



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

HABILITÁCIÓS TÉZISFÜZET

ELEK BARBARA JÚLIA

ÉPÍTMÉNYEK ÉS IPARI
TECHNOLÓGIÁK TŰZ- ÉS
KÖRNYEZETBIZTONSÁGI
KOCKÁZATAINAK
VIZSGÁLATA ÚJSZERŰ
MEGKÖZELÍTÉSEKSEL

**BIZTONSÁGTUDOMÁNYI
DOKTORI ISKOLA**

Budapest,
2024. november 29.

Tartalomjegyzék

I. A KUTATÁS ELŐZMÉNYEI	3
II. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	8
1. <i>A kompozit anyagok tűzállósági vizsgálatának újszerű megközelítése</i>	<i>8</i>
2. <i>Az autóiipari préselési technológia tűzbiztonságának vizsgálata újszerű módszertani megközelítéssel.....</i>	<i>22</i>
3. <i>Ipari tározók környezetbiztonsági kockázatának átfogó elemzési módszere</i>	<i>31</i>
III. A KUTATÁS ÉS A BEMUTATOTT EREDMÉNYEK HATÁSA, VISSZHANGJA.....	38
IV. IRODALMI HIVATKOZÁSOK LISTÁJA	39
V. A TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK	43
VI. TOVÁBBI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK.....	45

I. A KUTATÁS ELŐZMÉNYEI

Az ipari technológiák és az ezeket magukba foglaló építmények biztonsági kérdéseinek kutatása régóta kiemelt szerepet tölt be a mérnöki tudományok területén. A balesetek és veszélyhelyzetek megelőzése, a kockázatok minimalizálása, kezelése, valamint a havária helyzetek elhárítása nélkülözhetetlen a tűz- és környezetbiztonság megteremtése érdekében. E problémák tudományos megközelítése nem csupán mérnöki, hanem társadalmi és környezeti jelentőséggel is bír. Az építmény és az ipari technológia fogalmának definiálása a kutatás első lépése. Az építmény fogalmát az épített környezet alakításáról és védelméről szóló 1997. évi LXXVIII. törvény a következőképpen határozza meg: „Építmény (az épület, műtárgy gyűjtőfogalma): a rendeltetésére, szerkezeti megoldására, anyagára, készültségi fokára és kiterjedésére tekintet nélkül minden olyan helyhez kötött műszaki alkotás, amely a talaj, a víz vagy az azok feletti légtér természetes állapotának tartós megváltoztatásával, beépítésével jön létre.” (Étv.,1997) Az ipari technológia fogalmát definiálni már jóval bonyolultabb fejlődő

világunkban. Az ipari technológia mai megközelítés szerint a tudományos és mérnöki tudás alkalmazását jelenti a gyártási, logisztikai, energiaellátási és karbantartási folyamatok optimalizálása érdekében. Ez magában foglalja az erőforrások, a módszerek és az eljárások integrált kezelését, amely elősegíti a termelékenység, hatékonyság és fenntarthatóság növelését. Kulcselemei közé tartozik az innováció, a digitalizáció és a rendszerek közötti együttműködés, mely tovább hangsúlyozza az ipari technológia multidiszciplináris mivoltát (Groover, 2010; Heizer et al., 2016).

Tűzbiztonsági kutatás előzményei

Az ipari technológiák, építmények tűzbiztonsági kockázatának vizsgálata az utóbbi évtizedben különös nagy figyelmet kapott. Részben a gyártási folyamatok során jelentkező sorozatos tüzesetek, másrészt a korszerű, tűzálló, valamint fenntartható építőanyag, építményszerkezet fejlesztésekhez kapcsolódóan. Nemzetközi kutatások, így Hurley (2016) szerzőtársaival részletesen vizsgálta az új generációs építőanyagok,

például kompozitok és újrahasznosított anyagok tűzbiztonsági kockázatait. Ezek az anyagok a fenntarthatósági célkitűzések miatt egyre elterjedtebbek az iparban és az építőiparban, azonban éghetőségi tulajdonságaik és ezáltal tűzbiztonságra kifejtett hatásuk további kutatásokat igényel.

Az építmények tűzbiztonságának elemzése különösen azért jelentős, mert az emberi tevékenységek jelentős része az épített környezetben zajlik. Az építőanyagok éghetőségéből, ipari technológiák potenciálisan tűz- vagy robbanásveszélyes jellegéből adódó veszélyhelyzetek az emberi élet és a környezet szempontjából súlyos következményekkel járhatnak.

Fentiek tükrében a tűzbiztonsághoz kapcsolódó több mint egy évtizede megkezdett kutatásaim a korszerű építőanyagok, építményszerkezetek és technológiai anyagok éghetőségi tulajdonságainak mélyebb megértését célozták meg. Ezáltal is segítve a fenntartható és biztonságos építészeti, ipari technológiai megoldások kialakítását.

Környezetbiztonsági kutatás előzményei

A környezetbiztonsági kutatásom témájául a tározási építmények, különösen az ipari tározók környezetbiztonsági kockázatainak vizsgálatát helyeztem.

A 2010. évi vörösiszap-katasztrófa hazánk egyik legsúlyosabb ipari balesete volt, amely széleskörű szakmai és tudományos vizsgálatokat indított el tárgyi területen.

Nemzetközi szinten a brazíliai Mariana-gátszakadás (2015) és a dél-afrikai bányászati hulladéktározók meghibásodásai bírtak hasonló nagyságrendű környezeti károkozással (Urquiza és Rocha, 2019). Ezek az esetek rávilágítottak a tározók hosszútávú ellenőrzésének fontosságára, valamint a környezeti hatások csökkentésére irányuló technológiai fejlesztések szükségességére (Rico 2008, Sanchez et. al., 2018).

Kiss és szerzőtársainak (2020) tanulmánya ismertette, hogy Magyarországon még napjainkban is 1719 bányászati hulladékkezelő objektum található, amelyből 46 zagytározó. A tározók nagy része előregedett vagy nem felel meg a modern biztonsági előírásoknak, ami indokoltá teszi a kockázatelemző módszerek folyamatos fejlesztését. Az elmúlt 26 év során végzett kutatásaim és

mérnöki munkám során szerzett tapasztalataim alapján fejlesztettem ki egy olyan kockázatelemzési módszert, amely átfogó megközelítéssel teszi lehetővé a tározók környezetbiztonsági kockázatainak meghatározását. Ez magában foglalja a geotechnikai instabilitás, a hidraulikai problémák és az anyagszerkezeti hibák átfogó és egyidejű értékelését. A módszert 2010-ben, az ajkai vörösiszap tározó gátszakadását követően, a katasztrófa okait kereső mérnöki szakértői csapat tagjaként alkalmaztam először a gyakorlatban. A módszer segítségével történt meg a tározó környezetbiztonsági kockázatának meghatározása katasztrófavédelmi szempontokat szem előtt tartva, mely módszer alkalmas más típusú tározók (pl. víztározók) kockázatvizsgálatára is.

II. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. A kompozit anyagok tűzállósági vizsgálatának újszerű megközelítése

Bevezetés

A kompozit anyagok tűzállósági tulajdonságainak vizsgálata elengedhetetlen a korszerű ipari alkalmazások, különösen a magas hő- és lángterhelésnek kitett építményszerkezetek, szerkezeti elemek esetében.

A szabványos vizsgálati módszerek széles körben elfogadottak az anyagok tűzvédelmi tulajdonságainak osztályozásában és összehasonlításában. Azonban ezek a módszerek számos esetben nem képesek teljes mértékben reprezentálni a kompozit anyagok valós alkalmazási körülmények között tapasztalható viselkedését. A kutatás célja az volt, hogy módosított vizsgálati módszerek alkalmazásával a szabványos vizsgálati módszerek kiegészítésre kerüljenek és ezáltal átfogóbb képet kapjunk a kompozit anyagok tűzállósági és égési tulajdonságairól.

Vizsgálati módszertan

Szabványos vizsgálati módszerek

Az építőanyagok, szerkezetek tűzvédelmi tulajdonságait leíró szabványos vizsgálati módszerek az alábbiak.

MSZ 14800-16:1992, ASTM D 1929:1977 (gyulladásí hőmérséklet), ISO 11925-2:2010, EN 13501-1:2010 (függőleges lángterjedés), ISO 3795:1989 (vízszintes lángterjedés), ISO 4589:1996, ASTM D 2863 (oxigénindex), valamint EN ISO 1182:2002 (neméghetősségi teszt).

Gyulladásí hőmérséklet mérése

A gyulladásí hőmérséklet meghatározását az MSZ 14800-16:1992 és ASTM D 1929:1977 szabványok alapján végzik. E módszer szerint az anyagot szabályozott hőmérsékletű kemencében helyezik el, ahol a hőmérsékletet fokozatosan növelik (általában 10–20 °C/perc sebességgel). A gyulladás rögzítése megfigyeléssel vagy az égési folyamat során fellépő hőmérsékleti ugrás érzékelésével történik.

Vízszintes lángterjedés vizsgálat

Az ISO 3795:1989 szabvány szerint a vízszintes lángterjedési tesztet úgy végzik, hogy a mintát vízszintes helyzetben rögzítik, majd egy szabványos gyújtólánggal az egyik végét meggyújtják. A lángterjedési sebességet mm/perc értékben mérik.

Függőleges lángterjedés vizsgálat

Az ISO 11925-2:2010 és EN 13501-1:2010 szabványok szerint a függőleges lángterjedési vizsgálat célja az anyag égési viselkedésének értékelése tűzhatás alatt. A mintákat függőleges helyzetben rögzítjük, és egy szabványos, 850–900 °C hőmérsékletű lánggal gyújtjuk meg a minta szélén vagy felületén, általában 15 másodpercig. Az égési folyamat során mérjük a lángterjedési távolságot, az égési időt és a másodlagos hatásokat, például az égő cseppek képződését vagy a füst kibocsátást.

Oxigénindex mérése

Az ISO 4589:1996 és ASTM D 2863 szabványok szerint az oxigénindex-mérések célja az égés fenntartásához szükséges minimális oxigénkoncentráció meghatározása.

A vizsgálatok során a mintát egy szabályozott légkörű kamrában helyezik el, ahol a környezet oxigén- és nitrogéntartalmát fokozatosan állítják be. Az oxigénindex az az oxigénkoncentráció (térfogatszázalékban), amely még éppen elegendő ahhoz, hogy a függőlegesen elhelyezett minta égése fennmaradjon.

Neméghetősségi vizsgálat

Az EN ISO 1182:2002 szabvány szerint a neméghetősségi teszt célja az anyag tűzzel szembeni ellenállásának meghatározása magas hőmérsékleten. A vizsgálatához hengeres mintát (45 mm átmérő, 50 mm magasság) használnak, amelyet 750 °C-ra hevített kemencében helyeznek el. A teszt során mérik:

- Tömegveszteség (Δm): a minta súlyának csökkenése az égés hatására,
- Hőmérséklet-emelkedés (ΔT): a minta közepének és felületének hőmérséklet-növekedése,
- Lángolási idő (tf): a minta lángjelenséggel kísért égésének időtartama.

A szabvány szerint a neméghetőségi osztályok meghatározásához a következő értékeket kell elérni: $\Delta m \leq 50\%$, $\Delta T \leq 50$ °C, és $t_f \leq 20$ s.

Módosított vizsgálati módszerek

Módosított gyulladási hőmérséklet mérése

A vizsgáltok során úgynevezett Setchkin kemence került alkalmazásra, amely jelentős eltérést jelent a standard módszerekhez képest. Ez a berendezés egy vertikális hőkamra, amely lehetővé teszi a minta hőmérsékletének pontosabb kontrollálását, valamint az éghető bomlástermékek (pl. gázok) gyulladásának részletes megfigyelését a kemence felső részében. Továbbá, a vizsgálatok során vékonyabb minták kerültek felhasználásra, amelyek jobban tükrözik a valós alkalmazási körülményeket, mint a szabványos minták.

Módosított vízszintes lángterjedés vizsgálat

Az ISO 3795:1989 szabvány elveit megtartva, az Atlas HMV tesztkamra került alkalmazásra, amely pontosabb hő- és lángkontrollt biztosít, jelentős eltérést jelentve a

szabványos vizsgálati módszerhez képest. A minták vastagsága a valós alkalmazási körülményekhez lett igazítva, ami eltérést jelentett a szabványos vastagságtól. A módosított körülmények között a lángterjedési sebesség még a szabványban előírt maximális értéknél (100 mm/perc) is jelentősen alacsonyabbnak bizonyult, kiemelve az anyagok kiváló tűzállóságát.

