

A járműtüzek vizsgálatához alkalmazható számítógépes szimulációk áttekintése

A járműiparban ma már elengedhetetlen a számítógépes szimulációk használata a tervezés és a gyártás teljes folyamatában. A szimulációk alkalmazásával jelentősen csökkenthetők a költségek, azonban ehhez elengedhetetlenek a pontos adatok, a megelőző mérések, amelyek megbízható eredményeket hoznak. A jelenleg is átalakuló járműiparban egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek a biztonságra, amelynek egyik szegmense a járművekkel kapcsolatos tüzeseteké, amelyek nagy biztonsági kockázatot jelentenek. A járműtüzek vizsgálatában segítséget nyújthat a tüzek szimulációja. Az elmúlt években sajnos csak kevés kutatás foglalkozott a tüzesetek modellezésével, a tűz terjedésének numerikus vizsgálatával, valamint a különböző szimulációs módszerek alkalmazhatóságával. Jelen tanulmány célja a már korábban publikált járműtüzesetek tűzszimulációinak esettanulmány-elemzése. A vizsgálat során több nemzetközi forrásból származó szimulációs eredményt hasonlítottunk össze, értékeltük a felhasznált bemeneti paramétereket, valamint a szimulációk gyakorlati alkalmazhatóságát. Az elemzés célja a különböző modellezési megközelítések erősségeinek és korlátainak feltárása, amelyek hozzájárulhatnak a tűzoltási stratégiák fejlesztéséhez és a járművek tűzbiztonságának növeléséhez.

Kulcsszavak: tűzbiztonság, FDS, járműtűz, tűzszimuláció

Bevezetés

Már az 1960-as években alkalmaztak numerikus módszereket a járművek dinamikájának teszteléséhez, amelyhez tartozott többek között a felfüggesztés, a lengéscsillapítás vagy az úttartás vizsgálata. A 60-as évek végére elterjedt a CAD (*computer-aided design*) kifejezés, azaz a számítógépes tervezés, amelynek matematikai alapjait a francia Renault egyik mérnöke fektette le (Bézier Award [é. n.]). Az 1980-as években már elterjedtek az ipari számítógépek, amelyek segítségével 3D rajzokat készíthettek (GINDIS 2012). Hamar felismerték, hogy a szoftveres térben akár szimulációk is lefuthatnak, és ezzel kiválthatják a valós vizsgálatokat.

A valós vizsgálatok helyett készített szimulációk alkalmazásával jelentős költségmegtakarítással fejleszthettek, tesztelhettek és validálhattak a gyártók.

A számítógépes szimulációk olyan folyamatok vizsgálatát is lehetővé tették, amelyek valós körülmények között nehezen vagy egyáltalán nem figyelhetők meg. Ilyenek például a töréskeresztek, az áramlástan, hőtechnikai és akusztikus vizsgálatok, valamint az extrém események, mint például a járműtűzek modellezése is. Ezek egy része a komfortérzetet növeli, hozzáad a jármű esztétikájához, de fontos szerepet játszanak a járművek biztonságos közlekedésében is.

A biztonságra már a kezdetek óta nagy hangsúlyt fektetnek a gyártók. Az Egyesült Államokban már 1968-ban szabványban rögzítették, hogy milyen tűzbiztonsági paramétereknek kell megfelelnie az üzemanyagtanknak ütközés után (49 CFR § 571.301 *Standard No. 301; Fuel system integrity*). A beltérbe épített anyagok vízszintes tűzterjedésének vizsgálatát pedig 1971-ben vezették be, és ez a szabvány a mai napig érvényben van kisebb módosításokkal (49 CFR § 571.302 *Standard No. 302; Flammability of Interior Materials*).

A járműtűzek vizsgálatában a következő mérföldkő az alternatív hajtásláncok megjelenése volt, ugyanis ezek új veszélyeket hordoznak magukban. Az új típusú energiaforrások, mint a népszerű lítiumion-akkumulátorok, más veszélyt jelentenek tűzbiztonsági szempontból, mint a hagyományos belső égésű motorral szerelt járművek. Emellett fejlesztik az üzemanyagcellákat, és korábban már elterjedtek a cseppfolyós gázzal üzemelő járművek is. A felsoroltakból látható, hogy milyen sokszínűek lehetnek a járművek a hajtástechnológia és az üzemanyagtípusok tekintetében.

Ezen okok miatt szükséges a járműtűzek alapos elemzése, akár kategóriákra lebontva. A tűz kialakulásának, fejlődésének és terjedésének vizsgálata komplex folyamat, ezek modellezése csak megbízható bemeneti adatok és megfelelően kiválasztott numerikus módszerek segítségével lehetséges. Ebben játszhatnak kulcsszerepet a számítógépes tűzszimulációk. A szimulációk használatával lehetőség adódik a különböző kockázatok azonosítására, valamint a tűzoltási és mentési eljárások optimalizálására.

Jelen tanulmány célja, hogy áttekintést adjon a számítógépes szimulációk járműtűzekkel kapcsolatos alkalmazásairól, különös tekintettel a járműmodellekre, az alkalmazott szoftveres megoldásokra, valamint a szimulációs eredmények megbízhatóságának kérdésére. Továbbá kiemelt figyelmet fordítunk arra, hogy a szimulációk miként járulhatnak hozzá a járműbiztonság növeléséhez, illetve hogyan segíthetik a mérnökök munkáját a megelőzés és a kárenyhítés területén.

A járműtüzek áttekintése

A járműtüzekkel kapcsolatos kutatások időszerűek, ugyanis a járművek biztonsága kiemelt figyelmet kapott az elmúlt évtizedekben. Már korábban is különböző meghajtású járművek közlekedtek a forgalomban, azonban a modern elektromos meghajtások megjelenésével még nagyobb kihívást jelentenek a járműtüzek. A járműveket érintő tüzek vizsgálatakor fontos meghatározni azok keletkezési okát, ugyanis a szimulációban is meg kell határozni a tűz forrását.

Meg kell különböztetni a szándékos és a nem szándékos eredetűt, ugyanis az utóbbi jóval gyakoribb. Az Egyesült Államokban a közúti járműtüzek mindössze 5%-a köthető gyújtogatáshoz (Highway Vehicle Fires [2014–2016] 2018), míg Magyarországon ez a szám még ennél is alacsonyabb (PAPP–KERSÁK 2023). A tűz keletkezési helyének és okának megállapítása a gyakorlatban sokszor kihívást jelent vagy egyáltalán nem lehetséges, mivel a tűz gyorsan terjed, így annak nyomai, bizonyítékai hamar megsemmisülhetnek. Gyakran előfordul, hogy a keletkezési ok ismeretlen marad. A tűz keletkezési helye azonban utalhat adott alkatrész vagy rendszer meghibásodására (KANYÓ 2018).

A leggyakoribb okok közé tartozik a hibás elektromos hajtásrendszer, az üzemanyag-ellátó rendszer, valamint a forró felületekkel érintkező gyúlékony anyagok. A benzin magas párolgási hajlama miatt különösen tűzveszélyes, míg a gázolaj kevésbé az. A benzin- és a gázolajüzemű járműveknél is jellemző probléma az üzemanyag-befecskendező rendszer meghibásodása.

