



A MAGYAR TUDOMÁNY ÜNNEPE

A Magyar Tudományos Akadémia programsorozata

MŰSZAKI KONFERENCIA

NEMZETKÖZI INTERDISZCIPLINÁRIS
KONFERENCIA

A b s z t r a k t k ö t e t

Tudományos tanácsadás a társadalom szolgálatában

2024

2024. november 4.

Dunaújváros



A konferencia szervezője a Dunaújvárosi Egyetem
www.uniduna.hu

A konferencia ármogatója: MOL Magyarország





A MAGYAR TUDOMÁNY ÜNNEPE

A Magyar Tudományos Akadémia programsorozata

A konferencia szervezésére a
MTA Magyar Tudomány Ünnepe keretében
kerül sor.

A konferencia szervezője a Dunaiújvárosi Egyetem
www.uniduna.hu

A konferencia ármogatója: MOL Magyarország



TUDOMÁNYOS KONFERENCIA 2024

(DUE MK 2024)

*„Tudományos tanácsadás
a társadalom szolgálatában”*

Absztraktkötet

Tartalom

<i>Hári László Róbert</i> Kísérlettervezés a járműrezgést befolyásoló tényezők vizsgálatára	6
<i>Koroknai László</i> EMAT és ultrahangos falvastagságmérés összehasonlítása	30
<i>Kovács Imre</i> Nemesfémek hatása a nanoötvözetek kialakulására és szerkezetükre	37
<i>Kovács-Bokor Éva–Kiss Endre</i> Növények közötti szinergiahatások a nehézfémek felvételében	45
<i>Nagy András</i> Energiatárolás hidrogénben: kihívások és lehetőségek	57
<i>Petrovickijné Angerer Ildikó</i> Dunaújváros levegőszennyezettségi állapotának értékelése	64
<i>Szabó Andrea</i> Acéltisztaság fejlődése a technológiaváltás útján	72
<i>Szilassy Péter Ákos</i> Megfelelőségi mutató meghatározásának módszere az akkumulátoros elektromos autóbuszok és az autóbuszviszonylatok megfeleltetésére	77
<i>Tatár Levente–Bereczki Péter</i> Folyásgörbe a szakítóvizsgálat kontrakciós szakaszában	90
<i>Wizner Krisztián</i> Az ipari adatkezelés szerepe az Ipar 4.0 keretében a nehéziparban	104

Hári László Róbert

Kísérlettervezés a járműrezgést befolyásoló tényezők vizsgálatára

Dunaújvárosi Egyetem, Műszaki Intézet, Gépészeti és Energetikai Tanszék

harilaszlo@uniduna.hu

Kulcsszavak: Design of experiments, DOE, kimeneti változók.

Absztrakt:

Jelen tanulmány célja a személygépjármű utaskomfortját befolyásoló rezgéstani tényezők vizsgálatára irányuló kísérletsorozat tervezésének bemutatása. A tanulmány javaslatot tesz a lehetséges kimeneti változókra, valamint a kísérleti beállításokban szereplő faktorokra és azok szintjeire. A tervezés a *Design of experiments*, *DOE*, kísérleti módszertanra épít, amellyel az egyes tényezők hatásainak, valamint kölcsönhatásainak feltárása lehetségessé válik a tesztkörök során rögzített minták alapján.

Bevezetés

A gépjárművek rezgése összetett jelenség, amelyet számos tényező befolyásol. Ezek egy része a jármű menetdinamikai tulajdonságaihoz, más tekintetben a külső körülményekhez, nem kevésbe a vezetési stílushoz kapcsolódnak. A kialakuló rezgések befolyásolják az utasok kényelmét és az alkatrészek élettartamát. A gépjárművek közlekedése során kialakuló dinamikai viselkedés vizsgálata gyümölcsöző forrásként szolgál számos szakterület számára; így, a teljesség igénye nélkül: a járművek menetstabilitása, utaskomfortérzet vagy szállítmányozási relációban a csomagokat érő gerjesztések tanulmányozása céljából.

A kutatások egy része az útpálya degradációjának szempontjából végez kísérleteket – az *út gerjesztése* –, míg más vizsgálatok pont az útgerjesztésnek kitett lengő rendszert állítják középpontba. Személyes kutatási preferenciáim alapján eltekintek itt egyéb közlekedési módok (úgy mint hajózás, repülés és valamilyen ideértve a vasúti szállítást) tárgyalásától.

Jelen tanulmány az útgerjesztésnek kitett rendszereket állítja vizsgálatainak középpontjába, mint például személygépjárművek és annak utasai vagy szállítmányozási relációban a csomagok. A kapcsolódó kutatások átfogó tárgyalására most nem érdemes vállalkozni; még a tipikusnak mondható módszertani tárház is túl széles ehhez, így az analitikus-, numerikus- és kísérleti módszerek tekintetében. Az összetett többszabadságfokú rendszerek, a nemlinearitások és nem egyértelmű geometriai kényszerek nem könnyítik meg, de mindenképpen erősen behatárolják az előbbi két módszerrel kapható eredmények pontosságát. Természetesen az empirikus módszerek is a saját kompromisszumaikkal terheltek.

A következő szakaszok a kísérleti módszereken belül egy, a személygépjárművekkel történő közlekedés során tapasztalható rezgéstani állapotok vizsgálatára szolgáló kísérleti terv felállítását mutatja be. Ehhez a már tradicionálisnak számító kísérlettervezés (*Design of Experiments, DOE*) módszertanát használja. A 2. szakasz egy rövid áttekintést ad a DOE-t érintő alapvető kérdésekről és igyekszik képet adni a kísérletek elvégzéséhez. A járműrezgést befolyásoló lehetséges bemeneti változók tárgyalását, a lehetséges kimeneti változók ismertetése követi. A 3. módszertani szakasz immár a címben szereplő tényleges kísérleti terv felállítását rögzíti, melynek eredménye, a kísérleti terv. A 4. eredmények szakaszban kerül bemutatásra és az 5. Diskusszió szakaszban annak előnyeit és hátrányait tárgyalja. A tanulmányt egy összefoglaló kitekintés zárja a 6. szakaszban.

Irodalmi áttekintés

Érdemesnek tartom az irodalmi áttekintést Sir Ronald A. Fisher munkásságának megemlítésével kezdeni. 1919-ben Fisher statisztikus lett a London melletti rothamstedi kísérleti állomáson (*Rothamsted Experimental Station*), mely pozíció lehetővé tette számára, hogy más kutatókkal együtt mezőgazdasági terpei és laboratóriumi kísérletekben vegyen részt üvegházhatással, genetikával és tenyésztési kísérletekkel foglalkozzon. Az itt végzett munkája forradalmasította a kísérlettervezést a varianciaanalízis feltalálásával. Könyvei, a *Statistical Methods for Research Workers* (1925) és a *The Design of experiments* (1939) olyan kulcsfontosságú elveket fektettek le, mint a randomizálás, a replikáció, a lokális kontroll vagy blokkosítás, zavaró (*confounding*) hatások, randomizált blokkok és a faktoriális elrendezések.¹ [1]

A DOE MENETE

A DOE egy szélesebb keretrendszer, amely magában foglalja az ellenőrzött tesztek tervezését, elvégzését, elemzését és értelmezését, az eredményt befolyásoló tényezők értékelése érdekében. A faktoriális tervezés a DOE-ban használt számos módszer egyike. A varianciaanalízist (Analysis of variance, ANOVA) gyakran használják a DOE-n belül a kísérletek eredményeinek elemzésére, különösen azokéra, amelyek faktoriális tervezéssel kapcsolatosak. A DOE folyamat tehát egy strukturált megközelítés a szisztematikus és hatékony kísérleteket biztosítása érdekében, melynek lépései így foglalhatók össze:

1 Jelentős hozzájárulásai közé tartozik még a valószínűség (*likelihood*) és a maximális valószínűségi becslés (*maximum likelihood*), a kis mintákra alkalmas módszerek kifejlesztése, a kis mintákból származó számos statisztika pontos eloszlásának leírása, a Fisher-féle információs mérték, valamint a hipotézisvizsgálathoz való hozzájárulás.

- 1. A fejlesztendő probléma megnevezése és a cél kitűzése** a javítandó problémát vagy folyamatot azonosítja, valamint egyértelmű célokat nevez meg a kísérlethez.
- 2. A tényezők, szintek és kimeneti változók kiválasztása** során szabályozható vagy szabályozatlan bemeneti változók (factor, tényező) kerülnek kiválasztásra és szinteket (level) jelölünk ki az egyes tényezőkhöz. A mérhető kimenetek (response, válasz) azonosítása szintén ide tartozik.
- 3. A kísérleti elrendezés kiválasztása** a tényezők és a probléma jellege alapján történik, figyelembe véve az elérhető erőforrásokat, mint idő, költségvetés és kísérleti futtatások reális száma.
- 4. Randomizálás és csoportosítás** olyan módszerek, amelyeket a kísérleti futtatások (run, futás, futtatás) blokkosítására használnak a szabályozatlan változók hatásának minimalizálása érdekében.
- 5. A kísérlet elvégzése** során a kiválasztott tervet követve a tényezők megadott szinteken kerülnek ellenőrzésre, és az egyes futtatások válaszait rögzítjük.
- 6. Az adatok elemzése** során statisztikai módszerekkel (pl. ANOVA) és grafikus technikákkal (Pareto-diagramok) dolgozhatunk a főhatások és interakciók megértése érdekében.
- 7. Az eredmények értelmezése** során azonosítani kell a kimeneti változókat befolyásoló legfontosabb tényezőket, meghatározva az optimális beállításokat. Szükség esetén a tervezés finomítása érdekében további iterációkat jelölhetünk ki.
- 8. A megállapítások megerősítésére** további kísérletek során verifikáljuk az optimális beállítások és elvárt kimeneti hatások közötti összefüggést.
- 9. A megoldás megvalósítása** a vizsgált folyamatban vagy rendszerben lehetővé teszi az optimalizált működési tartomány folytatólagos alkalmazását.

SZŰRÉS VAGY OPTIMALIZÁCIÓ

A kísérletek tervezésénél és létrehozásánál az első eldöntendő kérdés, hogy szűrést vagy optimalizálást végzünk-e, mivel ezek a megközelítések különböző célokat szolgálnak.

A **szűrővizsgálatok** (*screening*) célja a kimeneteli változót befolyásoló jelentős tényezők azonosítása, a lehetségesen befolyással bírók bemeneti változók listájának szűkítése néhány kulcsfontosságú változóra. Jellemzően a főhatásokra összpontosítanak és egyszerűsített terveket használnak, mint a Plackett–Burman-terv vagy a törtfaktoriális terv (*fractional factorial design*). Előnyeik közé sorolható, hogy a kísérletek kevesebb futtatást használnak még nagyszámú tényezők esetén is, viszont alacsony felbontású adatokat szolgáltatnak (2. táblázat).

Az **optimalizálási** kísérlet célja a kulcsfontosságú tényezők finomhangolása a kimeneti változó optimális beállításainak megtalálása érdekében. Ilyenkor nagyobb hangsúly helyezhető az interakciós hatásokra is. Az olyan összetett tervek, mint a válaszfelület-módszer (*Response surface method, RSM*), a *Central Composite Design (CCD)* vagy a Box–Behnken-módszer nagyobb felbontású tervekkel pontosabb modellt szolgáltat. A szűrővizsgálatok és optimalizációs tervek egy kvalitatív összehasonlítása található az 1. táblázatban.

Összefoglalva elmondható, hogy szűrővizsgálatokat alkalmazunk, amikor még nem vagyunk biztosak a fontos faktorok mi-
benlétében, majd optimalizálással meghatározhatjuk az immár kevesebb, de bizonyítottan jelentős befolyással bíró faktorok optimális beállítását a legjobb „teljesítmény” érdekében. E szakaszokat így gyakran célszerű egymás után két külön tervben használni.

KÍSÉRLETTERVEZÉSI MÓDSZEREK

A DOE különféle terveket használhat, amelyek a speciális kísérleti igényekhez igazodnak. Néhány, a leggyakoribb módszerek közül: A **faktoriális tervek** (*Factorial design, FD*) hatékonyan tesztelik az összes lehetséges faktorszintet, míg a teljes faktoriális tervek (*Full factorial design, FullFD*) a faktorszintek összes kombinációjának tesztelésével tanulmányozzák a tényezők közötti kölcsönhatást.

1. táblázat. A szűrővizsgálatok és optimalizációs kísérletek aspektusai.

Szemponatok	Optimalizálás	Szűrővizsgálat
Célja	A tényezők szintjeinek finomhangolása a legjobb eredmény érdekében	Jelentős tényezők azonosítása
Faktorok száma	Kevés (már azonosított) tényező	Sok tényező
Cél	Fő hatások, interakciók és másodfokú hatások	Csak fő hatások
Design komplexitása	Bonyolultabb, nagy felbontású (pl. RSM, CCD)	Egyszerű, alacsony felbontású (pl. Plackett-Burman)
Futások száma	Több futás, nagyobb erőforrás-befektetés	Kevesebb futás
DOE szintje	Szűrés után, részletes elemzéshez	Kezdő feltárás

A részleges faktoriális tervek (*Fractional factorial design, FracFD*) a fentiek egy részhalmaza alapján működik. A **válaszfelület-módszertan** (*Response surface methodology*) egy folyamat-optimalizálási technika, amely több tényező és egy válaszváltozó közötti kapcsolatot vizsgálja, például olyan tervek segítségével,

mint a *Central Composite Design* és a *Box–Behnken Design*. A **Ta-guchi-módszerek** az ellenőrizhetetlen zajhatások minimalizálását és a minőség javítását helyezik középpontba, jellemzően ipari környezetben terjedt el a használatuk. A **Plackett–Burman-terv** egy szűrési módszer a kulcsfontosságú tényezők azonosítására, nagyszámú faktor esetén. A **latinnégyzet**-alakú kialakítás (*Latin square design*) egy statisztikai módszer, amely magában foglalja a *kezelések négyzetrácsban történő elrendezését és két zavaró változó hatásainak szabályozását*. A **véletlenszerű blokktervezés** (*Randomized block design*) módszer a hasonló kísérleti egységek blokkokba csoportosításával, majd az egyes blokkokon belül a kezelések véletlenszerűvé tételével szabályozza a külső változók okozta változékonyságot. A **Split-plot design** két szintre osztja a kísérleteket, különböző randomizálási sémákat használva az egésze és a részterületekre, ami hasznos olyan kihívást jelentő tényezőknél, mint a környezeti feltételek. A **keverék tervek** (*Mixture designs*) például keverékarányokkal végzett kísérletekben használják a különböző összetevők arányainak, a válaszra gyakorolt hatásuk tanulmányozása érdekében. A fenti módszerek mindegyike különböző kísérleti helyzetekre alkalmas; gyakorta a faktoriális tervet alkalmazva korai szakaszokban és válaszfelületi módszert az optimalizálási feladatokhoz.

A teljes faktoriális és részleges faktoriális tervek

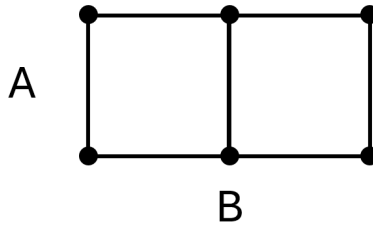
A faktoriális terv (FD) tehát olyan kísérlet, amely több tényező hatását vizsgálja a faktorokhoz tartozó szintek egyidejű rögzítésével. Az 1–3. ábrákon minden pont a faktorszintek különböző kombinációit jelöli. A teljes faktoriális terv, FullFD, mellett részleges faktoriális tervek, FracFD futtatására is van lehetőség.

A FullFD kialakításban a választ a faktorszintek minden kombinációjában mérik, pl. kétszintű FullFD esetében csak kétszintű tényezőket tartalmaznak. Ennek természetesen többszintű általánosítása is elképzelhető (*general full factorial design*), amelyek több mint kétszintű tényezőket is tartalmazhatnak. A kétszintű FullFD esetében a szükséges futtatások száma 2^k , ahol k a faktorok száma. A FracFD során a kísérleteket csak a FullFD faktoriális tervben szereplő futások „töredékén” végzik, ami megkönnyíti a költséghatékony kísérleteket. Az 1. ábra egy általános teljes faktoriális tervet, a 2. ábra egy háromfaktoros teljes faktoriális tervet szemléltet. A 3. ábrán a $\frac{1}{2}$ frakciós faktoriális tervezés látható.

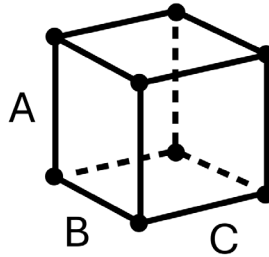
Mivel a FracFD a FullFD egy alhalmazát testesíti meg, abban zavaró (*confounded*) hatásokkal kell számolnunk. Példaként, az öt faktorra rendelkező FullFD esetében a fő hatások és az összes interakció az alábbiak szerint alakul:

- Fő hatások: A,B,C,D,E.
- 2-elemű kölcsönhatások: AB, AC, AD, AE, BC, BD, BE, CD, CE, DE.
- 3-elemű kölcsönhatások: ABC, ABD, ABE, ACD, ACE, ADE, BCD, BCE, BDE, CDE.
- 4-elemű kölcsönhatások: ABCD, ABCE, ABDE, ACDE, BCDE.
- 5-elemű kölcsönhatások: ABCDE.

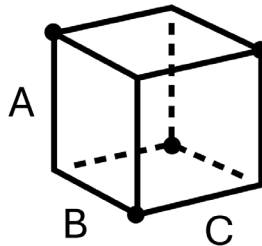
1. ábra. Kétfaktoros tervezés. Az A faktor két szinttel, a B faktor három szinttel egy general full factorial design-ban vizsgálhatók.



2. ábra. Háromfaktoros tervezés, valamennyi tényező két szintje esetén, egy kétfaktoros, két szintes full factorial design-t alkot.



3. ábra. A $\frac{1}{2}$ tört faktoriális tervezés. A $\frac{1}{2}$ tört kialakításnak fele annyi pontja van a teljes faktoriális kialakításhoz képest négy sarokponton mérve a választ.



A zavaró hatások így azt jelentik, hogy a különböző faktorok hatásait vagy a faktorok kölcsönhatásának hatását nem lehet egymástól elválasztani. A FracFD beállításokban így a futások száma csökkenthető, de ennek árát a felbontás kapcsán meg kell fizetni. A faktoriális tervek esetén az elérhető felbontásokat a 2. táblázat szemlélteti, melyben a római számokkal jelzett felbontások egy részlete [2]:

- III. szintű felbontás: a főhatások összetéveszthetők a kétfaktoros kölcsönhatásokkal, pl. $D=AB$.
- IV. szintű felbontás: a fő hatások összetéveszthetők a háromfaktoros kölcsönhatásokkal, pl. $D = ABC$, és a két tényező kölcsönhatása is összetéveszthető más kétfaktoros kölcsönhatásokkal, pl. $AB = CD$.
- V. szintű felbontás: hasonlóan, pl. $E=ABCD$ és $AB=CDE$.

A kísérletet tervezők gyakran elhanyagolható magasabb rendű interakciós hatásokat feltételeznek. A folyamat minőségét befolyásoló tényezők száma sok alkalmazásban egyszerűen túl nagy ahhoz, hogy részletesen tanulmányozni lehessen. A következő szakaszban számos tényezőt sorol fel a tanulmány. Jelen cikk folytatását előre vetítve, a faktorok nagy számát racionalizálással, egyszerűsítésekkel és nem utolsósorban egy szűrési terv alkalmazásával fogjuk ellensúlyozni.

2. táblázat. Az elérhető faktoriális tervek a felbontás feltüntetésével a Minitab 18-ban. [3]

	Faktorok													
Futások	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4		III.												
8				III.	III.	III.								
16				V.	IV.	IV.	IV.	III.	III.	III.	III.	III.	III.	III.
32					IV.	IV.	IV.	IV.	IV.	IV.	IV.	IV.	IV.	IV.
64							V.	IV.	IV.	IV.	IV.	IV.	IV.	IV.
128								VI.	V.	V.	IV.	IV.	IV.	IV.

JÁRMŰREZGÉS LEHETSÉGES FAKTORAI

A járművek rezgése összetett jelenség, a befolyásoló tényezők gyökerezhetnek a jármű szerkezeti felépítésében, felhasznált anyagaiban, az időjárási körülményekben és útfelületi sajátosságokban, vezetési stílusban, vezetéstámogató rendszerekben, többek között. Ezek egy bevallottan szubjektív felsorolását igyekeznek a következő alszakaszok tárgyalni az inherens tényezők és külső körülmények, továbbá, járművi rendellenességek, mérési körülmények csoportjai mentén, kiemelve a vezetési „stílust”.

Inherens tényezők

Súlyelosztás és terhelés: Az egyenetlen járműterhelés vagy a túlsúly rezgéseket okozhat, ami további terhelést jelent a felfüggesztésre és a gumiabroncsokra. Ezt befolyásolhatja az egyenetlen tengelyterhelés. **Jármű-design:** Az autó kialakítása, beleértve az aerodinamikát, a súlyelosztást és az anyagokat, befolyásolja a külső erőkre adott választ.

Alváz merevsége: A merevebb alváz csökkenti a rezgéseket, javítja a kezelhetőséget és a *menetminőséget*, míg a rugalmas alváz felerősítheti azokat. **Felfüggesztési rendszerek:** A felfüggesztési rendszer elnyeli az ütdőéseket és szabályozhatja a rezgéseket. Megkülönböztethetünk aktív és passzív csillapítású felfüggesztéseket.

Járművezetővel kapcsolatos tényezők

Sebesség és vezetési stílus: Közös tapasztalat, hogy ugyanazon az útburkolati hiányosságon lassan, normál és gyorsabb tempó mellett is más-más tranziens jelenséget tapasztalhatunk. *Ceteris paribus*, egy útburkolati küszöbön áthaladva újfent más dinamikával találkozunk.

Külső tényezők

Útfelület és körülmények: Az egyenetlen útfelületek, kátyúk, repedések és törmelékek gerjesztő hatása közismert. **Hőmérséklet:** A hőmérséklet befolyásolja a gumiabroncsok légnyomását, a gumik tapadását. **Aerodinamikai erők:** Az aerodinamikai erők növelhetik a jármű „aszfaltfogását”, de a helytelenül szervült vagy laza elemek éppen averzív hatást is kifejthetnek. Az időjárási körülmények tekintetében gyakran találkozhatunk szél-lökésekkel is, torlónyomással. **Külső terhelések és vontatás:** A pótkocsi vontatása vagy nehéz terhek szállítása megterhelheti a jármű felfüggesztését és hajtásláncát, ami befolyásolja a gerjesztésre adott választ.

