

Dr Beda László, Dr Bukovics István

A tűzben képződő füst veszélyességének jellemzése

Egy épületben keletkezett tűz alkalmával két rendszer, *a tűz és az épület*, van egymással kölcsönhatásban. A tűz következtében *hő és toxikus gázok* termelődnek, amelyek károsíthatják az *épület szerkezetét, az épületben levő tárgyakat, és élőlényeket.*

A tűz károsító tényezői

A tűz helyszínén, együttesen vannak jelen a tűz hatásai és a környezet által a tűzre gyakorolt hatások. A veszélyt alapvetően az éghető anyagok tulajdonságai és mennyiségük, valamint a körülmények határozzák meg. A tűzhelyszínnek alapvető szerepe van a kialakuló veszélyt illetően. Két egyforma helyszín nehezen képzelhető el, az egészen egyszerűtől az igen bonyolultig, bármilyen előfordulhat. Így a helyszíneket *növekvő komplexitás* szerint lehet rangsorolni.

A legegyszerűbb tűzhelyszínre - korlátozott mennyiségű éghető anyag égése zárt térben - a számítások viszonylag egyszerűek, nem igényelnek számítástechnikai eszközöket. Elegendő ismerni az éghető anyagok mennyiségét, a szoba térfogatát és a keletkezett füst - amely a szoba légterében összegyűlik, és viszonylag egyenletesen oszlik el - mérgezési potenciálját. Ilyen esetre egyszerűen meghatározható az éghető anyagoknak az a legnagyobb mennyisége, amelynek elégésekor a túlélés még biztosított, ha valaki a szobában tartózkodik. Ez az ún. *túlélhető mennyiség*. A számítások eredményei azt mutatják, hogy ez a mennyiség az említett legegyszerűbb esetben, egy átlagos méretű lakószobánál, a lakásokban előforduló leggyakoribb anyagokra nézve kb. 0,5 - 1 kg/m². Az ilyen egyszerű tűzhelyszín feltételezése természetesen nem igazán reális.

Egy *tipikus lakószobában* az éghető anyagok mennyisége eléri a 10 - 60 kg/m² - t. Az előző adattal összehasonlítva világosan látszik, hogy ha túl akarunk élni egy közönséges lakásban keletkezett tüzet, akkor arra két lehetőség kínálkozik: *vagy meg kell gátolni az égést, vagy el kell hagyni a lakást.*

A tűz károsító tényezői tehát, a ***hőmérsékletemelkedés*** és a keletkező ***füst toxikussága.***

Koncentráció és expozíciós idő

Fel lehet tenni azt a kérdést, hogy a két tényező mindig egyformán veendő-e figyelembe. A tapasztalat a következő:

Kisebb térfogatú szobában, a gyorsan fejlődő tűz jól definiált felső réteget hoz létre, amely a mennyezet irányából lefelé terjeszkedik. Ez a réteg a veszteségekhez képest relatíve gyors hőfejlődés miatt melegszik. Amint a meleg réteg egy bizonyos mélységig leereszkedett, igen magas hőmérséklete miatt közvetlen veszélyt jelent a benttartózkodókra, függetlenül a zóna kémiai összetételétől.

Nagyobb térben, vagy lassú égésnél (esetleg parázslásnál) a felső réteg relatíve hideg, illetve felső réteg nem is alakul ki (hiszen éppen a nagy hőmérsékletkülönbség az, ami a sűrűség szerinti rétegződést eredményezi). Ilyen esetben az égéstermékek toxikussága és nem a magas hőmérséklet lesz az a tényező, amelyik a zárt tér elviselhetetlenségét okozza.

A toxikus hatással egyébként is számolni kell olyan zárt terekben, ahol bár égés nincs, de a füst oda terjedése lehetséges.