A modern járművek alternatív hajtásláncai, mint az elektromos és hibrid rendszerek, újabb veszélyforrásokat jelentenek. Az átlagosnál (12–48 V) jóval magasabb feszültséggel (480–1200 V) működő rendszerek és lítiumion-akkumulátorok meghibásodása számos tüzesetet okozott már. Az elektromos járművek esetében a töltés közbeni kigyulladás gyakoribb, míg a hibrideknél a menet közbeni tüzek dominálnak.

Az akkumulátorral kapcsolatos tüzek kialakulhatnak túlmelegedés, rövidzárlat, fizikai sérülés vagy az akkumulátorfigyelő rendszer, azaz a BMS zavarai miatt. A kisebb részegységek, mint például az akkumulátor-előmelegítő meghibásodása, a sérült kábelrendszerekből származó szikrakisülések is okoztak már tüzeseteket.

A hagyományos hajtású járművek esetében a baleset következtében kifolyó üzemanyag vagy kenőanyag meggyulladhat, különösen ha forró felülettel vagy elektromos szikrával érintkezik. A segédanyag-tartályok gyakran a motortérben, az ütközési zónákhoz közel helyezkednek el, így könnyen sérülhetnek. Az autóbusz- és tehergépjármű-tüzek fő okai között az elektromos meghibásodások, a fékrendszer

túlmelegedése és a motortéri alkatrészek hibái szerepelnek. A futómű környezetében keletkező tüzek gyakran a szoruló fékek hőhatására vezethetők vissza. Ez jellemző személygépjárműveknél is, mind a hagyományos, mind az elektromos meghajtásoknál (KUTI 2019; SZABÓ–MOLNÁR–NAGY 2018; TÓTH 1984).

Módszerek

A kutatás módszertana kvalitatív esettanulmány-elemzésre épül. A vizsgálat során korábban már publikált járműtüzesetek számítógépes szimulációit elemeztük és hasonlítottuk össze. Az elemzés alapját több, nemzetközi szakirodalomból származó szimulációs tanulmány képezte, amelyek különböző modellezési megközelítéseket alkalmaztak. A módszertani lépések a következők voltak. Kiválasztottuk a forrásokat: releváns, lektorált beszámolókat kerestünk az elmúlt évekből, amelyek járműtüzek tűzterjedésének számítógépes modellezését mutatják be. Ezt követően az adatgyűjtés, a tanulmányokban közölt bemeneti paraméterek (anyagjellemzők, környezeti feltételek, tűzkeletkezési módok, geometriák) rendszerezése következett. Összehasonlító elemzést végeztünk a modellezési módszerek, a szimulációk lefutásának ideje, valamint az alkalmazott anyagbeállítások tekintetében. Nem hagytuk ki az alkalmazhatósági vizsgálatot sem, mivel az általunk vizsgált szimulációk gyakorlati hasznosíthatóságát értékeltük a hasonló területen szerzett tapasztalataink alapján. A fent leírt módszertani megközelítés lehetővé tette a különböző eseményekhez kapcsolódó szimulációs módszerek erősségeinek és korlátainak azonosítását, valamint a jövőbeni kutatások pontosítását.

A szimulációs szoftverek bemutatása

A tűzvizsgálathoz felhasználható szoftverek bemutatásához szükséges áttekinteni a szimulációs szoftverek működését. Az előzőkben már említettük, hogy a szimulációkat régóta alkalmazzák a hő- és áramlástani vizsgálatokhoz. A szimuláció úgynevezett az CFD (*computational fluid dynamics*), azaz számításon alapuló áramlástani modellező szoftverek segítségével történik.

Az ezeknek a háttérében álló fizikai folyamatokat numerikus módszerekkel írják le úgy, hogy a teret apró cellákra, úgynevezett rácshálókra osztják, és ezekben végzik el a különböző fizikai jellemzők számítását az idő előrehaladtával. Ez a számítási folyamat alkalmas a tüzek szimulációjára is, bemutatható általa a tűz

kialakulása, terjedése, az égési folyamat, a hőátadás, a füstterjedés, valamint a levegő és a hő áramlása zárt vagy nyitott térben.

Az elérhető irodalomban legtöbbször az FDS (*Fire Dynamics Simulator*) program szerepel, amely tudományos alapokon validált modelljeivel alkalmas kutatási és mérnöki célokra is. Ezenkívül létezik még egyéb CFD-alapú modellező szoftver is, de az összehasonlíthatóság érdekében a továbbiakban az FDS programot mutatjuk be részletesen.

Az FDS programot az Amerikai Egyesült Államokban fejlesztették ki, nyílt forráskódú és ingyenesen letölthető. Belső és külső terekben lejátszódó tüzek numerikus szimulációjára alkalmas. A fő alkalmazási területek a következők: az épülettüzek, az alagutak és a zárt terek, a füst- és hőterhelés vizsgálata, valamint a tűzoltási rendszerek hatékonyságának vizsgálata és a járműtüzek. Az FDS a Navier–Stokes-egyenletek egyszerűsített alakját alkalmazza a számításokhoz, amelyet alacsony sebességű ($Ma < 0,3$),¹ termikusan vezérelt áramlásra, különös tekintettel a tűzből származó füst- és hőtranszportra alkalmaznak. A nyomás felírásakor megkülönböztetik a hidrosztatikus alapkompontent (p_0) és a kisebb mértékű, áramlási hatásokból eredő perturbációt (p'), ezáltal az akusztikus hullámok számítását mellőzik, a sebességmező divergenciáját pedig a közelítéshez illeszkedő feltétellel biztosítják. A sűrűségváltozás nem a nyomásból, hanem főként a hőmérséklet-változásból és az égés során keletkező gázok, azaz az égéstermékek és a még nem elégett éghető anyagok helyi koncentrációváltozásából adódik. Ez lehetővé teszi az akusztikus hullámok figyelmen kívül hagyását és a numerikus stabilitás növelését, miközben a modell a hő- és égéstermék-transzport pontos szimulációját biztosítja.

Az impulzus- és tömegmegmaradás alapegyenletei (1) és (2) összenyomhatatlan, homogén folyadék esetén:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -(u \times \nabla)u - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u + F \quad (1)$$

$$\nabla \times u = 0 \quad (2)$$

ahol ρ a sűrűség (kg/m^3), ν a kinematikai viszkozitás (m^2/s), F pedig a térfogategységre ható külső erők (például gravitáció). Az első egyenlet az impulzusmegmaradást, a második a kontinuitást (összenyomhatatlansági feltétel) fejezi ki.

¹ Mach-szám: dimenziómentes mennyiség, egy objektum haladási sebességének (vagy az áramló közeg áramlási sebességének) és az áramló közeg (folyadék vagy gáz) helyi hangsebességének hányadosa. Bármely áramlás összenyomhatatlannak tekinthető, ha a Mach-száma kisebb, mint 0,3.

