
 - az ott végzett folyamatok, technológiák leírására;
 - az ott tárolt anyagok jellemzőire;
 - milyen passzív tűzvédelmi berendezésekkel rendelkezik a tér (tűzjelző és oltó berendezések),
- Tűzvédelmi terv;
 - Kiürítési idő;
 - Passzív védelmi, eszközök (hő- és füstelvezetés vezérlése);
 - Oltóberendezések vezérlései;
 - Légtechnika vezérlései;
- Mértékadó tűzteljesítmény görbe;
- Vizsgálati idő.

A megadott feltételek tartalmazzák a szoba a részletes szobageometriáját és szerkezetét, hány nyílással rendelkezik és milyen a szellőzés, valamint ezek méreteit. Az ott tárolt eszközökbe tartoznak a szoba bútorzatai, a tárolt anyagok égés karakterisztikája, a turbulencia és a sugárzási paraméterek. A kimeneti paraméterek pedig a füst és a hő mozgása és sebessége, a tér védelmi és jelző eszközei, ezek mennyi idő alatt aktiválódnak. Fontos tényező a tűz belobbanási ideje, a hőmérsékleti értékek és a füsttéteg magassága. A feltételekre a számítások felírásához van szükség, amit az egyenletrendszerek írnak. Ezek a

fizikai és termikus törvényeken, valamint tapasztalati úton lettek megalkotva és az elméleti összefüggéseken alapszanak. Ugyanakkor minél több feltételt adunk meg, a szoftver használhatósága annál jobban beszűkül. A modell mérete és a tér geometriája és csökkenti az alkalmazási lehetőségek számát.

4.5. A Navier-Stokes egyenlet

A CFD modellezés az idő függvényében felírt differenciál egyenletek megoldását végzi minden elemre. Ehhez a Navier-Stokes egyenleteket alkalmazza, amely pontos közelítést ad a paraméterekre. Használat időigényes és bonyolult, a vizsgált elemek számával ez érték jelentősen megnőhet, ezért nagy számítógépes kapacitásra van szükség. Cserébe azonban összetettebb geometriát is megenged a terekre. A számítások végeztével hitelesítésre van szükség a megbízhatóság érdekében.

A modell az egyenletrendszer egy közelítő formáját használja, amiből megállapítható egy alacsony Mach szám, ami egy dimenziómentes mennyiség, felírható egy objektumsebességének vagy egy áramlás sebességének a kapcsolata az áramló közeg helyi hangsebességének függvényében. A közelítés jelenítés, hogy a kép hullámokat megszűri, mivel a számtalan eredménye lehetne a különböző hőmérsékleteken és sűrűségek függvényében. Ezeket ábrázolva egy elliptikus ábra rajzolódik, ami már megfelelő a lassú sebességű áramlásnak és a termikus sugárzási folyamatoknak.

Az elmélete arra alapul, hogy egy súrlódásmentes közegben a folyadék részecskék felgyorsulnak egy rájuk ható erőtl vagy nyomástól. Ha ezt egy valóságos közegben vizsgálják, ahol a súrlódást nem hanyagolják el, az előző értékhez még hozzá kell adni a súrlódási erőt, ami a csúsztatófeszültségből származik, valamint még egy arra merőleges nyomó erőt, ezek pedig arányosak a folyadék deformációjának sebességével. Állandó sűrűség dinamikai viszkozitás esetén az Euler-egyenlet jobb oldala egy súrlódó hatását figyelembe vevő taggal egészül ki.

Ez alapján az egyenlet a következő képlet formájában írható le³¹:

³¹ [17] Dr. Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai BME Áramlástan Tanszék Egyetemi Jegyzet

$$\frac{dv}{dt} = g - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + v \Delta v$$

4.6. képlet: Navier-Stokes egyenlet

ahol:

- $v \Delta v$: a konvektív gyorsulás;
- p : nyomás.

A gyakorlati alkalmazásuk önmagukban nehézkes lenne, de a számítógépen futtatva, kiegészítve egyéb összefüggésekkel jól használható. A felállított paramétereket előre meg kell tervezni és fontos, hogy megfelelően legyenek felállítva a határértékek. Ezáltal megbízható számítások kaphatóak a tűz gáz- és füstmozgásának szemléltetésére. A számítógépen futtatott tűzmodellező programok a tűzvédelmi tervezés fontos eszközei, amelyek megkönnyítik a tervezést és a tűzvizsgálatot.