Ha a *füstképződéssel* összefüggő veszélyt elemezzük, akkor azt tapasztaljuk, hogy a helyzet kissé eltér a magas hőmérséklet okozta veszélytől. A hőmérséklet ugyanis soha nem emelkedik egy bizonyos maximális érték fölé, de füst mindaddig képződik, amíg az égés tart. Az, hogy mekkora füstkoncentrációt képes az élő szervezet elviselni, az égési körülményektől és attól függ, hogy milyen anyag ég. *A füst elviselhetetlenségének mértékét azzal a dózissal szokás kifejezni, ami az élő szervezetben észlelhető biológiai hatást - cselekvésképtelenséget (halált) - okoz. A dózis a füstkoncentráció és az expozíciós idő által meghatározott. Ebből az következik, hogy ha ismert a koncentráció időbeli változása (a koncentráció - idő görbe), akkor meghatározható az az időpont, amelynél az adott térben az elviselhetetlen koncentráció egy bizonyos expozíciós idő esetén előáll.*

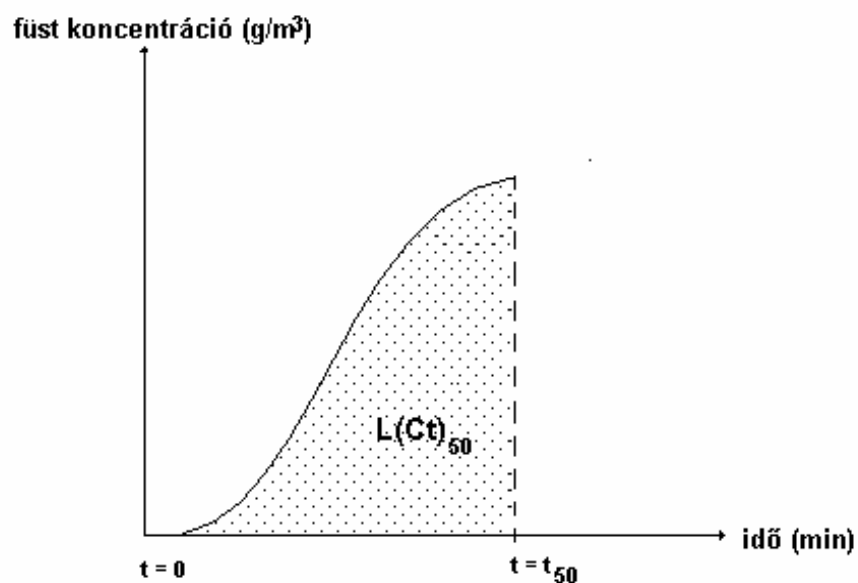
Kézenfekvőnek látszik az a kérdés, hogy mi a veszélyesebb: magasabb koncentráció mellett rövidebb ideig, vagy alacsonyabb koncentráció mellett hosszabb ideig belélegezni a mérgező gázokat. Ezzel kapcsolatban a **Haber-szabály** általánosan elfogadott, amely szerint a mérgező hatás szempontjából az *akkumulált dózis (D) számít, azaz a koncentráció (C) és az expozíciós idő (t) szorzata állandó kell hogy legyen.* Vagyis:

$$D = C \cdot t \quad (1)$$

Az (1) összefüggés lineáris kapcsolatot jelent a mérgező anyag felvétele és az expozíciós idő között. Ennek az eredménye az, hogy kétszeresére növekedett koncentráció mellett, felére kell csökkenteni a tartózkodási időt, hogy a dózis (ezzel együtt a várható biológiai hatás) változatlan maradjon. Az egyenlet a legtöbb esetben alkalmazható, azonban vannak vegyületek (mint pl. a szén-monoxid) amelyek a tüdőn át jutnak a szervezetbe majd onnét tovább a véráramba. Az ilyen esetben a felszívódás exponenciális a *Coburn-Forster-Kane (CFK)* egyenletnek megfelelően :

$$D = C (1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

A tér toxikusságának becsléséhez szokásos eljárás szerint az $L(Ct)_{50}$ értéket kell meghatározni, ami nem más, mint *annak a dózishoz megfelelő koncentráció-idő szorzat, amely ahhoz szükséges, hogy a füst hatásainak kitett állatok 50%-ánál halált okozzon.* Ezt az értéket szabványos laboratóriumi állatkísérletekben úgy határozzák meg, hogy folyamatosan mérik a füstkoncentráció időbeni változását, miközben az állatokat az adott térbe helyezik. Feljegyzik azt az időpontot amikor a kísérleti állatok 50%-a elpusztul. Az addig felvett dózist a koncentráció-idő görbe alatti terület adja (1. ábra).