Módosított függőleges lángterjedés vizsgálat

A szabványos vizsgálatok kiterjesztésre kerültek, és a minták valós alkalmazási körülményeket tükröző vastagságban kerültek tesztelésre, ami jelentős eltérést jelentett a szabványos előírásokhoz képest. Atlas HMV berendezés került alkalmazásra itt is, mely pontosabb méréseket tett lehetővé, különösen a láng viselkedésének és a lángterjedési folyamatok részletesebb elemzéséhez. A módosított minták mérete eltért a szabvány által előírt 250x90 mm-es mérettől, ezáltal a valós beépítési viszonyokat jobban közelítő minta vizsgálata történhetett meg.

Módosított oxigénindex mérés

A szabványos vizsgálati körülmények kiegészítésre kerültek magasabb oxigénkoncentráció alkalmazásával, egészen 100%-os oxigénkörnyezetig, ami jelentős eltérést jelentett a szabványos módszerektől. Ezzel a megközelítéssel az anyag gyulladási hajlama szélsőséges környezeti körülmények (pl. rendkívül magas oxigénkoncentráció a levegőben) között is vizsgálatra kerülhetett, lehetővé téve az anyagok viselkedésének leírását extrém tűzveszélyes helyzetekben is. Az oxigénindex meghatározásánál is a valós beépítési viszonyokat jobban közelítő minta vizsgálata történt meg.

Módosított neméghetősségi vizsgálat

A vizsgálatok során nemcsak a szabványos hengeres minták kerültek tesztelésre, hanem valós alkalmazási vastagságú (2 mm-es) lapos minták is, amelyek jelentős eltérést jelentettek a szabványos előírásokhoz képest. A módosított minták ugyanabban a 750 °C-ra hevített kemencében kerültek vizsgálatra, azonban a valós vastagság gyorsabb felmelegedést és magasabb hőterhelést eredményezett, kiemelve az anyagok extrém

körülmények közötti viselkedését. A hőmérsékletet mind a minta felületén, mind a belső rétegeiben megfigyelésre került, azonban a vékony minták esetében a belső hőmérséklet közvetlen mérése nem volt lehetséges, ami korlátozhatta bizonyos hőtechnikai paraméterek pontos meghatározását.

Vizsgálati eredmények

Gyulladási hőmérséklet

A Setchkin-kemencében végzett gyulladási tesztek azt mutatták, hogy a kompozit anyagok 560 °C-ig nem mutattak gyúlékonyságot. A 420 °C fölötti hőmérsékleti tartományban megfigyelt gázképződés sem eredményezett gyulladást. Ezek az eredmények nemcsak a szabványok követelményeit haladták meg, hanem új adatokat szolgáltatottak az anyagok hőbomlási viselkedéséről.

Függőleges és vízszintes lángterjedés

A függőleges lángterjedési vizsgálatok során az anyagok nem mutattak lángterjedést, füstképződést vagy égő cseppek kibocsátását. A vízszintes lángterjedési sebesség

alacsony (100 mm/perc alatti) értékei szintén igazolták a kompozit anyagok kiváló tűzállóságát. Ezen tulajdonságok kombinált elemzése ritkán szerepel nemzetközi vizsgálatokban, ami kiemeli az eljárás újszerűségét.

Oxigénindex (LOI)

Az LOI-értékek 80% és 100% között mozogtak, ami rendkívül alacsony gyúlékonysági potenciált jelez. A mérések során nem jelent meg füst vagy égő cseppek, továbbá az anyagok szerkezeti stabilitása megmaradt, még oxigéndús környezetben is. Ez a vizsgálati megközelítés a kompozitok égési mechanizmusainak mélyebb megértéséhez járulhat hozzá. Kerekes (2012) vizsgálataira is tekintettel elmondható, hogy a módosított oxigénindex mérés fontos szerepet tölthet be az anyagok éghetőségének, tűzállóságának és tűz hatására való viselkedésének megértésénél.

Neméghetőség

A neméghetőégi tesztek során a minták 750 °C-on is megőrizték szerkezeti integritásukat, mindössze 20%-os

tömegveszteség mellett. Az A1 és A2 tűzvédelmi osztály követelményeinek teljesítése mellett az anyagok viselkedése kiterjesztett hőterhelési körülmények között is kiemelkedő volt.

Tudományos következtetések

A vizsgálatok során alkalmazott módosított vizsgálati módszerek igen részletes adatokat szolgáltatottak a kompozit anyagok tűzvédelmi tulajdonságairól, különösen azok valós körülmények közötti viselkedéséről. A szabványos tesztekől eltérő vizsgálatok lehetővé tették az anyagok hőbomlási, lángterjedési és gyulladási tulajdonságainak mélyebb megértését, melyek alapján az alábbi következtetésekre jutottam:

Gyulladási hőmérséklet

A módosított gyulladási hőmérséklet mérések pontosabb képet nyújthatnak az éghető gázok termikus bomlásáról és gyulladásáról. Ezek az eredmények különösen fontosak azon alkalmazásoknál, ahol az anyagok magas hőmérsékleti viselkedésének pontos értékelése

elengedhetetlen. Ugyanakkor a szabványos tesztekkel való összehasonlíthatóság hiánya korlátozza a közvetlen ipari standard vizsgálati alkalmazhatóságot, ezért az eredmények jelen fázisban elsősorban kutatási és fejlesztési célokat szolgálnak.

Vízszintes és függőleges lángterjedés

A módosított módszerek pontosan modellezték a valós alkalmazási környezeteket, például a beépített vastagságú anyagok lángterjedési viselkedését. Az eredmények megerősítették, hogy az anyagok kiváló tűzállósággal rendelkeznek, mivel sem vízszintes, sem függőleges helyzetben nem mutattak jelentős lángterjedést. Ez a tűzvédelmi teljesítmény különösen fontos olyan ipari és építészeti felhasználások során, ahol magas hőmérsékletnek kitett szerkezeti elemek kerülnek beépítésre.

Oxigénindex

Az oxigénindex szélsőséges körülmények között végzett mérései lehetővé tették az anyagok gyulladási tulajdonságainak feltárását magas oxigénkoncentráció

esetén. Az eredmények bizonyították az anyagok kiváló tűzállóságát még 100%-os oxigénkörnyezetben is, ami tovább erősíti a kompozitok alkalmazhatóságát magas tűzvédelmi követelményeket támasztó környezetekben.

Neméghetősségi vizsgálatok

A módosított neméghetősségi tesztek részletesebb képet nyújtottak az anyagok valós hőállóságáról, különös tekintettel a vékony minták (1. ábra) gyors hőreakcióira.