4.6. FDS tűzmodellező program³²

Az FDS egy dinamikus tűz szimulátor, amellyel számítógépen lehet ábrázolni a hőtechnikai modelleket. A program az éghető anyagok alapvető fizikai tulajdonságait használja fel elsődleges adatként. A szoftver a már említett Navier-Stokes egyenletekre épít és jól használható a gázok és a füst áramlására. Ezen termikus áramlások ábrázolása segítséget nyújt a tervezési munkálatokhoz, valamint a tűzdinamika és az égés kutatásában. Az ábrázoláshoz szükség van egy szemléltető programra is, amely az FDS számításra épülő Smokeview program. Segítségével megadható egy szimuláció a gázképződés és részletesen ábrázolja az áramlásokat. 2D-ben vagy 3D-ben felvehetők az a hőmérséklet és az áramlási vektorokat, megadja irányukat, nagyságukat, valamint statikai adatokat jeleníthetők meg vele.

A matematikai eredmények alapján a Smokeview kiegészítő egy CAD-hez hasonló ábrát hoz létre. Ezen beállítva az idő előrehaladásának mértéket, akár képkockánként is megjeleníthető a tűz lefolyás, a füst terjedése, milyen hőmérsékleti állapot alakul ki. Az égési modellek megjelenítésére két mód lehetséges. Az egyik mód a Direkt Numerikus Szimuláció, ahol az éghető anyag és az oxigén keveredésének közvetlen modellezése lehetséges, a kémiai

³² [20] Szilágyi Csaba Tűzvizsgálat számítástechnikai támogatással Védelem 2007. december 4. szám

reakciók teljes mértékben ábrázolhatóak. A másik módszer a Nagy Örvényes Szimuláció, ebben az esetben az éghető anyag és az O_2 keveredési modelljéhez egy kevert égési modellt alkalmaznak. Hogy melyiket alkalmazzák, a felhasználási céltól függ. A program még felhasználja Newton második törvényét is és a termodinamika első főtételét, valamint az ideális gázállapot egyenlet. A programnak szükség van a zárt térben elhelyezett éghető anyagok hőfelszabadulási sebességére vagy párolgáshőjére is. Fontos bemeneti paraméter, hogy milyen hőmérsékleten gyulladnak meg és milyen hővel, sűrűséggel égnék.

A megfelelő működéshez feltételezni kell, hogy az egyenletek alacsony Mach számúak. A numerikus megoldás során a négyzet alakú teret további részekre, cellákra bontja. A tűz szimulálása során mindenelemnek más a gáz sebessége, hőmérséklete, amelyek az idő függvényében változnak. Az egyenleteket minden cellára külön-külön számítja, ezért a megoldás nagy mértékben függ az elemek számától. A hátránya, hogy nem szimulálhatóak a terek, ha az alapja nem négyzet. A felosztott térben figyelembe veszi a cellák között áramlásokat, az azokban levő forrásokkal és nyelőkkel együtt. A pontosság érdekében a számítások akár több ezerszer is elvégezhetőek.

5. Vizsgálati feladat egy irodatűzre³³³⁴

A gyakorlati használhatóság szemléltetésére egy példa levezetését mutatom be. A tűz ez esetben egy elképzelt irodában fog lefolyni, amelyet teljesen elborít a tűz. Az egyes tényezők megállapításához az eddig ismertetett tűzmodellek kerülnek felhasználásra.

Ahhoz, hogy a számítások elvégezzük, az adatok legyenek a következők:

- A tér alapterülete: $A_f=140 \text{ m}^2$
- Teljes körbezárt terület: $A_t=470 \text{ m}^2$
- Vertikális-kijáratok teljes területe $A_v=25 \text{ m}^2$
- Vertikális-kijárat tényező: $\alpha_v=0.2$
- Horizontális-kijárat tényező $\alpha_h=0.0$
- Magasság $H=3.5 \text{ m}$
- Átlagos ablakmagasság: $h_{eq}=1.7 \text{ m}$ (feltételezés)
- Könnyűsúlyú beton: $p=1900 \text{ kg/m}^3$; $c=840 \text{ J/kgK}$
- Tűznövekedési arány: közepes $\lambda = 1.0 \text{ W/mK}$.