1. ábra A füstkoncentráció (C) időbeni változása és a felvett dózis $L(Ct)_{50}$, addig az időpontig, amíg a kísérleti állatok fele elpusztul

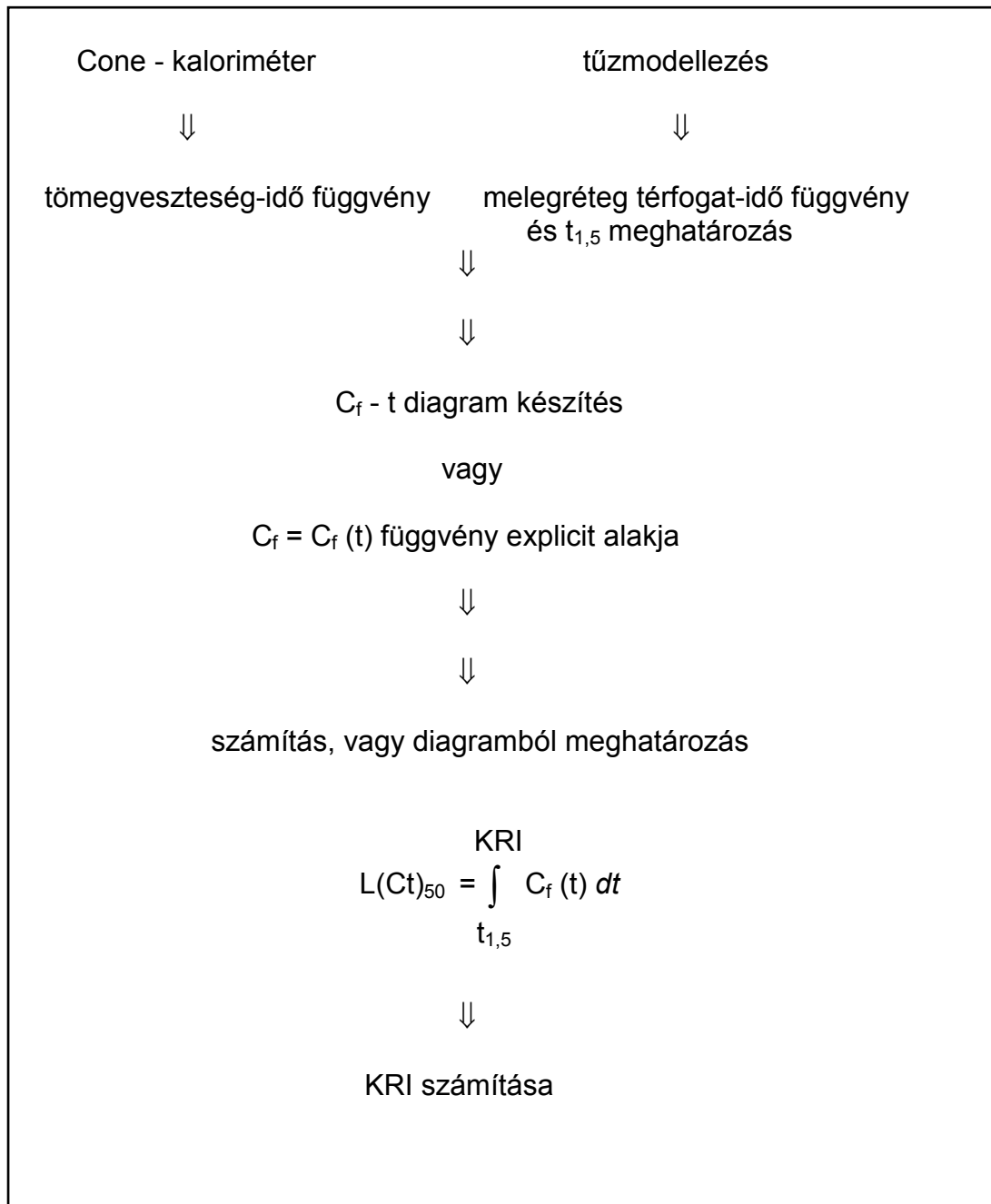
Kiürítési idő

Hogyan tudnánk meghatározni a kiürítéshez rendelkezésre álló időt, a KRI értékét? Vegyünk két esetet: az egyik egyetlen tárgy égése, a másik több tárgy égése egy szobában.