1. ábra: Neméghetősségi vizsgálat kompozit anyagból készült a standard vizsgálati és a valós méretű mintán (saját kép)

Ezek a vizsgálatok igazolták a kompozitok magas hőmérsékleten mutatott stabilitását és tartósságát, amely

kiemelt fontosságú például kéménybélések vagy más, nagy hőterhelésnek kitett szerkezeti elemek esetében.

Fentieket összefoglalva megállapítható, hogy ez az átfogó vizsgálati rendszer lehetővé tette a kompozit anyagok hőbomlási, lángterjedési tulajdonságainak egyidejű elemzését akár rendkívül magas oxigénkoncentrációjú környezetben is. Az így nyert adatok nemcsak a legszigorúbb tűzvédelmi előírásoknak való megfelelést igazolták, hanem rámutattak arra is, hogy ezek az anyagok kiválóan alkalmazhatók magas hőmérsékletű és rendkívül nagy tűzterhelésnek kitett környezetekben.

TÉZIS 1:

A kompozit anyagok tűzvédelmi teljesítményének átfogóbb értékelésére egy integrált vizsgálati megközelítés került kidolgozásra, amely túlmutat a hagyományos szabványos teszteken. A kutatás során feltárt eredmények igazolták, hogy ezek az anyagok kiváló termikus stabilitással, alacsony gyúlékonysági potenciállal és kimagasló hőállósággal rendelkeznek

még extrém hőmérsékleti körülmények között is. A vizsgálatok során alkalmazott módszertan lehetővé tette az anyagok hőbomlási, gázképződési és lángterjedési viselkedésének részletesebb feltárását, ezáltal megalapozva azok ipari alkalmazhatóságát. Az eredmények alapján javaslom a szabványos vizsgálati eljárások kiegészítését valós alkalmazási körülményeket modellező vizsgálati módszerekkel, különös tekintettel az extrém környezeti körülmények között magas hő- és tűzterhelésnek kitett szerkezeti elemek, építőanyagok esetében. [EB1]

2. Az autóiipari préselési technológia tűzbiztonságának vizsgálata újszerű módszertani megközelítéssel

Bevezetés

Az autóiipari gyártási folyamatok során alkalmazott préselési technológiák tűzvédelmi szempontból kiemelt figyelmet igényelnek, különösen a hidraulikus rendszerekben használt hidraulikaolajok potenciális éghetősége miatt. Az hidraulikaolajok szennyeződése kedvezőtlenül befolyásolhatja annak éghetőségi tulajdonságait, jelentős mértékben növelve általa a tűzkockázatot. A mérsékelt tűzveszélyes hidraulikaolajok kedvezőtlenebb gyulladási jellemzői, valamint a tűzálló hidraulikaolajok gyúlékonysága extrém körülmények között (például magas, 900 °C-os hőmérsékletű fémfelülettel érintkezve) különösen kritikus tényező a gyártási folyamatok biztonsága szempontjából. [EB2]

Ezen túlmenően a gyártási környezetben alkalmazott elektromos vezetékek anyagminőségének időbeli romlása

és túlterhelése szintén nem elhanyagolható tűzkockázati tényezőt jelent, amely befolyásolhatja a technológiai folyamatok biztonságát. [EB3]

Vizsgálati módszerek

Hidraulikaolajok éghetősége (lobbanás- és gyulladáspont meghatározás)

A vizsgálataim során az MSZ EN ISO 2592:2002 szabvány előírásait követtem, és Cleveland CLA 2 nyílttéri lobbanáspont-mérő készüléket használtam vizsgálataimhoz. A vizsgálataimhoz 4 féle (2. ábra) szennyezett és szennyezetlen mérsékelt tűzveszélyes hidraulikaolaj mintát készítettem elő.



2. ábra A vizsgált 4 féle hidraulika olaj (saját kép)

A minták lobbanás- és gyulladáspontját három ismétlésben határoztam meg, hogy az éghetőségi jellemzőket megbízhatóan értékelhessem.



3. ábra: Lobbanáspont mérés CLA 2 típusú készülékkel (saját kép)

Elektromos vezetékek vizsgálati módszerei

A vizsgálatok során alkalmazott szabványok:

- Oxigénindex-mérés (LOI): Az égéshez szükséges minimális oxigénkoncentráció az ISO 4589-2:1996 és az ASTM D 2863 szabvány alapján lett meghatározva.
- Túlterhelés-tesztek: Az áramerősség növelése (30-150 A) során a hőmérsékleti és szigetelési viselkedés az MSZ 2364-523: 2002 szabvány szerint lett megfigyelve.

- A kábelek előregedés vizsgálata: az előregedés az MSZ EN 60811-401:2012 szabvány alapján lett vizsgálva,
- Lángterjedési tesztek: Az égési sebesség és lángterjedés az EN 60332-1-2:2004 szabvány alapján lett mérve.

Tűzszimuláció

A PyroSim és Fire Dynamics Simulator (FDS) szoftverek alkalmazásával modelleztem egy autóiipari üzemben a tűz- és füstterjedési jelenségeket. A szimulációk során két eltérő hőteljesítményű tüzesetet (500 kW és 5 MW) vizsgáltam, különös tekintettel a látótávolság csökkenésére, a kiürítési folyamat időigényére, valamint a füstelvezető rendszerek hatékonyságának értékelésére.