A modelltér térfogatelemekre van bontva, és az egyes cellákban számítja ki a fizikai jellemzőket.

A kimeneti adatokat tekintve a következőket jeleníti meg a program: hőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$), füstkoncentráció, CO/CO_2 szintek, nyomásviszonyok, a láng magassága, hőáram, hőfelszabadulási ráta (*heat release rate*, HRRP) és fajlagos hőfelszabadulási ráta felületre vetítve (*heat release rate per unit area*, HRRPUA). Továbbá az anyagok hőterhelése és gyulladási hőmérséklete is monitorozható. A fajlagos hőfelszabadulási ráta felületre vetítve (HRRPUA) az adott égő felület egységére eső hőenergia leadási sebességét jelenti, és a (3) egyenlet szerint számítható:

$$\text{HRRPUA} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (3)$$

ahol $\dot{Q}$ a teljes hőfelszabadulási ráta (W), A pedig az égő felület nagysága (m^2).

A szoftverhez tartozik grafikus segédprogram is, az úgynevezett Smokeview és PyroSim is, amely az FDS kimeneteit vizualizálja a könnyebb megértés érdekében. Megjeleníthetők füstterjedés- és lángterjedés-animációk, hőmérsékleti mezők és nyomáseloszlások is (Fire Dynamics Simulator [FDS] and Smokeview [SMV] [é. n.]).

Járművekkel kapcsolatos tűzszimulációk

A legfrissebb, elérhető szakirodalmak többsége a járműtüzekkel kapcsolatos szimulációkkal úgy foglalkozik, hogy a zárt terekben, általában parkolóokban keletkező, terjedő tüzet szimulálják. Ebben a fejezetben az elmúlt évek releváns írásai közül azokat tekintjük át, amelyekben a jármű modellje kulcsfontosságú volt a szimuláció lefuttatásához.

Teljesítményalapú tűzbiztonsági elemzés elektromos járművek esetében

Brzezińska és Bryant tanulmányában bemutatja az elektromos járművek okozta tűzkockázat fő szempontjait, megosztja a valós tűzkísérletek tapasztalatait és a teljesítményen alapuló (*performance-based*) módszereket a parkolóban történő tűzbiztonsági elemzésekhez (BRZEZINSKA–BRYANT 2022). Az írás elején említést tesznek a hibrid és elektromos meghajtású járművek okozta kockázatokról.

Az elektromos és hibrid járművekben leggyakrabban lítiumion-akkumulátorok szolgáltatják az energiát, amelyek a szerzők szerint főként a termikus megfutás miatt jelentenek tűzbiztonsági kockázatot. Ez különösen gyakori baleset bekövetkeztekor vagy az akkumulátor meghibásodása esetén. Az akkumulátorok nemcsak a tűz kiindulási pontjai, hanem fő üzemanyagként is szolgálnak az égéshez. Ez alapján megállapítható, hogy minél nagyobb az akkumulátor kapacitása, annál nagyobb a kockázat (MIECHÓWKA–WĘGRZYŃSKI 2025).

A föld alatti mélygarázsokban az alacsony belmagasság és az elektromos töltőállomások növelik a tűz terjedésének veszélyét, ezért teljesítményalapú tűzbiztonsági elemzésekre és megfelelő tervezésre van szükség a veszélyek csökkentésére. A teljesítményalapú tűzbiztonsági tervezés olyan mérnöki megközelítés, amelyben meghatározzák az elérni kívánt tűzbiztonsági célokat, az előforduló tűzscenáriókat, majd elemzik azokat, felvetik a tervezési alternatívákat adott helyre vonatkozóan, és így azok kvantitív módon értékelhetővé válnak (BADONSKKI–BÉRCZI 2023).

Ezt az 1970-es években vezették be, majd a 2001-ben elkészült brit BS 7974 (BS 7974:2019. *Application of Fire Safety Engineering Principles to the Design of Buildings* 2019) szabvány adott részletes keretet a tervezőknek, hogy egységesen, összehasonlítható módon alakítsák ki a tűzbiztonsági rendszereket. A szabványhoz készültek kiegészítésként azok az irányelvek, amelyek a következőket fedik le: a tűz fejlődésének leírása, a füst és a toxikus gázok határértékei, tűzérzékelés, beavatkozás, evakuáció, kockázatértékelés és vagyonvédelem.

Ennek természetesen magyar vonatkozása is van, az OTSZ (Országos Tűzvédelmi Szabályzat) és az MSZ EN 1991-1-2 (Magyar Szabványügyi Testület) tartalmazza az építmények tűzvédelmi követelményeit és foglalkozik a tűzterheléssel, a hőhatásokkal és a szerkezet ezekkel szembeni viselkedésének modellezésével, amely a teljesítményalapú tervezés egyik pillére.

A Brzezińska-féle publikációban egy parkoló tűzbiztonsági értékeléséhez készítettek CFD-alapú szimulációt az általunk előzőleg bemutatott FDS nevű programban. A szimuláció elkészítéséhez szükséges a bemeneti, kezdeti feltételeket meghatározni. A szerzők megadták a levegő paramétereit: a hőmérsékletet és a nyomást. Az épületszerkezet anyaga beton, így az ehhez tartozó főbb fizikai-kémiai tulajdonságokat is betáplálhatták a programba. Éghető anyagként még megemlíti a polisztirol és a fa keverékét mint gyakori beltérben alkalmazott éghető anyagokét. A számításokhoz 0,3 m felbontású rácshálót alkalmaznak mindhárom térbeli irányban. A tűz terjedését szabványos számítással adják meg.

Az általuk elkészített szimuláció egy elektromos járműben bekövetkezett tűz esetét mutatja be egy mélygarázsban. A tűz az elektromos autók számára kijelölt

helyen, a garázs középső részén keletkezett, a friss levegő beáramlását a főkapu biztosította. A garázsban volt füstelszívó rendszer, ez a mennyezet alá szerelt csatornákból állt. A hőmérséklet-eloszlást és a látótávolságot a padlótól számított 1,8 m magasságig modellezték az FDS szoftverrel.

A korábban bemutatott BS 7974 számú szabvány szerint a meneküléshez megengedett legnagyobb hőmérséklet 52 °C lehet, a látótávolság pedig 10 m sötét helyeken és 30 m megvilágított vészkijáratoknál. A szimuláció alapján a tűz keletkezésétől számított 80 másodpercen belül megtörténik a riasztás, a füst átmérője ebben a pillanatban már meghaladja a 20 m-t, ezért legalább két füst-érzékelő működésbe lép.

A 300. másodpercig megtörténhet a kimenekülés, de ezután a látótávolság 1,8 m magasságban 10 m alá csökken, ami nem felel meg az evakuáláshoz szükséges feltételeknek. A 480. másodpercre a tűzoltók megérkeznek, de ekkor még a hőmérséklet nem haladja meg az 52 °C -os határértéket. További fontos érték az úgynevezett hőfelszabadulási ráta, amelyet 1:1 arányú tűzkísérletből származó adatok hiányában 7,0 MW-ra becsültek. A jármű teljes kiegészéhez 16–18 perc kellett (BRZEZINSKA–BRYANT 2022).