Nézzük először az *első* esetet! Legyen egy nagyobb méretű tárgy, pl. egy fotel, vagy egy heverő, ami meggyulladt. Mivel a tűz ebben az esetben csak egy jól meghatározott helyre terjed ki (tudniillik csupán egyetlen éghető tárgy van a szobában), a tér többi részének vizsgálata a hőtermelés szempontjából érdektelen. Természetesen ismerni kell a határoló falak vastagságát, termodinamikai tulajdonságait, a hőveszteségek megítélése szempontjából. A becsléshez feltételezzük, hogy a hőmérséklet elviselhetőségének határa 150 °C (amely érték elérése előtt az embereknek el kell hagyni a helyiséget), a bútor anyagára vonatkozóan az égéskor keletkező füst toxicitási adatai ismertek és azok megfelelnek az adott égési körülmények között várható toxicitásnak. A meggyulladt bútorral kapcsolatban ismerni kell annak égési sebességét, azaz a hőfelszabadulás és a tömegvesztés sebességét. A forró rétegben a füstkoncentráció (C_f) egy tetszőleges t időpontra meghatározható az égő anyag *tömegvesztés - idő*, illetve a *forróréteg térfogat - idő* görbék ismeretében. A tömegvesztésre vonatkozóan *Cone*-kaloriméteres mérési adatok állnak rendelkezésre, a forró réteg térfogatát (pontosabban a réteg vastagságát) pedig matematikai tűzmodellek segítségével határozhatjuk meg. Ha ily módon különböző időpontokra kiszámítjuk C_f értékét, akkor felrajzolhatjuk a $C_f - t$ (szobában a *füstkoncentráció - idő*) görbét (amely hasonló lesz a laboratóriumi kísérletekben kapott, 1. ábrán látható görbéhez), vagy meghatározhatjuk a $C_f = C_f(t)$ függvény explicit alakját. Akár a megszerkesztett görbe grafikus integrálásával, akár a következő integrál (3) segítségével a laboratóriumi mérésekkel meghatározott $L(Ct)_{50}$ ismert értékből a kiürítésre rendelkezésre álló idő (KRI) számítható:

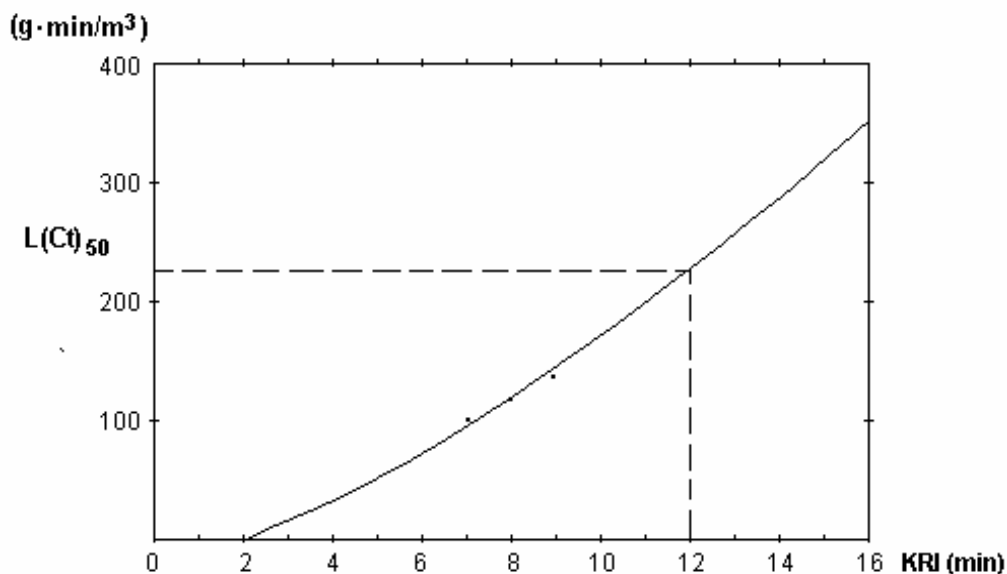
$$L(Ct)_{50} = \int_{t_{1,5}}^{KRI} C_f(t) dt \quad (3)$$

Ahol $t_{1,5}$ az az idő amelynél a felső réteg (a füst) eléri a talajtól mért 1,5 m-es szintet. Értéke tűzmodellezéssel meghatározható. Ugyanis, ekkor már fel lehet tételezni, hogy a helyiségben tartózkodó, álló felnőttek ki vannak téve a gázok toxikus hatásainak. Összefoglalva a módszer lépéseit, a séma a következő:



Meg kell azonban jegyezni, hogy az ismertett módszer alkalmazásánál fel kell tételezni azt, hogy a vizsgált tűzben keletkezett füst toxikussága megegyezik a laboratóriumi füst toxikusságával és hogy az $L(Ct)_{50}$ értékek a kísérletekben alkalmazott patkányok és az emberek részére azonosak. Ez utóbbi feltétel természetesen nem teljesül, ezért *a módszer csak a relatív veszélyesség megítélésére alkalmas*. Vagyis segítségével el lehet dönteni azt, hogy pl. két anyag közül ugyanabban a környezetben melyik és milyen mértékben jelent nagyobb veszélyt tűz esetén.

