

kovats_164_23

MTA DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Légköri szálló por környezeti kockázatának jellemzése

Kovács Nóra

Veszprém 2025

1. Bevezetés, célkitűzés

A 10 mikrométernél, illetve a 2,5 mikrométernél kisebb méretű szálló por (PM_{10} illetve $PM_{2,5}$) az Európai Unió 2008/50/CE sz. levegőminőségre vonatkozó irányelvei szerint az emberi egészségre leginkább káros légszennyező anyag. Forrása lehet a természetes kibocsátókon (erdőtűz, vulkánkitörés stb.) kívül olyan jellemzően antropogén tevékenységek, mint a közlekedés, biomassza égetés (pl. lakossági fűtés), mezőgazdaság ill. különböző ipari kibocsátók.

A porszemcsék toxikus hatása a rajtuk megkötött szerves és szervetlen szennyezők révén valósul meg. Ezek közül leggyakrabban a nehézfémek, ill. policiklusos aromás szénhidrogének (PAHok) szennyező hatásával foglalkozik az irodalom.

A szálló por, ill. a megkötött potenciálisan toxikus komponensek emberi egészségre gyakorolt hatását rendkívül sok publikáció taglalja, ugyanakkor lényegesen kevesebb adat áll rendelkezésünkre az ökoszisztémákra gyakorolt esetleges hatás(ok)ról, hatásmechanizmusokról.

A hatások vizsgálatának egyik speciális lehetőségét biztosítják az ökotoxikológiai tesztek. Ezek elvégzését ugyanakkor megnehezíti a minta speciális jellege. A szálló por mintázása, mintavétele filtereken történik, tehát jellemzően kis mennyiségű mintát kell feldolgozni (DeVizcaya-Ruiz et al. 2006). Mindez nyilvánvalóan behatárolja az adott mintán alkalmazható vizsgálatok ill. akár teszt-szervezetek körét, a mérés reprodukálhatóságát.

Részben ez a metodikai korlát lehet annak az oka, hogy a *Vibrio fischeri* biolumineszcencia-gátlásán alapuló tesztet alkalmazzák a legelterjedtebben a PM ökotoxicitásának minősítésére (Kováts és Horváth 2016). A *V. fischeri* biolumineszcens, Gram negatív tengeri baktérium. A biolumineszcencia indukciójában és szabályozásában speciális enzimfehérjék játszanak szerepet, amelyek gátlása a tulajdonképpeni toxikus hatás következménye. Mindez a fénykibocsátás csökkenését eredményezi, amely műszeresen rendkívül jól mérhető végpont.

Már az 1960-as évektől alkalmazták az eljárást levegő szennyezettségének vizsgálatára. Elterjedté 1981-től vált, ekkor került az első mérőműszer piaci forgalomba. Ennek továbbfejlesztett és standardizált változata Microtox néven jelenleg is hozzáférhető, sőt világszerte ez a legelterjedtebb rendszer.

A Microtox rendszer alapváltozata vizes fázissal dolgozik, lévén maga a teszt-szervezet tengeri élőlény. Erre számos nemzeti ill. nemzetközi szabvány áll rendelkezésre, hazánkban a releváns szabvány: MSZ EN ISO 11348-2000: Vízminőség. Vízminták gátló hatásának meghatározása a *Vibrio fischeri* fénykibocsátására (lumineszcensbaktérium-teszt).

Szilárd halmazállapotú (üledék, talaj, ill. szálló por) vizsgálatára ugyanakkor a teszteljárás közvetlenül nem alkalmas, ezekből a mátrixokból kivonatot kell készíteni, amely történhet vízzel ill. valamilyen szerves oldószerrel.

Hipotézisem szerint ugyanakkor a szerves oldószerrel történő extrahálás nem reprezentálja azt a természetben előforduló valós expozíciós utat, amely során a légköri szálló por ill. a rajta levő potenciálisan toxikus komponensek esetleges káros hatásukat kifejtik. Ráadásul ez a jellegű extrahálás olyan komponenseket is hozzáférhetővé tesz, amelyek a természetben nem lennének biológiailag hozzáférhetőek.