Problémákkal kapcsolatos tényezők

Gumiabroncsok és kerekek kiegyensúlyozatlansága: Az autó rezgései gyakran a gumiabroncs vagy a kerék kiegyensúlyozatlanságából erednek. **Felfüggesztési rendszer:** A lengéscsillapítók, rugóstagokból álló felfüggesztési rendszer döntő fontosságú az út rezgéseinek hatékony csillapításában. **Motor-problémák:** Például gyújtáskimaradások, időzítési problémák vagy kopott motortartó bakok rezgéseket okozhatnak az egyenetlen teljesítményleadás és a motor nem megfelelő rögzítése miatt. **Hajtáslánc:** A hajtáslánccal kapcsolatos problémák, beleértve a kardántengely kiegyensúlyozatlanságát, a sebességgel változó rezgéseket okozhatnak. **Fékrendszer:** Az egyenetlenül kopott féktárcsák rezgéseket okozhatnak, pulzáló érzést okozva a fékpedálban, a kormánykerékben vagy az autó vázában. **Beállítási problémák:** A kerék helytelen beállítása, gerjesztést gyakorol a gumiabroncs nem megfelelő forgása miatt, és súlyosbíthatja a meglévő problémákat. **Kipufogórendszer:** A rosszul felszerelt vagy sérült kipufogórendszerek rezgéseket okozhatnak, mivel áthaladnak a jármű vázszerkezetében haladnak, rezonanciát vagy zörgést okozva az utastérben.

Mérési körülmények

Mérőpont helye: A tapasztalható rezgésszintet egyértelműen befolyásolja, hogy rezgés tovaterjedésének mely pontján rögzítjük a jeleket. **Mérési pontok száma:** A vizsgálati lehetőségeket jelentősen kiszélesíti, hogy hány helyen mérjük a jármű rezgését, számos további jelfeldolgozási lehetőséget is felvetve. A méréssel kapcsolatos további körülményeket, mint például a mintavételezési frekvencia és a vizsgálni kívánt sávszélesség meghatározását a diagnosztika hatáskörébe utaljuk.

Természetesen a fenti felsorolások nem teljeskörűek, így azokat a tapasztalat és intuíció vezérelte. A lehetséges külső tényezők kapcsán megjelenik négy paraméter (jármű-design, alvázmerevség, gumibroncs futófelülete, felfüggesztés típusa), melyek egyenként történő figyelembevétele további szintek mellett különös kihívást jelentene. Megjegyezhető továbbá, hogy a szél hatása természetesen befolyásolja a menetdinamikát, azonban a vertikális irányú rezgésekre, várakozások szerint, nincs nagy hatása – kísérleti beállítása jelentős bonyodalmakat jelentene. A fentiek egy sematikus összefoglalását a 3. táblázat szemlélteti.

3. táblázat. A lehetséges faktorok vizsgálatból történő kizárása és kezelhetősége kísérleti szempontból

Faktorcsoport	Faktor	Javaslat (1)	Indoklás
Belső	Súlyelosztás, terhelés	●	Könnyen szerelhető és várhatóan jelentősen befolyásolja a menetdinamikát.
	Jármű-design	●	Ezen tényezők egyenként történő figyelembevétele helyett a szűrővizsgálat során először csak két
	Alvázmerevség	●	„különböző gépjárműt használunk.”
	Gumibroncs futófelülete	●	
	Felfüggesztés típusa	●	
Humán	Sebesség és vezetési stílus	●	Bár nehezen reprodukálható a futások során, de jelentős faktor lehet a várakozások szerint.
Külső	Útfelület és körülmények	●	A vizsgálat tárgyát képező alap paraméter.
	Hőmérséklet-változások	○	A mérési sorozatot javasolt egy nap leforgása alatt elvégezni, a gumi hőtartása szabadtéri körülmények között kihívásokkal járna.
	Szél- és aerodinamikai erők	●	Az egy napra korlátozott "blokk" kialakítása egy nyugodt időjárási viszonyokkal rendelkező napra időzítendő.
	Sár, szennyeződés vagy hó felhalmozódása a kerekeken	○	Nehéz reprodukálhatóság miatt eltekintünk ettől.
	Terhelések és vontatás	●*	Könnyen szerelhető és várhatóan jelentősen befolyásolja a menetdinamikát.
		○ ^(a)	A kísérlettervezés szempontjából élünk az ideális jármű felleltésével.
Zavarok	(...)	○ ^(a)	
Mérés	Mérőpont helye	●	Könnyen beállítható paraméter és a mindennapos tapasztalat szerint is jelentős tényező lehet.
	Mérési pontok száma	●	Bár a több-csatornás mintavételezés pontosabb eredményeket szolgáltatna, azonban a berendezés költségvonzata nem elhanyagolható.

(1) ○ - eltekintünk tőle; ● - körülményesen figyelembe vehető; ● - javasolt

* Bár könnyen szerelhető, de a későbbi vizsgálatokban a vontatmányoktól eltekintünk.

^(a) lásd 2.4.4. szakasz.

JÁRMŰREZGÉS LEHETSÉGES KIMENETI VÁLTOZÓI

A járműrezgések, mint minden rezgésdiagnosztikai paraméter széles tárházát alapvetően az idő- és frekvenciatartományi besorolás mentén lehet legegyszerűbben tárgyalni. Haszontalan lenne megpróbálni felsorolni valamennyi szóba jöhető leíró statisztikát, ehelyett a szerző tapasztalatai alapján szóba jöhető, inkább vizsgálni kívánt változókat sorolja fel az alábbi két szakasz.

Időtartomány

A rögzített jelek időtartományi vizsgálatában elsősorban a rögzített rezgésgyorsulásnak, $P(X=x_i)$, a vizsgálati időtartamra vetített standardizált momentumai, $m_i, i=1,2,3,4$:

$$m_1 = E \left[\frac{X - \mu}{\sigma} \right] \quad (1)$$

$$m_2 = E \left[\left(\frac{X - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$m_3 = E \left[\left(\frac{X - \mu}{\sigma} \right)^3 \right] \quad (3)$$

$$m_4 = E \left[\left(\frac{X - \mu}{\sigma} \right)^4 \right] \quad (4)$$

esetünkben azoknak, a mintából számított, tapasztalati: átlaga, $\bar{x}$, varianciája, s^2 , ferdesége, γ és csúcsossága, κ szolgálhatnak, melyek formális ismertetésétől itt eltekintünk. Nem kevésbe az átlag számítását ugyan nem tudjuk figyelmen kívül hagyni, de értelmezését, mint kimeneti változó, nem feltétlenül indokolt figyelembe venni, mivel 0 körül várjuk annak értékét; kiváltképp, ha a digitális jelfeldolgozás esetén a rezgéshez tartozó DC-komponenst felüláteresztő szűrővel szűrjük.

Más tipikusan figyelt mutatók a jel effektív értéke, x_{RMS} , csúcsértéke, x_p , vagy terjedelme, x_{p2p} és a crest-faktor, x_c :

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (5)$$

$$x_p = \max |x_i| \quad (6)$$

$$x_{p2p} = \max x_i - \min x_i \quad (7)$$

$$x_c = \frac{x_p}{x_{RMS}} \quad (8)$$

Óvatosságot kell azonban tanúsítanunk a csúcsérték és terjedelem esetében, hiszen az utazás során jelentkező tranziens jelenségek amplitúdói igen széles skálán szóródhatnak, ezért azok nem feltétlenül nyújtanak konzekvens becsléseket. Ezen inkonzekvenca ellen több tesztkörből számított átlagokat képezhettünk, azonban felmerülne a kérdés, hogy a többi mutatóval kapcsolatban miért nem járunk el hasonlóan.

Végezetül információelméleti alapokon szívesen vizsgált mutató a Shannon-entrópia, $H(X)$,

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log p(x_i) \quad (9)$$

mellyel a szerző célja a szóba jöhető mutatók több doménre történő kiterjesztése.

Frekvenciatartomány

A rezgésjelek tanulmányozásának másik tipikus területe a frekvenciatartomány, az x_i jelből az

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-2\pi j \frac{kn}{N}} x_i \quad (10)$$

Fourier-transzformációval kapott X_k spektrum alapján. Természetesen a spektrum – legyen az amplitúdó- vagy teljesítmény-spektrum, vagy azoknak sűrűségfüggvénye – a megfelelő normalizálások elvégzése után vehető figyelembe. Ebben a szakaszban azonban a gépjármű haladási sebességéből adódó természetes változások miatt „frekvencia irányú” normalizálásra szeretné a szerző a figyelmet felhívni.

A jármű karosszériáját nem csak az út gerjeszti, hanem belső gerjesztések is jelen vannak a hajtáslánc részéről. Ennek kiküszöbölése, ezáltal a fordulatszámától történő függetlenítésére az order-elemzés nyújt lehetőséget. Korábbi, a spektrogramot érintő vizsgálatok kimutatták, hogy nehéz egy állandó sebességen tartani a gépjárművet, a gázpedál finom kezelése mellett is. A gázpedál mozgására megjelenő reakciók így mind nyomot hagynak a spektrogramon. Ennek tekintetében szükséges regisztrálni a jármű haladási sebességét, vagy valamelyik féltengely fordulatszámát.

A frekvenciatartományban további érdekes valószínűségi változók vizsgálata válik lehetségessé. A fentiekhez hasonlóan az első négy spektrális nyomaték: a spektrális centroid, μ_1 , spektrális szóródás, μ_2 , spektrális ferdeség, μ_3 és spektrális csúcosság, μ_4 :

$$\mu_1 = \frac{\sum_{k=b_1}^{b_2} f_k X_k}{\sum_{k=b_1}^{b_2} X_k} \quad (11)$$

$$\mu_2 = \sqrt{\frac{\sum_{k=b_1}^{b_2} (f_k - \mu_1)^2 X_k}{\sum_{k=b_1}^{b_2} X_k}} \quad (12)$$

$$\mu_3 = \frac{\sum_{k=b_1}^{b_2} (f_k - \mu_1)^3 X_k}{\mu_2^3 \sum_{k=b_1}^{b_2} X_k} \quad (13)$$

$$\mu_4 = \frac{\sum_{k=b_1}^{b_2} (f_k - \mu_1)^4 X_k}{\mu_2^4 \sum_{k=b_1}^{b_2} X_k} \quad (14)$$

ahol b_1 és b_2 a vizsgálni kívánt sáv szélesség alsó és felső határai. A fenti egyenleteken túl további, az akusztika területén sikeresen használt mutatók is figyelembe vehetők, de a tanulmánynak nem célja minden lehetséges változót ismertetni.

Módszerek

A tanulmány jelen szakasza a DOE általános menetének első négy pontját tárgyalja. Az olvasó saját belátása szerint választhat ki, hagyhat el vagy mutathat be új vizsgált változókat.

1. A probléma és a cél meghatározása: A szűrővizsgálat célja meghatározni, hogy a személygépjárművel történő közlekedés során rezgésdiagnosztikai szempontból mely független változók vannak a legnagyobb befolyással a járműre az alábbi kimeneti változókra való tekintettel.

2. A tényezők, szintek és kimeneti változók kiválasztása:

a. *Kimeneti változók:* Egy futás három tesztkört felölve, a függőleges irányú rezgésgyorsulásból számított körönkénti κ , x_{RMS} , x_C értékeinek átlaga, hasonlóan $H(X)$ és $\mu_i, i=1,2,3,4$ változókra.

b. *Faktorok és szintek:* A 3. táblázatban javasoltként feltüntetett faktorokat és azokon belül két-két szintre mutat be egy példát a 4. táblázat, mely egyúttal rögzíti a vizsgálni kívánt faktorokat és szintjeiket.

3. Kísérleti elrendezés kiválasztása:

Az $\frac{1}{2}$ frakcionális faktoriális terv 5 faktor esetén replikációk nélkül V. szintű felbontást eredményez, 16 futás mellett. Ez teljes faktoriális terv esetén 32 futást igényelne.

4. Randomizálás és blokkosítás:

- a. Az ismétlés (*repeat*) és replikáció (*replication*) ugyanarra a kísérleti beállításra vonatkoznak. Az ismétlés ugyanazon vagy egymást követő futások alatti mérési sorozatot alkotnak, melyre a három tesztkör folytonos lefutása jó lehetőséget ad. Ezzel szemben az ugyanazon beállítás randomizált ismétlése, azaz a replikáció, a szűrővizsgálatok esetén nem jellemző.
- b. A blokk (*block*) olyan kategorikus változó, amely a válaszban bekövetkező olyan változásokat magyarázza, amelyeket nem a faktorok okoznak. A blokkok figyelembe veszik azokat a különbségeket, amelyek a különböző körülmények között végzett futtatások között előfordulhatnak, így a blokkok a nem kontrollálható változókból eredő változásokat veszik figyelembe, hogy ezek a hatások ne keveredjenek össze a vizsgálni kívánt tényezők hatásaival. Az olyan nem kívánt hatások, mint az időjárás változékonysága egy derűs, csendes napon végzett méréssel minimalizálható.
- c. Végsőzetül a különböző kísérleti beállításokhoz tartozó futások véletlenszerűsítését a statisztikai programcsomagra bízuk.

Az 5–9) pontok: a kísérlet elvégzése, az adatok elemzése, az eredmények értelmezése, a megállapítások megerősítése és a megoldás megvalósítása a kísérletek elvégzése után egy későbbi cikk témájául szolgálhatnak.

Eredmények

Az 4. táblázat a $\frac{1}{2}$ frakcionális faktoriális terv kísérleti menürendjét ábrázolja. Ahogy a 4. táblázatból is látszik, a külön-

böző betűk egy-egy szintet jelölnek, míg a -1 folytonos változók alsó beállítását, +1 ugyanennek a felső szinthez tartozó beállítását jelölik.

Diszkusszió

A terv 5 faktorból áll egy kétszintű tört faktoriális elrendezésben, 16 futtatásból álló alaptervvel, V felbontás mellett. A $2^5=32$ a faktoriális elrendezés 32-ről 16-ra csökkenti az összes futtatást, egyensúlyt teremtve a kísérleti hatékonyság és a szignifikáns hatások kimutatásának képessége között.

4. táblázat. A lehetséges faktorkok vizsgálatból történő kizárása és kezelhetősége kísérleti szempontból

Faktorcsoport	Faktor	Javaslat ⁽¹⁾	Szint 1	Szint 2
Belső	Súlyelosztás, terhelés	●	[-1] Csak a sofőr	[+1] További 100 kg elosztása az üléseken
	Jármű	○	[A] Jármű	[B] Jármű
	Alvázmerevség	○		
	Gumiabroncs futófelülete	○		
	Felfüggesztés típusa	○		
Humán	Sebesség vezetési stílus	●	[-1] Nominális utazósebesség 20 km/h	[+1] Nominális utazósebesség 40 km/h
Külső	Útfelület és körülmények	●	[S] Sima tesztpálya	[D] Durva tesztpálya
Mérés	Mérőpont helye	●	[E] Utastérben elől	[H] Hátul

⁽¹⁾ ○ - körülményesen figyelembe vehető; ● – javasolt

Az V. felbontás azt jelzi, hogy a főhatások és a kéttényezős kölcsönhatások megkülönböztethetők egymástól. Az egyes faktor-kombinációk egyetlen ismétlése minimalizálja a redundanciát, míg az egyetlen blokk biztosítja, hogy minden futtatás azonos körülmények között történik, megőrizve a terv magas felbontását anélkül, hogy további blokkokból származó variabilitást vezetne be.

Jelen tervben nincsenek középpontok, következésképpen, a lineáris hatások és a kétirányú kölcsönhatások hatékonyan értékelhetők, de korlátozott a nem lineáris kapcsolatok vagy görbületi hatások kimutatásában.

Az *aliasing* vagy összetéveszthetőség (*confounding*), azért fordul elő a tört faktoriális tervekben, mert az nem tartalmazza a faktorszintek összes kombinációját. Például, ha az A faktor összezavarodik a BCD háromirányú kölcsönhatással, akkor az A becsült hatása az A és a BCD tényezők összege; másszóval nem lehet meghatározni, hogy egy jelentős hatás oka A , esetleg BCD , vagy a kettő kombinációja.

A generátor² által definiált *alias*-szerkezet $E = ABCD$ és a meghatározó reláció³ $I = ABCDE$ betekintést nyújt, hogy a beállítás tört faktoriális jellegéből adódóan a hatások hogyan keverednek és, hogyan jelennek meg aliasok.

2 A generátoregyenlet (*generating equation*) a további tényezősinteket más tényezősintek szorzataként határozza meg. Lehetővé teszi egy frakcionált terv létrehozását azáltal, hogy egy faktort mások kombinációjaként definiál. Ebben a tervben a $E = ABCD$ generátor azt jelenti, hogy a E faktor szintjeit a A , B , C és D faktorok szintjeinek szorzásával határozzuk meg.

3 A meghatározó reláció (*defining relation*) egy teljes egyenletkészlet, amely leírja a terv összes lehetséges aliasát. Tartalmazza az I -azonosságot (*identity*), amely a hatástalanságot és az azzal összetéveszthető tényezők kombinációit jelenti. Az I -azonosság a kimeneti változó teljes átlagára vagy alapszintjére utal. Mivel $I = ABCDE$, a válaszban megfigyelt, a teljes átlagnak tulajdonított bármilyen változás a A , B , C és D tényezők közötti kölcsönhatásból is adódhat.

A jelen kétszintű faktoriális elrendezésben a meghatározó kapcsolat azonosítja, hogy a főhatások és kölcsönhatások mely kombinációi nem különböztethetők meg egymástól, az alábbiak szerint:

$I+ABCDE$ azt jelzi, hogy az azonosság, I , és az öttényezős kölcsönhatás, $ABCDE$ összezavarodnak, tehát az $ABCDE$ -hatás nem választható el a teljes átlagtól. Továbbá az V. szintű felbontás miatt, minden főhatás négyirányú kölcsönhatással keverhető össze: $A+BCDE$; $B+ACDE$; $C+ABDE$; $D+ABCE$; $E+ABCD$. Továbbá, a kéttényezős kölcsönhatások aliasa háromtényezős kölcsönhatásokból eredhet: $AB+CDE$; $AC+BDE$; $AD+BCE$; $AE+BCD$; $BC+ADE$; $BD+ACE$; $BE+ACD$; $CD+ABE$; $CE+ABD$; $DE+ABC$.

Összefoglalva, az *alias*-szerkezet tükrözi a frakcionált faktoriális tervekre érvényes korlátozásokat. Minden főhatás egy négyirányú kölcsönhatással, és minden kétfaktoros kölcsönhatás egy háromirányú kölcsönhatással van összekapcsolódva. Ez a struktúra rávilágít a frakcionált mintákban rejlő kompromisszumokra, mindeközben csökkentik a szükséges futtatások számát. Az összekeveredő hatások külön becslésének lehetősége így korlátozott, de élhetünk a magasabb rendű kölcsönhatások elhanyagolhatóságának feltételezésével.

5. táblázat. A $\frac{1}{2}$ frakcionális faktoriális terv 5 faktor esetén. A, B a jármű jele; S, D a sima vagy durva pálya jele; E, H a műszer lokációja elöl vagy hátul és -1, +1 a folytonos változók alsó és felső beállítása a 4. táblázat szerint.

Standard sorrend(a)	Futtatási sorrend(b)	Középpont(c)	Blokk	Tömeg	Jármű	Sebesség	Pálya	Mérés
2	1	1	1	1	A	-1	S	E
15	2	1	1	-1	B	1	D	E
13	3	1	1	-1	A	1	D	H
1	4	1	1	-1	A	-1	S	H
10	5	1	1	1	A	-1	D	H
14	6	1	1	1	A	1	D	E
6	7	1	1	1	A	1	S	H
12	8	1	1	1	B	-1	D	E
7	9	1	1	-1	B	1	S	H
8	10	1	1	1	B	1	S	E
11	11	1	1	-1	B	-1	D	H
3	12	1	1	-1	B	-1	S	E
6	13	1	1	-1	A	1	S	E
16	14	1	1	1	B	1	D	H
4	15	1	1	1	B	-1	S	H
9	16	1	1	-1	A	-1	D	E

- (a) (Standard order) a futások nem véletlenszerű sorrendje. Ez hasznos a tervnek a tankönyvekben vagy más alkalmazásokban található tervekkel való összehasonlításához.
- (b) (Run order) a sorrend, amelyben a kísérletet végre kell hajtani. Csökkenti a torzítás lehetőségét, ha a kísérletet véletlenszerű sorrendben futtatjuk.
- (c) (Center Point) kétszintű faktoriális design esetében: a középpontok kísérleti futtatásokat jelölnek, ahol az összes tényezőszint félúton van beállítva az alacsony és a magas beállítás között: 1 egy sarokpont; 0 a középpont. [4]

Konklúzió

Jelen cikkben szemléltettem a kísérlettervezés gondolatmenetét és bemutattam azt a kísérleti terv összeállításáig. A járműrezgéseket befolyásoló tényezők számossága miatt tapasztalatra és intuícióna támaszkodva a lehetséges faktorok egy jó kiindulási alapjának tárgyalása után potenciálisan vizsgálható kimeneti változókat ismerttettem. A kísérleti módszertanok tárházából, a $\frac{1}{2}$ frakcionális faktoriális terv öt faktor figyelembevételével, tényezőként két-két szinttel, 16 futást eredményezett, amit a lehetséges összetéveszthetőségi állapotok tárgyalása követett. A fenti tárgyalás szükséges folytatása néhány próba futás elvégzése után a statisztikai próbára vonatkozóan az erő-hatás nagyság-mintanagyság hármas ellenőrzése, szükség esetén a fenti terv finomítása. A végső célhoz vezető út folytatása a teszt pályák megtervezése, a gépjárművek kiválasztása és mérési elrendezés pontosítása.

Irodalomjegyzék

- [1] Salkind, N. J. (2007): „Fisher, Ronald Aylmer (1890–1962)”, *Encyclopedia of measurement and statistics*, köt. I., III. köt. Sage publ, Thousand Oaks (Calif.),
- [2] Guthrie, W. F. (2020): „Fractional factorial design specifications and design resolution”, *NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods (NIST Handbook 151)*. National Institute of Standards and Technology, o. Section 5.3.3.4.4. doi: 10.18434/M32189.
- [3] *Minitab*®. (2017): Minitab, Inc.
- [4] „How Minitab stores design information in the worksheet”. *Minitab® Support*. Elérés: 2024. október 26. [Online]. Elérhető: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/supporting-topics/basics/how-minitab-stores-design-information/>

Koroknai László

EMAT- és ultrahangos falvastagságmérés összehasonlítása

Dunaújvárosi Egyetem, Műszaki Intézet

koroknail@uniduna.hu

Bevezetés

A roncsolásmentes vizsgálatok már az emberiség megjelenése óta van jelen. Az évszázadok alatt több roncsolásmentes vizsgálati eljárásokat dolgoztak ki. Megkülönböztetünk felületi és térbeli vizsgálati eljárásokat. A felületi eljárások azt jelenti, hogy a felületre nyitott vagy éppen felület közeli folytonossági hiányokat lehet detektálni velük. Ilyen eljárás például a szemrevételezéses vizsgálat, mágneses vizsgálat, folyadékbehatolós vizsgálat. A térbeli vizsgálatok alatt az ultrahangos vizsgálatot, radiográfiai vizsgálatot értjük, illetve az olyan vizsgálatokat, amikkel az anyag belsejében lévő folytonossági hiányokat lehet meghatározni.