Az $L(Ct)_{50}$ értékeit a KRI -k függvényében ábrázolva a 2. ábrához jutunk.



2. ábra A kiürítéshez rendelkezésre álló idő, mint az $L(Ct)_{50}$ függvénye

Egy példán keresztül, feltételezve a következő körülményeket: *szoba alapterülete 93 m², a tűz 100 kW –os, állandó hőteljesítményű, és 0,6 m átmérőjű*, akkor a felső réteg 6 min alatt éri el a talajtól mért kb.1,5 m távolságot és hőmérséklete 12 min alatt emelkedik 150 °C-ra. Ennek az időpontnak kb. 220 g·min/m³ toxikus adag felel meg. Ha a vizsgált füst toxicitása nagyobb ennél az értéknél, azaz $L(Ct)_{50} < 220$ g·min/m³ akkor a toxikus hatás lesz a domináns, ha a toxicitás kisebb akkor a hőhatás miatt kerül az ember veszélyhelyzetbe. Vagyis a füst toxicitása jelent fenyegetést akkor, ha a vizsgált helyszínen a légtér előbb válik kritikusan mérgezővé, mint veszélyesen meleggé. Azaz:

$$KRI (\text{toxikus}) \leq KRI (\text{hőmérséklet}) \quad (4)$$

Hatásos dózis hányad

Egy másik módszer a *lánggal égéskor* keletkező füst (ami belélegezve jut a szervezetbe) toxikus veszélyének jellemzésére a *hatásos dózis hányad - HDH* alkalmazása.

Előre kell bocsátani, hogy az *eljárás relatív*, és még korántsem teljes mértékben kifejlesztett, de kiküszöböli azokat a nehézségeket, amelyek más értékelési módszerek alkalmazásához szükséges adatok hiányából erednek. Néhány *kikötés* az alkalmazás körülményeit illetően: nem ipari környezet; nem füstölő, inkább lángoló égés; flashovert megelőző tűzfejlődési szakasz; a hatásnak kitett személyek nem a lángoktól vagy a hőtől károsodnak.

A HDH egy dimenzió nélküli szám, amely a ténylegesen elszenvedett dózis és a vizsgált hatást (pl. 50%-os elhalálozást) kiváltó dózis aránya.

$$\text{HDH} = \boxed{} \quad (5)$$

ahol:

LC_{50} - az a füstkoncentráció (szokás nevezni *toxikus potenciálnak* is), amely a mérgező hatásnak kitett egyedek 50%-ánál halált okoz. Mértékegysége: kg/m^3 (vagy $mg/liter$), azaz koncentráció mértékegységű. Az LC_{50} maga is változó (értéke függ pl. a vizsgálóberendezéstől, a kísérleti körülményektől, az alkalmazott kísérleti állatoktól), így nem specifikus jellemzője az égő anyagnak. Értéke fordítottan arányos az expozíciós idővel (t -vel).

Mivel a tűzkísérletekből adatok a szokásosan alkalmazott $t = 30$ percnak megfelelő LC_{50} -re állnak rendelkezésre, a (4) egyenlet t -vel való egyszerűsítése után, felírható a következő formában:

$$\text{HDH} = \frac{C_f}{LC_{50}} \quad (6)$$

Látható, hogy $HDH = 1$ akkor, amikor a füst koncentrációja elérte az 50%-ban halálos koncentrációt, az 1-nél kisebb értékek a "nem halálos" atmoszférát jelzik (30 perces belélegzésnél).