Ennek alternatívájaként olyan ún. direkt kontakt tesztet dolgoztam ki, amelyben a tesztbaktériumok közvetlen fizikai kontaktusban vannak a mintában található szennyezett szemcsékkel (Kováts et al. 2012). A teszteljárás kiindulási alapját a Lappalainen és munkatársai által kidolgozott kinetikus mérés szolgáltatta, amely a vizsgált minta ökotoxicitását a *Vibrio fischeri* biolumineszcens baktérium által mutatott fénykibocsátás-csökkenés alapján számszerűsíti (Lappalainen et al. 1999, 2001). A kinetikus mérés lényege, hogy az ökotoxikus hatás következtében fellépő lumineszcencia csökkenés mértékét nem egy abszolút kontrollhoz

képest értékeli, hanem ahhoz az értékhez viszonyítja, amely a mérés kezdetén a még intakt baktériumokra jellemző. Ez az eljárás lehetővé teszi, hogy olyan mintákat is vizsgáljunk, amelyekben szín- és vagy lebegőanyag is megtalálható. A kinetikus mérés további jellemzője, hogy a tesztbaktériumok által adott választ a mérés első 30 másodperce alatt folyamatosan rögzítjük, ami gyakorlatilag real-time információt ad a minta várható toxicitásáról.

A teszteljárást a finn team szabványosította, a protokollra épülő szabványt (ISO 21338:2010: Water quality - Kinetic determination of the inhibitory effects of sediment, other solids and coloured samples on the light emission of *Vibrio fischeri* /kinetic luminescent bacteria test/) 2010-ben fogadták el.

Munkám céljai a következők voltak:

Elsődlegesen az általam kidolgozott teszteljárás megfelelő érzékenységét és megbízhatóságát kívántam alátámasztani.

Figyelembe véve a levegőszennyezés globális jellegét, további célom olyan alkalmazási területeknek az ismertetése és diszkutálása, amelyek esetében a teszteljárás valóban új lehetőséget biztosított az adott területen jelentkező problémák feltárására és elemzésére. Ezért a dolgozatban kiemelt szerepet kaptak:

- Városi (települési) levegő minősítése
- Közlekedési eredetű levegőszennyezés vizsgálata. E területen belül a régebb óta ismert és kutatott, gépjármű emisszióból származó terhelés mellett kiemelt a nem emisszió jellegű terhelés vizsgálata.
- Illegális hulladék égetéséből származó emisszió ökotoxikológiai jellemzése.
- Beltéri, különböző emberi tevékenységből (fűtés, főzés) származó emisszió jellemzése.
- Légköri humuszszerű anyagok (HULIS: HUmic Like Substances) vizsgálata.

Az ökotoxikológia alapelve az 'egy teszt nem teszt' mondás. A fentebb említett területeken szisztematikusan elvégzett vizsgálatokat úgy terveztük meg, hogy valóban a különböző emissziókból származó PM terhelés átfogó jellemzését tudjuk megadni. Ennek tükrében a munka célja, hogy a kidolgozott tesztprotokoll használhatóságát annak tükrében is értékelje, azt mennyire támasztják alá egyéb (analitikai, esetenként egyéb toxikológiai) vizsgálatok eredményei.

2. Anyag és Módszer

2.1 Mintavétel és mintaelőkészítés

A mintavételek helyét, időpontját, valamint az alkalmazott eszközt a következő táblázat foglalja össze:

Kolontár és Devecser	2010. október 6 - 11	PARTISOL-FRM 2000 116
K-pusztza	2008. július 16 - augusztus 4; december 9 - 12. 2014. december 18 – 2015. március 22.	DIGITEL DH-80
Budapest	2009. július 29 -31; 2010. január 20-28.	DIGITEL DH-80
Budapest	2009. július 29 - augusztus 14	MSP személyi PM ₁₀ mintavevő
Budapest	2010. január 20 - február 12	MSP személyi PM ₁₀ mintavevő
Szeged	2015. január 07 - 30	DIGITEL DH-80
Budapest	2015. február 09 - 28	DIGITEL DH-80
Coimbra (Portugália)	2018. december - 2019 június	MCV CAV-A/mb és Echo PM Tecora
Bragança (Portugália)	2021. január 14 - március 17	Echo PM TECORA
São Paulo (Brazília)	2021. július 10 - augusztus 8	MFC-PM _{2,5}
dízel emisszió	2020. május	KÁLMÁN PM _{2,5} mintavevő

A-29 autópálya, Aveiro	2021. augusztus	egyedi fejlesztésű terepi reszuszpendált por mintavevő
Aveiro, parkolóházak	2021. augusztus	egyedi fejlesztésű terepi reszuszpendált por mintavevő
Hulladék égetése	2021. szeptember-október	égetés Servant S114, 5 kW vaskályhában; mintavétel KÁLMÁN PM _{2,5} mintavevő
Ulánbátor (Mongólia)	2018. január 09- február 09	AirChek XR5000
Aveiro (Portugália)	2018. július	Nagy térfogatúramú MCV mintavevő (CAV-A/mb modell, áramlási sebesség 30 m ³ /h).