Az összes roncsolásmentes anyagvizsgálati eljárások közül az ultrahangos vizsgálatot alkalmazzák a leggyakrabban és a legtöbb iparban, mivel szerteágazó felhasználási területe van és fajtái.

Ultrahangos vizsgálat fajtái:

- Hagyományos,
- Fázisvezérelt,
- TOFD,
- Bemerítéses,
- Falvastagságmérés,
- EMAT.

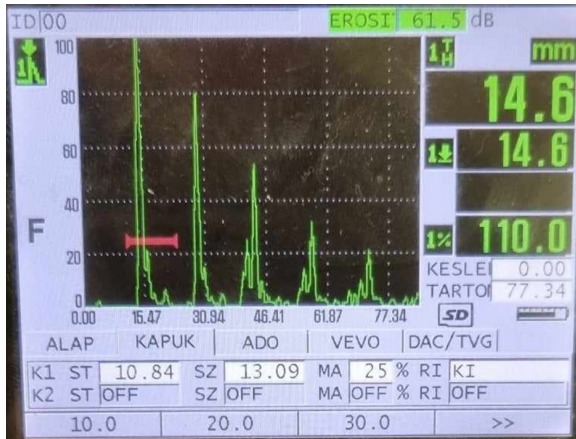
Az ultrahangos vizsgálat során 20 kHz feletti frekvenciájú hanghullámokkal végezzük a vizsgálatot. A vizsgálófejek tartalmaznak egy piezokristályt, amit megrezegtetünk és ezáltal longitudinális hullámok keletkeznek. A hullámot az anyagba vezetjük, úgy, hogy csatoló közeget alkalmazunk, ami az ultrahang tovább terjedését biztosítja a vizsgálati anyagba. Ezáltal az anyag részecskéi különféleképpen kezdenek el mozogni. Az vizsgálati anyagunk hátulsó felületéről, azaz a hátfalról, fogunk kapni egy visszhang jelzést, egy amplitúdó kiugrást.

Természetesen az ultrahangos vizsgálat megbízhatóságát számos tényező befolyásolja, például az anyag típusa, a hiba típusa és mérete, a vizsgálófej frekvenciája és típusa, valamint a csatoló közeg minősége. A megfelelő paraméterek kiválasztása kritikus a pontos eredmények elérése érdekében.

FALVASTAGSÁGMÉRÉS

Az ultrahangos vizsgálat során a felület megfelelő előkészítése után a vizsgálófejet, amely az ultrahanghullámok kibocsátására és a visszavert jelek érzékelésére szolgál, a vizsgálati darabra illesztjük. Ehhez megfelelő csatolóközeget, például olajat, alkalmazunk, amely biztosítja az ultrahang hullámok hatékony átvitelét az anyagba. A vizsgálókészüléket előzetesen etalonokon végzett beállításokkal kalibráljuk, hogy a geometriai jellemzők és az érzékenység megfelelő legyen. Ennek köszönhetően lehetőség nyílik az akusztikai határfelületek, azaz a visszaverődést okozó reflexiós felületek helyének pontos meghatározására, valamint a visszavert ultrahang energia mértékének mérésére.

1. ábra. Ultrahang visszaverődések



A vizsgálat során nemcsak a visszaverődési pontok helyét lehet azonosítani, hanem a visszavert hullám intenzitását is, amelyből következtethetünk a reflexiós felület méretére és jellegére.

EMAT

Az ultrahangos vizsgálat legújabb változata az EMAT, azaz Electro-Magnetic Acoustic Transducer. Ennél a vizsgálatnál nem piezokristály megrezegtetésével állítjuk elő az ultrahangot, hanem a vizsgáló fej tartalmaz egy mágnezt, illetve egy elektromágneses tekercset. Az EMAT rendszerek a Lorentz-erő, az elektromágneses indukció és a magnetostrikció jelenségeit használják ki az ultrahangos hullámok generálásához és érzékeléséhez. Az EMAT vizsgálófej egy mágneses mezőt hoz létre, amely az anyag felületén örvényáramokat indukál.

Ezek az örvényáramok az anyagban mechanikai rezgéseket generálnak, amelyek ultrahangos hullámokká alakulnak.

Az anyagban terjedő hullámok a longitudinális és a tranzverzális hullámok, míg a felületén a Rayleigh és a Lamb-hullámok terjednek.

2. ábra. EMAT-rendszer



Vizsgálat

A vizsgálatok végrehajtásához egy 200mmx200mm nagyságú laposacélterméket használtam, aminek a névleges vastagsága 14mm.

A vizsgálatok célja, hogy egy felmérést, összehasonlítást tudjak készíteni kizárólag falvastagságmérésre hangsúlyozva.

A vizsgálatokat a következő mérőeszközök segítségével végeztem el:

- Olympus MG2-DL falvastagságmérő,
- Olympus LTC EPOCH hagyományos ultrahangos mérőeszköz,
- M2M GEKKO fázisvezérelt mérőeszköz,
- EMAT.

3. ábra. Vizsgálati darab



A vizsgálati darabon a mérési pontok a négy saroknál és a felület közepén helyezkednek el. Csatolóközegnek olajat választottam.

A mérések megkezdése előtt a mérőműszereket kötelező jelleggel kalibrálni kell a szabványos etalonokkal (ET1 és ET2). Az etalonok adott vastagságokkal rendelkeznek: 12.5mm, 25mm és 100mm. Mivel a vizsgálati darab névleges vastagsága 14 mm, így az eszközöket 12.5mm és 25mm vastagságra kellett kalibrálni.

4. ábra. Mérési adatok

MG2-DL [mm]	Olympus LTC [mm]	M2M GEKKO [mm]	Innerpsec [mm]
14,03	13,73	14,08	14,145
14,02	13,83	14,06	14,125
14,026	13,83	14,12	14,141
14,04	13,73	14,09	14,145
14,013	13,73	14,10	14,127
14,03	13,77	14,09	14,14

A mérési adatokból látható, hogy közel 20%-os szórás van az átlagolt eredmények között, ami eléggé nagy mértéknek számít. Azonban ha jobban megfigyeljük az adatokat, akkor meg lehet állapítani, hogy a legbiztosabb mérési rendszer az MG2-DL típusú falvastagságmérő és az M2M GEKKO típusú fázisvezérelt mérőrendszer.

Konklúzió

Összefoglalásként elmondható, hogy a vizsgálatok végrehajtása közben tapasztaltam a módszerek között különbségeket és hasonlóságokat. Ezeket tartalmazza az 5. ábra.

5. ábra. Összehasonlítás

Ultraszónusos vizsgálat	EMAT
> 20 kHz	
Etalonok használata	
Bármilyen anyagminőség	Inkább ferromágneses anyag
Csatolóközeg szükséges	Nincs csatolóközeg
Alacsony beszerzési ár	Magas beszerzési ár
Százados pontosság	Ezredes pontosság
„Könnyen” kezelhető	

Érdemes megemlíteni, hogy megfelelő vizsgálati módszer kiválasztása nagyban függ a vizsgálati körülményekkel. Ha például olyan környezetben kell elvégezni a vizsgálatot, ahova szennyező anyagok nem juthatnak be, akkor a legjobb választás az EMAT, mivel nincs szükség csatoló közegre.

Mindegyik vizsgálatra elmondható, hogy „Könnyen” kezelhető vagy elvégezhető. Ez a vizsgálatot végző személytől függ, hogy mennyire képzett, illetve a mérőrendszereket mennyire ismeri.

Köszönetnyilvánítás

Külön köszönet a mérőeszközökért a Ke-Tech Kft. és az Inner-spec Technologies partnereinknek.

Irodalomjegyzék

- Klauz Koppány Attila (2024): *Hagyományos ultrahangos vizsgálat és az EMAT-módszer összehasonlítása. Záródolgozat.*
- Koroknai László–Kuzsella László (2023): *Ultrahang terjedése, visszaverődése különböző felületű és anyagminőségű anyagokban.* XXVI. Tavaszi Szél Konferencia, pp 555–560.

Kovács Imre

Nemesfémek hatása a nanoötvözetek kialakulására és szekezetükre

Dunaújvárosi Egyetem, Műszaki Intézet, Gépészmérnöki Tanszék
kovacsimre@uniduna.hu

Kulcsszavak: Katalitikusan aktív fém, Co-ionok redukálása, platina-fémek, fotonelektron spektroszkópia, NEXAFS-módszer.

Absztrakt:

A katalitikusan aktív fém ionjainak redukálását egy hordozó felületén kialakítva kaphatunk egy aktív katalizátort. Ezt azonban ún. katalitikus tesztekkel ellenőriznünk kell. A Co-ionok redukálása a katalizátor készítése közben nem készségeen irányítható reakció. A katalitikusan szintén aktív platina-fémek adagolásával a redukció könnyebben megy végbe. A két fém együttes alkalmazása olyan részecskék kialakulását eredményezheti, amelyek szerkezetét nem tudjuk megjósolni. A katalitikusan is használható összetételek pontosabb jellemzésére a röntgen-gerjesztésű fotonelektron spektroszkópia (XPS) mellett az EXAFS, illetve NEXAFS-módszerek alkalmazása is szükséges.

Bevezetés

A nanométer nagyságrendű részecskék szerkezetének vizsgálatára a hagyományos, tömbi vizsgáló módszerek, mint a röntgen-diffrakció nem a legalkalmasabb módszer. Az elektronmikroszkópia (TEM) egy-egy nanoméretű részecske vizsgálatára alkalmas ugyan, de ezt vákuumba helyezett mintán tehetjük meg és nem biztos, hogy a kiválasztott objektumok – nanorészecskék – a minta legjellemzőbb képviselői.

A katalizátorok készítése során – akár kis tételekben vagy akár nagy mennyiségben készülnek – az atomi vagy molekuláris lépések felől szokás megközelíteni. Ez azt jelenti, hogy ha csak egy fémből készítjük a katalizátort akkor a szóban forgó fém ionját oldószerben oldjuk és a katalizátor hordozóra felvisszük. Az esetek többségében az oldószer víz. Ha a fémmion rosszul oldható vízben, avagy nem stabil a vízben, akkor komplexképzővel reagáltatjuk és a fémkomplexet használjuk. A hordozó gyakran egy oxid, pl. alumínium-oxid. A hordozót – por alakban – az említett fémmiont tartalmazó oldatba keverjük, szuszpendáljuk. Az ilyen oldatot szűrjük és szárítjuk. A következő lépésben a komplexképzőt, valamint a mintára került szerves anyagokat oxigénáramban égetéssel távolítjuk el. Ennek a lépésnek a végén az aktív fémmion oxid formában lesz, tehát redukálnunk kell. Legtöbbször hidrogénnel állítunk elő fém részecskéket. A katalizátor vizsgálata során itt merül fel, hogy milyen nagyságú klaszterek jöttek létre és a kiindulási fémmionok milyen hányada redukálódott a „0” oxidációs állapotig. A nehezen redukálható fémmionok esetén a reakció hőmérséklete magas kell legyen a teljes redukcióhoz. A magas hőmérsékleten viszont a nagyobb klaszterek kialakulása lesz kedvező és számolnunk kell azzal is, hogy a katalizátorfelület regenerálása is csak a magasabb hőmérsékleten történhet meg és az aktív fém diszperzitása is csökkenni fog. (Diszperzításfokon a reakció számára elérhető felületi fématomok hányadát értjük. Következésképpen a nagyobb klaszterben több lesz a rosszul hasznosuló fém.)

A nemesfémek kis mennyiségben adva a katalizátorfelületre, elősegíthetik az alacsonyabb hőmérsékleten történő redukciót. Az ilyen esetek megoldására használatos a katalizátorgyártás során egy vagy akár két nemesfém használata is. A nemesfém aránya csak 5–15 atom százalék. Természetesen felmerül, hogy létrejön-e kémiai kapcsolat a két fém között.

Ennek kimutatására több közvetett és néhány közvetlen módszer áll rendelkezésre.

A felsorolt katalizátor készítő lépések egy általános folyamatot igyekeznek bemutatni, de a példákat elsősorban a Fischer-Tropsch-típusú katalizátorok [1, 2] közül vesszük.

Kialakult-e nanoötvözet?

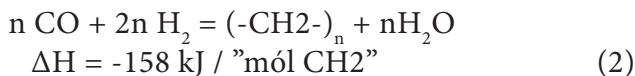
REDUKÁLHATÓSÁG

A kétfémes katalizátor redukálása során találkozhat a két fém. Amennyiben az egyik fém lényegesen készségebben redukálódik, akkor a már redukált fémen megtörténik a hidrogén molekula kemisorpciója, azaz a:



A két fém közötti kapcsolatot közvetett és közvetlen bizonyítékok igazolhatják. Katalitikus folyamatok szempontjából a legfontosabb maga a katalizált folyamat lehet. Amennyiben a F-T folyamatban (Fischer-Tropsch) a szintézisgázból szénhidrogéneket állíthatunk elő (2).

A Fischer-Tropsch-reakció a következőképpen játszódik le:



A keletkező szénhidrogének összetétele az ún. Schulz-Flory-szabályt követi [3]. A szintézisgázban a $\text{CO}:\text{H}_2$ arányt két reakcióval állíthatjuk be közel 1 : 2 arányban (3, 4).

Víz-gáz-reakció:



Gőz reformálás:



A F–T-reakciót jól katalizálják a Fe- és a Co-alapú katalizátorok. A katalizátorokat későbbiekben nemesfém tartalommal módosítva készítették. A nemesfémek szerepe a hidrogénnel végzett redukció előrehaladását mérve megállapítható, hogy alacsonyabb hőmérsékleten kezdődik az oxidok redukciója. Az 1. táblázatban összefoglaltuk saját munka és irodalmi hivatkozások alapján néhány nemesfém hatását a Co redukciója közben.

1. táblázat. A Co-X összetételű katalizátorok redukálásának jellemzői

X	A redukció kezdete és vége / °C	ΔT / °C	Referencia
Pt	100–400	350	[5]
Ru	150–500	200	[6]
Ag	180–550	150	[7]
Re	300–600	150–200*	[8]

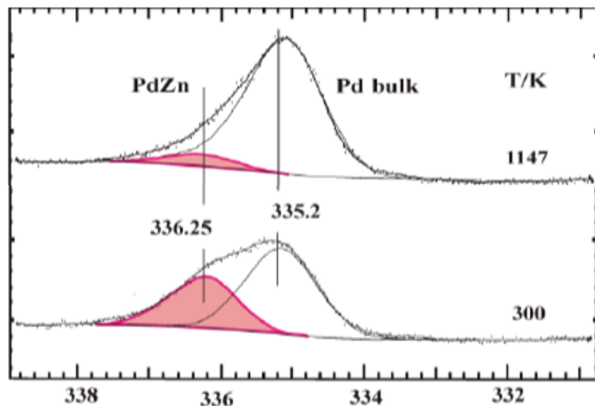
Az 1. táblázat 3. oszlopából láthatjuk, hogy a redukció hőmérséklete jelentősen csökkenthető. A hordozón lévő kobalt ionokat kb. 750–800 °C-on tudjuk teljesen redukálni [4]. A nemesfémek jelenléte a redukció befejeződését mintegy 150–350 °C-kal csökkentette [5–8]. A Re esetében a folyamat végén is csak teljesen redukálódott, $\text{Co}^0 / (\text{Co}^0 + \text{Co}^{\text{on+}}) \approx 0.72$ hányada volt a teljes kobalt tartalomnak.

FOTONELEKTRON SPEKTROSZKÓPIAI (XPS) BIZONYÍTÉK AZ ÖTVÖZET KÉPZŐDÉSRE

Egykristályok felületén a nagyfelbontású XPS-mérésekkel megkülönböztethetjük a felületen és a tömbi fázisban lévő atomok elektronkötési energiájában a különbséget. Ha még közben ötvözet is kialakul, akkor a kölcsönható atomok elektronszámai kissé eltolódnak.

A monokromatikus $\text{Al}_{K(\alpha)}$ röntgen-fotonnal gerjesztett spektrum a palládium felületen létrehozott PdZn felületi ötvözetéről a Pd 3d(5/2) helyzetét az 1. ábra mutatja. Az 1,05 eV-os eltolódást eredményezték. Az energiaeltolódás mértéke arányos az ötvözet képződési entalpiájával. A kísérleti eredményekről bővebb adatok találhatóak még a (Kovács 2024) közleményében.

1. ábra. A Pd(100) felületre ultravákuumban felvitt Zn-atomok és a felületi Pd-atomok közötti ötvöződés hatására a Pd 3d(5/2) jel egy része eltolódott. A felső görbe az 1147 K-en elpárologtatott Zn

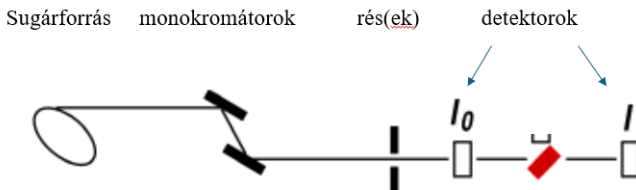


A NANOÖTVÖZET BELSŐ SZERKEZETE

Nanométer nagyságú fémrészecskék szerkezetét közvetlenül például transzmissziós elektron mikroszkópiával (TEM), pásztázó tűszondás mikroszkópiákkal (STM, AFM), illetve röntgen abszorpció-él finomszerkezetének elemzésével (XANES, EXAFS) deríthetjük fel. A nanoötvözetben belül az alkotó fémek elrendeződésére következtethetünk az EXAFS-spektrumok alapján. Ennek a módszernek az előnye, hogy in-situ méréseket is végezhetünk. Az ötvözetképződés és redukció, valamint a változó reakciók közben is vizsgálhatjuk a katalizátort.

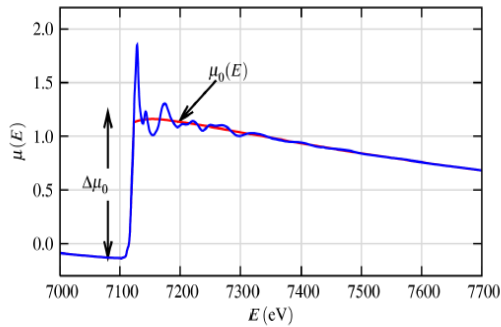
A ciklotronból jövő sugárzásból monokromátorokkal a kívánt hullámhosszúságú fotonokat a mintára vezetve az abszorpció energia függését rögzítettük, lásd a 2. ábra. Majd a kapott spektrumból először az abszorpció-él tartományát kell leválasztani.

2. ábra. A mérésekhez használt berendezések sematikus elrendezése.



Az ábrán balra levő ciklotrontól a pirossal jelölt mintáig. Az I és I_0 ionizációs kamrák jeleiből a Lambert-Beer törvény szerint kapjuk a tulajdonképpeni spektrumot.

3. ábra. Egy vastartalmú minta XAS-spektrumát mutatja



Abban az esetben, ha az abszorpciós-él után néhány 100 eV tartományban nincs másik elemnek elnyelése és jó jel/zaj viszony mellett rögzítettük a spektrumnak ezt a részét, akkor egy újabb transzformációval áttérhetünk a „k” térbe:

$$k = \sqrt{\frac{2m(E - E_0)}{\hbar^2}}$$

Az utóbbi függvény Fourier-transzformációjával egy a kérdéses elem körüli gyakorisági függvényt állíthatunk elő. Az utóbbi illesztésével kaphatjuk meg az ötvözetben szerepelő atomok ill. ionok körül az első koordinációs öv szerkezetét. Az utóbbi esetben a tömbfázisú alkotóelemek segítségével kapjuk meg az ötvözők saját adatait. Mivel átlagos elrendeződést mérünk, megtörténhet, hogy egy „maghéj” szerkezet alakul ki, mint ahogy Ru- és Co-ötvözet esetén, amit Faujasite (FAU)-típusú zeoliton hoztunk létre. A Ru-ról kiderült, hogy megvédi a kobalt „magot” levegőben az oxidációtól [6].

A tárgyalt katalizátorok a fuel-cell technológiában is használatosak [10]. Ezért a közölt módszerek jelentősége a jövőben is megmarad.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönettel tartozik a néhai Gucci Lászlónak és D. Bazin valamint Schay Zoltán professzoroknak, valamint az MTA Katalizátorkutató osztálya munkatársainak.

Irodalom

- [1] Fischer, F.–Tropsch, H. (1923): Über die Reduktion des Kohlenoxyds zu Methan am Eisenkontakt unter Druck. *Brennstoff-Chemie*, 4., pp. 193–197.
- [2] Fischer, F.–Tropsch, H. (1925): Methanol und Synthol aus Kohlenoxyds als Motorbetriebstoff. *Brennstoff-Chemie*, 6., pp. 233–234.
- [3] Gucci, L.–Margitfalvi, J.–Schay, Z. (1988): A szénmonoxid katalitikus aktiválása. *A kémia újabb eredményei*, 68., Budapest: Akadémiai.
- [4] Bazin, D.–Kovács, I.–Gucci, L.–Parent, P.–Laffon, C.–De Groot, F.–Duc-reux, O. – Lynch, J. (2000): Genesis of Co/SiO₂ catalysts: XAS study at the cobalt LIII,LII absorption edges. *J of Catalysis*, 189., (2.), pp. 456–462.
- [5] Gucci, L.–Bazin, D.–Kovács, I.–Borkó, L.–Schay, Z.–Lynch, J.–Parent, P.–Laffon, C.–Stefler, G.–Koppány, Zs.–Sajó, I. (2002): Structure of Pt–Co/Al₂O₃ and Pt–Co/NaY bimetallic catalysts: characterization by in situ EXAFS, TPR, XPS and by activity in CO (carbon monoxide) hydrogenation. *Topics in Catalysis*, 20., (1–4.).
- [6] Gucci, L.–Bazin, D.–Kovács, I.–Borkó, L.–Kiricsi I.: Relation between the structure and activity of Ru–Co/NaY catalysts studied by x-ray absorption spectroscopy (XAS) and CO hydrogenation, *Studies in Surface Science and Catalysis*, 136., 111–116.
- [7] Thani Jermwongratanachai–Gary Jacobs–Wenping Ma,–Wilson, D.–Shafer, Muthu Kumaran Gnanamani–Pei, Gao–Boonyarach, Kitiyanan–Burtron, H.–Davis, Jennifer L. S. Klettlinger, Chia, H. Yen, Donald–Cronauer, C. –Jeremy, A.–Kropf, Christopher–Marshall, L. (2013): Fischer–Tropsch synthesis: Comparisons between Pt and Ag promoted Co/Al₂O₃ catalysts for reducibility, local atomic structure, catalytic activity, and oxidation–reduction (OR) cycles, *Applied Catalysis A: General*, 464–465.
- [8] Bazin, D.–Borkó, L.–Koppány, Z.–Kovács, I.–Stefler, G.–Sajó, I.–Schay, Z.–Gucci, L. (2002): Re–Co/NaY and Re–Co/Al₂O₃ bimetallic catalysts: in situ EXAFS study and catalytic activity. *Catalysis Letters*, 84., (3.).
- [9] Imre, Kovács, The Heat of Alloy Formation Determined from XPS and TDS Measurements, 2024 IEEE 7th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE): *Proceedings*, Budapest: IEEE Hungary Section. 347., pp. 127–132.
- [10] Baglio, V.–D’Urso, C.–Sebastian ‘n, D.–Stassi, A.–Arico A. S. (2014): PtCo catalyst with modulated surface characteristics for the cathode of direct methanol fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy* 39.