Összegezve a szimuláció azt mutatja, hogy az elektromos autótűz nem jelent közvetlen veszélyt a bent tartózkodókra a kimenekítés ideje alatt, és a tűzoltás is időben elkezdhető. A tanulmány jól szemlélteti, hogyan romlanak a menekülési feltételek a hőmérséklet emelkedésével és a látótávolság csökkenésével, lehetővé teszi az evakuáció és a tűzoltás körülményeinek előzetes felmérését.

Bár a teljesítményalapú módszereket régóta alkalmazzák, még mindig előfordulhatnak hiányzó értékek és ellentmondásos eredmények. Az egyik legvitatottabb kérdés az elektromos járműtűzek hőfelszabadulási rátája (HRR) és annak növekedése, amelyet ebben a tanulmányban is csak becsléssel tudtak megadni. Véleményünk szerint a 7,0 MW érték elég magasnak számít, a valós 1:1 arányú tűzkísérleteket bemutató irodalmak a jármű égésekor felszabaduló hő értékét 3–5 MW közé teszik (TERZIEV 2019; JIANG et al. 2018).

Ennek az értéknek a pontos meghatározása csak a tűzkísérletekre támaszkodva, pontos anyagmeghatározások után lehetséges. Sajnos a valós tűzkísérletek rendkívül költségesek, és megbízható következtetéseket sorozatmérésből lehet levonni, így jelenleg akkumulátorteszteken és számításokon alapuló feltételezésekből indulhatunk ki a teljesítményalapú elemzések során.

A Tesla Model S elektromos autó tűzesetének szimulációja

Gavryliuk és szerzőtársai az FDS segítségével modellezték egy Tesla Model S elektromos autó tűzesetét egy parkolóépületben, hogy meghatározhassák a biztonságos védőtávolságot az autó és az épületszerkezet között (GAVRYLIUK et al. 2023). Ebben a kutatásban is az épületbiztonságot tartják szem előtt, ám már sokkal nagyobb szerepet kap a jármű modellje a szimuláció során.

A tanulmány célja, hogy a szimulációval meghatározzák azokat a főbb hődinamikai jellemzőket, mint például a hőáram, a hőmérséklet-eloszlás és a tűzterjedés, amelyek EV-tűz esetén jelentkeznek. Az elért eredmények azért fontosak, mert segítséget nyújtanak a töltőállomások és a parkolók kialakításának és tűzvédelmi rendszerének fejlesztéséhez.

Itt is ki kell emelnünk, hogy sok kutatás foglalkozik a lítiumion-akkumulátorokkal kapcsolatos tüzekkel, azonban a legtöbb az akkumulátorokat csak különálló elemként vizsgálja. Ezek a kutatások kulcsfontosságúak a bemeneti adatok szempontjából, azonban nélkülözik a rendszerszintű vizsgálat pontosságát.

A szerzők részletesen összefoglalják a témában eddig elért eredményeket. Az elektromos járműtüzek jellemzői jelentősen eltérnek a belső égésű motorral szerelt járművekétől, a legfőbb éghető anyag az akkumulátor. A lítiumion-akkumulátorok fajlagos égéshője rendkívül magas, amelyet a nagy energiasűrűség és a termikus megfutás veszélye tovább fokoz. Az EV-tüzekkel kapcsolatos kutatások sajnos még mindig nem olyan mélységűek, mint az egyedi akkumulátorokkal kapcsolatos tüzek vizsgálata – tehát további rendszerszintű kutatások szükségesek.

A szerzők szabadon fejlődő égést feltételeznek, így a szimulációt 720 másodpercig futtatják. Ez az időhossz a beavatkozó egységek helyszínre érkezési idejéből (600 s) és a feltételezett beavatkozás-előkészítési időből (120 s) tevődik össze. A járműmodell alapját a Tesla Model S elektromos járműve szolgáltatja, amely a jelenleg elérhető legnagyobb kapacitású (104 kWh) személygépkocsiba szerelt hajtóakkumulátorral rendelkezik. A valós jármű méreteit ($4976 \times 1963 \times 1435$ mm) és tömegét (2100 kg) használják.

Az akkumulátor tekintetében az égési folyamatok paraméterezése az akkumulátoranyagok reakcióhője alapján kellően pontos eredményeket szolgáltat, különösen a hőmérséklet modellezéséhez. Megállapították a szakirodalom áttekintése után, hogy a lítiumion-akkumulátorokkal végzett kísérletek eredményei szerint az égés során a hőmérséklet 850–1020 °C között mozog, és a teljes leégéshez legalább 70 perc szükséges. A legmagasabb hőfelszabadulási ráta a

10–22 perc közötti időszakban figyelhető meg, ezt célszerű figyelembe venni a modell paraméterezése során.

Továbbá meghatározták a járműben található éghető anyagokat és az azokhoz tartozó éghőértékeket is. Az alábbiakat sorakoztatták fel tömeggel együtt: gumi: 118,4 kg; kenőanyagok: 8,4 kg; polimerek: 49,7 kg; poliuretán hab: 32,6 kg; cellulóztermékek: 6,1 kg; valamint műbőr: 14,2 kg.

Mint már azt említettük, a járművet egy parkolóépületben helyezték el, így a modellezett tér fizikai határolóelemeként egy téglafalat adtak meg, amelynek tulajdonságai a következők: sűrűség: 1950 kg/m^3 ; fajhő: $1,04 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$; sugárzási tényező: 0,9; elnyelési együttható: 0,65 1/m.

Ebben a kutatásban a fájlagos hőfelszabadulási teljesítmény maximális értékét 5200 kW/m^2 -ben állapították meg, míg a lángterjedés vonalmenti sebessége $0,21 \text{ m/s}$ lett. Összehasonlításként megemlítjük, hogy a hagyományos fenyőből készült fa hőleadása körülbelül $250\text{--}400 \text{ kW/m}^2$ – tehát a megállapított érték beláthatóan magas.

Ebben a szimulációban az égés zavartalanul, külső beavatkozás nélkül fejlődik a szimuláció teljes időtartama alatt (720 s). A járműszerkezetet alkotó anyagok közül a legkisebb öngyulladási hőmérséklettel rendelkező anyagot vették figyelembe kritikus gyulladási hőmérsékletként, amely jelen esetben $160 \text{ }^\circ\text{C}$ a szintetikus szövetek esetén.

A környezeti paraméterek beállításakor és a kezdeti peremfeltételek megadásakor a láng hőmérsékletét homogénnek tekintették az égő felület teljes területén. A szomszédos objektumoknak $20 \text{ }^\circ\text{C}$ kezdeti hőmérsékletet adtak meg. A szimulációban a hőhatás kizárólag sugárzással történik, a konvektív hőátadás elhanyagolható.