Vizsgálati eredmények

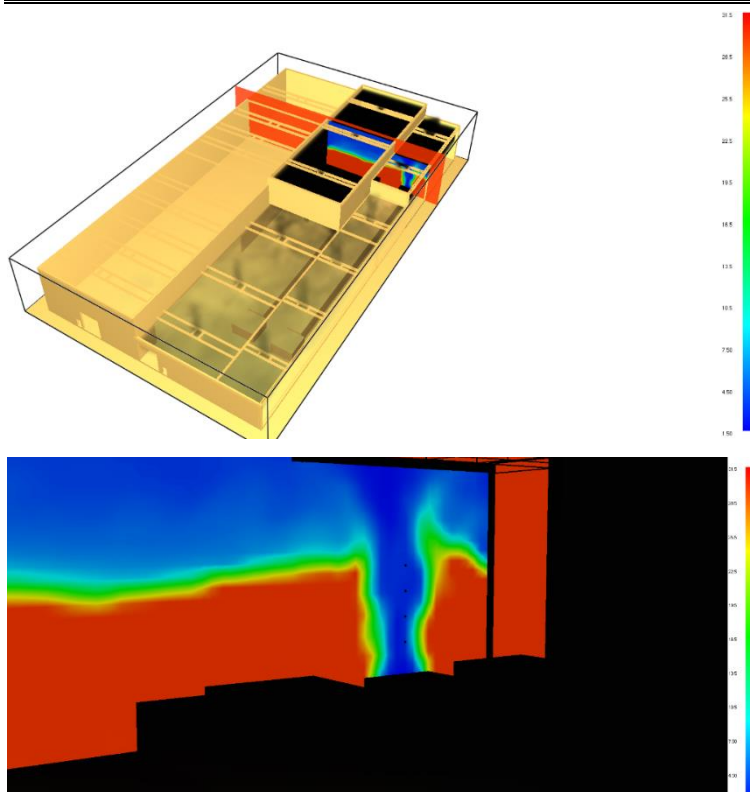
Hidraulikaolajok éghetősége (lobbanás- és gyulladáspont meghatározás)

A mérésenként tűzveszélyes hidraulikaolajok lobbanáspontja a szennyezett minták esetében szignifikánsan csökkent, ahol az érték akár 50%-kal alacsonyabb volt a tiszta mintákéhoz képest. [EB2]

A tűzálló hidraulikaolajok, például a Total Hydransafe HFDU 46 és a Fuchs Renosafe Turbo 46 DR, magasabb gyulladásponttal (≥ 250 °C) rendelkeznek ugyan, azonban extrém körülmények között (pl. 900 °C-os fémfelülettel érintkezve) ezek is gyúlékonyak lehetnek. (Houghton, 2019)

Elektromos vezetékek vizsgálati eredményei

A vizsgálatok eredményei alapján a halogénmentes kábelek magasabb oxigénindexet mutattak ($\geq 28\%$), ami önkiltó tulajdonságot jelez, míg a PVC-szigetelésű kábelek alacsonyabb oxigénindexük miatt gyúlékonyabbnak bizonyultak. A túlterhelési tesztek során a PVC-szigetelésű kábelek 150-200 °C-on gyulladtak, míg a halogénmentes kábelek csak 300 °C fölött mutattak gyulladási jeleket. Mechanikai hatásra (hajlítás) a kábelek gyorsabban gyulladtak meg és szigetelésük sérülése is jelentősen csökkentette tűzállóságukat. A lángterjedési tesztek azt mutatták, hogy a vizsgált halogénmentes kábelek kisebb lángterjedési sebességgel rendelkeztek, míg a PVC-szigetelésű kábelek gyorsabban égtek és több füstöt bocsátottak ki. [EB3, EB4]



4. ábra: 5 MW-os tűz szimulációjának eredménye (saját szerkesztés)

Tűzszimulációs eredmények

Az 5 MW-os tűz szimulációjának eredményei (4. ábra) gyorsabb füstterjedést és jelentős látótávolság-csökkenést mutattak, amely korlátozta a kiürítési folyamat

hatékonyaságát. Bár a tűzjelző és füstelvezető rendszerek hatékonyan támogatták a kiürítést, a beépített oltórendszerek hiányában az anyagi károk igen jelentősre becsülhetők.

Tűzvédelmi berendezések fenntarthatósági kérdései

Kutatási szempontból kiemelt figyelmet érdemel a beépített tűzvédelmi berendezések fenntarthatóságának vizsgálata is, például a hulladékkezelési szempontok figyelembevételével. A tűzvédelmi rendszerek tervezésében és üzemeltetésében alapvető fontosságú a fenntarthatósági szempontok integrálása, különös tekintettel az anyaghasználat optimalizálására, a hulladék minimalizálására és az újrahasznosítás lehetőségeire. [EB5]

Tudományos következtetések

Az eredmények közvetlenül felhasználhatók a tűzvédelmi rendszerek tervezésében, a karbantartási protokollok fejlesztésében, valamint a kockázatértékelési gyakorlatok

optimalizálásában. Az elemzések segíthetnek olyan szabályozások kidolgozásában, amelyek biztosítják a hidraulikaolajok biztonságos (tűzbiztonságos) használatát. Az ilyen gyakorlatorientált megközelítés hozzájárulhat a tűzkockázatok mérsékléséhez és a biztonságosabb gyártási környezet kialakításához az autóiparban. Kutatásom során feltárt eredmények és következtetések túlmutatnak az autóipar keretein, és más magas tűzkockázatú iparágakban – például a bányászatban és az acélgyártásban – is alkalmazhatók. Az ásványi alapú és tűzálló hidraulikaolajok éghetőségi viselkedésének részletes elemzése új referenciapontokat kínál a tűzvédelmi szabványok és karbantartási protokollok továbbfejlesztéséhez. A szimulációk eredményei pedig világosan megmutatták, hogy a tűzjelző és füstelvezető rendszerek önmagukban nem elegendőek a nagy intenzitású tüzek káros hatásainak mérséklésére a préselési technológiát magába foglaló üzemi területeken, ezért beépített oltórendszerek alkalmazása kulcsfontosságú az autóipari gyártás tűzbiztonságának növelése érdekében. Továbbá a tűzvédelmi rendszerek tervezésében és üzemeltetésében alapvető fontosságú a

fenntarthatósági szempontok integrálása, különös tekintettel az anyaghasználat optimalizálására, a hulladék minimalizálására és az újrahasznosítás lehetőségeire. [EB5]

TÉZIS 2

A hidraulikaolajok szennyeződése jelentősen csökkenti gyulladáspontjukat (akár 50 %-al), míg a tűzálló hidraulikaolajok extrém körülmények között gyúlékonyá válhatnak. Az elektromos vezetékek esetében a halogénmentes kábelek jobb tűzállóságot mutattak, de a mechanikai sérülések és a túlterhelés megnöveli gyulladásuk kockázatát. A tűzszimuláció igazolta, hogy a füstelvezető rendszerek mellett beépített oltórendszerek is szükségesek az autóipari gyártás teljeskörű tűzvédelme érdekében. A kutatás kiemelte a fenntarthatóság fontosságát, különösen az anyaghasználat optimalizálásában, a hulladék csökkentésében és az újrahasznosításban, amelyek egyaránt növelik a tűzvédelmi rendszerek biztonságát és hosszú távú fenntarthatóságát. [EB2, EB3, EB4, EB5]