A felső forró rétegben egyenletesen eloszlott füst koncentrációja (C_f - kg/m^3) számítható az állandósult állapotra felírt tömegmérlegből, ha ismert a szellőzés térfogatárama, \dot{V} (m^3/s). Ugyanis ebben az állapotban az időegység alatt keletkezett tömeg és a szellőzés által szállított tömeg egyenlő, azaz:

$$\dot{m}'' \cdot A = C_f \cdot \dot{V} \quad (7)$$

ahol: \dot{m}'' - az égő anyag felületegységre vonatkoztatott tömegégési sebessége ($kg/s \cdot m^2$)

A - az égő anyag lángok által érintett felülete (m^2)

A (7) egyenletből kifejezve a füstkoncentrációt és (6) - ba helyettesítve:

$$\text{HDH} = \frac{\dot{m}'' \cdot A}{\dot{V} \cdot LC_{50}} \quad (8)$$

A tűz toxikusságának veszélye

Az egyenletből látható, hogy a tűz által keltett füst toxikus veszélyessége annál nagyobb, minél inkább hajlamos az anyag az égésre, minél nagyobb rajta a lángterjedési sebesség (következésképpen a lángokkal borított felület, A) és minél kisebb a szellőzések áram, valamint a füst káros hatást kiváltó koncentrációja.

A számításhoz szükséges adatokra a következő megfontolásokat alkalmazzuk:

1. Legyen $\alpha = 1$, hiszen a cél a különböző anyagok relatív veszélyességének megítélése, akkor pedig mindegyik anyag fajtára ugyanakkora, tetszőleges értékű szellőzési áramot választhatunk.
2. Az LC_{50} értékeként használhatók a különböző toxicitási vizsgálatok eredményei
3. \dot{m}'' pillanatnyi értéke a *Cone-kaloriméteres* vizsgálatokból közvetlenül nyerhető, de itt az átlagértékre ($\dot{m}''_{\text{átl}}$) van szükség, amelyet a következő egyenlettel definiálunk:

$$\dot{m}''_{\text{átl}} = \frac{m_{90} - m_{10}}{t_{90} - t_{10}} \quad (9)$$

ahol:

m_{90} - a teljes elégett tömeg 90%-ának megfelelő tömegvesztés (kg/m²)

m_{10} - a teljes elégett tömeg 10%-ának megfelelő tömegvesztés (kg/m²)

t_{90} - a 90% tömegvesztéshez tartozó idő (s)

t_{10} - a 10% tömegvesztéshez tartozó idő (s)

4. Az anyag lángokkal borított felülete (A) fordítottan arányos a (t_{gy} , szekundum) Cone kaloriméterben mérhető gyulladási idővel, azaz:

$$A \propto \frac{1}{t_{gy}} \quad (10)$$

Az előző megfontolások alapján a (9) egyenlet helyett egy közvetlenül használható formulát írhatunk fel, amely szerint a tűz toxikus veszélye (TTV) egyenesen arányos az anyag teljes égési időre vonatkoztatott átlagos égési sebességével, fordítottan arányos a gyulladás idejével és a keletkező füst toxikus hatást kiváltó koncentrációjával, azaz:

$$TTV \propto \frac{\dot{m}''_{\text{átl}}}{t_{gy} \cdot LC_{50}} \quad (11)$$

Ismételten hangsúlyozni kell, hogy az egyenlet két anyag *relatív toxikus veszélyességének* megítélésére szolgál, azaz amelyik anyagra nézve a TTV értéke nagyobb, az adott környezetben keletkező tűz esetén az abból származó füst toxikus

veszélyessége is nagyobb lesz. Természetesen nem alkalmas annak eldöntésére, hogy egy anyag az adott környezetben használva kielégít-e bizonyos biztonsági követelményeket, vagy sem.

Füstölgő tüzek

Abban az esetben, ha a bútor nem lánggal, hanem csak *füstölve ég*, akkor általában nem fejlődik annyi hő, hogy stabil felső réteg alakuljon ki. Ilyenkor a füst az egész helyiségben szétterjed, és közel homogénen tölti ki a teret. Az ember ilyenkor azt várná, hogy ha kétszer olyan gyorsan keletkezik a füst, vagy kétszer olyan toxikus, akkor az elviselhetetlen körülmények fele annyi idő alatt következnének be. A helyzet azonban az, hogy a kimenekítési idő nem olyan érzékeny az égési sebességre, illetve a füst toxikusságára.