A tűz keletkezési pontjának meghatározásához és a fejlődés lehetséges becsléséhez a szerzők figyelembe vették, hogy az elektromos járművekben bekövetkező tüzek leggyakoribb oka a rövidzárlat, amely a kábelek gyulladásához vezet. Az akkumulátor termikus megfutása miatt az önkioltás jelensége nem figyelhető meg (PAPP 2024). Ezért fontos kiemelni, hogy a szimulációban a tűz az égő járműből indul ki – az égés feltételezett okát előzetesen meghatározták, de ezt részletesen nem modellezik. A szimuláció célja az volt, hogy onnantól vizsgálja a tűz viselkedését, hogy az már kialakult. A szél hatásait sem tartalmazza a modell, mivel az csökkentené a hőáram egyenletességét, valamint a lángmagasságot is mérsékli.

Ebben a cikkben az előzőhöz képest sokkal alacsonyabb volt a hőfelszabadulási ráta, ez körülbelül 3 MW volt. Az első írásban is megemlítik, hogy más forrásokban a hagyományos, belső égésű motorral meghajtott jármű tüzesetekor ez az érték $4\text{--}5 \text{ MW}$ között volt (BRZEZINSKA–BRYANT 2022). Az aktuális cikk

ezt az értéket 3–5 MW-ban állapította meg, tehát a forráselemzés mindkét cikk tekintetében azonos eredményeket hozott.

Összevetve az eddigiekben tárgyalt két cikket, megállapítottuk, hogy a hőfelszabadulási ráta értékei kis különbséget mutatnak. Elmondható, hogy a második kutatásban az anyagmeghatározások pontosan szerepelnek, ezzel segítve más kutatók munkáját a reprodukálhatóság és az összehasonlíthatóság érdekében.

Egyszerűsített járműmodell tűzszimulációja

A továbbiakban szlovák kutatók munkáját foglaljuk össze. Halada és szerzőtársai 2011-ben végzett kutatása azért jelentős, mert egyszerűsített járműmodell tűzszimulációját készítették el. Az elvégzett munka értékét tovább fokozza, hogy azóta is csak kevés olyan írás érhető el, amelyben a teljes jármű viselkedését figyelik meg a szimuláció során.

Ennek feltehetőleg az az oka, hogy az autótűz viselkedésének követéséhez szükséges paraméterek megadása valós tűzkísérletből származó adatokat igényelne, továbbá a bonyolult járműmodell elkészítése, szimulációs szoftverbe ültetése még manapság is óriási számítási kapacitást igényel. A különböző értékek követése, megjelenítése jelenleg is szuperszámítógépek bevonásával lehetséges, azok használata pedig sajnos költséges.

Mint azt korábban is említettük, az épülettervezés egyik fontos szegmense a tűzbiztonság, így általában a járművek a szimulációban csak kiindulópontként kapnak szerepet, és az épület szerkezetében történő változásokat, a keletkező károkat figyelik meg. Ez lényegesen egyszerűbb, mint a nem leegyszerűsített járműmodell és az épület modelljének együttes nyomon követése a tűz során.

Ezt a kutatást 2011-ben végezték, de már akkor az FDS szimulációs programot használták. A cikk tartalmazza egy belső égésű motorral szerelt Audi 80 motortérből kiinduló tüzesetének FDS-szimulációját. A motortéri tűz szimulációja rendkívül összetett feladat, mivel bonyolult geometriákat tartalmaz, és ott több, különféle égési tulajdonsággal rendelkező beépített anyag található (például műanyag, gumi, papír, fém).

Ebben a kutatásban a bemeneti geometriát 3D szkenneléssel és közvetlen mérésekkel állították össze, a gumicsöveket például vékony vonalakkal modellezték a felület/térfogat arány megtartásával. Tehát a lehető legtöbb egyszerűsítést alkalmazták, hogy a szimuláció ne lépje túl az elérhető számítási kapacitást, mégis maradjanak részletezett elemek.

A tűz kezdetét egy 4×4 cm-es már égő felület jelképezte, amelynek hőleadása 2,1 kW volt és 60 másodpercig tartott. Tehát ebben a munkában már volt úgynevezett gyújtóforrás, míg a többiben már az eleve égő járművet figyelték.

A szimulációs tartomány két részre oszlott, 1 cm-es és 2 cm-es rácsfelbontással készült hálóra, 720 másodpercig tartó (12 perc) tűz modellezéséhez. A rácsáló finomsága alapvetően meghatározza a szimuláció pontosságát, erőforrásigényt és megbízhatóságát. Az első kutatásban 0,3 méteres durva hálót használtak. Az 1–2 cm-es rácsfelbontás sokkal finomabb geometriák, vékony elemek, például kábelek, burkolatok modellezését teszi lehetővé.

A teljes jármű vagy nagyobb tér modellezése ilyen rácsmérettel gyakorlatilag kivitelezhetetlen lehet idő vagy erőforrásszűkében, és a numerikus instabilitás esélye is nőhet, ha a rácsáló túl finom. Mindezt figyelembe véve a durvább (0,3 m) hálóméret alkalmas nagy léptékű, általános hőterjedési vizsgálatokhoz, például az említett parkolóban, de sajnos nem kellően pontos.

Az akkori számítástechnikai fejlettséget tekintve a rácsfelbontás miatt a szimulációt a kutatók nem tudták külső források bevonása nélkül elvégezni. Az anyagtulajdonságokat részben mérésekből, részben becslésekből határozták meg, és a szimulációt valós kísérlettel is összevetették.

Megjegyeznénk, hogy a valós kísérletet és a szimulációval való összehasonlítást nem mutatják be az írásban, csupán a hőmérsékleti diagramok kerültek be. A diagramok tanulmányozása után leolvasható, hogy a szimuláció során a motortérben mért legmagasabb hőmérséklet körülbelül $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ körül alakul, a motorháztetőn mért érték körülbelül $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, míg a valóságban ez az érték körülbelül $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. A motor hőmérséklete azonos, és nagyjából a valóságban és a szimulációban is a 400. másodpercre éri ezt el. Ez megegyezik az elérhető irodalmakban szereplő értékekkel.

A szerzők három különböző tüzesetet modelleztek az FDS segítségével: az első esetben a tűz áterjed egy égő autóról egy 60 cm-re parkoló másik autóra, a második esetben a jármű belterében keletkezik tűz (utas- vagy csomagtér), a harmadik esetben alagútban bekövetkező járműtűz modelljét láthatjuk. Az első esetben két azonos típusú autó szerepelt, a szimuláció bemeneti paramétereiről sajnos csekély adatot közölnek. Az alagútmodellről tudható, hogy $10 \times 180 \times 7$ m volt a mérete, ahol egy $2 \times 3 \times 0,1$ m éghető blokkot gyújtottak meg, maximum 1000 kW hőleadással, míg a beépített ventilátorok sebessége fokozatosan nőtt 5-ről 20 m/s-ra. A szimulációban hat hőmérséklet-érzékelőt alkalmaztak különböző pontokon, hogy vizsgálják az áramlás és a hőterjedés alakulását.