Kovács-Bokor Éva¹–Kiss Endre²

Növények közötti szinergiahatások a nehézfémek felvételében

Dunaújvárosi Egyetem, Műszaki Intézet

¹ kovacsbe@uniduna.hu

² kisse@uniduna.hu

Kulcsszavak: Szinergiahatások, toxikus anyagok, kémiai kommunikáció.

Absztrakt:

A növények közötti szinergiahatások kiemelt szerepet játszhatnak a nehézfémek felvételében és akkumulációjában, különösen a fitoremediációs alkalmazások során. A növények szinergikus kölcsönhatásai javíthatják a nehézfémek felvételét a talajból, növelhetik a növények ellenálló képességét a toxikus anyagokkal szemben, és optimalizálhatják a fitoremediációs folyamatok hatékonyságát. A szinergiahatások különböző mechanizmusokon keresztül valósulnak meg, beleértve a gyökérzónában kialakuló mikrobiális közösségeket, a növények közötti kémiai kommunikációt, valamint a talajban található tápanyagok és ásványi anyagok hasznosításának megosztását. Kutatásaink során elsősorban folyóvízi környezetben, szinergiában és külön is élő növényfajták nehézfém akkumulációs potenciálját vizsgáltunk meg. Az ilyen szinergikus kapcsolatok feltárása és tudományos megértése alapvető fontosságú a fitoremediációs technológiák továbbfejlesztésében.

Abstract:

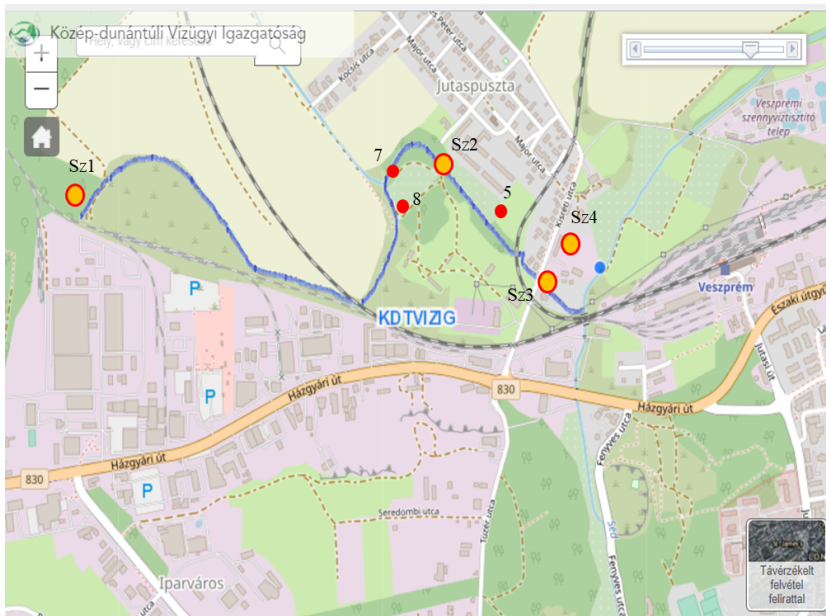
Synergies between plants can play a key role in the uptake and accumulation of heavy metals, especially in phytoremediation applications. Synergistic interactions between plants can improve the uptake of heavy metals from soil, increase the resistance of

plants to toxic substances and optimise the efficiency of phytoremediation processes. Synergistic interactions are achieved through various mechanisms, including microbial communities in the root zone, chemical communication between plants, and sharing of nutrient and mineral utilisation in the soil. Our research has focused on the heavy metal accumulation potential of plant species living in synergistic and isolated riverside environments. The exploration and scientific understanding of such synergistic relationships is essential for the further development of phytoremediation technologies.

Keywords: Synergistic effects, toxic substances, chemical communication.

Bevezetés

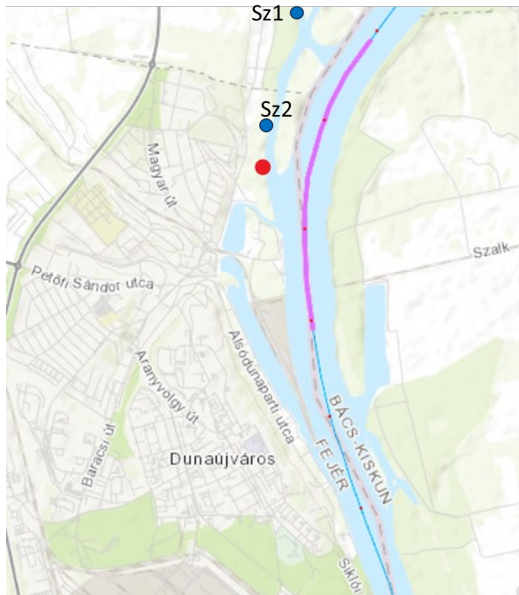
Kutatásunk során folyóvízi környezetben vizsgáltuk meg angol perje (*Lolium perenne* L.) és kerek repkény (*Glechoma hederacea* L.), továbbá baracklevelű keserűfű (*Persicaria maculosa* L.) és parti sás (*Carex riparia* L.) szinergikus növekedésének hatását a nehézfém akkumulációs képességükre nézve. A kutatás egyik mintavételi helyszínét Veszprém egyik felszíni vízfolyása, a Békatói-árok mentén jelöltük ki, amely a Séd vízgyűjtő területéhez tartozik (1. ábra). Ez a kisebb felszíni vízfolyás Veszprém északi részén, a Házgyári utca mentén található, a Séd-patak középső szakaszába torkollik. A Békatói-árok a város felszíni vízelvezető rendszerének egy része, amely az északi ipari zóna szennyvizének és Dózsaváros csapadékvizének befogadója. A területre jellemző, lehetséges szennyező pontok az alábbiak: Sz1: Bakony Művek; Sz2: illegális kommunális bekötés; Sz3: Jutas Autómosó; Sz4: Észak-Dunántúli MÉH Nyersanyaghasznosító Kft. [1].



Forrás: <https://www.vizugy.hu>

A másik mintavételi helyszínt a Duna dunaújvárosi szakaszán jelöltük ki, a Szabadstrand iszapjának kotrásával 2009-ben kialakított meddő területén (2. ábra). A terület ismert, lehetséges szennyezőpontjai: Rácalmási szennyvíztisztító telep (Sz1); Hankook Tire Magyarország Kft. szennyvíz befolyó csatornája (Sz2) [1].

2. ábra. Mintavételi helyszín Dunaújvárosban



Forrás: <https://www.vizugy.hu>

Anyag és módszer

A Békatói-árok és a Duna part menti részéről 3–3 db/m² iszap-, és növénymintát gyűjtöttünk be. A növények gyűjtésénél fontos tényező volt a szinergia-vizsgálat elvégzése miatt, hogy csak egyedül, illetve együtt is megtalálhatók legyenek egy adott területen (3. ábra). Az iszapmintákat közvetlenül a növények gyökérzetétől gyűjtöttünk, 0–10 cm mélységből. A mintákat egy minta és helyazonosítóval, dátummal ellátott polietilén tasakba helyezve, hűtve szállítottuk a laboratóriumba.

3. ábra. Tesztnövények

Duna:

Baracklevelű keserűfű



Parti sás



Békatói-árok:

Angol perje



Kerek repkény



Forrás: Saját fotók.

a. Analitikai vizsgálatok

Az üledékek nehézfém-tartalmát a korábbi MSZ 12739/4-78 és az újabb MSZ 21470-50:2006 szabvány szerinti, salétromsavas hidrogén-peroxidos kétlépcsős, extrakciós feltárással határoztuk meg [1]. A növény mintákat a laboratóriumba szállítás után főbb növényi részeikre (gyökér, szár, levél, virág), osztottuk, majd kiszárítottuk. Az üledék- és növényminták savas-peroxidos feltárását CEM Mars 6 típusú mikrohullámú roncsolóval végeztük el [2, 3].

Az eljárás után kapott szűrletek fémtartalmát (Cr, Ni) ICP-OES készülék (Perkin Elmer Avio 200) segítségével elemeztük [1].

b. Faktorszámítások

A növényi részek közötti elemegoszlásokhoz, a nehézfém-akkumulációs potenciál meghatározásához két faktor, a bioakkumulációs és a transzlokációs faktor számítását végeztük el [4, 5, 6, 7].

$$BAF = C_{\text{növényi rész}} / C_{\text{üledék, talaj}}$$

$$TF = C_{\text{hajtás}} / C_{\text{gyökér}}$$

Ahol:

$C_{\text{növényi rész}}$: a növényi részekben mért fémkoncentráció (mg/kg)

$C_{\text{üledék/talaj}}$: az iszapos üledékben mért fémkoncentráció (mg/kg)

$C_{\text{hajtás}}$: a felszín feletti növényi részek összes fémtartalma (mg/kg)

$C_{\text{gyökér}}$: a gyökérben mért fémtartalom (mg/kg)

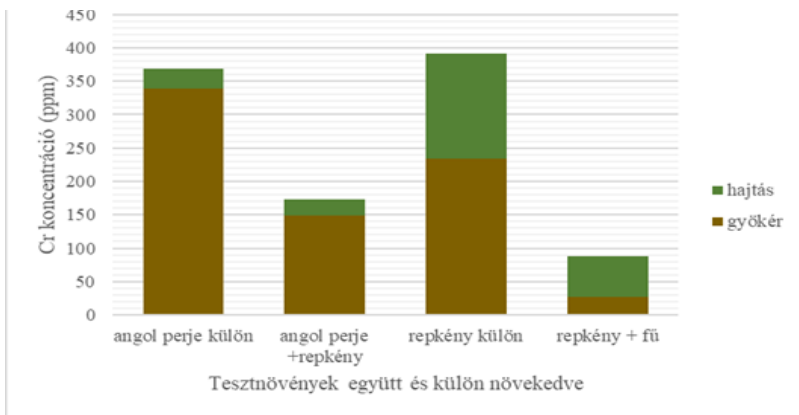
Eredmények

Szinergia hatása a növények króm-akkumulációs képességére

Az angol perje szinergiában 54%-kal, a repkény pedig 78%-kal kevesebb krómot tudott akkumulálni (4. ábra). A növények gyökérzetben rakódott le nagyobb mennyiségben (86–92 %) a króm. A repkény nagyobb arányban volt képes ezt az elemet a levelében elraktározni.

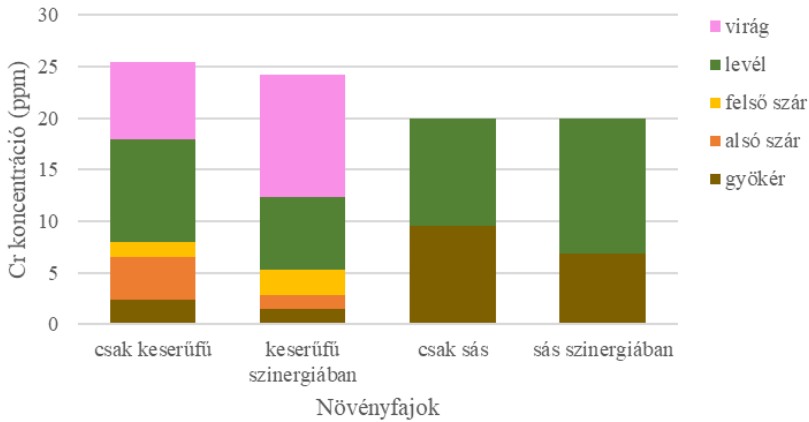
Külön fejlődve 40%-ban, együtt a perjével 70%-ban a levélben dúsult fel ez az elem. Szinergiában növekedve a perje 5 %-kal több krómot halmozódott fel a levelekben, mint külön növekedve.

4. ábra. Az angol perje és a kerek repkény krómtartalma



A keserűfű esetén a szinergiában növekedés hatására csak 1,05-ször volt kisebb a króm felvétele (5. ábra). A sás esetében azonban a króm felvétele kismértékben hatékonyabb volt szinergiában, ekkor 1,001-szer több krómot tudott akkumulálni a növény. A króm növényen belüli megoszlása megváltozott, szinergiában inkább a felsőbb növényi részekből (levél, virág) volt nagyobb krómtartalom kimutatható, nem a gyökerekből. Keserűfűnél és sásnál átlagosan 14%-kal nőtt a felső részekben való felhalmozódás együtt növekedés esetén.

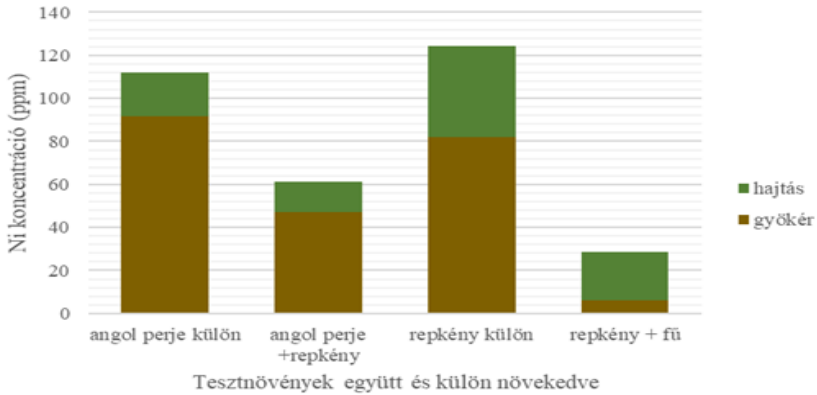
5. ábra. A baracklevelű keserűfű és a parti sás krómtartalma



Szinergia hatása a növények nikkell-akkumulációs képességére

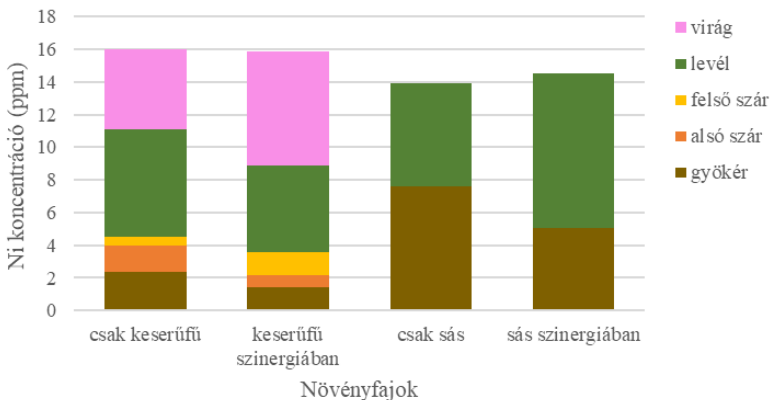
A két növény szinergiában kevesebb nikkelt tudott akkumulálni, mint külön fejlődve (6. ábra). A perje 46%-kal, a repkény 76%-kal kevesebb nikkelt halmozott fel együttélésük során. Az angol perje 5%-kal, míg a kerek repkény 45%-kal jobban tudta szinergiában a levelek felé transzlokálni a nikkelt. A perjénél inkább a gyökerekben maradt ez az elem. A repkénynél viszont a levelekből is nagy arányban (34 és 80%) volt a nikkelt kimutatható.

3. ábra. Az angol perje és a kerek repkény nikkeltartalma



Megfigyelhető, hogy a keserűfű egyedül fejlődve, a sás vízszint szinergiában növekedve vett fel több nikkelt (7. ábra). Az eltérés csak kismértékű. A sás és a keserűfű szinergiában inkább a felső részeikben (levél, felső szár + virág) tudta akkumulálni a nikkelt. A keserűfűnél 11%-kal, a sásnál 20%-kal több nikkelt halmozódott fel a felsőbb részekben együtt fejlődésük során.

4. ábra. A keserűfű és a sás nikkeltartalma



Faktorszámítások

Az angol perje és a kerek repkény esetén, szinergiában a perje és a repkény BAF-értékei közel fele akkorák lettek (1. táblázat). Ez alapján megállapítható, hogy a két növény inkább egyedül képes több elemet akkumulálni az üledékből. Együttélésük gátolja az elemfelvételt. Transzlokációs faktorértékek (TF) alapján a két növény közül csak a szinergiában növekedett repkény volt eredményesnek mondható. 3–7-szer jobban tudta a felsőbb részeibe halmozni a vizsgált elemeket.

1. táblázat. A perje és a repkény BAF- és TF-értékei

	BAF				TF			
	<u>angol perje külön</u>	angol perje + repkény	<u>repkény külön</u>	repkény + fű	<u>angol perje külön</u>	angol perje + repkény	<u>repkény külön</u>	repkény + fű
Cr	46,9	36,5	246,7	95,7	0,1	0,2	0,7	2,3
Ni	2,1	1,4	4,3	2,3	0,2	0,3	0,5	3,9

A baracklevelű keserűfű és a parti sás BAF-értékei alapján elmondható (2. táblázat), hogy a keserűfű külön fejlődve nagyobb mértékben tudja az üledék fémtartalmát akkumulálni, a sás viszont inkább együtt fejlődve mutatott nagyobb akkumulációs képességet. A transzlokációs faktorértékek (TF) a keserűfűnél 1,5-szer, sásnál pedig 2-szeresen lettek nagyobbak együtt fejlődésük esetén. Ebből következik, hogy a gyökérzetükből hatékonyan tudta a két növény a felsőbb szárrészeikbe, leveleikbe és a virágba szállítani és akkumulálni a vizsgált két elemet.

2. táblázat. A keserűfű és a sás BAF- és TF-értékei

	BAF				TF			
	<u>Csak keserűfű</u>	Keserűfű + sás	Csak sás	<u>Sás+ keserűfű</u>	Csak keserűfű	<u>Keserűfű + sás</u>	Csak sás	<u>Sás+ keserűfű</u>
Cr	2,11	0,63	0,29	0,57	9,52	16,05	1,10	1,94
Ni	7,70	1,07	0,47	1,21	5,81	10,32	0,83	1,88

Összefoglalás

A kutatásunk fő célkitűzése az volt, hogy megvizsgáljuk, van-e hatása a növények fémakkumulációs potenciáljára az a tényező, hogy egy területen egyedül, vagy együtt növekedve, szinergiában fejlődnek-e. Eredményeink azt mutatták, hogy az angol perje és a kerek repkény szinergiában kevesebb elemet tudott akkumulálni az üledékből, tehát gátolták egymást. Ez a perjénél 27–33%-os, a repkénynél 47–61%-os csökkenést jelentett a fémakkumulációban. A baracklevelű keserűfű és parti sás együttélése következtében a keserűfű fémakkumulációs képessége (BAF) elemtől függően 70%-kal csökkent, a sásé viszont a 2-szeresére növekedett. Tehát a keserűfű serkentette a sás akkumulációs képességét.

A szinergiában fejlődés esetén megállapítható, hogy a nehézfémek akkumulációs helye a tesztnövényekben a felsőbb növényi részek (felső szár, levél, virág) felé tolódik el. A TF = perje esetén 1,5–2-szeresére, a repkénynél 3–7-szeresére növekedett. A TF = 1,5-szeresére nő a baracklevelű keserűfűben, és 2-szeresére a parti sásban szinergia esetén.

A kapott eredményeink igazolták, hogy a növények egymásra hatása jelentős változással van a fém akkumulációs képességükre is. A jövőben tovább szükséges kutatni, hogy például az egyes növények gyökérzete, az üledékben élő mikroorganizmusok ezt a képességet hogyan befolyásolják. Ez azért is fontos lehet, mivel egy szennyezett terület remediációja esetén a megfelelő növénytársítások megválasztása fokozhatja a nehézfémek eltávolításának hatékonyságát.

Irodalom

- [1] Kovács-Bokor Éva (2022): *Iszapok nehézfém-tartalom mobilizációjának monitorozása, a nehézfém-tartalom csökkenése kémiai és biológiai módszerekkel*. Disszertáció, Pannon Egyetem, Vegyész-mérnöki és Anyagtudományok Doktori Iskola.
- [2] Simon L. (2004): *Fitoremediáció, Környezetvédelmi Füzetek*. Azonosító: 2318. Budapest: BMKE OMIKK, 1–59.
- [3] Szegedi L. (2011): *Toxikus nehézfém-szennyezés utóhatásának vizsgálata barna erdőtalajon*. PhD-értekezés, Szent István Egyetem, Gödöllő.
- [4] Baker, A.J.M., Brooks, R.R. (1989): Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements – a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*, 1., (2.), pp. 81–126.
- [5] Lago-Vila, M.–Arenas-Lago, D.–Rodríguez-Seijo, A.–Andrade Couce M. L.–Vega, F. A. (2015): Cobalt, chromium and nickel contents in soils and plants from a serpentinite quarry. *Solid Earth*, 6., (1.), pp. 323–335.
- [6] Khan, S.–Cao, Q.–Zheng, Y. M.–Huang, Y. Z.–Zhu, Y. G. (2008): Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. *Environmental Pollution*, 152., (3.), pp. 686–692.
- [7] Mehr, M. R.–Keshavarzi, B.–Moore, F.–Hooda, P. S.–Busquets, R.–Ghorbani, Z. (2020): Arsenic in the rock–soil–plant system and related health risk in a magmatic–metamorphic belt, West of Iran. *Environmental Geochemistry Health*, 42., (11.), pp. 3659–3673; <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00599-y>

Nagy András

Energiatárolás hidrogénben: kihívások és lehetőségek

Dunaújvárosi Egyetem, Műszaki Intézet

nagyandras@uniduna.hu

Kulcsszavak: Hidrogén, üzemanyagcella, közlekedés.

Absztrakt:

Ez a cikk áttekinti a hidrogén-energiatárolás egyes aspektusait, amely fontos szerepet játszik a megújuló energiaforrások integrációjában és az üvegházhatású gázkibocsátás csökkentésében. Noha a hidrogén környezetbarát energiahordozónak számít, jelenlegi előállítása jelentős szén-dioxid (CO_2) kibocsátással jár. A cikk foglalkozik a különféle tárolási technológiákkal, beleértve a fizikai (kompresszált és kriogén), adszorpciós és kémiai módszereket, amelyek közül kiemeli a fizikai tárolás járműipari és energetikai alkalmazásait. A közlekedési szektorban az üzemanyagcellás rendszerek innovatív alkalmazásai és a kompozit alapú hidrogéntartályok fejlesztése terén jelentős előrelépés történt, ám a költséghatékonyság és a súlycsökkentés iránti igény további kutatásokat igényel.