A tűzterhelés arányának meghatározásához a 4.2. képlet kerül alkalmazásra. Egy iroda esetében nagy mennyiségben fordul elő papír és fa alapanyag, ezért a szabvány alapján az m faktorra a 0.8 értéket lehet feltételezni.

δ_{q1} és δ_{q2} értékeket a szabvány táblázata alapján lehet megkapni.

A tér alapterülete (A_f) m^2	δ_{q1}	A tér rendeltetése (példák)	δ_{q2}
25	1,10	Múzeum, galéria	0,78
250	1,50	Iroda, hotelszoba	1,00
2500	1,90	Gépipari összeszerelő üzem	1,22
5000	2,00	Laboratórium	1,44
10000	2,13	Festékek, tűzijátékok gyártása	1,66

³³ [10] EN 1991-1-2 Eurocode 1 actions on structures - part 1-2 general actions - actions on structures exposed to fire képletei és táblázatai alapján

³⁴ [19] P. Schaumann, T. Trautmann University of Hannover – Institute for Steel Construction, Hannover, Germany: Examples to EN 1991-1-2

4.1. táblázat: Paraméterek³⁵

Ez alapján a $\delta_{q1}=1,5$, a $\delta_{q2}=1,0$.

A δ_n tényező több tűzvédelmi megoldás figyelembe vételével számolható:

Aktív tűzvédelmi berendezések			
Automata tűzoltó rendszerek		Automata tűzjelző rendszerek	
Sprinkler rendszer δ_{n1}	Vízellátás δ_{n2}	Érzékelés és riasztás δ_{n3} Hőre δ_{n4} Füstre	Riasztás átvitel δ_{n5}
0,61	0,1,2, 1,0; 0,87; 0,7	0,87 vagy 0,73	0,87

4.2. Táblázat δ_{ni} tényezők (1-5)³⁶

Védelmi rendszerek				
Munkahelyi tűzoltóság δ_{n6}	Illetékes tűzoltóság δ_{n7}	Kiürítési útvonalak δ_{n8}	Tűzoltó készülékek δ_{n9}	Füstelvezető rendszerek δ_{n10}
0,61 vagy 0,78		0,9 vagy 1,0 vagy 1,5	1,0 vagy 1,5	1,0 vagy 1,5

4.3. Táblázat: δ_{ni} tényezők (6-10)³¹

$$\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni} = 1,0 \cdot 0,73 \cdot 0,87 \cdot 0,78 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,50$$

A karakterisztikus tűzterhelés kiszámításához a 4.3. képletet kell alkalmazni. Ebben az esetben a teljes tűzterhelési érték legyen 50 kg faanyag/m². A EN 1991-1-2:2002 E.3. táblázata alapján a H_{ui} értéke fára 17,5 MJ/kg. Így az eredmény a következőképpen alakul:

³⁵ [10] EN 1991-1-2 Eurocode 1 actions on structures - part 1-2 general actions - actions on structures exposed to fire

³⁶ [10] EN 1991-1-2 Eurocode 1 actions on structures - part 1-2 general actions - actions on structures exposed to fire

$$Q_{f,i,k} = 140 * 50 \cdot 17,5 \cdot 1,0 = 122500 \text{ MJ}$$

A karakterisztikus tűzterhelés eloszlása meghatározható 140 m²-re.

$$q_{f,k} = \frac{Q_{f,i,k}}{A_f} = \frac{122500}{140} = 875 \text{ MJ/m}^2$$

A fentiek alapján már minden adott a tűzterhelés arányának meghatározásra.

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n = 875 * 0,8 * 1,5 * 1,0 * 0,5 = 525 \text{ MJ/m}^2$$

A hőmérséklet-idő görbe felrajzolása paraméterek segítségével történik. A meghatározásához szükség van az éghető anyag mennyiségére vagy a szellőzésre. Ehhez fel kell használni a kijártok tényezőjét és karakterisztikus tűzterhelés eloszlás tervezett értékéhez meg kell határoznunk a teljes felületet:

$$O = \sqrt{h_{eq}} \frac{A_v}{A_t} = \sqrt{1,7} \frac{25}{470} = 0,06935 \text{ m}^{1/2}$$

Az O tényezőnek 0,02 és 0,2 m^{1/2} közé kell esni³⁷, ezért az értéke megfelelő.