Sajnálatos módon a cikkben nem részletezik az eredményeket, számszerűen nincsenek a szövegben megemlítve, csupán a füst mozgását mutatják be képi

formában a 80. másodpercben az alagútban. A bemutatott szimulációk bemeneti paramétereinek hiányában és a részletes eredmények közlése nélkül a kutatás nehezen hasonlítható össze más szerzők munkáival, továbbá kérdéses, hogy az eredmények a valóságban lejátszódó folyamatokhoz hogyan viszonyulnak (HALADA et al. 2011).

Elektromos jármű tüzesete ingázó kompon

Végezetül Pitana és szerzőtársai tanulmányát elemezzük, amely egy ingázó kompon bekövetkező tüzeset szimulációját tartalmazza, a tűz pedig egy elektromos járműből ered (PITANA et al. 2025). A cikk által bemutatni kívánt tudományos probléma, hogy a kompok tűzoltó rendszere jelenleg nincs tesztelés alatt lítiumion-akkumulátorral kapcsolatos tűz esetén.

Mivel világ szinten megnövekedett az elektromos járművek száma, és ezzel együtt a bekövetkezett elektromos járműtüzek is, releváns ennek a témának a vizsgálata. Azért választottuk ezt a munkát elemzésre, mert bár itt sem a jármű tűzbéli viselkedése kapta a kulcsszerepet a szimulációban, mégis részletes bemeneti paramétereket adtak meg, és a modell is jól kidolgozott, egyszerűsítve, de nem más tételelemmel helyettesítve illesztették be az FDS-programba.

A kutatók a hajó fedélzetének csak azt a részét vizsgálták, ahová az elektromos meghajtású személygépjárművekkel parkolhatnak az utasok. A szimuláció alapjául egy 170 méter hosszú, 11 931 tonnás Ro-Ro (*roll on – roll off*) komp szolgál, amely több száz utas és jármű szállítására alkalmas. A modell az egész hajót lefedi, de korlátozott anyagkészlettel dolgozik, és 1,5 méteres rácshálóval futtatták a szimulációt. Ez a hálóméret az eddig bemutatott méreteknél jelentősen nagyobb, a komp méreteit tekintve a sűrűbb hálóméret számítási problémákat okozna, de pontosabb eredményeket adna. Mivel az elektromos járművek kompon történő elhelyezésére nincs külön szabály, azok pontos helyét a kompon meghatározni nem lehet. A szerzők így két külön forgatókönyv szerint futtattak szimulációt, az oltásra vízköddel és CO₂-vel működő oltórendszert integráltak. A szimuláció célja, hogy meghatározható legyen, elegendő-e a meglévő tűzoltó rendszer az akkumulátortüzek eloltására.

A szimuláció során figyelembe veszik a *sprinkler* rendszer aktiválódásának időpontját, az oltás időtartamát, valamint a füst terjedését és a szellőztetőrendszer hatékonyságát. Az elektromos járművek anyagösszetételét is számításba veszik, tömegarányokat definiálnak. Lítium, acél, alumínium, műanyag, üveg

és gumi került a bemeneti paraméterek közé, amelyeket rendre 0,64, 57,9, 14, 8, 5, és 2%-ban adtak meg a jármű tömegéhez képest. A modellezett jármű tömege azonban nem szerepel pontosan a tanulmányban, csak a befoglaló mérete, amely $5 \times 2 \times 2$ m. Ez egy átlagos személyautó méretének felel meg, így a tömeget körülbelül 1500 kg-ra becsüljük.

Az előbb említett két szimulációs forgatókönyvből az elsőben az autót egy egyszerű térelem, téglatest helyettesítette a szimulációban, a másodikban pedig már részletesebb modellt használtak, egyszerűsítve mutatja be az autó formáját, de már pontosabban tükrözi a valós hőfelszabadulási értékeket. Megállapítható, hogy a túlzott egyszerűsítések a szimulációs értékeket nagyban befolyásolják. A szimulációs paraméterek alapjául Kang és szerzőtársai kísérleti eredményei szolgáltak, akik megállapították, hogy az elektromos járművek tüzeinél a hőfelszabadulás legnagyobb részét a jármű karosszériájának hagyományos anyagai okozzák, és a hőfelszabadulás 7,81 MW. A szimuláció időtartama jóval hosszabb, mint az előzőkben, 1500 másodperc (KANG et al. 2023).

Az első szimuláció lefutasakor a tűz 200 másodpercnél kezdett gyors növekedésbe. A hőfelszabadulási ráta rendkívül magas, 10 MW, ezt követően pedig 6000–9500 kW között ingadozott a szimuláció végéig. Ez az érték meghaladja a tanulmányban hivatkozott cikkek (KANG et al. 2023; HYNINEN et al. 2023) által bemutatott értékeket és az általunk feldolgozott irodalmak eredményeit is. Az oltórendszer hatékonyságát tekintve az eredmények alapján elmondható, hogy a hőmérséklet nem csökkent számottevően 9 *sprinkler* működésbe lépésével sem. A levegő maximális hőmérséklete elérte a 148 °C-ot 200 másodpercnél, majd 80–140 °C között mozgott. A jármű alatt elhelyezett szenzor ennél sokkal magasabb, 800 °C-os értéket mért, ez a korábbi kutatások által bemutatott értékkel nagyjából megegyezik a jármű közelében. A füst gyorsan terjedt, már az első perc végére betöltötte a teljes vizsgált fedélzetet, és átterjedt a szomszédosra is. Ez a gyors terjedés jelentős kockázatot jelent más járművek és a fedélzet tekintetében.

A második forgatókönyvben a szimuláció csak 576 másodpercig tartott, a hálóméret 1,5 méter volt. A járművet zárt térben helyezték el a fedélzeten. A hőfelszabadulási ráta 2500 kW csúcserőértéket vett fel 380 másodpercnél, majd lecsökkent 250 kW-ra, később pedig újra visszaemelkedett 2000 kW-ra. Ez a csökkenés a *sprinkler* rendszer működésének tudható be (8 aktiválódott). A tüzet nem sikerült teljesen eloltani, ennek ellenére nem terjedt tovább más járművekre. Véleményünk szerint ennek az oka, hogy a járművet zárt térbe helyezték a szimulációs programban. A jármű tetején elhelyezett szenzor 280 °C-ot mért 550 másodpercnél, 400 másodpercnél pedig rövid időre 70 °C-ra csökkent a hőmérséklet.

A jármű alján mért hőmérséklet 130 °C körül alakult az 500–576. másodperc között, amely lényegesen alacsonyabb, mint az 1. forgatókönyvben. A zárt tér miatt a füst nem tudott terjedni.

A két forgatókönyv közötti különbségek rávilágítanak arra, hogy a jelenlegi vízalapú *sprinkler* rendszerek önmagukban nem elegendők az elektromos járművek tűzének hatékony eloltásához. A zárt terek kialakítása jó tűzvédelmi megoldást jelenthet a közlekedő kompok tervezésekor, mivel jelentősen javíthatják az oltás hatékonyságát és a füst visszaszorítását.