3. Ipari tározók környezetbiztonsági kockázatának átfogó elemzési módszere

Bevezetés

Az ipari tározók, különösen a bányászati hulladéktározók üzemeltetése során, illetve felhagyásukat követően fellépő környezetbiztonsági kockázatok komplex értékelése, kezelése a fenntartható ipari tevékenység fontos kihívása. Ezek a létesítmények jelentős mennyiségű anyagot, olykor veszélyes anyagot vagy hulladékot tárolnak, amelyek stabilitása és hosszú távú viselkedése számos tényezőtől függ, beleértve a gátszerkezet stabilitási jellemzőit, a környezeti terheléseket, valamint a tározott anyag fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságainak időbeli változásait. A hazánkat sújtó vörösiszap-katasztrófa és más, a világon az elmúlt időszakban bekövetkező katasztrófális események rámutattak a tározók geotechnikai stabilitásának, szerkezeti integritásának és a környezetbiztonság integrált megközelítésben történő vizsgálatának szükségességére. A hagyományos tervezési és üzemeltetési gyakorlatok elsődlegesen az építmény statikai és hidraulikai

megfelelőségére, jellemzőire fókuszálnak, miközben kevés figyelmet fordítanak a tározott anyagok és a környezeti elemek, tényezők közötti kölcsönhatásokra. Ezért kutatásom célja egy olyan átfogó kockázatelemzési módszer kidolgozása volt, amely környezetbiztonsági kockázatok feltárásán túl annak a geotechnikai kockázatokkal együttes vizsgálatát teszi lehetővé. A módszertan alapját a hibafa- és eseményfa-elemzési technikák, az árvízi következményszámítások, valamint a kockázatértékelési mátrix képezte, kiegészítve a monitoring rendszerek potenciális kockázatot befolyásoló hatásával.

Vizsgálati módszerek

Hibafa- és eseményfa-elemzések

Kutatásomban először a geotechnikai jellegű súlyos balesetek csúcseseményeit azonosítottam. Ehhez hibafa- (FTA) és eseményfa-elemzéseket (ETA) végeztem, amelyekkel feltártam az eseményláncokat, valamint azokat a tényezőket, amelyek a tározók meghibásodását,

károsodását idézhetik elő. Az elemzéseimet a Relex 7.7 programmal hajtottam végre.

Árvízi következményelemzés

Az ipari tározók meghibásodásának egyik legsúlyosabb következménye az árvízszerű iszap- vagy anyagiömlés. Ennek modellezésére árvízi következményelemzést (mivel a jelenség az árvízi jelenségeket mintázza) végeztem, amely során meghatároztam a potenciális kármutatókat, és besoroltam azokat a kockázati mátrixba a veszélyeztetett területek és érintett lakosság nagyságának meghatározásával.

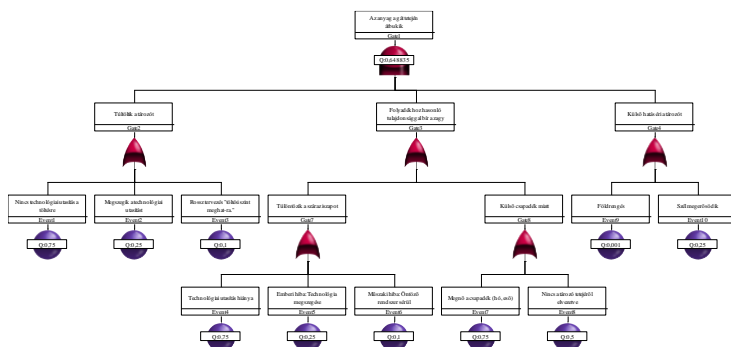
Kockázatértékelési mátrix

Az elemzés eredményeit kockázatértékelési mátrix segítségével osztályoztam, amely figyelembe vette a környezeti, gazdasági, valamint társadalmi aspektusokat is. Az eredmények alapján konkrét kockázatcsökkentési javaslatokat dolgoztam ki, például hatékony monitoring rendszerek telepítésére és a geotechnikai sérülést, sérülékenységet csökkentő intézkedések bevezetésére.

Vizsgálati eredmények

Csúcsesemények azonosítása

A legfontosabb kockázati tényezők között szerepelt a tározó gátjának átszakadása, anyag átbukás a gát tetején (5. ábra), a talajstabilitás problémái, valamint az extrém meteorológiai események (pl. intenzív és rövid időtartamú csapadék) által okozott túlterhelés. Ezek különösen veszélyesek a bányászati hulladéktározók esetén.



5. ábra: Anyagátbukás a gát tetején csúcsesemény hibafaelemzése (saját szerkesztés)

Árvízi következmények

Az elemzéseim kimutatták, hogy a tározók meghibásodása során a kiömlő anyag jelentős környezeti és gazdasági károkat okozhat. Az árvízi következményelemzés

eredményeként meghatározásra került az érintett területek nagysága és az ott élő lakosság veszélyeztetettsége is.

Kockázatértékelési mátrix eredményei

A kockázati mátrix alkalmazása adott tározó esetében lehetővé tette a legkritikusabb geotechnikai és környezetbiztonsági tényezők azonosítását és kockázat szempontú osztályozását. A meghatározott kockázatok alapján konkrét javaslatokat dolgoztam ki a monitoring rendszer kialakítására, a gátszerkezet stabilitásának javítására és a veszélyhelyzeti reagálási terv fontos elemeire vonatkozóan a hosszú távú környezetbiztonság megőrzése érdekében.

Tudományos következtetések

A kutatás újszerűsége az alkalmazott módszertani integrációban rejlik, amely a hibafa-elemzés, az árvízi következményszámítás és a kockázati mátrix együttes alkalmazásával képes az ipari tározók geotechnikai és környezetbiztonsági kockázatainak komplex értékelésére. Az integrált megközelítés nemcsak pontosabb kockázat

azonosítást és osztályozást tesz lehetővé, hanem részletes alapot nyújt a tározók stabilitásának javítására irányuló stratégiai döntésekhez, valamint a katasztrófavédelmi tervek kidolgozásához.

A módszertan jelentőséggel bírhat a bányászati hulladéktározók és más, nagy mennyiségű veszélyes anyagot, hulladékot tároló ipari létesítmények hosszú távú fenntarthatóságának elemzése terén.