A q_{td} értékre a tervezési szakaszban van szükség, amely megmutatja a tűzterhelés értékét a teljes terület arányában.

$$q_{td} = q_{f,d} \frac{A_f}{A_t} = 525 * \frac{140}{470} = 156 \text{ MJ/m}^2$$

A görbe felrajzolásához meg kell állapítani a hevítési és hűlési szakaszokat. Ehhez a b tényezőre van szükség. Ismerni kell a fal termikus jellemzőit az anyagi környezetben, mivel ez a tényező megmutatja a termikus abszorpcióképességet a térhatároknál. A sűrűség, a fajhő, a hővezetési tényező az anyagra jellemzőek, a normál hőmérsékletnek megfelelően adottak. A vizsgált esetben legyen a padlózat, a falak és a lemezek anyaga könnyűbeton.

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} = \sqrt{1900 * 840 * 1} = 1263,3 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \text{s}^{1/2} \text{K}}$$

A hevítési és hűlési szakaszhoz a t* tényező kell. A szellőzés füstelvezető rendszer

³⁷[10] EN 1991-1-2 Eurocode 1 actions on structures - part 1-2 general actions - actions on structures exposed to fire

esetében vezérelt, a t^* számolható. hőmérséklet-idő görbe a hevítés szakaszában adott:

$$t^* = t * \Gamma$$

ahol

$$\Gamma = \frac{(0/b)^2}{(0.04/1160)^2} = \frac{(0.06935/1263,3)^2}{(0.04/1160)^2} = 2,53$$

A hevítés szakasza a 3.3. képlet alapján:

$$\theta_g = 20 + 1325(1 - 0,324e^{-0,2*2,53t} - 0,204e^{-1,7*2,53t} - 0,472e^{-19*2,53t})$$

Hűlési szakasz

A hűlési szakaszhoz szükség van a maximális hőmérsékletre, amit pedig a következő alapján lehet kiszámolni:

$$\theta_{max} = 20 + 1325(1 - 0,324e^{-0,2*t_{max}} - 0,204e^{-1,7*t_{max}} - 0,472e^{-19*t_{max}})$$

ahol:

$$t_{max}^* = t_{max} * \Gamma$$

A t_{max} idő az meghatározható táblázat alapján:

$$t_{max} = 0,2 * 10^{-3} * \frac{q_{td}}{0} = 0,2 * 10^{-3} \frac{156}{0,06935} = 0,449 \text{ h}$$

A táblázat alapján a 0,417 arányra van szükség.

Idő	Lassú tűznövekedési arány	Közepes tűznövekedési arány	Gyors tűznövekedési arány
$t_{lim} [h]$	0.417	0.333	0.250

4.4. Táblázat: Tűznövekedési arányok

A t_{max}^* számítása:³⁸

$$t_{max}^* = 0,449 * 2,53 = 1,13 \text{ h}$$

A maximális hőmérséklet számítása ez alapján:

³⁸ [10] EN 1991-1-2 Eurocode 1 actions on structures - part 1-2 general actions - actions on structures exposed to fire

$$\theta_{max} = 20 + 1325(1 - 0,324e^{-0,2*1,13} - 0,204e^{-1,7*1,13} - 0,472e^{-19*1,13}) = 962,95^{\circ}\text{C}$$

A hűlési szakasz t^* és a t^*_{max} számítható:

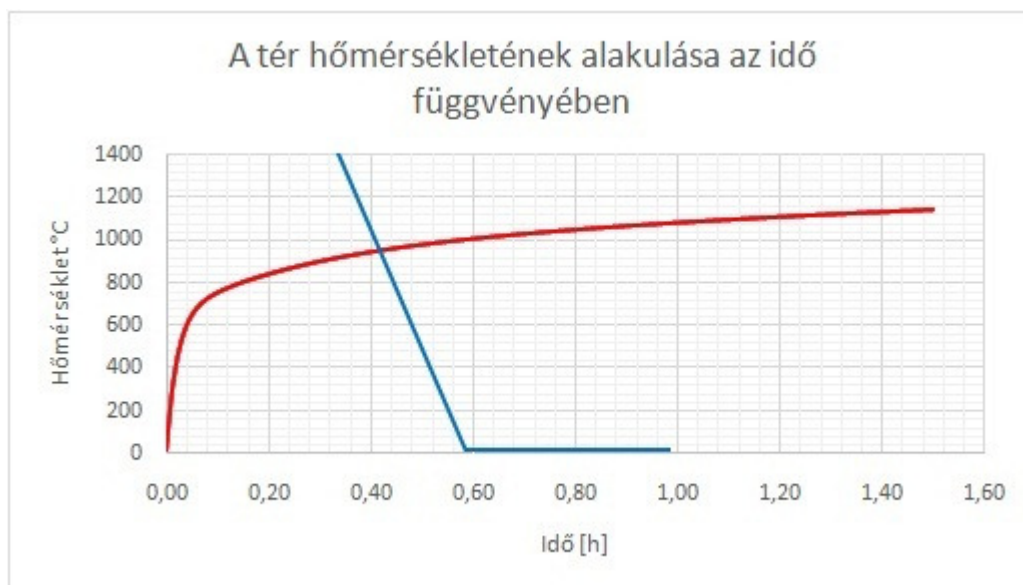
$$t^* = t * \Gamma = t * 2,53$$

$$t^*_{max} = 0,2 * 10^{-3} \frac{q_{td}}{O} \Gamma = 0,2 * 10^{-3} \frac{156}{0,06935} * 2,53 = 1,12 \text{ h}$$

A hőmérséklet-idő görbén a t^*_{max} értéknek 0,5 és 2,0 közé kell esni,

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(3 - t^*_{max})(t^* - t^*_{max} * x) = 962,95 - 250(3 - 1,12)(t^* - 1,12 * 1) \text{ ahol } x \text{ értéke}$$

1,0 mivel $t_{max} > t_{lim}$.



4.2. ábra: A számítások ábrázolása

A számítások eredményeképpen megkapható a tér léghőmérséklete és ábrázolható a paraméteres hőmérséklet-idő görbe segítségével végzett számítások szerint. Az ábráról leolvasható, hogy az idő elteltével hogyan alakul a hőmérséklet a helyiségben. A maximális hőmérsékletet, 962,95 °C fokot a tűz kialakulás után már 20 perccel eléri, ezért fontos a gyors kiürítés megszervezése, mivel csak egy rövid idő keret áll rendelkezésre.

6. Összefoglalás

A dolgozatomban megmutattam, a tűzmodellek alkalmazásaira milyen lehetőségek vannak. Megvizsgáltam a matematikai tűzmodelleket és kiemelésre kerültek az egyes típusok előnyei és hátrányai. Mindegyik típus használatának van létjogosultsága, mivel nincs két azonos tüzeset, így a vizsgálatoknál hasznos, ha több szemszögből is meg lehet vizsgálni egy esetet.

Az első fejezetben a tűz rövid kémiai folyamatának bemutatása után rátértem a tűzmodellek csoportosítási lehetőségeire. Lehetőség van arra, hogy a tüzet teljes valójában vizsgálják a fizikai módszerek segítségével. Ez azonban igen költséges, ezért egyszerűbb és költséghatékonyabb a matematikai tűzmodellek alkalmazása. Ezek a számítások számos változót vesznek figyelembe. Ha a már meglévő módszereket számítógép segítségével is lemodellezik, akkor nagy pontossággal lehet megállapítani a tűz kialakulásának lehetőségeit. A megbízhatóság az elsődlegest szempont.

A második tartalmi fejezetben összehasonlítottam az egyes modelleket. Nagy hangsúlyt fektettem arra, hogy az egyes módszerek elvei mellett azok kiszámítási módját is megmutassam. Megvizsgáltam, hogy mikor, milyen esetben használhatóak a modellek, kiemeltam, hogy milyen előnyökkel és hátrányokkal rendelkeznek egymással szemben. A feldolgozás során egyaránt támaszkodtam az Országos Tűzvédelmi Szabályzatra és nemzetközi szabványokra, valamint a témában rendelkezésre álló irodalomra.