Az olyan füstölgő tüzekre, amelyeknél a tömegégési sebesség állandó ($\dot{m} = \text{áll.}$), azaz a méretük idővel nem változik, a KRI megbecsülhető:

$$KRI = \left[\frac{2L(Ct)_{50} \cdot V}{\dot{m}} \right]^{1/2} - t_d \quad (12)$$

ahol: V - a helyiség térfogata,

t_d - a tűz észleléséig eltelt idő, az ún. detektálási idő

Az olyan tüzekre, amelyek időben lineárisan növekednek, azaz $\dot{m} = k \cdot t$, az összefüggés:

$$KRI = \left[\frac{6L(Ct)_{50} \cdot V}{k} \right]^{1/3} - t_d \quad (13)$$

Ez a tendencia folytatódik, azaz minél magasabb a tömegveszteség időfüggésének rendűsége, annál kevésbé érzékeny a KRI az $L(Ct)_{50}$ értékének megváltozására.

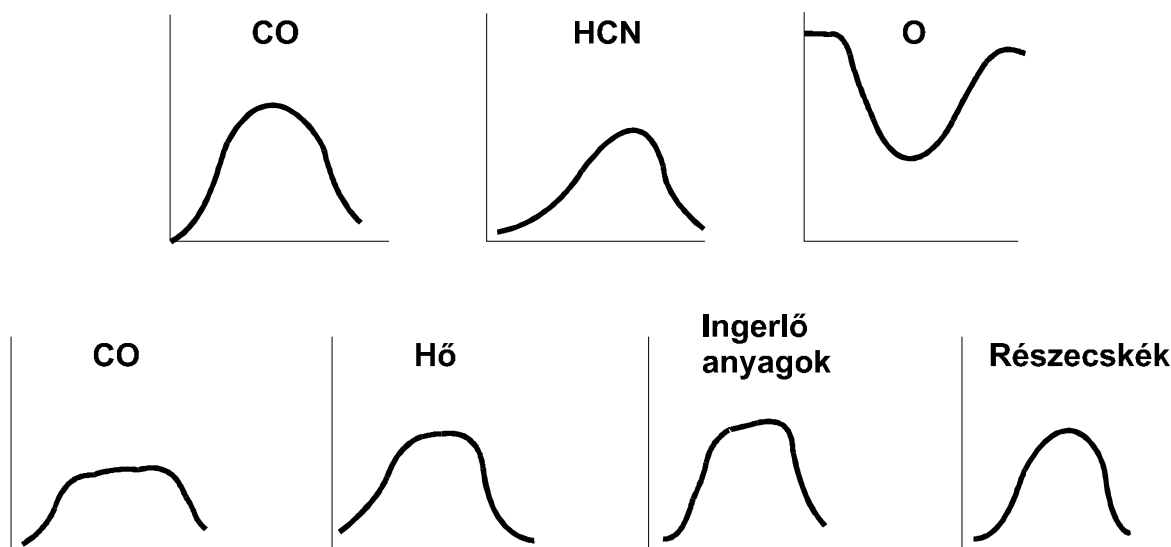
Több tárgy égésekor (amilyen általában a valóságos tűzhelyszín) mindig találhatunk ún. *elsőként meggyulladt* anyagot, amelyről a tűz továbbterjed. A sorrend majdnem mindegy, az egyik tárgyról a másikra a továbbterjedés ugyanolyan valószínű, mint fordítva. Azonban, ha egy szobában tűz keletkezett, nagyobb a valószínűsége annak, hogy éghető anyagok meggyulladnak a szomszédos szobában amiatt, hogy a tűz a falat melegíti, minthogy közvetlenül valami más tűzkeletkezési ok miatt gyulladnának meg. Ilyen esetekben, amikor a hőmérséklet a fal másik oldalán

megfelelően magas lesz, az éghető anyagok többsége elkezd bomlani. A gáz halmazállapotú bomlástermékek is hozzájárulnak a tér teljes toxicitásához.

A veszélyes koncentrációk változásai

A 3. ábrán a tűz életre veszélyes tényezőinek (azok „koncentrációinak”) időbeni alakulása látható. Az mindenesetre szembetűnő, hogy az oxigénkoncentrációnak akkor van minimuma (a t_f időpont környékén), amikor a legtöbb a toxikus anyag.

'Koncentráció' /idő profilok'



3. ábra A tűztermékek és az oxigén „koncentrációjának” időbeni alakulása

Irodalom: Dr. Beda László: Tűzmodellezés, tűzkockázat-elemzés, Fűfőiskolai jegyzet, tűzvédelmi mérnök szakos hallgatók számára, SZIE YMMFK, Budapest (2000)

Dr. Beda László intézetvezető
Szent István Egyetem, YMMFK, Tűzvédelmi és Biztonságtechnikai Intézet
Dr. Bukovics István főosztályvezető
BM OKF