A kidolgozott átfogó kockázatelemzési módszertan eleget tesz az ISO 31000:2018 kockázatkezelési szabványban előírtaknak, mivel a kockázatok azonosítását, elemzését és kezelését integrált, rendszerszintű megközelítéssel végzi. A módszer arra törekszik, hogy a hibafa- és eseményfa-elemzések, az árvízi következményszámítás, valamint a kockázati mátrix alkalmazásával a geotechnikai és környezetbiztonsági kockázatokat holisztikus módon értékelje. Ezáltal támogatja a megelőző kockázatkezelési stratégiák kidolgozását és megvalósítását, összhangban az ISO 31000:2018 által megkövetelt döntéstámogatási és biztonságnövelési célokkal, illeszkedve a vállalati EHS

(Environment: környezetvédelem., Health: egészségvédelem, Safety: biztonság), ESG (Environmental, Social, and Governance: környezetvédelem, társadalmi felelősségvállalás és vállalatirányítás) célok eléréséhez.

TÉZIS 3

Az általam kidolgozott integrált kockázatelemzési módszertan – amely a hibafa-elemzés, az árvízi következményszámítás és a kockázati mátrix kombinációján alapul – hatékony eszközt nyújt az ipari tározók, különösen a bányászati hulladéktározók elsődlegesen geotechnikai szempontú környezetbiztonsági kockázatainak részletes vizsgálatára. A módszertan új alapot teremt a gátszerkezetek stabilitásának javításához, a monitoring rendszerek optimalizálásához és a veszélyhelyzeti tervezéshez, hozzájárulva e létesítmények hosszú távú fenntarthatóságához és nemzetközi szinten is alkalmazható környezetbiztonsági megoldások kidolgozásához.

[EB6, EB7, EB8, EB9, EB10]

III. A KUTATÁS ÉS A BEMUTATOTT EREDMÉNYEK HATÁSA, VISSZHANGJA

A hatást elsődlegesen a tézisekhez kapcsolódó publikációkra kapott hivatkozásokon keresztül mutatom be. Független hivatkozások száma: 37. Független WoS, Scopus hivatkozás: 10.

Kutatásaim és a bemutatott eredmények hatásaként mutatható be, hogy a hő- és lánghatásnak kitett kompozitok tulajdonságainak mélyebb és átfogóbb vizsgálatát ismertető - Journal of Building Engineering tudományos folyóiratban (SJR: D1, WoS: Q2) megjelent - cikkekre nemzetközi szinten is számos WoS, Scopus hivatkozás történt.

Kutatási eredményem hatásaként adható meg továbbá, hogy a tározók esetében kidolgozott átfogó kockázatértékelési módszer a gyakorlatban is alkalmazásra került, mely alkalmazások közül a MAL ZRt. vörösiszap-tározójának balesetet követő további környezetbiztonsági kockázatának meghatározása során betöltött szerepe emelhető ki.

IV. IRODALMI HIVATKOZÁSOK LISTÁJA

- **ÉTV tv. 1997.** Építésügyi törvény, Magyarország.
- **Groover, M. P. (2010).** *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems.* John Wiley & Sons.
- **Heizer, J., Render, B., & Munson, C. (2016).** *Operations Management: Sustainability and Supply Chain Management.* Pearson.
- **Hurley, M. J., Gottuk, D. T., Hall Jr., J. R., Harada, K., Kuligowski, E. D., Puchovsky, M., Torero, J. L., Watts Jr., J. M., Wieczorek, C. J. (2016).** *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering.* 5th ed. New York: Springer. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0.
- **Urquiza, A. H. A., & Rocha, A. de O. (2019).** *O desastre ambiental de Mariana e os Krenak do Rio Doce.* *Veredas do Direito*, 16(35), 243–266. DOI: 10.18623/rvd.v16i35.1507.
- **Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A. R., Díez-Herrero, A., & Pereira, H. G. (2008).** *Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context.* *Journal of Hazardous Materials*, 152(2), 846–852.
- **Sánchez, L. E., Alger, K., Alonso, L., Barbosa, F., Brito, M. C., Laureano, F., May, P., Roeser, H., & Kakabadse, Y. (2018).** *Impacts of the Fundão Dam failure.* *International Union for Conservation of Nature.*
- **Kiss, J., Jordán, Gy., Detzky, G., Vértesy, L., Müller, T., Zsámbok, I., Paszera, G., Gulyás, Á., Óri, G., Rádi, K., Hermann, V., Jerabek, Cs., (2020).** *Bezárt bányászati hulladékkezelő létesítmények nyilvántartása és*

kockázati besorolása. Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat, Budapest.

▪ **MSZ 14800-16:1992:** Tűzállósági vizsgálatok. Szilárd anyagok gyulladási hőmérsékletének meghatározása, 7.5.1 szakasz. MSZT.

▪ **ASTM D 1929-77:** *Standard Test Method for Determining Ignition Temperature of Plastics.* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 1977.

▪ **ISO 11925-2:2010:** *Reaction to fire tests – Ignitability of products subjected to direct impingement of flame – Part 2: Single-flame source test.* International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland.

▪ **MSZ EN 13501-1:2010:** *Építési termékek és épületelemek tűzvédelmi osztályozása – 1. rész: Tűzreakció tesztek alapján történő osztályozás.* Európai Szabványügyi Bizottság (CEN), Brüsszel, Belgium.

▪ **ISO 3795:1989:** *Road vehicles, tractors, and machinery for agriculture and forestry – Determination of burning behaviour of interior materials.* International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland.

▪ **ISO 4589:1996:** *Plastics – Determination of burning behaviour by oxygen index – Part 2: Ambient-temperature test.* International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland.

▪ **ASTM D 2863:** *Standard Test Method for Measuring the Minimum Oxygen Concentration to Support Candle-Like Combustion of Plastics (Oxygen Index).* ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

- **EN ISO 1182:2002:** Reaction to fire tests for building products - Non-combustibility test (ISO 1182:2002)
- **Kerekes, Zs. (2012):** *Oxigénindex szerepe az oxidált- és szén-szálak éghetőségében.* PhD disszertáció, Szent István Egyetem.
- **MSZ EN ISO 2592:2002:** *Kőolajtermékek és rokon termékek – Lobbanás- és égéspont meghatározása – Cleveland nyílttéri módszer.* Magyar Szabványügyi Testület (MSZT), Budapest, Magyarország.
- **ISO 4589-2:1996:** *Plastics – Determination of burning behaviour by oxygen index – Part 2: Ambient-temperature test.* International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland.
- **MSZ 2364-523:2002:** *Épületek villamos berendezéseinek létesítése. 5. rész: A villamos szerkezetek kiválasztása és szerelése. 523. fejezet: A kábel- és vezetékrendszerek megengedett áramai.* Magyar Szabványügyi Testület (MSZT), Budapest, Magyarország.
- **MSZ EN 60811-401:2012:** *Villamos és optikai szál kábelek szigetelő- és köpenyanyagainak vizsgálati módszerei – 401. rész: Hőöregítés levegőben – Eljárások hőkamrában történő öregítéshez.* Budapest: Magyar Szabványügyi Testület.
- **EN 60332-1-2:2004:** *Tests on electric and optical fibre cables under fire conditions – Part 1-2: Test for vertical flame propagation for a single insulated wire or cable – Procedure for 1 kW pre-mixed flame.* European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- **Quaker Houghton (2019).** „*Fire Safety In Hot Forming Hydraulic Presses*”.