Bevezetés

A hidrogéntechnológia egyre nagyobb figyelmet kap napjainkban, mint a globális felmelegedés elleni küzdelem egyik eleme. Bár a hidrogént tiszta energiahordozónak tekintik, amely energiatermelés közben nem bocsát ki káros anyagokat, a jelenlegi előállítási módokat sem tisztának, sem fenntarthatónak nem nevezhetjük. A hidrogén-előállítás jelenleg évente körülbelül 830 millió tonna CO_2 -kibocsátásért felelős [5], mivel nagyrészt földgázból állítják elő gőzreformálással [6].

A klímacélok eléréséhez és a fenntartható fejlődéshez szükséges az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése. Ez a megújuló energiaforrások széleskörű alkalmazásával és a jellemzően nagy károsanyag kibocsátású iparágak „zöldítésével” érhető el. A megújuló energiaforrások széleskörű terjedése újabb problémákat hozott magával, mint például az egyenlőtlen, kiszámíthatatlan energiatermelés, illetve a hálózati instabilitás, ami a forgógépek nélküli energiatermelés egyik negatív hatása. Az energiatermelés kiszámíthatatlansága a megújuló energiaforrások rendelkezésre állásának napszak és évszak szerinti ingadozásából, az aktuális időjárási viszonyok változásából adódik.

A megújuló energia sokszor viszonylag kismértékben áll rendelkezésre, azonban vannak olyan időszakok, amikor olyan mértékű a termelés, hogy meghaladja a teljes aktuális fogyasztást. Például 2017. május 1-jén történt, hogy Németországban a megújuló energiaforrásokból, főként a szél- és napenergiából származó villamosenergia-termelés olyan magas szintet ért el, hogy az országos villamosenergia-hálózatban túlkínálat alakult ki. Az energiárok ekkor több órán keresztül negatív tartományban voltak.

Németországban a megújulók telepített kapacitása 2015 óta nagyobb, mint a fosszilis és nukleáris erőművek kapacitása, ugyanakkor 2017-ben például az éves energiatermelés mindössze 27%-át adták a megújuló energiaforrások [1]. Ebből is látszik, hogy a szél- és naperőművek milyen kis kihasználtsággal üzemelnek. Ezeket a problémákat hatékony energiatárolási módszerekkel lehet kezelni, aminek egyik módszere az energia molekulákban történő tárolása, vagyis olyan anyag előállítása és tárolása, amely aztán a szükséges időszakban visszaalakítható villamos energiává. A leginkább fenntartható és környezetkímélő módszer a villamos energiával történő vízbontás. Ennek eredményeként keletkező hidrogén szinte korlátlan mennyiségben tárolható.

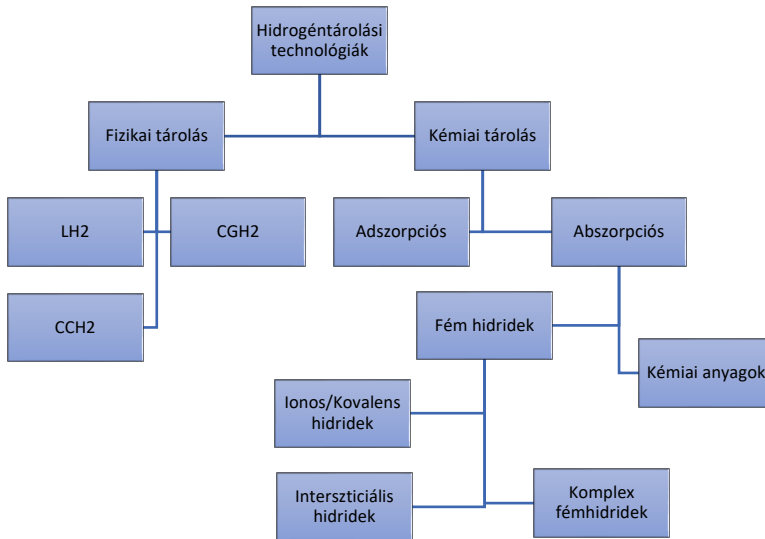
Szükség esetén üzemanyagcellában villamos energia termelhető belőle, akár 50%-os, vagy elégethető gáz körfolyamatokban (pl. gázturbinában) akár 60%-os hatásfokkal [7]. A hidrogéntárolás lehetőséget biztosít arra, hogy órákkal, napokkal, akár hónapokkal később is felhasználhassuk a fejlesztett hidrogént, így rugalmas energiatárolási megoldáshoz jutunk. Ez alkalmas a megújuló energia ingadozásainak napi és akár évszakos kiegyenlítésére is. Az atomos hidrogén tárolására, a tárolni kívánt mennyiség függvényében többféle lehetőség kínálkozik, ebben a cikkben ezeket részletezem.

Hidrogéntárolási megoldások

A hidrogén tárolására többféle megoldást kifejlesztettek. Alapvetően lehetőség van hidrogéngáz fizikai tárolására kompresszált, kriogén, vagy kriokompresszált állapotban, tartályokban. Ezen túl az adszorpciós tárolás fémorganikus, szénalapú anyagokban, vagy porózus szerves polimerekben lehetséges. Harmadik módszercsoport a kémiai tárolás, többek között fém-hidridek, ammónia vagy metanol formájában [2]. A különböző tárolási technológiák rendszere az 1. ábrán látható.

Ebben a cikkben csak a fizikai tárolás jellemzőire koncentrálnunk, kiemelve az energetikai és járműipari alkalmazásokat.

1. ábra. Hidrogéntárolási technológiák

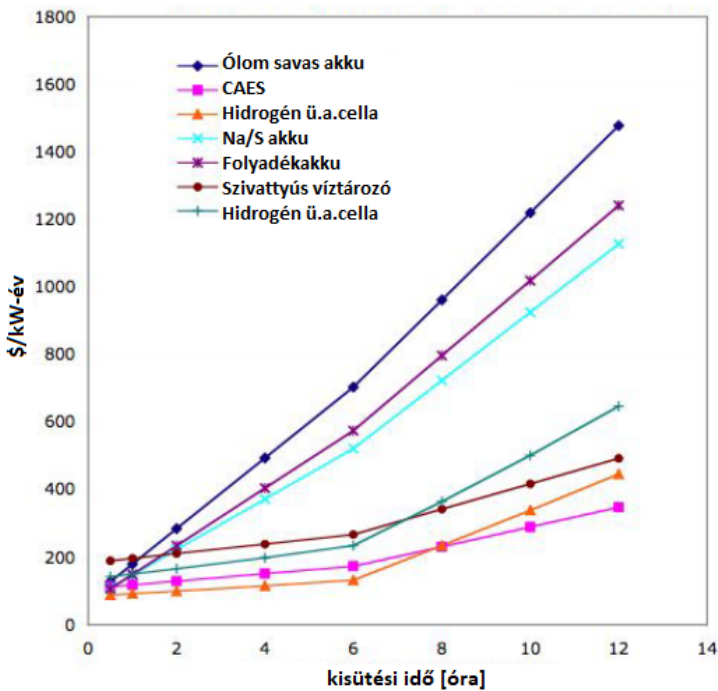


Több kutatás is foglalkozik ezekkel a témákkal. Például [3] bemutatja a jelenlegi nagyléptékű hidrogéntárolási és szállítási technológiákat, beleértve az aktuális globális projekteket és a szakpolitikai irányvonalakat, továbbá értékeli a különböző tárolási és szállítási módszereket (sűrített- és folyékony hidrogén, hidrogén keverése földgázvezetékekbe, valamint ammónia mint zöld hidrogén hordozó). Az eredményei rámutatnak arra, hogy bár a hidrogén tárolási költségei várhatóan csökkenni fognak a technológiai fejlődés és méretgazdaságosság miatt, a nagyobb mértékű elterjedéshez még meg kell oldani a tárolási módszerek, szállítási módok, hatásfok és a technológia társadalmi elfogadásának kihívásait.

A világ különböző hidrogéntárolási technológiáinak fejlesztési állapotának áttekintését végzi [4], beleértve a komprimált, kriogén, folyékony szerves hidrogénhordozókat, valamint kitér a tartályanyagok osztályozására is.

A cikk részletesen tárgyalja a földalatti tárolási helyeket, a különböző cseppfolyósítási ciklusokat és a hidrogéntermelés gazdasági aspektusait világszerte. Az energiatárolási technológiák összehasonlításával foglalkozik [12], a 2. ábrán a különböző technológiák éves költségének összehasonlítása látható.

2. ábra. Energiatároló technológiák éves költségének összehasonlítása [12]



[12] arra jutott, hogy a hidrogén-energiatárolás jól illeszkedik a megújuló energiaforrásokhoz, különösen a szélenergiához, hatékonyan csökkenti a villamosenergia-termelés üvegházhatású gázkibocsátását, valamint a földalatti tárolás költséghatékony lehetőséget kínál.

A hidrogén és az üzemanyagcellák számos méretben kiegészítik a villamos hálózatot, bár a technológia további fejlesztést igényel.

A hidrogén felhasználásának három fő célja van: az állandó telepítésű, a közlekedési és a hordozható alkalmazások [8]. A közlekedési alkalmazásokhoz nagy tömeg és térfogategységre vetített energiasűrűsége, mérsékelt üzemi nyomásra és hőmérsékletre, gyors kinetikára, ciklusállóságra, valamint magas biztonságra van szükség. Az autóiipar az egyik fő terület, amely profitál a hidrogéntekológiából és az ehhez kapcsolódó tárolási módszerekből [9]. Járműiparban a nagy nyomású kompozit tartályok kritikus komponens a megfelelő hidrogéntárolás biztosításához [10]. Az autóiiparban gyakran használnak fém (III. típusú) és nem fém (IV. típusú) erősítőszállal gyártott kompozit nyomástartó edényeket [11].

Az üzemanyagcellás rendszerek innovatív felhasználása növekszik, különösen a közlekedési szektorban, és nagy figyelmet fordítanak a hidrogéntárolás technikai kihívásainak leküzdésére, miközben a kompozit anyagok és biztonsági tesztek egyre érettebb technológiát eredményeznek. [13] A további fejlődés azonban elsősorban a költséghatékonyság és a szerkezeti súly csökkentése terén szükséges.

Irodalom

- [1] Bruno, Burger (2018): *Power generation in Germany – assessment of 2017*. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/Stromerzeugung_2017_e.pdf
- [2] Langmi, Henrietta W.–Engelbrecht–Phillimon, Nicolaas–Modisha, M.–Bessarabov, Dmitri (2022): Hydrogen storage, Electrochemical Power Sources: Fundamentals, Systems, and Applications. *Elsevier*, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819424-9.00006-9>

- [3] Ma, Nan–Zhao, Weihua–Wang, Wenzhong–Li, Xiangrong–Zhou Haiqin (2024): Large scale of green hydrogen storage: Opportunities and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 50., <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.021>.
- [4] Muthukumar, P.–Kumar, Alok–Afzal, Mahvash–Bhogilla, Satyasekhar–Sharma, Pratibha–Parida, Abhishek–Jana, Sayantan–Kumar, Anil–Pai, Ranjith Krishna–Jain, I. P. (2023): Review on large-scale hydrogen storage systems for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.304>
- [5] IEA (2019): The Future of Hydrogen. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>, Licence: CC BY 4.0
- [6] Di Nardo, Alessandra–Portarapillo, Maria–Russo, Danilo–Di Benedetto, Almerinda (2024): Hydrogen production via steam reforming of different fuels: thermodynamic comparison, *International Journal of Hydrogen Energy*, 55., <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.215>
- [7] Breeze, P. (2018): Power system energy storage technologies. *Academic Press*.
- [8] Abe, J. O.–Popoola, A. P. I.–Ajenifuja, E.–Popoola, O. M. (2019): “Hydrogen energy, economy and storage: review and recommendation,” *Int. J. Hydrogen Energy*, 44., (29.), pp. 15072–15086.
- [9] Zheng et al. (2014): “Queuing-based approach for optimal dispenser allocation to hydrogen refueling stations,” *Int. J. Hydrogen Energy*, 39., (15.), pp. 8055–8062.
- [10] Cheng, Qian–Zhang, Ruiqiang–Shi, Zhusheng–Lin, Jianguo(2024): Review of common hydrogen storage tanks and current manufacturing methods for aluminium alloy tank liners. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 7., (2.), <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2023.08.002>.
- [11] Bourgeois, T.–Brachmann, T.–Barth, F.–Ammouri, F.–Baraldi, D.–Melideo, D.–Acosta-Iborra, B.–Zaepffel, D.–Saury, D.–Lemonnier, D. (2017): Optimization of hydrogen vehicle refuelling requirements. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, (19.). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.165>.
- [12] Schoenung, Susan M.: *Economic analysis of large-scale hydrogen storage for renewable utility applications*. United States. <https://doi.org/10.2172/1029796>

Petrovickijné dr. Angerer Ildikó

Dunaújváros levegőszennyezettségi állapotának értékelése

*Dunaújvárosi Egyetem, Műszaki Intézet, Gépészeti és Energetikai
Tanszék*

petrovi@uniduna.hu

Bevezetés

Dunaújváros levegőszennyezettségét a Köztársaság út 14. szám alatti automata mérőállomás méri. Az adatokat gyűjtjük, elemezzük és értékeljük. A PM_{10} , $PM_{2,5}$ szálló por, SO_2 , NO_2 , CO , O_3 és a benzol koncentrációját mérik. Az adatokat összehasonlítjuk az egészségügyi határértékekkel és az elmúlt évek adataival. Korábban a PM_{10} szálló por magas koncentrációja a városban időnként szmoghelyzetet idézett elő, melynek legfőbb okozója főként az ipari tevékenység volt, ritkábban a közlekedés és a lakossági fűtés. A vas- és acélgyártás, valamint a kokszyártás visszaszorulásával, majd megszűntével a városban 2023–2024-es években javult a levegő minősége.

Dunaújváros levegőminőségének mérése és értékelése

Hazánkban a levegőminőség mérést, értékelését az Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat (OLM) végzi. A hálózat alapvetően két részből áll. Az automata állomások folyamatos mérést végeznek. A manuális hálózat (RIV) pontjain gyűjtött minták elemzése laboratóriumban történik. A levegő szennyezettségének mérést Dunaújvárosban a Köztársaság út 14. szám alatt lévő automata konténerállomás, valamint a város három pontján (Papírgyári út, Lajos király körút, Városháza tér) elhelyezett manuális mintavevő rendszer segítségével mérik.

Dunaújvárosi Egyetem



University of Dunaújváros

A füstköd tájékoztatási és a riasztási küszöbértékek túllépése esetén az önkormányzat tájékoztatja a lakosságot. 2021-ben egy alkalommal volt szükség a lakosság tájékoztatására. Ekkor a PM_{10} szálló por 24 órás átlagkoncentrációja (2021. február 25-én $87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ és 2021. február 26-án $92 \mu\text{g}/\text{m}^3$) meghaladta a tájékoztatási küszöbértéket ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$), de nem érte el a riasztási küszöbértéket ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$). A 2022. és 2023. években és 2024. október 31. napjáig (az utolsó rendelkezésre álló adat) nem volt szükség a lakosság tájékoztatására.

A levegőminőség értékelése a légszennyezettségi index alapján

A hivatalos, légszennyezettségi index alapján történő levegőminőségi értékelést a HungaroMet Országos Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt. Levegőtisztaság-védelmi Referencia Központban működő Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat adja meg az egész országra és köztük Dunaújvárosra is. A város levegőminőségének összesített értékelése 5-fokozatú skálán történik, melynél az 1-es a "kiváló", az 5-ös az "erősen szennyezett" levegőt jelöli. Az 1. táblázat szemlélteti Dunaújváros levegőminőségének éves változásait a légszennyezettségi index alapján.

1. táblázat. Dunaújváros levegőminősége a légszennyezettségi index alapján

Év	Légszennyezettségi index								Összesített (a legmagasabb indexű komponens alapján)
	SO ₂ kén-dioxid	NO ₂ nitrogén-dioxid	NO _x nitrogén-oxid	PM ₁₀ szálló por	PM _{2,5} szálló por	CO szén-monoxid	O ₃ ¹ ózon	Benzol	
2018.	Kiváló (1)	Jó (2)	Jó (2)	Jó (2)	Jó (2)	Kiváló (1)	Jó (2)	Kiváló (1)	Jó (2)
2019.	Kiváló (1)	Jó (2)	Jó (2)	Jó (2)	Jó (2)	Kiváló (1)	Jó (2)	Kiváló (1)	Jó (2)
2020.	Kiváló (1)	Jó (2)	Jó (2)	Jó (2)	Jó (2)	Kiváló (1)	Kiváló (1)	Kiváló (1)	Jó (2)
2021.	Kiváló (1)	Jó (2)	Kiváló (1)	Jó (2)	Jó (2)	Kiváló (1)	Kiváló (1)	Kiváló (1)	Jó (2)
2022.	Kiváló (1)	Kiváló (1)	Kiváló (1)	Jó (2)	Jó (2)	Kiváló (1)	Jó (2)	Kiváló (1)	Jó (2)
2023.	Kiváló (1)	Kiváló (1)	Kiváló (1)	Jó (2)	Jó (2)	Kiváló (1)	Jó (2)	Kiváló (1)	Jó (2)

¹18 órás futó átlag napi maximumainak átlaga, egy naptári éven belül.
Forrás: Sajat készítésű táblázat.

A légszennyezettségi indexe Dunaújvárosnak évek óta változatlanul "jó" (2) minősítésű, mivel a levegőben mért légszennyező komponensek levegőben mért koncentrációi "kiváló" (1), vagy "jó" (2) minősítésűek voltak. Az összesített minősítés mindig a legkedvezőtlenebb adat alapján történik.

A PM₁₀ szálló por napi és éves átlagkoncentrációi

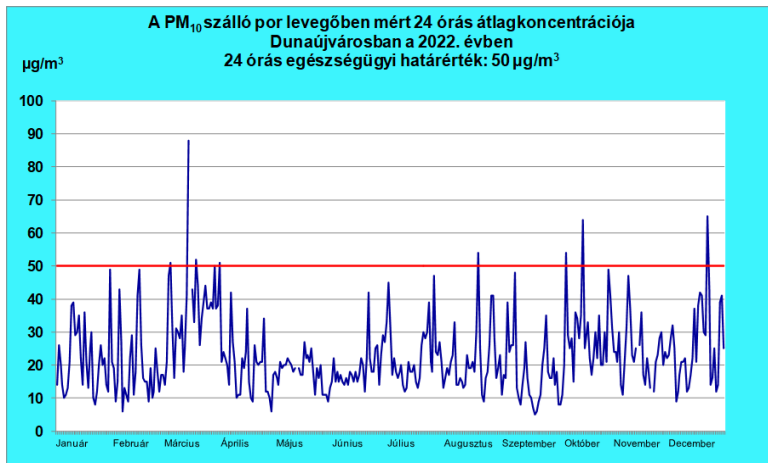
A továbbiakban a városban évtizedek óta legnagyobb problémát okozó PM₁₀ és PM_{2,5} szálló por levegőben mért koncentrációinak alakulását mutatom be.

A PM₁₀ szálló por 24 órás átlagkoncentrációi 2022. évben 5 és 88 µg/m³, 2023-ban 5 és 130 µg/m³, 2024. október 31-ig pedig 2 és 148 µg/m³ között ingadoztak. A 2024-ben az extrém magas értéket 148 µg/m³ április 1-én mérték a szaharai porvihar idején, mely Dunaújvárosban is éreztette hatását. Ekkor már nyersvas- és acélgyártás nem volt a vasműben, a koksizoló is csak

rendkívül alacsony üzemmódban működött. A 2022–2023-as években és 2024. október 31-ig összességében lassú javulás következett be a szálló por levegőben mért koncentrációja éves átlagainak tekintetében.

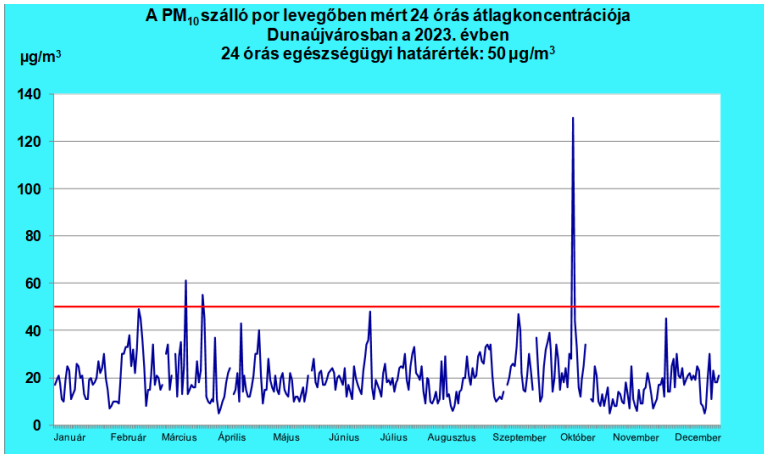
A szálló por (PM_{10}) adatait tekintve Dunaújváros levegőjének minősége a 2022. évihez hasonlóan a 2023. évben is az értékelés szerint változatlanul „jó” az éves átlagok alapján. A 1–3. ábrák a PM_{10} szálló por 24 órás átlagkoncentrációit mutatják be 2022-től 2024-ig.

1. ábra. A PM_{10} szálló por 24 órás átlagkoncentrációi 2022-ben



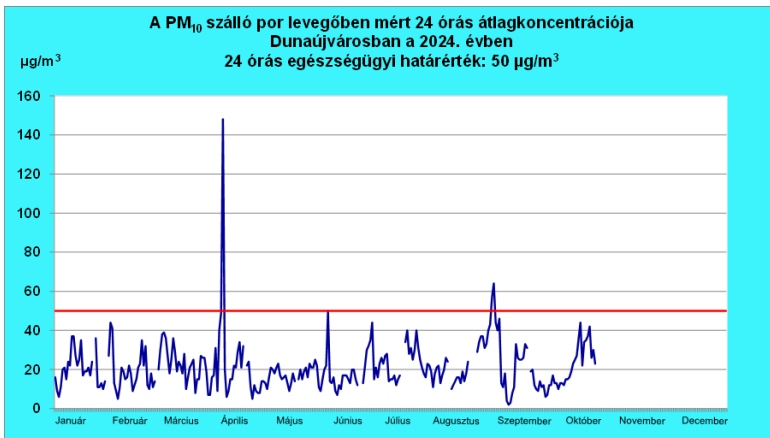
Forrás: Saját készítésű diagram.

2. ábra. A PM_{10} szálló por 24 órás átlagkoncentrációi 2023-ban



Forrás: Saját készítésű diagram.