Az alkalmazhatósági területek közül a szerkezetekre vonatkozó számításokat emeltem ki, mivel egy épület esetében már a tervezéskor számolni kell a tűz fenyegető hatásaival. A megelőzés a legfontosabb, ezért olyan anyagokat kell választani, amelyek ellenállóak a tűzzel szemben, sokáig megtartják funkciójukat a tűzzel szemben. Segítségükkel megbízható módszereket lehet kidolgozni, amelyekkel az épületek biztonságosabbá tehetőek tűz esetén.

Egy számítási feladat elvégzésével megmutattam, mindössze néhány paraméter ismeretével már jobban megismerhető a tűz és az eredmények figyelembe vételével van lehetőség arra, hogy védekezzünk ellene. Az eredmény birtokában egy tűzvédelmi szakembernek lehetősége van arra, hogy megvizsgálja egy szervezet tűzvédelmi rendszerének hatékonyságát és javaslatot tegyen annak fejlesztésére. Akár már 1 tényező megváltoztatásával is jelentős javulás érhető el.

7. Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Simon Ákos – Török László Ervin: Alkalmazott kémia ZMNE/BMF Főiskolai jegyzet Budapest 2007
- [2] Dr. Beda László t. ezredes: Épületek tűzbiztonságának műszaki értékelése Phd értekezés Budapest 2004
- [3] Dr. Beda László: Tűzmodellezés, tűzkockázat-elemzés SZIE-YMMK Budapest, 1999
- [4] Dr Beda László, Dr Bukovics István: A tűzben képződő füst veszélyességének jellemzése Védelem 3. szám 2004. 11. oldal <http://www.vedelem.hu/letoltes/tanulmany/tan07.pdf>
- [5] Dr. Takács Lajos Gábor, Szikra Csaba: Zóna- és cellamodellek alkalmazásának gyakorlati tapasztalatai hő - és füstterjedés modellezésében TSZVSZ Konferencia 2013. december 5. http://www.tszvsz.hu/anyagok/04_Szikra_Csaba_Takacs_Lajos_hu.pdf
- [6] 28/2011. (IX. 6.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról
- [7] A tűzvédelmi mérnöki tudás elterjesztése (Mérnöki tudást összefoglaló oldal) http://www.difisek.eu/HU/DIFISEK_HU.htm
- [8] CEN; prEN1990, Eurocode – Basis of structural design, 2001.
- [9] ISO 834:2002 - Fire-resistance tests 2002
- [10] EN 1991-1-2 Eurocode 1 actions on structures - part 1-2 general actions - actions on structures exposed to fire
- [11] Dr. Bódi István, Dr. Koris Kálmán: Mérnöki faszerkezetek BME Hidak és szerkezetek Tanszék Budapest 2011 http://www.hsz.bme.hu/hsz/oktatas/feltoltesek/BMEEOHSASA3/tuzhatas_modellezese.pdf
- [12] Dr. Vytenis Babrauskas, Fire Science and Technology Inc 1996 http://www.interfire.org/features/heat_release.asp
- [13] O. Vassart, L.G. Cajot & M. Brasseur: Thermal & Mechanical Actions (Grand-Duchy of Luxembourg) http://www.difisek.eu/HU/DIFISEK_HU.htm
- [14] O. Vassart: Thermal Response (ArcelorMittal Long Carbon Europe Research Centre) http://www.difisek.eu/HU/DIFISEK_HU.htm
- [15] B. ZHAO Mechanical response (CTICM – Centre Technique de la Construction Métallique, France) http://www.difisek.eu/HU/DIFISEK_HU.htm
- [16] Wikipedia: <http://hu.wikipedia.org/wiki/Navier%E2%80%93Stokes-egyenletek>
- [17] Dr. Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai (BME Áramlástan Tanszék) www.ara.bme.hu/oktatas/letolt/artolmw97.doc
- [18] ISO 5660-1:2002 Fire Tests – Cone Calorimeter method

- [19] P. Schaumann, T. Trautmann University of Hannover – Institute for Steel Construction, Hannover, Germany: Examples to EN 1991-1-2 http://www.difisek.eu/HU/DIFISEK_HU.htm
- [20] Szilágyi Csaba Tűzvizsgálat számítástechnikai támogatással Védelem 2007. december 4. szám