Ha a kompok szerkezetét megvizsgáljuk, láthatjuk, hogy javarészt acélból készülnek. Ennek olvadáspontja 1425–1540 °C körül alakul, így a szimulációkban tapasztalt legmagasabb, 800 °C-os hőmérséklet alapján a hajószerkezet nem károsodik jelentős mértékben (PITANA et al. 2025). Azonban a tartósan magas hőmérséklet az anyagban gyengülést, deformációt okozhat, illetve az esetleges műanyag vagy faburkolatok az égést táplálják. Továbbá számolni kell azzal is, hogy a különböző beépített anyagok és felületbevonatok égése során egészség- és környezetkárosító anyagok kerülnek a levegőbe, ezzel rontva a menekülési esélyeket. A tűzbiztonsági kérdések mellett foglalkozni kell az emberi szervezetre és a természeti környezetre gyakorolt káros hatásokkal is, ugyanis bizonyos esetekben ezeknek súlyosabb hatásai lehetnek, mint magának a tűznek (BEREK–FÖLDI–PADÁNYI 2020).

A bemutatott szimulációk rávilágítanak arra, hogy a teljesítményalapú tűzbiztonsági tervezés egyre fontosabb szerepet tölt be, főleg az elektromos járművek megjelenése óta. A bemutatott tanulmányok azt igazolják, hogy érdemes a jármű modelljét részleteibe menően kidolgozni a szimuláció elkészítése során, mert sokkal pontosabb és reális eredmények érhetők el, akár az épülettervezés, a kimenekíthetőség szempontjából.

Ugyanakkor az is jól látható, hogy a valós kísérleti adatok hiánya továbbra is bizonytalanságot jelent a modellek paraméterezésében. A következő évek kutatásaiban érdemes a valós kísérletek eredményeinek felhasználásával pontosítani a szimulációkat.

Saját tapasztalatok

A jármű tűzszimulációjának elkészítéséhez jól felépített modellre és pontos bemeneti adatokra van szükség. A bemeneti adatok nagy része a járműbe épített anyagok éghetőségi tulajdonságaiból tevődik össze. Ezek meghatározása rendkívül

nehéz feladat, ugyanis a gyártók legtöbbször nem közlik a különböző felhasznált anyagokra vonatkozó összetételi információkat, azok égési tulajdonságait.

A szimuláció pontosságának egyik kulcsa a járművet felépítő és annak belterében használt anyagok tulajdonságainak számításba vétele. Az adatok meghatározása általában becslésen alapszik, ugyanis a jármű tömegéhez viszonyítva százalékos lebontásban kerülnek a programba. Azt is fontosnak tartjuk kihangsúlyozni, hogy nem elegendő kategorikusan besorolni a különböző égési tulajdonságokkal bíró anyagokat, például az autóiparban számos műanyagot használnak fel. A szimuláció pontosságát növeli, ha nem átlagot vonunk a műanyagokra vonatkozó értékekből, hanem részletesen adjuk meg, hogy a jármű hány százalékban tartalmaz az autóiparban gyakran használt polipropilén (PP), akrilnitril-butadién-sztirol (ABS), polikarbonát (PC), poliamid (PA) vagy poliuretán (PUR) -fajtákat (ABEDSOLTAN 2024). Továbbá a szimulációba az autóról készült modell is egyszerűsítve kerül, a bonyolult geometriák nagyon hosszú számítási időt vagy numerikus hibát okoznának. Az eredmények így belátható módon a valóságtól, ha csak kis mértékben is, de el fognak térni.

Korábbi kutatásunkban megvizsgáltuk, miként viselkednek az egyszerűsített és összetett geometriák az FDS-programban. Az egyszerűsítés alatt azt értjük, hogy a vizsgált geometria a szimulációban beállított hálóméretnek megfelelően kis kockákból tevődik össze, míg az összetett követi a geometria bonyolult alakját. Megállapítottuk, hogy az egyszerűsített geometria nem okoz durva eltérést a szimulációs eredményeket tekintve. A lefutás és a számítási idő gyorsabb, a hőmérsékleti görbék megegyeznek a valósággal. A nagy sűrűségű háló beállításával az egyszerűsített modell közel olyan pontos lehet, mint egy összetett modell.

Az általunk bemutatott publikációkban vagy helyettesítéssel, vagy durvább egyszerűsítéssel oldották meg a járművek modellezését. A kismértékű egyszerűsítés tapasztalataink szerint nem okoz jelentős eltérést az eredményeknél, azonban a más geometriával való helyettesítés már nem hozza a kívánt szintű eredményeket (HAJDU–PAPP–KUTI 2025).

Összegezve megállapítható, hogy a szimulációk pontosságának kulcsát a valós bemeneti adatok és a megfelelő részletességgel felépített, de számítási szempontból optimalizált geometriai modell jelenti. A jövőbeni fejlesztések célja olyan adatbázisok létrehozása lehet, amelyek pontos égési tulajdonságokat tartalmaznak az autóiparban használt anyagokra vonatkozóan. Emellett törekedni kell a szimulációs modellek további finomítására, hogy azok még megbízhatóbban tükrözzék a valóságos tűz lefolyását.

Összegzés

A járműtüzek szimulációval történő vizsgálata a modern közlekedésbiztonság és a tűzbiztonság területén egyre nagyobb jelentőséggel bír. A gépjárművek hajtásláncra és üzemanyaga az elmúlt évek során óriási változásokon esett át, és az ilyen irányban végzett fejlesztések további változásokat hoznak. Ezek mellett a járművek szerkezeti elemei, a beépített anyagok egyre különbözőbb anyagszerkezettel rendelkeznek, amely számos különféle éghető és nem éghető anyagot foglal magában, így a tűz kialakulásának és terjedésének modellezése nagyon összetett, de nélkülözhetetlen feladat.

A járműtüzek jelentős kockázatot hordoznak magukban mind az emberi életre, mind az anyagi javakra nézve, továbbá súlyos környezeti károkat is okozhatnak. A tűzvédelem és a tűz megelőzés hatékonyságának növelése érdekében elengedhetetlen a járműtüzek során kialakult folyamatok részletes és megbízható szimulációja. A szimulációk alapját a valós, pontos és részletes bemeneti adatok adják, amelyek legfőbb része a járművekben használt anyagok égési tulajdonságaiból származik. A gyakorlatban azonban nagy nehézséget jelent a kutatóknak, hogy a gyártók ritkán szolgáltatnak részletes adatokat a felhasznált anyagok összetételéről és égési viselkedéséről. Ez a hiányosság a bemeneti paraméterek becslésen alapuló megközelítést követeli meg, ezzel korlátozva a szimulációk pontosságát és megbízhatóságát.

A modell elkészítésekor azt az optimális megoldást kell választani, ahol az eredmény kellően pontos, és a számítási erőforrások is rendelkezésre állnak. A jövőben szeretnénk a feltárt hiányosságoknak eleget tevő kutatást lefolytatni, valós tűzkísérletet végezni egy személygépjárművön, és az adatokat felhasználni elkészíteni a jármű tűzszimulációját minél kevesebb egyszerűsítést alkalmazva. A szimulációs modellek továbbfejlesztése és az anyagokra vonatkozó adatok bővítése hozzájárulhat a tűzzel kapcsolatos folyamatok valósághű bemutatásához, amely támogatja a tervezők, a mérnökök és a beavatkozó személyek munkáját.