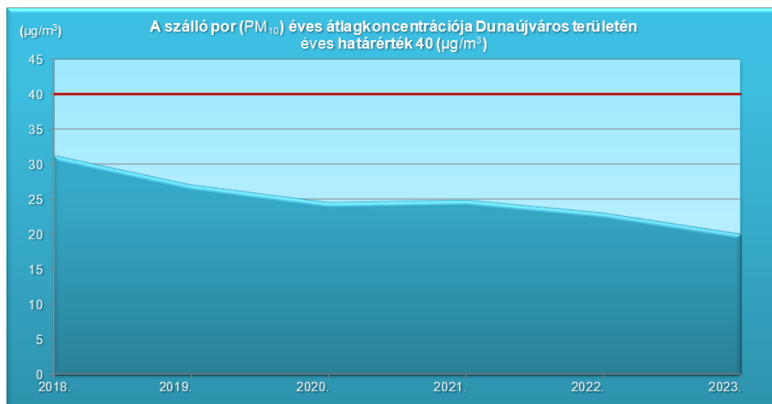
3. ábra. A PM_{10} szálló por 24 órás átlagkoncentrációi
2024. október 31-ig



Forrás: Saját készítésű diagram.

A PM_{10} szálló por éves átlagkoncentrációi 2018-tól 2023-ig vizsgálva 21 és $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ között voltak, a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ éves egészségügyi határértéknek 58–78%-a körül alakultak. A mért átlagértékek 2019. óta enyhén csökkenő tendenciát mutatnak. Az éves átlagkoncentrációkat a 4. ábra mutatja be.

4. ábra. A PM_{10} szálló por éves átlagkoncentrációi 2018–2023-ig

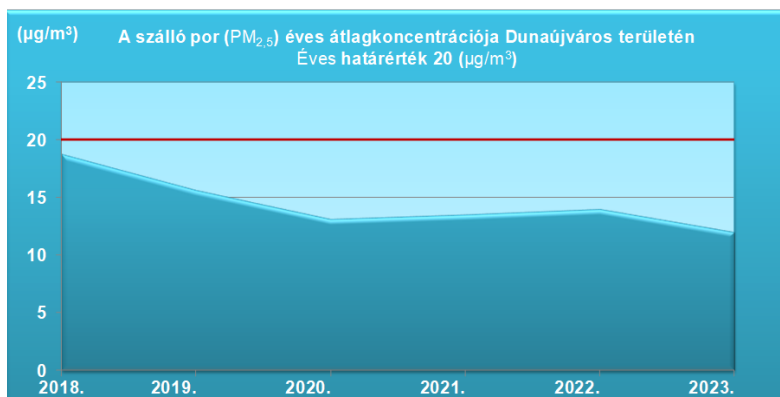


Forrás: Saját készítésű diagram.

A $PM_{2,5}$ szálló por napi és éves átlagkoncentrációi

A $2,5 \mu\text{m}$ szemcseátmérő alatti szálló por ($PM_{2,5}$) óras és 24 órás értékeire a 4/2011. (I. 14.) VM rendelet 1. számú melléklete nem állapít meg külön 24 órás határértéket, így túllépésük mértéke sem vizsgálható. A $PM_{2,5}$ szálló por 24 órás átlagkoncentrációja 2022. évben 3 és $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2023-ban 4 és $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2024. október 31-ig pedig 3 és $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ között ingadozott. A 2018. és 2024. közötti időszak éves átlagkoncentrációit az 5. ábra tartalmazza.

5. ábra. A $PM_{2,5}$ szálló por éves átlagkoncentrációja 2018–2023-ig



Forrás: Saját készítésű diagram.

A $2,5\ \mu\text{m}$ szemcseméret alatti szálló por éves átlagértékei 2018-tól 2023-ig 13 és $19\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ között ingadoztak, mely a $20\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ éves egészségügyi határérték 60–95%-a, ezek éves szinten igen magas értékek. 2019. után kis mértékben, $19\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ -ról $13\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ -re csökkent a $PM_{2,5}$ szálló por éves átlagkoncentrációja, ugyanakkor 2021-től ismét elenyésző mértékben, $14\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ -re emelkedett, majd 2023-ban $12\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ -re, az éves határérték 60 %-ára mérséklődött.

Konklúzió, összefoglalás

Dunaújvárosban a levegőszennyezés szempontjából a legnagyobb gondot a PM_{10} szálló por gyakori magas koncentrációi okozták, korábban gyakran előfordultak egészségügyi határérték túllépések, sőt füstködriadó tájékoztatási és riasztási küszöbátlépések is. Füstköd tájékoztatási küszöbérték-átlépés legutoljára 2021 februárjában volt, azóta nem fordult elő.

A levegő minőségének jelentős javulásához vezetett a vasmű termelés csökkenése, majd teljes leállása. A szálló por okozta levegőszennyezés csökkentése érdekében a lakossági fűtésnél a környezetkímélő megoldásokat kell alkalmazni, főként a megújuló energiaforrások használatának elterjesztésével. A kerti hulladékot nem javasolt elégetni, helyette célszerű inkább komposztálni. Így megfelelő idő után értékes termőtalajhoz juthatunk. Előnyben kell részesíteni továbbá a környezetkímélő közlekedési módokat (tömegközlekedés, gyalogolás, kerékpáros közlekedés, elektromobilitást).

Irodalom

- Petrovickijné Dr. Angerer Ildikó–Szántó Krisztina–Tóth László (2022): „Tájékoztató Dunaújváros Megyei Jogú Város Környezeti Állapotáról”. Dunaújváros: Dunaújváros MJV Önkormányzata, készült: TEXT Nyomdaipari, Kereskedelmi és Szolgáltató Kft.
- Petrovickijné Dr. Angerer Ildikó–Szántó Krisztina–Tóth László (2023): „Tájékoztató Dunaújváros Megyei Jogú Város Környezeti Állapotáról”. Dunaújváros: Dunaújváros MJV Önkormányzata, készült: TEXT Nyomdaipari, Kereskedelmi és Szolgáltató Kft.
- Petrovickijné Dr. Angerer Ildikó–Szántó Krisztina (2024): „Tájékoztató Dunaújváros Megyei Jogú Város Környezeti Állapotáról”. Dunaújváros: Dunaújváros MJV Önkormányzata, in press.

Szabó Andrea

Acéltisztaság fejlődése a technológiaváltás útján

Dunaújvárosi Egyetem, Műszaki Intézet, Szerkezeti Integritás Tanszék

szaboandrea@uniduna.hu

Kulcsszavak: Acéltisztaság, nemfémes zárványok, BOF- és EAF-technológia, acélgyártás fenntarthatósága, salakkezelés, energiahatékonyság.

Absztrakt:

Az acélipar jelentős szerepet játszik a globális gazdasági növekedésben, azonban működése során jelentős mennyiségű hulladékot és mellékterméket termel, amelyek kedvezőtlen környezeti hatásokkal járhatnak. Az acélgyártás egyik kulcsfontosságú szempontja a végtermék tisztasága, amelyet nagymértékben meghatároz az acélban található zárványok száma és mérete (Das et al. 2018). Az alapvető oxigénes konverter (BOF) és az elektromos ívkemence (EAF) technológiák a legszélesebb körben alkalmazott acélgyártási eljárások közé tartoznak. E technológiák hatékonysága a tiszta acél előállításában folyamatos kutatás és vita tárgyát képezi. A tanulmány célja az acéltisztaság fejlődésének és a technológiaváltás szerepének vizsgálata a fenntartható acélgyártás irányába.

Hagyományos BOF acélgyártás

A hagyományos oxigénkonverteres (BOF) eljárás a világ acéltermelésének jelentős részét adó, széles körben elterjedt technológia. Ez a folyamat a nagyolvasztóból származó nyersvasat és az acélhulladékot alakítja át kiváló minőségű acéllá, tiszta oxigén segítségével eltávolítva a szennyeződések.

A BOF-eljárás során egy oxigénláندzsát alkalmaznak, amely hatékony gyártást és kielégítő minőséget biztosít. Ugyanakkor a BOF-technológia jelentős mennyiségű port és más mellékterméket állít elő, amelyek újrahasznosítása gyakran nehézséget okoz (Aguilar et al. 2019).

EAF-acélgyártás

Az elektromos ívkemencés (EAF) eljárás a hagyományos BOF-módszer alternatívája, és az utóbbi években egyre nagyobb népszerűsége tett szert, mivel energiahatékonyabbnak és környezetkímélőbbnek tekintik. Az EAF-technológia elektromos ív segítségével olvasztja meg az acélhulladékot és más nyersanyagokat, miközben kevesebb mellékterméket állít elő, mint a BOF-eljárás (Chisăliță et al. 2018). Az EAF egyik kiemelkedő előnye, hogy képes kevesebb zárványt tartalmazó acélt előállítani, ami javítja az acél tisztaságát és minőségét.

Az acéltisztaság összehasonlító elemzése

Számos tanulmány vizsgálta a BOF- és EAF-technológiák által elért acéltisztaságot, különös tekintettel a végtermékben található zárványok számára és méretére. Az EAF általában kevesebb zárványt eredményez, különösen nemfémes szennyeződések, például alumínium-oxid, kalcium-oxid és szilícium-dioxid tekintetében. Ez részben annak köszönhető, hogy az EAF lehetővé teszi a gyártási környezet jobb szabályozását és a szennyeződések hatékonyabb eltávolítását (Aguilar et al. 2019).

A BOF-technológiánál nagyobb valószínűséggel keletkeznek oxidációs zárványok, mivel a folyamat során magas oxidációs állapotú salak keletkezik.

Az EAF-eljárás ugyanakkor kisebb mennyiségű salakot állít elő, amely alacsonyabb vastartalmú (FeO), és így csökkenti az oxidációs zárványok kialakulásának esélyét. Továbbá, az EAF-ban történő alumínium-alapú dezoxidálás eredményeként gyakran magnézium-aluminát spinellek keletkeznek, amelyek mechanikai tulajdonságok szempontjából kedvezőbbek (Thermo Fisher Scientific, 2019).

Az EAF és BOF közötti különbségeket gyakran a tisztítási lépésekben alkalmazott gyakorlatok is meghatározzák. Az argonfújás például mindkét technológiánál hatékonyan csökkenti a salakzárványok számát, de az EAF-ban a kisebb salaktartalom miatt tisztább acélt eredményezhet.

BOF és EAF összehasonlítása az acéltisztaság szempontjából

Az elektromos ívkemencében (EAF) készült acélok zárványai általában kisebb méretűek és kevesebb nemfemes oxidot, például alumínium-oxidot és kalcium-szulfidot tartalmaznak, mint a konverteres oxigénfúvós eljárásban (BOF) gyártott acélok. Az EAF-eljárás pontosabb irányíthatósága miatt az oxigén- és szulfidtartalom is alacsonyabb, ami hozzájárul a tisztább végtermékhez.

ZÁRVÁNYOK MÉRETELOSZLÁSA

Az EAF-ban gyártott acélokban az alumínium-oxid zárványok átmérője átlagosan 10–20 μm közötti, míg a BOF-ban készült acélokban ezek elérhetik a 40 μm -t is. Ez különösen fontos az olyan alkalmazásoknál, ahol a mechanikai tulajdonságok kritikusak.

FeO-TARTALOM ÉS ZÁRVÁNYOK ÖSSZETÉTELE

Az acélgyártási folyamatok során a salakban lévő FeO szintje jelentős hatással van a zárványok összetételére. Az EAF-ban alacsony FeO-tartalmú salakot használnak, amely csökkenti a másodlagos oxidációt, és tisztább végterméket eredményez. BOF-eljárásban az oxidáltabb salak gyakran nagyobb mennyiségű alumínium-oxid és spinel típusú zárványt eredményez, ami hátrányosan befolyásolja az acél szívósságát és hegeszthetőségét.

MECHANIKAI TULAJDONSÁGOKRA GYAKOROLT HATÁS

A tisztább acél jobb szakítószilárdságot, alacsonyabb törékenységi átmeneti hőmérsékletet és nagyobb fáradási ellenállást mutat. Az EAF-eljárás eredményeként gyártott acélok esetében kisebb a zárványok mérete és homogénebb az eloszlásuk, ami javítja az anyag tulajdonságait a repedésindítási pontok számának csökkentésével.

A vizsgálati eredmények azt mutatják, hogy az EAF-technológia előnyösebb a nagy tisztaságú acél gyártásában, különösen olyan iparágakban, ahol szigorú tisztasági követelményeknek kell megfelelni.

Összegzés

Az acéltisztaság szempontjából az elektromos ívkemencés, EAF-eljárás előnyösebbnek bizonyult a hagyományos oxigénkonverteres BOF-technológiával szemben. Az EAF által előállított acélban kisebb méretű és homogénebben eloszló zárványok találhatók, különösen az alumínium-oxid és más nemfémes szennyeződések tekintetében.

Ez a tisztasági előny a jobb folyamatirányíthatóságnak és a kisebb mértékű oxidációs reakcióknak köszönhető, amit a salak alacsonyabb FeO-tartalma is elősegít.

A tisztább acélok előállítása nemcsak a mechanikai tulajdonságokat, például a szakítószilárdságot javítja, hanem a gyártási folyamatok gazdaságosságát is növeli. Az EAF környezeti hatásai is kedvezőbbek a kevesebb melléktermék és kisebb energiafogyasztás miatt. Összességében az EAF egy fenntarthatóbb és technológiailag fejlettebb alternatívája a BOF-nak a tiszta acél előállításában.

Szilassy Péter Ákos

Megfelelőségi mutató meghatározásának módszere az akkumulátoros elektromos autóbuszok és az autóbusz-viszonylatok megfeleltetésére

Dunaújvárosi Egyetem, Műszaki Intézet, Gépészeti és Energetikai Tanszék

szilassyp@uniduna.hu

Bevezetés és irodalomkutatás

Napjainkban az elektromos autóbuszok energiahatékonysága és energiafogyasztása a városi közlekedés fenntarthatósági céljai között kiemelt figyelmet kap, különösen az európai városok dekarbonizációs törekvései szempontjából. Az áttekintett irodalmak részletesen elemzik azokat a kulcsfontosságú tényezőket, amelyek befolyásolják az elektromos buszok működését és energiafogyasztását, ideértve a *vezetési stílust*, az *utasforgalmat*, a *külső hőmérsékletet* és a *töltési infrastruktúra optimalizálását*.

ENERGIAFOGYASZTÁS MODELLEZÉSE ÉS ELŐREJELZÉSE

Az autóbuszok energiafogyasztására számos modell ad jó közelítéssel becslést, amelyek különböző vezetési körülmények és városi forgalmi helyzetek figyelembevételével elemzik az energiaigényt. Basma és mtsai (2020) valamint Abdelaty és mtsai (2021) átfogó modellezési módszereket javasolnak, amelyek segítségével pontosabban előrejelezhető az elektromos autóbuszok energiaigénye a városi forgalomban.

DOMBORZAT, KÜLSŐ HŐMÉRSÉKLET ÉS UTASFORGALOM HATÁSA AZ ENERGIAFOGYASZTÁSRA

A külső hőmérséklet és az utasszám jelentős hatással vannak az elektromos buszok energiafogyasztására. Szilassy és Földes (2024) tanulmánya szerint a külső hőmérséklet és az utasok száma jelentős befolyással bír az akkumulátorok fogyasztására és az energiahatékonyságra, különösen a fűtési és légkondicionáló rendszerek (HVAC) használatakor. Az elektromos autóbushoz buszok energiafogyasztására számos tényező hat, köztük a domborzati viszonyok, a megállók közötti távolság, a külső hőmérséklet és az utasok terhelése. Az alábbi összefoglaló a témakörben végzett kutatások eredményeit mutatja be:

Domborzati hatások: A domborzat jelentős szerepet játszik a fogyasztásban, mivel az emelkedőkön és lejtőkön történő mozgás eltérő energiafelhasználást eredményez. Fernandes (2018) szerint a regeneratív fékezés során az energiafogyasztás 82%-a nyerhető vissza, ami a domborzati tényezők figyelembevételének fontosságát hangsúlyozza az energiafogyasztási modellek kialakításakor.

Megállók közötti távolság: A megállók gyakorisága szintén meghatározó tényező. Basma és mtsai (2020), valamint Vepsäläinen és mtsai (2018) arra jutottak, hogy a gyakori gyorsítás és lassítás jelentősen növeli a fogyasztást. Anttila (2016) kutatása is megerősítette, hogy a megállók közötti távolság optimalizálása javíthatja a hatékonyságot.

Külső hőmérséklet: A külső hőmérséklet, különösen a fűtési és hűtési rendszerek (HVAC) működésén keresztül, jelentős hatást gyakorol az energiafogyasztásra. Corazza és mtsai (2021) szerint a téli fűtési igény különösen kritikus, ami akár 40–45%-kal is csökkentheti az elektromos busz hatótávját. Corazza és mtsai (2021) valamint Göhlich és mtsai (2015) tanulmányai rész-

letezik azokat a stratégiákat, amelyekkel csökkenthető az ilyen rendszerek energiaigénye, ezáltal javítva az elektromos autóbuszok hatékonyságát.

Utasforgalom: Az utasok száma és dinamikus terhelése szintén jelentős hatással van a fogyasztásra. He és mtsai (2018) kimutatták, hogy az utaslétszám az összes energiafogyasztás 5–6%-át befolyásolhatja, különösen a HVAC-rendszereken keresztül. Szilassy és mtsai (2022) eredményei szerint ugyanakkor a nagyobb utaslétszám csökkenti az egy főre jutó utazási költséget, ami gazdasági szempontból előnyös.

Összességében az elektromos autóbuszok energiafogyasztásának optimalizálása érdekében figyelembe kell venni a környezeti viszonyokat, a megállók közötti távolságot, a külső hőmérséklet változásait és az utasok terhelését. Ezek a tényezők nemcsak a jármű hatékonyságára, hanem annak fenntarthatóságára is jelentős hatást gyakorolnak.

TÖLTÉSI INFRASTRUKTÚRA ÉS OPTIMALIZÁLÁS

Az optimális töltési infrastruktúra és elhelyezkedés kritikus szerepet játszik az elektromos autóbuszok folyamatos üzemeltetésében. Liu és mtsai (2021, 2023) kutatásai rávilágítanak arra, hogy a szezonális ingadozások és a töltési infrastruktúra elhelyezkedése hogyan javíthatják a városi közlekedési rendszerek működési hatékonyságát.

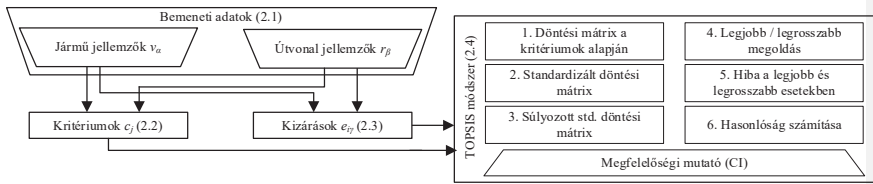
Összességében az elektromos autóbuszok elterjedése komoly infrastrukturális és üzemeltetési kihívásokkal jár, de a kutatók rávilágítanak arra, hogy a megfelelő töltési infrastruktúra, a klímahatások figyelembevétele és a légkondicionáló rendszerek optimalizálása hozzájárulhat a fenntartható és hatékony városi közlekedéshez.

Az elektromos autóbuszok ilyen típusú integrálása és az energiaigény optimalizálása hosszú távon elősegítheti a városi közlekedési rendszerek karbonsemleges működését és fenntarthatóságát.

Módszertan

A tisztán elektromos autóbuszok (BEB) megfelelőségi mutatójának meghatározási módszere a 1. ábra szerint került kidolgozásra, ahol a lépések számozása az egyes alfejezetekkel egyezik meg. Az alábbiakban a módszertan főbb elemei kerülnek összefoglalásra:

1. ábra. A megfelelőségi mutató meghatározási módszerének lépései



PARAMÉTEREK AZONOSÍTÁSA: A szakirodalom alapján azonosították a járműhöz (v_α) és az útvonalhoz (r_β) kapcsolódó paramétereket, amelyek befolyásolják a BEB-ek egy vonalon való alkalmazhatóságát.

Járműparaméterek (v_α)

- v_1 Maximális teljesítmény [kW]
- v_2 Hajtáslánc hatékonyság [-]
- v_3 Fogyasztási ráta [kWh/km]
- v_4 Akkumulátorkapacitás [kWh]

v_5	Max. töltésteljesítmény [kW]
v_6	Utaskapacitás [fő]
v_7	Jármű tömege [kg]

Útvonalparaméterek (r_p)

r_1	Szintkülönbség [m]
r_2	Lejtés szöge [°]
r_3	Útvonal hossza [km]
r_4	Megállók száma [-]
r_5	Sebességhatár [km/h]
r_6	Maximális utasszám [fő/óra]
r_7	Átlagos sebesség [km/h]

KRITÉRIUMOK MEGHATÁROZÁSA: A jármű- és útvonalparaméterek alapján két típusú kritérium (c_j) képzése történt meg, költség- és haszonkritériumok. Az utasonkénti fogyasztás csökkenéséhez vagy növekedéséhez való hozzájárulásuk szerint sorolhatók költségyszerű, ill. haszonjellegű kritériumokba. (1. táblázat)

Költségkritériumok

c_1	Fékezési veszteség [kWh/km]
c_2	Emelkedési veszteség [kWh/km]
c_3	Töltési idő [óra]

Haszonkritériumok

c_4	Kapaszkodási sebesség [km/h]
c_5	Utasterhelés [fő]
c_6	Menetek száma [-]

A fogyasztás meghatározása az autóbuszviszonylat teljes (oda-vissza) az átlagos fogyasztás, valamint a busz mozgási és helyzeti energiájának figyelembevételével történik.

1. táblázat. A megfelelőségi mutató meghatározási módszerének kritériumai

j	Kritérium c_j	Fogyasztásra gyakorolt hatás utasra vetítve	Kritérium típusa	Számítás módja	
1	Fékezési veszteség [kWh/km]	–	költség	$c_1 = \frac{r_4 \cdot v_7 \cdot r_5^2}{r_3}$	(1)
2	Emelkedési veszteség [kWh/km]	–	költség	$c_2 = \frac{v_7 \cdot g \cdot r_1}{r_3}$	(2)
3	Töltési idő [h]	–	költség	$c_3 = \frac{v_4}{v_5}$	(5)
4	Kapaszkodási sebesség [km/h]	+	haszon	$c_4 = \frac{v_1}{v_7 \cdot g \cdot \sin r_2 \cdot v_2}$	(3)
5	Utasterhelés [-]	+	haszon	$c_5 = \frac{r_6}{v_6}$	(4)
6	Menetek száma [-]	+	haszon	$c_6 = \frac{v_4}{(v_3 + c_1 + c_2) \cdot r_4}$	(6)

KIZÁRÁSOK

A járművek kizárási kritériumai a minimális szolgáltatási elvárások teljesítését vizsgálják:

- I. Minimális sebesség ($e_1: c_4 > 15 \text{ km/h}$)
- II. Utaskapacitás ($e_2: v_6 < \text{pillanatnyi utasszám}$)
- III. Maximális töltési idő ($e_3: c_3 < \text{pillanatnyi utasszám}$)
- IV., Minimális menetek száma ($e_4: c_6 < 2$)

- V. Maximális járműtömeg (e_5 : $v_7 < 20$ ill. 30 t szóló ill. csuklós autóbuszra)
- VI. Geometriai kizárás (e_6 : Pl. csuklós autóbuszok nem járhatnak szűk utcákban)

TOPSIS-MÓDSZER ALKALMAZÁSA

A BEB-ek megfelelőségi mutatójának számítása a TOPSIS- (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) módszerrel történt:

I. Döntési mátrix felírása a rangsoroláshoz és döntéshozatalhoz (7), ahol a döntési $m \times n$ -es mátrix m választható járműből (O_i) és n kritériumból (C_j) áll.