Elek Barbara Júlia

*Építmények és ipari technológiák tűz- és környezetbiztonsági kockázatainak vizsgálata
újszerű megközelítésekkel*

- **ISO 31000:2018: Risk management – Guidelines.** *International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland, 2018.*

V. A TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ TU DOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

[EB1] Kerekes, Zsuzsanna, Lubl6y, va, Elek, Barbara, Rests, goston. (2018). *Standard fire testing of chimney linings from composite materials*. Journal of Building Engineering, 19, pp 530–538.

[EB2] Horvth-Klmn, Eszter, Elek, Barbara, Kovcs-Szeleczkai, Xnia. (2023). *Melegalaktsi technol6gia tzbiztonsgi krdsei*. Biztonsgtudomnyi Szemle, 5(2), pp 123–135.

[EB3] Varga, Dvid, Kerekes, Zsuzsa, Elek, Barbara. (2017). *Elektromos vezetkek tlterhelsnek hatsa a tzvedelmi biztonsgra*. Vdelem Tudomny: Katasztr6favdelmi Online Tudomnyos Foly6irat, 2(3), pp 37–52.

[EB4] Kerekes, Zsuzsa, Gy6ngy6ssy, va, Elek, Barbara. (2017). *Tzolt6 kbelek manyag burkolatnak j s hagyomnyos vizsglati m6dszereinek 6sszehasonlt6 elemzse*. Vdelem Tudomny: Katasztr6favdelmi Online Tudomnyos Foly6irat, 2(3), pp 24–36.

[EB5] Mohai, gota Zsuzsanna, Elek, Barbara, Kovcs, Mrk. (2023). *Environmental Aspects of Using Fire Protection Systems with a Sustainable Development Approach*. Journal of Integrated Disaster Risk Management, 13(2), pp 22–39.

[EB6] Elek, Barbara, Bodnr, Lszl6, Horvth-Klmn, Eszter. (2023). *Bnyszati hulladkkezel6 ltestmny troz6jnak kockzatelemzse*. Biztonsgtudomnyi Szemle, 5(2), pp 107–121.

[EB7] Horváth-Kálmán, Eszter, Elek, Barbara, Bodnár, László, Komlai, Krisztina. (2023). *Építési kockázatok és kezelésük nukleáris létesítmények környezetében*. Műszaki Katonai Közlöny, 33(4), pp 103–116.

[EB8] Horváth-Kálmán, Eszter, Elek, Barbara. (2023). *Risks and the management of construction in the environment of nuclear facilities*. Acta Technica Jaurinensis, pp. 1–8.

[EB9] Elek, Barbara. (2022). *Risk analysis of a reservoir as a vital system component*. Védelem Tudomány: Katasztrófavédelmi Online Tudományos Folyóirat, 7(4), pp 212–229.

[EB10] Elek, Barbara, Hák, Viktor, Kovács, Gábor. (2012). *Ipari hulladéktározók kockázatának vizsgálata*. Hulladék Online, 3(2), 12 p.

VI. TOVÁBBI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

- Kovács, A. és Elek, B. (2024). *Sugárzó hőnek kitett fák gyulladásának veszélyei és az égéskésleltetés lehetőségei*. Műszaki Katonai Közlöny, 34(2), 73–85.
- Leitner, M., Elek, B. és Daruka, N. (2024). *Technológiai üzemállapotok figyelembevétele robbanásvédelmi kockázatértékelés során*. In Z. Rajnai (Ed.), *Mérnöki Szimpózium a Bánkin Előadásai: Proceedings of the Engineering Symposium at Bánki (ESB 2023)* (pp. 308–313). Budapest, Hungary: Óbudai Egyetem.
- Leitner, M., Daruka, N. és Elek, B. (2024). *Assessment of the explosion protection risk of gunpowder as a raw material for manufacturing technology in greenfield plants*. In Zborník prednášok: z 33. medzinárodnej konferencie Trhacia Technika 2024 (pp. 53–64). Banská Bystrica, Slovakia: Slovenská spoločnosť pre trhacie a vrtacie práce.
- Zsarnovszki, A. és Elek, B. (2023). *Changes in the safety level of potentially explosive industrial technologies in practice*. In I. Bölkény, J. Abonyi, A. Trohák, M. Vadászi, Y. Dakhel, Z. Forgács, A. Reda és G. Szabó (Eds.), *PCS Science 2023: Konferencia kiadvány* (pp. 57–69). Miskolc, Hungary: Eclipse Solutions Ltd.
- Elek, B. (2023). *Non-destructive testing of the construction material of fire-damaged building structures with a vibration measuring device*. Nagy, R. (szerk.), *Szilvay Kornél Tűzvédelmi Konferencia* (pp. 87–100). Budapest, Hungary: Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar.

- Sereg, A., Kerekes, Zs. és Elek, B. (2018). *Hazai fafajták jellegzetességének hatása az égésükre, különös tekintettel a kéreg hatására*. Védelem Tudomány: Katasztrófavédelmi Online Tudományos Folyóirat, 3(1), 26–51. Paper: 02-sereg-kerekes-elek.
- Kovács, G. és Elek, B. (2013). *A termásvíz közvetlen hőhasznosításának hidrogeológiai kockázatai*. Energiagazdálkodás, 54(1), 47–49.
- Makó, A. és Elek, B. (2006). *Comparison of the soil extraction isotherms of soil samples saturated with nonpolar liquids*. Water, Air, and Soil Pollution: Focus, 6(3–4), 331–342. DOI: 10.1007/s11270-006-9067-5.