REVIEW OF COMPUTER SIMULATIONS APPLICABLE TO VEHICLE FIRE INVESTIGATION

In the automotive industry, the use of computer simulations is inevitable throughout the entire design and manufacturing process. With the help of simulations, costs can be significantly reduced; however, this requires accurate data and measurements in advance to ensure reliable

results. In the currently evolving automotive sector, safety is being focused on severely, within safety one important aspect is vehicle-related fire incidents that pose serious safety risks. Fire simulations can provide valuable support in the investigation of such events. Unfortunately, in recent years, relatively few studies dealt with the modeling of vehicle fires, the numerical analysis of fire spread, or the applicability of various simulation methods. The aim of this study is to conduct a case study analysis of previously published vehicle fire simulations. During the study, we compared simulation results from several international sources, evaluated the input parameters used, and the practical applicability of the simulations. The aim of the analysis is to explore the strengths and limitations of different modeling approaches, which can contribute to the development of firefighting strategies and the improvement of vehicle fire safety.

Keywords: fire safety, FDS, vehicle fire, fire simulation

Felhasznált irodalom

49 CFR § 571.301 Standard No. 301; Fuel system integrity.

49 CFR § 571.302 Standard No. 302; Flammability of Interior Materials.

ABEDSOLTAN, Hossein (2024): Applications of Plastics in the Automotive Industry: Current Trends and Future Perspectives. *Polymer Engineering & Science*, 64(3), 929–950. Online: <https://doi.org/10.1002/pen.26604>

BADONSZKI Csaba – BÉRCZI László (2021): A tűzvédelmi tervezés fő tartópillérei a tűzvédelmi műszaki irányelvek. *Védelem Tudomány: Katasztrófavédelmi online tudományos folyóirat*, 6(2), 66–96. Online: <https://doi.org/10.61790/vt.2021.6.2.66>

BEREK Tamás – FÖLDI László – PADÁNYI József (2020): The Structure and Main Elements of Disaster Management System of the Hungarian Defence Forces, with Special Regard to the Development of International Cooperation. *AARMS – Academic and Applied Research in Military and Public Management Science*, 19(1), 17–26. Online: <https://doi.org/10.32565/aarms.2020.1.2>

Bézier Award [é. n.]. *Solid Modeling Association*. Online: <http://solidmodeling.org/awards/bezier-award/>
BS 7974:2019. *Application of Fire Safety Engineering Principles to the Design of Buildings* (2019). London: BSI Group.

BRZEZINSKA, Dorota – BRYANT, Paul (2022): Performance-Based Analysis in Evaluation of Safety in Car Parks under Electric Vehicle Fire Conditions. *Energies*, 15(2), 649. Online: <https://doi.org/10.3390/en15020649>

Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview (SMV) [é. n.]. *National Institute of Standards and Technology*. Online: <https://pages.nist.gov/fds-smv/>

GAVRYLIUK, Andrii et al. (2023): Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building. *SAE International Journal of Transportation Safety*, 11(3), 421–434. Online: <https://doi.org/10.4271/09-11-03-0013>

- GINDIS, Elliot (2012): *Up and Running with AutoCAD 2012. 2D and 3D Drawing and Modeling*. Amsterdam – Boston – Heidelberg – London – New York – Oxford – Paris – San Diego – San Francisco – Singapore – Sydney – Tokyo: Academic Press.
- HAJDU Flóra – PAPP Csenge – KUTI Rajmund (2025): Fire Simulation of Different Complex Geometry Tree Objects Using FDS. *Pollack Periodica*, 20(2), 67–72. Online: <https://doi.org/10.1556/606.2024.01225>
- HALADA, Ladislav et al. (2011): Computer Simulation of Automobile Fires. *Communications: Scientific Letters of the University of Žilina*, 13(2), 69–73. Online: <https://doi.org/10.26552/com.C.2011.2.69-73>
- Highway Vehicle Fires (2014–2016) (2018). *Topical Fire Report Series*, 19(2). Online: www.usfa.fema.gov/downloads/pdf/statistics/v19i2.pdf
- HYNYNEN, Jonna et al. (2023): Analysis of Combustion Gases from Large-Scale Electric Vehicle Fire Tests. *Fire Safety Journal*, 139, 103829. Online: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103829>
- JIANG, Xiao-hui et al. (2018): Full-Scale Experimental Study of Fire Spread Behavior of Cars. *Procedia Engineering*, 211, 297–305. Online: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.016>
- KANG, Sungwook et al. (2023): Full-Scale Fire Testing of Battery Electric Vehicles. *Applied Energy*, 332, 120497. Online: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120497>
- KANYÓ Ferenc (2018): Elektromos gépjárművek tűzoltásának nemzetközi és hazai tapasztalatai. *Védelem Online*, 2, 19–20.
- KUTI Rajmund (2019): *Alkalmazott műszaki mentések és technikák*. Győr: Palatia.
- MSZ EN 1991-1-2:2005. *Eurocode 1: A tartószerkezeteket érő hatások. 1.2. rész: Általános hatások. A tűznek kitett szerkezeteket érő hatások* (2005). Budapest: Magyar Szabványügyi Testület.
- MIECHÓWKA, Bartosz – WĘGRZYŃSKI, Wojciech (2025): Systematic Literature Review on Passenger Car Fire Experiments for Car Park Safety Design. *Fire Technology*, 61, 2651–2688. Online: <https://doi.org/10.1007/s10694-025-01701-5>
- PAPP Csanád (2024): Elektromos járművek okozta kihívások tűzoltás és műszaki mentés során. *Védelem Tudomány*, 9(4), 12–41. Online: <https://doi.org/10.61790/vt.2024.17933>
- PAPP Csenge – KERSÁK József (2023): Közúti járművekben keletkezett tüzek okai. *Hadmérnök*, 18(2), 109–121. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2023.2.7>
- PITANA, Trika et al. (2025): Simulation of an Electric Vehicle Fire on a Ro-Ro Ferry. *Journal of Applied Engineering Science*, 23(1), 45–55. Online: <https://doi.org/10.5937/jaes0-51952>
- SZABÓ Viktória – MOLNÁR Kristóf – NAGY Rudolf (2018): Elektromos járművek tűzbiztonságának vizsgálata. *Védelem Tudomány*, 3(2), 77–118.
- TERZIEV, Angel (2019): Study of the Fire Dynamics in a Burning Car and Analysis of the Possibilities for Transfer of Fire to a Nearby Vehicle. *E3S Web of Conferences*, 112, 01015. Online: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911201015>
- TÓTH Zoltán (1984): A közúti járművek tűzvédelme. In HUSZÁR Imre (szerk.): *Közlekedési eszközök és létesítmények tűzvédelme*. Budapest: Belügyminisztérium, 288–308.