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} O_1 & O_2 & \vdots & O_1 & \vdots & O_m \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1j} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{21} & \cdots & c_{2j} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{i1} & c_{i1} & \cdots & c_{ij} & \cdots & c_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m1} & \cdots & c_{mj} & \cdots & c_{mn} \end{matrix} \end{matrix} \quad (7)$$

II. Normalizált döntési mátrix létrehozása $N(=n_{ij})$ (8).

$$n_{ij} = \frac{c_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m c_{ij}^2}} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, 6 \quad (8)$$

III. Súlyozott normalizált döntési mátrix létrehozása $T(=t_{ij})$ (9), ahol w_j a C_j kritérium súlya, amely minden O_j járműtípusnál azonos

$$t_{ij} = w_j \cdot n_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, 6 \quad (9)$$

IV. Az ideális pozitív (O_{best} legjobb opció (10)) és **ideális negatív** (O_{worst} legrosszabb opció (11)) megoldás meghatározása a jármű és az útvonal paramétereinek alapján.

$$O_{best} = \left\{ \left\langle \max_i(t_{ij} | i = 1, 2, \dots, m) | j \in J_+ \right\rangle, \left\langle \min_i(t_{ij} | i = 1, 2, \dots, m) | j \in J_- \right\rangle \right\} \equiv \{t_{bj} | j = 1, 2, \dots, 6\} \quad (10)$$

$$O_{worst} = \left\{ \left\langle \min_i(t_{ij} | i = 1, 2, \dots, m) | j \in J_- \right\rangle, \left\langle \max_i(t_{ij} | i = 1, 2, \dots, m) | j \in J_+ \right\rangle \right\} \equiv \{t_{wj} | j = 1, 2, \dots, 6\} \quad (11)$$

ahol $J_+ = \{j=1, 2, \dots, 6 | j\}$ a pozitív hatású kritériumok összessége, míg $J_- = \{j=1, 2, \dots, 6 | j\}$ a negatív hatású kritériumok összessége. A pozitív hatású kritériumokban a legnagyobb értékűt, míg a negatív hatású kritériumokban a legalacsonyabb értékűt kell kiválasztani.

V. A négyzetes hiba módszere alapján a i járműopciók kritériumai és a legjobb opció kritériumai közötti $d_{i,best}$ különbség mértékének meghatározása (12), illetve az i járműopciók kritériumai és a $d_{i,worst}$ legrosszabb opció kritériumai közötti különbség meghatározása (13).

$$d_{i,best} = \sqrt{\sum_j^n (t_{ij} - t_{bj})^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

$$d_{i,worst} = \sqrt{\sum_j^n (t_{ij} - t_{wj})^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

VI. A Cli megfeleléségi mutató meghatározása i járműre (14), vagyis az i jármű hasonlósága az O_{best} legjobb járműopcióhoz. $CI_i=1$, ha az i járműopció rendelkezik a legjobb kritériumokkal; $CI_i=0$, ha a járműopció a legrosszabb kritériumokkal rendelkezik.

$$CI = \frac{d_{i,worst}}{d_{i,worst} + d_{i,best}}, \quad 0 \leq CI \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

VII. Az i járműopciók rangsorolása a legjobb esettel való hasonlóság szerint.

ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLAT

A kritériumok súlyának változtatásával az eredmények torzulását vizsgálták 48 esetben. Az eltérések abszolút értékét normalizált rangsorban fejeztem ki. $\gamma \in [0; 0.75; 1.5; 3]$ alapján.

$$w' = \gamma \cdot w_j$$

Eredmények és Konklúzió

ESETTANULMÁNY HELYSZÍNE: BUDAPEST

Budapestet választották az elektromos buszok (BEV) alkalmazásának vizsgálatához, mivel a város buszhálózata nagyrészt nem elektromos. Jelenleg csak néhány elektromos busz üzemel, így a megfelelő busztípusok kiválasztása jelentős hatással lehet az elektromosítás hatékonyságára.

Főbb adatok:

- **Utasszám:** Évente több mint 1,3 milliárd utas használja a városi közlekedést, ebből napi átlagban 3,1 millió. A buszok az utazások több mint 50%-át biztosítják.
- **Viszonylathálózat:** Budapest 244 buszvonallal (3000 km) és 15 trolibuszvonallal rendelkezik. A hálózat sík és dombvidéki területekre is kiterjed.

- **Elemzés:** 58 buszvonalat és 30 különböző típusú buszt (8 midi, 18 szóló, 4 csuklós) elemeztek, a vonalak hosszát, megállók távolságát, sebességet, topográfiát és utasterhelést figyelembe véve.

MEGFELELŐSÉGI MUTATÓ

A megfeleléségi mutatót (compliance indicator) két különböző súlyozás alapján határoztam meg:

- a, Nominális:** Egyenlő súlyozás az összes szempont között.
- b, Súlyozott:** Az utasok kényelmét, fogyasztást és az utazások számát nagyobb súllyal vették figyelembe.

Az elemzés részletezte a 21-es autóbuszviszonylat példáját, amely dombos terepen halad. A vizsgált paraméterek közé tartozott az emelkedés (341m), a maximális lejtés (7,6°), az út hossza (11km), valamint a megállók száma (22) és az utasok maximális száma (59 fő/óra). Az elemzés során a buszok energiateljesítményét, töltési idejét és kapacitását vizsgálták mindkét irányban (felfelé és lefelé).

EREDMÉNYEK 21-ES AUTÓBUSZVISZONYLAT

A legjobb buszok az egyes súlyozások szerint:

Nominális teszt: BEB-14

Súlyozott teszt: BEB-23

Hét autóbustípus kizárásra került, mivel nem feleltek meg az utaskapacitási és utazási szám kritériumoknak.

A különböző buszvonal-kategóriákat összevonták, mivel az alacsony és közepes sebességű vonalak között nem volt jelentős eltérés. Így 14 kategória maradt a 21 eredetiből.

KATEGÓRIÁK ÉS AJÁNLOTT BUSZTÍPUSOK BUDAPEST EGÉSZÉRE

A budapesti buszvonalak fő kategóriái alapján kilenc különböző busztípust azonosítottam, amelyek a teljes hálózatot kiszolgálhatják. A BEB-23 volt a legalkalmasabb típus, az esetek 90%-ában az első három helyen szerepelt, és 83%-ban az első helyet foglalta el. Valamennyi kategóriában a legjobbnak bizonyult autóbusztípusok a Melléklet A táblázatában látható.

ÖSSZEFOGLALÓ ÉS VÉGKÖVETKEZTETÉSEK

Összességében az alábbi következtetéseket tettem:

- Az emelkedőkkel kapcsolatos kritériumokat nagyobb súllyal kell figyelembe venni, hogy a buszok a dombos szakaszokat hatékonyan kezeljék.
- Az utazások számának maximalizálása érdekében a járművek töltési idejének optimalizálása szükséges.
- A flották homogenizálása (pl. töltőteljesítmény, gyártók szerint) fontos szempont lehet a jövőbeli elemzésekben.

A tanulmány végkövetkeztetése szerint egy Budapesthez hasonló nagyvárosban néhány (max. 6–10) különböző típusú elektromos busz elegendő lenne a hálózat hatékony üzemeltetéséhez.

Melléklet

A táblázat. A legjobb akkumulátoros elektromos autóbuszok kategóriák szerint

Autó- busz-vál- tozat	Autóbuskatego- riák és rangsor	Típus	v1 [kW]	v3 [kWh/ km]	v4 [kWh]	v5 [kW]	v6 [pax]	v7
A	III; XIV. ③	szóló	300	1,29	348	80	95	11540
BEB-02	I-VIII; XI. ②	szóló	250	1,35	450	135	51	15583
BEB-03	IX. ③	csuk- lós	250	1,275	414	75	125	19500
BEB-04	XII. ①	szóló	220	0,85	311	75	90	12000
BEB-12	X. ②, I; V; VI; VIII; XI. ③	midi	180	1,28	385	150	87	12300
BEB-14	XIII. ①	szóló	250	0,90	240	450	90	12880
BEB-15	X. ③	csuk- lós	270	1,30	240	450	129	21228
BEB-23	XIII. ③	szóló	200	1,10	422	150	97	13300
BEB-30	I-XI; XVI. ①, XII. ②	szóló	250	1,35	450	135	51	15583
BEB-23	IX. ②, II; IV; VII. ③	szóló	200	1,10	422	150	97	13300
BEB-30	IX. ②, II; IV; VII. ③	szóló	250	1,35	450	135	51	15583

Saját forrás: Összes táblázat és ábra.

Irodalom

- Basma, H.–Mansour, C.–Haddad, M.–Nemer, M.–Stabat, P. (2020): Comprehensive energy modeling methodology for battery electric buses. *Energy (Oxford, England)*, 207.,
- Abdelaty, H.–Mohamed, M. (2021): A prediction model for battery electric bus energy consumption in transit. *Energies*, 14., (10.). <https://doi.org/10.3390/en14102824>

- Szilassy, P. Á.–Földes, D. (2024): Impact of Ambient Temperature, Passenger Load, and Delay on the Consumption of Battery Electric Buses. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 52., (2.), pp. 113–119. <https://doi.org/10.3311/PPtr.23478>
- Fernandes H. (2018): *Electric bus performance evaluation in real world use conditions*. https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1126295043836122/ExtendedAbstract_76209.pdf [Letöltve: 2024. november 19.]
- Vepsäläinen, J.–Ritari, A.–Lajunen, A.–Kivekäs, K.–Tammi, K. (2018): Energy uncertainty analysis of electric buses. *Energies*, 11., (12.).
- Anttila, J. (2016): *Uncertainty in electric bus driving cycles (Master thesis)*.
- Corazza, M.–Conti, V.–Genovese, A.–Ortenzi, F.–Valentini, M. P. (2021): A procedure to estimate air conditioning consumption of urban buses related to climate and main operational characteristics. *World Electric Vehicle Journal*, 12., (1.). <https://doi.org/10.3390/wevj12010029>
- Göhlich, D.–Ly, T.–A.–Kunith, A.–Jefferies, D. (2015): Economic assessment of different air-conditioning and heating systems for Electric City buses based on comprehensive energetic simulations. *World Electric Vehicle Journal*, 7., (3.), pp. 398–406. <https://doi.org/10.3390/wevj7030398>
- He, H.–Yan, M.–Sun, C.–Peng, J.–Li, M.–Jia, H. (2018): Predictive air-conditioner control for electric buses with passenger amount variation forecast. *Applied Energy*, 227., pp. 249–261. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.181>.
- Szilassy, P. Á.–Jenőfi, B.–Földes, D. (2022): Marginal energy consumption cost factors of battery electric buses, 2022 Smart City Symposium Prague (SCSP). *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/SCSP54748.2022.9792553>
- Liu, X.–Qu, X.–Ma, X. (2021): Optimizing electric bus charging infrastructure considering power matching and seasonality. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 100, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103057>.
- Liu, X.–Liu, X. C.–Liu, Z.–Shi, R.–Ma, X. (2023): A solar-powered bus charging infrastructure location problem under charging service degradation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 119., 103770. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103770>

Tatár Levente¹–Bereczki Péter²

Folyásgörbe a szakítóvizsgálat kontrakciós szakaszában

¹ HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest

² Dunaújvárosi Egyetem, Műszaki Intézet, Dunaújváros

Kulcsszavak: Szakítóvizsgálat, folyásgörbe, kontrakció, Considère-kritérium.

Absztrakt:

A megbízható folyásgörbék valamennyi végeselemes modellhez elengedhetetlenek. A folyásgörbéket általában szakító- vagy zömítővizsgálatokkal határozzák meg. A szakítóvizsgálatokból nyert nyers adatokra alkalmazott egyszerű képletek csak a kontrakciós szakaszig tekinthetők megbízhatónak. A kontrakció kezdete után a feszültség- és alakváltozási mezők háromdimenzióssá válnak, valamint a feszültség egytengelyűségének feltételezése már nem érvényes. A Dunaújvárosi Egyetemen kísérleteket végeztünk a próbatestek valós viselkedésének feltárására. A szakítóvizsgálatok során szabályos négyzetrácssal felhálózott, téglalap keresztmetszetű próbatesteket használtunk. A deformálódó mintákról készült fényképek utófeldolgozásával, a Choung-Cho korrekciós módszerrel a nem korrigált esethez képest jelentősen javult a kontrakció alatti anyagi viselkedés közelítése.

A kontrakció kialakulásának kezdetét hengeres próbatestek végeselemes modelljeinek segítségével tanulmányoztuk a korábban meghatározott folyásgörbék felhasználásával. A kontrakció kezdetén a Considère-kritérium megfeleltethető az axiális erőnek a keresztmetszeti felülettől való függetlenségével. Ezen kritérium alapján a végeselemes elemzésekhez használható elméleti „folyásgörbéket” alkottunk, amelyek a szakítóvizsgálat során jelentkező tipikus tulajdonságokat azonosítják.

Bevezetés

Számos alkalmazás használja a képlékeny alakváltozás végeselemes modellezését. Ezek különböző kategóriákba sorolhatóak, mint például fémek alakítási folyamatainak szimulációja; üzemzavaros helyzetek szimulációja, ahol kis vagy akár nagy képlékeny alakváltozások lépnek fel; méretezési határfeszültségek ellenőrzése egy szerkezetre; repedésterjedés szimulációja az elasztó-plasztikus tartományban stb. Igénytől függően a szimulációk többféle megközelítéssel is végrehajthatóak, pl. kis vagy nagy mértékű plaszticitás; kinematikai vagy izotróp keményedés, viszkoplasztikus vagy sebességfüggetlen képlékeny alakváltozás stb. Ebben a tanulmányban a nagy mértékű plaszticitásra, az időtől független anyagtörvényekre, az izotróp anyagmodellre és a von Mises megközelítésre korlátozzuk a modellünket. Továbbá valódi (logaritmikus) alakváltozásokkal és a valódi feszültségekkel dolgozunk.

A folyásgörbéket általában hosszirányú nyúlásmérőkkel felszerelt szakítóvizsgálatokból nyerik. A hengeres próbatesteknél az alakváltozási folyamat kezdetén biztonságos feltételezés, hogy a feszültségmező egytengelyű, és így egyszerű képletekkel egytengelyű feszültség-nyúlás görbét kaphatunk. A szimulációk során azonban sok esetben szükség van olyan alakváltozások és feszültségek kiszámítására, amelyek túllépik az egytengelyű képletekből kapott folyásgörbék érvényességi tartományát. A szimulációk megbízhatósága erősen függ a bemeneti adatok megbízhatóságától, ezért nagy szükség van a folyásgörbék alkalmazhatóságának kiterjesztésére.

Hengeres próbatesteknél jól ismert megközelítés a Bridgman-korrektúra [1]. A Bridgman-korrektúra gyakorlati alkalmazásához meg kell mérni a próbatest minimális átmérőjét és az oszkulációs kör sugarát a kontrakció környezetében.

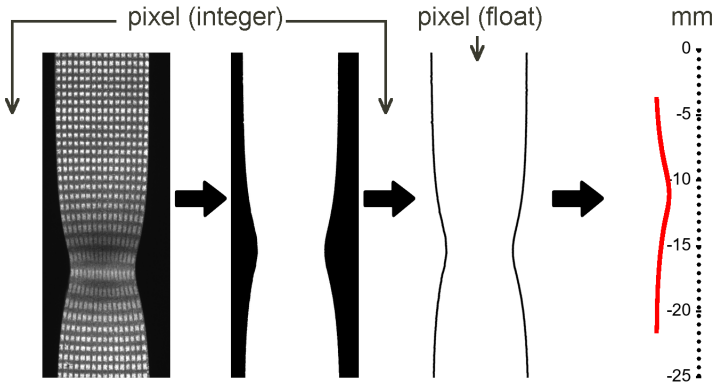
Bár a módszer meglehetősen régi és viszonylag jó eredményeket ad, a mérési nehézségek miatt még mindig nem elterjedt.

A folyásgörbék meghatározása és a szakítóvizsgálat szimulációja

Kísérleteink során négyzet- és téglalap keresztmetszetű próbatesteket használtunk. Négyzetháló alakú rácsot nyomtattunk a próbatestek vizsgálandó szakaszának mind a négy felületére. Házon belül kifejlesztettünk egy kétkamerás rendszert, amely rögzíti a próbatestek valós alakját a deformáció során. A rács által körülhatárolt objektumok követése Lucas–Kanade módszerrel történt, így fel tudtuk tární az alakváltozás egyenetlenségeit és lokális eltéréseit.

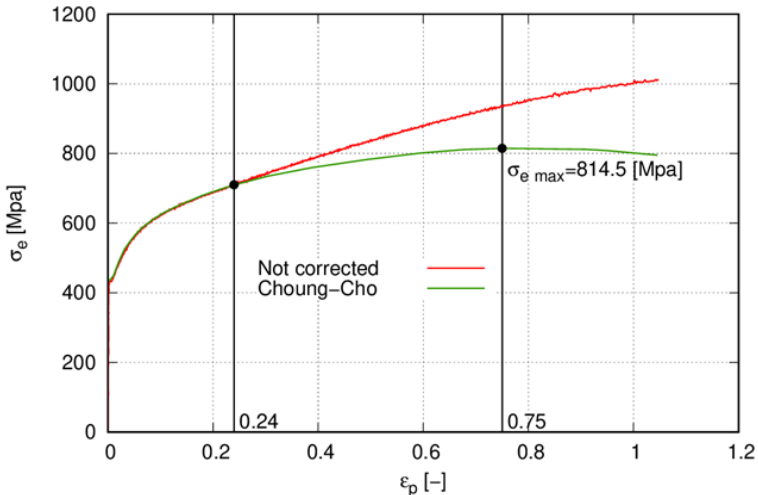
Sajnos a kontrakciós szakaszban a nyomkövetés megbízhatósága jelentősen csökkent. A kontrakciós tartományban a folyásgörbe meghatározásához a Choung–Cho-módszert [2] alkalmaztuk. A módszer alkalmazásához az optikailag rögzített képsorokból csak a próbatestek kontúrjait és az azokból meghatározott minimális keresztmetszetet használtuk. A grafikus információ feldolgozásának lépéseit vázlatosan az *1. ábra* mutatja be. A folyamatot részletesebben a [3] szakirodalom írja le.

1. ábra. A képek feldolgozásának lépései



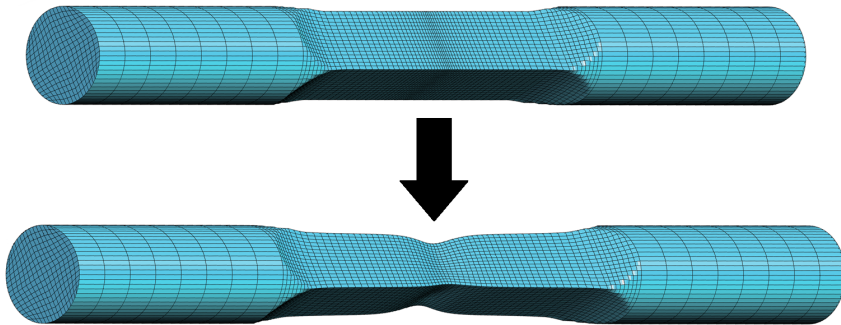
A nyers (nem korrigált) és a korrigált folyásgörbék a 2. ábrán láthatóak. Az értékelésnél figyelembe kell venni, hogy a Choung–Cho-módszerrel korrigált görbének a függvény polinomiális jellege miatt van egy maximumpontja.

2. ábra. Az eredeti és a korrigált folyásgörbe



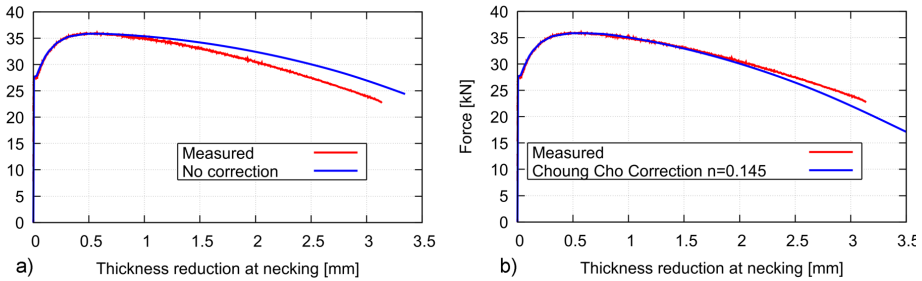
A korrigált görbe pontosságának ellenőrzésére a szakítóvizsgálati folyamatot szimuláltuk végeleemes környezetben. A szimulációkhoz használt háló eredeti és deformált állapotában a 3. ábrán látható.

3. ábra. Végeleemes háló



Az eredmények azt mutatják, hogy a Choung-Cho korrekciós módszerrel kapott folyásgörbe alkalmazásával nagyobb intervallumon kapunk jó egyezést a kísérleti eredményekkel, mint a nem korrigált folyásgörbével – azonban a szimuláció nem pontos a szakítási folyamat végén. A 4. ábra a mért és szimulált Erő–Vastagság csökkentés-diagramokat mutatja a kontrakció helyén.

4. ábra. A szakítóvizsgálat szimulációja: a) az eredeti (nem korrigált) folyásgörbével és b) a Choung-Cho módszerrel korrigált folyásgörbével



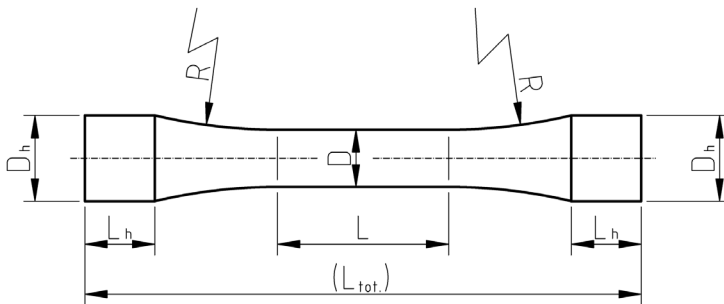
Hengeres próbatestek szakítóvizsgálatának végeselemes szimulációi

Bár a teljes 3D-modell meglehetősen jó egyezést adott a kísérleti eredményekkel, és a kísérleteket téglalap keresztmetszetű próbatesteken végeztük, a szimulációs munkát mégis hengeres próbatesteken folytattuk. Ennek az volt az oka, hogy a teljes 3D-s szimulációk számításilag sokkal egyszerűbbek, mivel ellentétben a hasáb próbatestekkel, a hengeres mintákhoz elegendő a tengelyszimmetrikus modellek használata.

Az optikailag támogatott szakítóvizsgálatok egyik fő problémája, hogy előzetesen nem ismerjük a kontrakció helyét. Ez gyakorlatban azt jelenti, hogy ha csak a nyakrészre vagyunk kíváncsiak, akkor is a próbatest teljes hengeres részét kell követni, ami az elérhető pontosság jelentős csökkenéséhez vezet. Ennek a problémának a megoldására egy sor tengelyszimmetrikus végeselemes szimulációt hajtottunk végre különböző hosszúságú mintákon. A próbatesteket az L/D arányukkal jellemeztük, ahol L a befogófejek közötti, deformáció alatt álló hengeres rész

hosszát, D ennek az átmérőjét jelöli. Ezt követően erre a szakaszra „megfigyelt részként” fogunk hivatkozni. A próbatest befogási szakaszának az eredményekre gyakorolt hatását úgy minimalizáltuk, hogy nagy lekerekítési sugarakat használtunk az átmeneti zónában (5. ábra). Továbbá az L értékét nagyobbra választottuk, mint a szabványokban meghatározott érték.

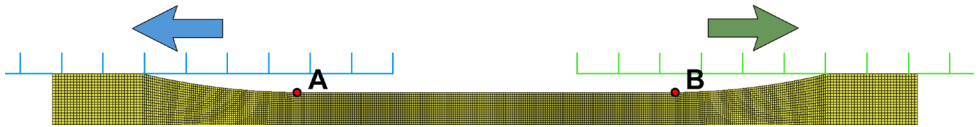
4. ábra. Specimens used for simulations



Az L/D arányok az R10 Renard-sorozatot követték [4], 1-től 10-ig. Ezt egészítettük ki egy speciális $L/D=0$ arányú próbatesttel, azaz hengeres rész nélküli mintával. A hálózás eredményekre gyakorolt hatásának lehető legnagyobb mértékű kiküszöbölése érdekében a háló azonos méretű hasáb alakú elemeket tartalmazott (kivéve a fejeknél és azok átmeneti zónáinál). A próbatestek mindkét oldali befogási szakasza szerepelt a modellben. A megfigyelt rész átmérője 8 mm volt, az elemeket a megfigyelt résznél 0,2 mm élhosszúságúra választottuk. Mindkét befogófejet egyidejű axiális húzással terheltük. Tengelyszimmetrikus modelleket használtunk. A háló bikvadratikus, 8 csomópontos teljes integrációs elemekből állt. Az anyag homogén, izotróp, Young-modulusa 210 000 Mpa, Poisson-tényezője 0,3-ra lett választva. Minden szimuláció 500 lépésben került végrehajtásra.

Minden lépéshez ugyanazokat az elmozdulás-növekményeket használtuk, de az eredő deformációs-növekmények elemzésenként eltérőek voltak. A végeselemes összeállítást a 5. ábra mutatja be.

5. ábra. A végeselemes összeállítás



A megfigyelt rész egyes csomópontjainak elmozdulásait (A és B pontok között) az eredményfájlból gyűjtöttük össze minden lépéshez, így szimulált szintvonalak halmazaihoz jutottunk. A szimuláció pontossága sokkal nagyobb, mint a mechanikus mérőeszközökkel elérhető eredményeké.

A SZIMULÁCIÓK EREDMÉNYEI

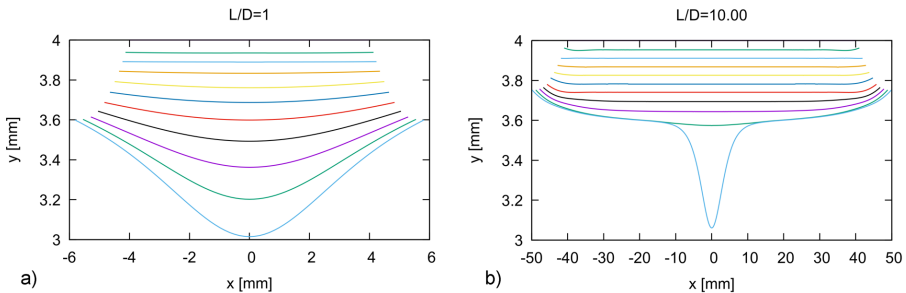
Az eredmények azt mutatják, hogy csak az $L/D=0$ (hengeres rész nélküli) próbatest különbözik jelentősen, a többi eredmény egymáshoz nagyon hasonló. Még a nagyon rövid próbatest is, amelynél $L/D=1$, a szimulációkból adódó korrigálatlan alakváltozás-feszültség görbére 1%-nál kisebb különbséget adott az $L/D=10$ arányú próbatesthez képest a 0,3 logaritmikus alakváltozáshoz tartozó folyási feszültségek összehasonlításában. Így az általában használnál rövidebb minták alkalmazása elfogadható lehet.

Az eredmények alaposabb vizsgálatokor megfigyelhető, hogy a befogófejek és a folyásgörbe együttes hatása egy ideálisan homogén anyag esetén is rendkívül kis eltéréseket mutat az ideális

hengerformától. Ezek az eltérések végső soron makroszkopikusan megfigyelhető lokális kontrakcióhoz vezetnek. Ezt mutatják be a következő ábrák.

Bár a próbatestek globális viselkedése (erő-átmérő csökkenéséből nyert feszültség-nyúlás) minden esetben azonosnak tekinthető, a kontrakció lokalizációja a különböző L/D arányú próbatesteknél egészen más utat követ. A kontúrvonalak $y=4$ mm-től indulnak és körülbelül 3 mm-nél érnek véget, ami 6 mm-es minimális kontrahált átmérőnek felel meg. A diagramokat felülről lefelé kell olvasni, ahogy a folyamat fejlődik. A diagramokon a szimulációk minden 50. lépését mutatjuk be. Összehasonlításuképpen az $L/D=1$ és $L/D=10$ értékű próbatestek eredményeit láthatjuk a 6. ábrán.

6. ábra. A kontúrvonalak előrehaladása a végesselemes szimuláció során
(a) az $L/D=1$ (b) az $L/D=10$ arányú próbatest esetében

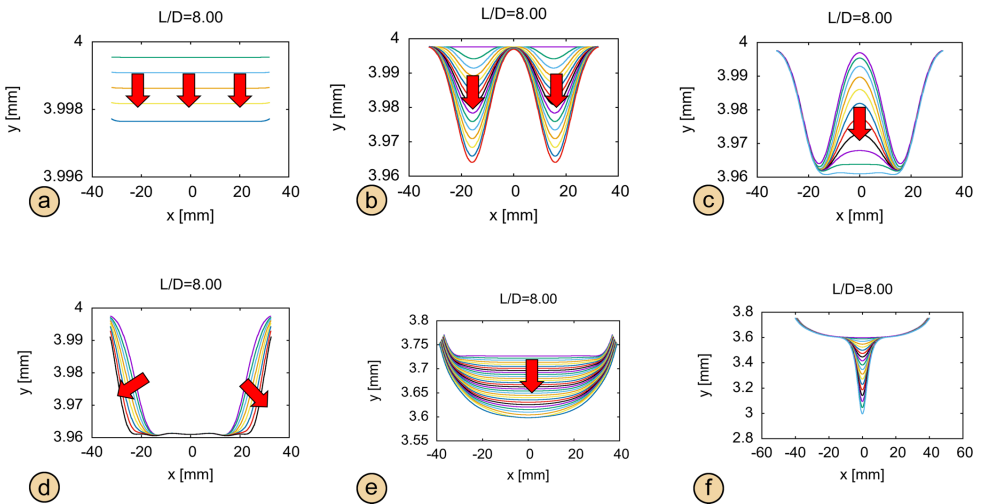


$L/D=1$ esetén a kontrakció lokalizációja szinte csak a vizsgálat végén figyelhető meg, míg $L/D=10$ esetben gyakorlatilag a folyamat végéig nincs makroszkóposan mérhető lokalizáció. A közepes L/D arányú próbatestek köztes viselkedést mutatnak.

Az alakváltozás lokalizációs folyamatának részleteit jobban szemügyre véve megállapítható, hogy még az sem egyszerű, ami távolról egyszerűnek tűnik.

Ezt egy $L/D=8$ -as arányú próbatest bizonyítja a leginkább, ami meglehetősen közel áll az általánosan használt minták L/D arányához (természetesen a fejkénél az átmeneti zóna sugara általában kisebb, mint a mi modellünkénél). A lokalizáció folyamatát a 7. ábra mutatja be.

7. ábra. (a) Egyenletes átmérő csökkenés, (b) lokalizáció, (c) delokalizáció, (d) további delokalizáció (e) diszperz kontrakció (f) végső lokalizált kontrakció



SZÁMÍTÁSOK „MESTERSÉGES” FOLYÁSGÖRBÉKKEL

Mint teljesen elméleti megközelítések, a következő folyásgörbét alkalmaztuk:

– Exponenciális:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{\varepsilon} \quad (1)$$

- Hipo-exponenciális, ahol a lineáris tag kivonásra kerül az exponenciálisból:

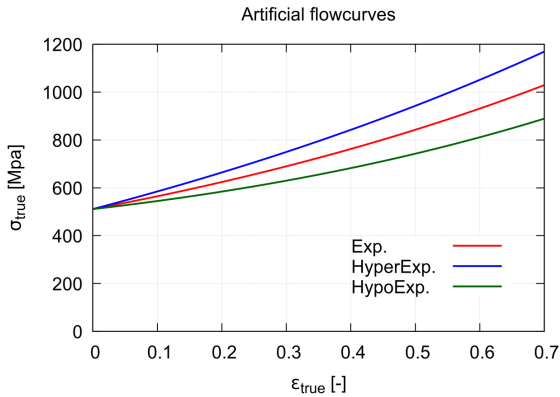
$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^\varepsilon - K \cdot \varepsilon \quad (2)$$

- Hiper-exponenciális, ahol a lineáris tag hozzáadásra kerül az exponenciálishoz:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^\varepsilon + K \cdot \varepsilon \quad (3)$$

A három folyásgörbe a 11. ábrán látható. ($\sigma_0=511$ Mpa, $K=200$ Mpa)

8. ábra. A „mesterséges” folyásgörbék

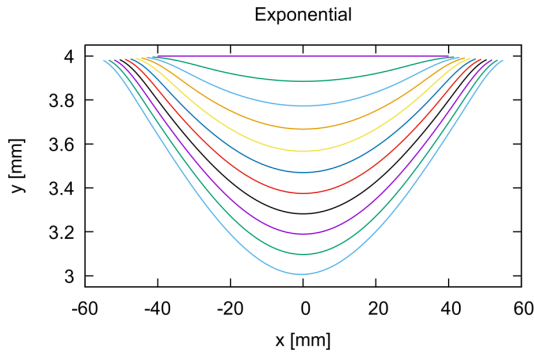


SIMULATION RESULTS USING ARTIFICIAL FLOWCURVES

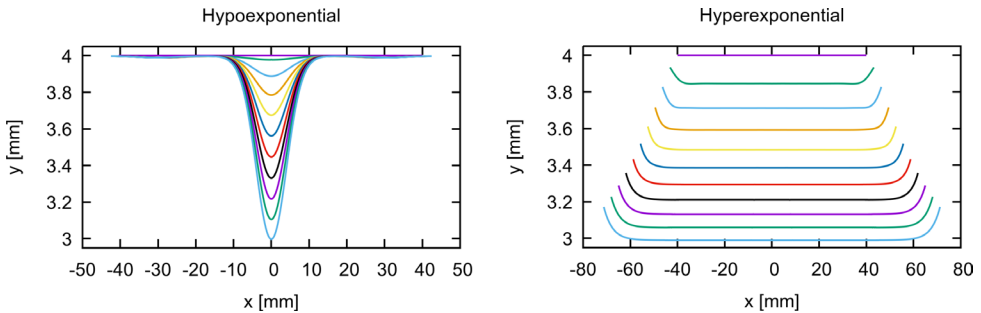
A „mesterséges” folyásgörbékét $L/D=10$ -es arányú próbatetekre alkalmazzuk. A 9. ábra az exponenciális, míg a 10. ábra

a hipo- és hiper-exponenciális folyásgörbékhez tartozó kontúr-
görbék mutatja be.

9. ábra. A próbatest kontúrjai exponenciális folyásgörbe esetén



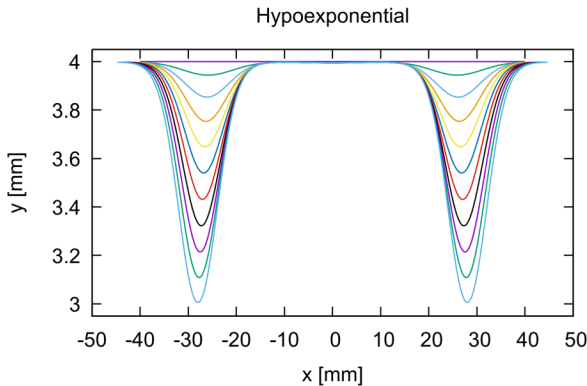
10. ábra. A próbatest kontúrjai hipo- és hiper-exponenciális
folyásgörbék esetén



Az ábrákon látható, hogy a három folyásgörbe három különböző viselkedéstípushoz vezet. Exponenciális görbe esetén a próbatest teljes hosszában gyenge lokalizáció figyelhető meg. A hiper-exponenciális folyásgörbe esetében csak egy átmeneti zóna van a befogás közelében, nincs további lokalizáció.

A hipo-exponenciális görbe esetében viszont erős lokalizáció jelentkezik, amely már a szakítási folyamat legelején elkezdődik. Megjegyzendő, hogy a lokalizáció numerikusan instabil, különböző elmozdulás-növekmények alkalmazása esetén két minimumot is kaphatunk, amint azt a 11. ábra mutatja. A 11. ábrán látható görbéket 0,025 mm elmozdulás-növekménynél kaptuk. Úgy gondoljuk, hogy az erős lokalizáció folyamata nemcsak számszerűen, hanem fizikailag is instabil, így bármilyen inhomogenitás (anyagi, geometriai) kontrakciót válthat ki. A 11. ábrán látható teljesen kifejlődött iker-kontrakció képződés a valós próbatesteknél anyagi és geometriai inhomogenitások jelenléte miatt valószínűtlen.

11. ábra. A próbatest kontúrjai hipo-exponenciális folyásgörbe és 0,019 mm-es elmozdulás-növekmény esetén



A „mesterséges” folyásgörbékkel kapott kontúrgörbékre bemutatott viselkedések referenciának tekinthetők a reális folyásgörbékől nyert viselkedésekre nézve, figyelembe véve, hogy a reális folyásgörbének vannak hiper- és hipoexponenciális részei is amellet, hogy annak mértékadó szakasza közel exponenciális.

Összefoglalás

Optikai mérésekkel és a Choung–Cho-korrekcióval növelni tudtuk a négyzet keresztmetszetű próbatesteknél kapott folyásgörbék megbízhatósági tartományát. A kapott reális folyásgörbe felhasználásával szimulációsorozatot készítettünk hengeres próbatestekre, különböző L/D arányú próbatestekkel. Megállapítottuk, hogy bár a globális viselkedés az átmérő-csökkentés és az erő tekintetében hasonló, az ehhez vezető út egészen más. Különböző alapviselkedéseket tudtunk azonosítani.

A Considère-kritérium [5] alapján mesterséges folyásgörbét, exponenciális, hipo- és hiper-exponenciális változatokat szerkesztettünk. Ezek a görbék segítenek megérteni a valóságos folyásgörbén alapuló szimulációkhoz kapcsolódó alapvető viselkedéseket.

Irodalom

- [1] Bridgman, P. W., (1952): *Studies in Large Plastic Flow and Fracture*. New York: McGraw-Hill. pp 9–16.
- [2] Choung, J.–Cho, S.–R. (2008): Study on true stress correction from tensile tests. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22., pp. 1039–1051.
- [3] Fekete, T.–Antók, D.–Tatár, L.–Bereczki, P. (2022): Extending reliability of FEM simulations, based on optically assisted tensile tests and digital twins. *Procedia Structural Integrity*, 42, pp. 1684–1691
- [4] ISO 3:1973 Preferred numbers. *Series of preferred numbers*.
- [5] Considère, A. (1885): *Mémoire sur l'emploi du fer et de l'acier dans les constructions*. *Annales des Ponts et Chaussées* 9. Paris: Ch. Dunod. pp. 574–605.

Wizner Krisztián

Az ipari adatkezelés szerepe az Ipar 4.0 keretében a nehéziparban

Bevezetés

Az ipari adatkezelés és az Ipar 4.0 szorosan összefonódnak, különösen a nehéziparban, ahol az automatizáció, a digitalizáció és az adatalapú döntéshozatal központi szerepet kapnak a hatékonyság, termelékenység és versenyképesség javítása érdekében. Az Ipar 4.0 megjelenése a gyártási folyamatok digitalizációját és integrálását vonja maga után, amelyben a kiber-fizikai rendszerek (CPS), az ipari dolgok internete (IIoT) és a nagy adatfeldolgozási technológiák (Big Data) jelentik a legfontosabb technológiai pilléreket.

Az adatkezelés fontossága a nehéziparban

A nehézipar folyamatosan fejlődő környezete egyre nagyobb mennyiségű és komplexitású adatot generál. Ezek az adatok nem csak a gyártási folyamatokhoz kapcsolódnak, hanem kiterjednek a beszállítói láncra, a karbantartási folyamatokra és az energiahatékonyságra is. Az *adatkezelés* tehát létfontosságú a gyártási folyamatok átláthatóságának, hatékonyságának és rugalmasságának biztosításához.

Az Ipar 4.0-ban a *nagy adatmennyiségek kezelése* és az ezekből származó betekintések előállítása kritikus szerepet játszik. A valós idejű adatelemzési technikák segítségével a gyártási folyamatok optimalizálhatóak, csökkenthetőek a gyártási hibák, valamint növelhető a termelékenység és az energiahatékonyság.

Ahogy az Xu és munkatársai (2018) által bemutatott kutatás is rámutat, a nehéziparban az Ipar 4.0 technológiák alkalmazása jelentős adattöbbleteket hoz létre, amelyeket fejlett adatkezelési algoritmusokkal kell feldolgozni az üzleti eredmények javítása érdekében [1].

Kiber-fizikai rendszerek és adatkezelés

A *kiber-fizikai rendszerek* (CPS) a nehéziparban kulcsfontosságú szereplőkké váltak, mivel lehetővé teszik a valós idejű adatok integrálását és a termelési folyamatok intelligens irányítását. A CPS-ek összekapcsolják a fizikai és digitális világot, és biztosítják a valós idejű információkat a gyártási rendszerek működéséről és állapotáról. Ezek a rendszerek képesek előrejelzésekre és karbantartási döntések meghozatalára, amelyek segítenek minimalizálni a leállásokat és maximalizálni a gyártási hatékonyságot. *Yan és munkatársai* (2017) az ipari nagy adatok szerepét emelik ki a prediktív karbantartásban, ahol a különféle forrásokból származó adatokat integráltan elemzik a gyártási folyamatok folyamatos működésének biztosítása érdekében [2].

Ipari dolgok internete és adatintegráció

Az ipari dolgok internete (IIoT) alapvető szerepet játszik az Ipar 4.0-ban a nehézipar számára. Az IIoT-rendszerek lehetővé teszik a különböző gyártási eszközök, gépek és érzékelők összekapcsolását, amelyek valós idejű adatokat gyűjtenek a gyártási környezetről. Ez az adatintegráció javítja a gyártási folyamatok hatékonyságát, és lehetővé teszi az automatikus optimalizálási folyamatokat.

Czvetkó és Abonyi (2023) kutatásukban kiemelik, hogy az adatok integrálása olyan szabványosított formátumokban, mint az AutomationML és az International Data Spaces, lehetővé teszi az adatok biztonságos és széles körű megosztását az ipar különböző szereplői között, így fokozva az ipari együttműködést [3].

Prediktív karbantartás és adatelemzés

A nehézipar egyik legfontosabb kihívása a gépek és eszközök karbantartásának hatékony menedzselése. Az Ipar 4.0 megjelenésével a *prediktív karbantartás* technológiája új szintre emelkedett. A valós idejű adatelemzéssel és a gépek működési adatainak folyamatos monitorozásával a vállalatok képesek előre jelezni a meghibásodásokat és minimalizálni a leállási időket. *Moeuf és munkatársai* (2018) kutatásukban bemutatják, hogy a prediktív karbantartási rendszerek jelentős költségcsökkentést eredményezhetnek, miközben növelik a gépek élettartamát és megbízhatóságát [4].

Big Data szerepe a döntéshozatalban

A nagy adatmennyiségek kezelése és elemzése kritikus fontosságú a nehéziparban az Ipar 4.0 keretében. A valós idejű adatfeldolgozási és -elemzési technológiák lehetővé teszik a gyártási folyamatok optimalizálását, a hibák korai felismerését és a hatékonyság növelését. *Peres és munkatársai* (2018) rámutatnak, hogy a gyártási adatok valós idejű felhasználása lehetővé teszi a termelési folyamatok intelligens felügyeletét és az üzemi hatékonyság maximalizálását [5].

Következtetés

Az ipari adatkezelés elengedhetetlen szerepet játszik az Ipar 4.0 sikeres megvalósításában a nehéziparban. A kiber-fizikai rendszerek, az ipari dolgok internete, a prediktív karbantartás és a nagy adatok valós idejű feldolgozása mind hozzájárulnak ahhoz, hogy a gyártási folyamatok hatékonyabbak és fenntarthatóbbak legyenek. Az ipari adatkezelési rendszerek fejlesztése lehetőséget teremt a nehézipar számára, hogy alkalmazkodjanak a modern technológiai kihívásokhoz, miközben növelik a termelékenységet és csökkentik a működési költségeket.

Irodalom

1. Xu, L. D.–Xu, E. L.–Li, L. (2018): Industry 4.0: state of the art and future trends. *International journal of production research*, 56., (8.), pp. 2941–2962.
2. Yan, J.–Meng, Y.–Lu, L.–Li, L. (2017): Industrial big data in an industry 4.0 environment: Challenges, schemes, and applications for predictive maintenance. *IEEE Access*, 5., pp. 23484–23491.
3. Czvetkó, T.–Abonyi, J. (2023): Data sharing in industry 4.0-automation ML, B2MML and international data spaces-based solutions. *Journal of Industrial Information Integration*,
4. Moeuf, A.–Pellerin, R.–Lamouri, S. (2018): The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International journal of production research*, 56., (3.), pp. 1118–1136.
5. Peres, R. S.–Rocha, A. D.–Leitao, P.–Barata, J. (2018): IDARTS–Towards intelligent data analysis and real-time supervision for industry 4.0. *Computers in Industry*, 101., pp. 94–102.



DUNAÚJVÁROSI EGYETEM
www.uniduna.hu

D-U-E PRESS

Kiadóvezető Németh István

Felelős kiadó Dr. habil András István

Felelős szerkesztő Nemeskéry Artúr

Tördelés Duma Attila

Készült a HTSART nyomdában

Felelős vezető Halász Iván