Az üvegszálás kvarcfilterre (ill. egy esetben Teflon filterre) gyűjtött minták előkészítéséhez a PM mintát tartalmazó filterből 25 mm átmérőjű korongokat vágunk, melyeket ezután Sartorius mikromérleggel (10µg érzékenységű) gravimetriásan mérünk. A korongokat achát mozsárban porítjuk, majd 4 ml-es tisztított üvegcsékbe helyezzük és mindegyik üvegcséhez 2 ml ioncserélt (Millipore víztisztítóval előállított) vizet adunk. A szuszpenzió készítését folyamatos keverés mellett végezzük.

2.2 Ökotoxicitás vizsgálata

A *Vibrio fischeri* biolumineszcencia-gátláson alapuló tesztet az ISO 21338:2010 szabványban rögzített protokoll szerint végezzük. A méréshez Lumistox Luminescent baktérium kitet (NRRL-B-11177 törzs) alkalmazunk, melynek beszerzési forrása a Hach Lange Co., Magyarország. A kiteket, melyek életképessége 1 év, felhasználásig -18 C-on tároljuk. A méréshez a Thermo Scientific által forgalmazott Luminoskan Microplate Luminometer-t alkalmazzuk.

A készülék 96 lyukú plate-t használ, amelyre előzetesen feltöltjük a mintákból a fentebb leírt módon előállított szuszpenzióból készült hígítási sort. A mérés kezdetekor a készülék ehhez adagolja a baktériumsuszpenziót, majd 30 másodpercig folyamatosan rögzíti a fénykibocsátás időbeli lefutását.

A toxicitás kvalitatív (vizuális) értékelése történhet az első 30 másodpercben rögzített kinetikus jel alapján is (Mortimer et al. 2008). A számszerű értékelés a beállított (max. 30 perces) expozíció után számított gátlás alapján történik, az Aboatox Co.-tól beszerzett Ascent szoftver segítségével. A szoftver kiszámítja az EC₅₀ és EC₂₀ értékeket (azaz azt a koncentrációt, amelyben a vizsgált minta 50, ill. 20%-os gátlást okoz).

Az egyes minták ökotoxicitását TU (Toxic Unit) formában tüntettem fel, amelynek számítási módja a következő: $TU = [1/EC_{50}] \times 100$. A toxicitás jellemzésére a következő kategóriákat alkalmaztam: nem toxikus (<1), toxikus (1-10), nagyon toxikus (10-100), ill. rendkívül toxikus (>100) (Chang et al. 2013).

3. Eredmények

3.1 A direkt kontakt teszt megbízhatóságának ellenőrzése

A kidolgozott teszteljárás lényege, hogy direkt (fizikai) kontaktust tesz lehetővé a tesztbaktériumok és a szálló por szemcsék, ill. az ezeken megkötött potenciálisan szennyező komponensek között. Színanyagot ill. lebegőanyagot tartalmazó minták esetében az MSZ EN ISO 11348-1:2000 szabványon alapuló (azaz extraktummal dolgozó) ToxAlert 100 rendszer magasabb (virtuális) ökotoxicitást mutatott, mint a Flash rendszer. A két rendszer ill. két mintaelőkészítési módszer közötti különbséget leírtam nyári városi ill. vidéki PM minták ökotoxicitásának összehasonlítása során (Kováts et al. 2020), továbbá a devecseri

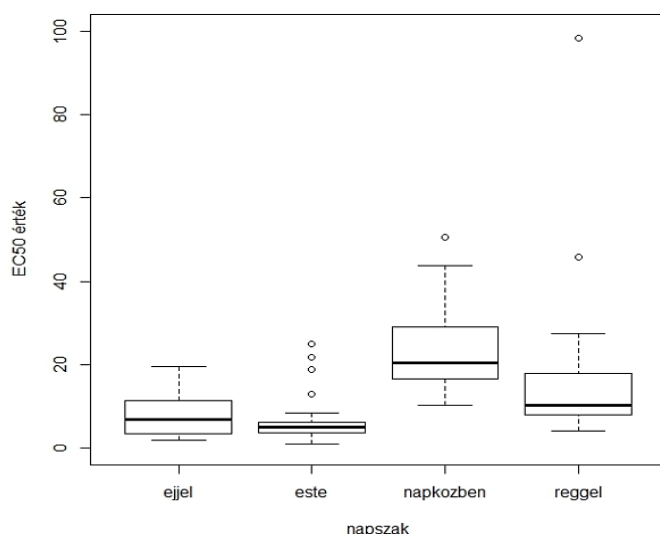
vörösiszapömlésből származó por ökototoxicitásának becslése során (Gelencsér et al. 2011). Ekkor a két rendszer között drasztikus különbség mutatkozott. A pormintából készült kivonatot ToxAlert-tel elemezve több esetben rendkívül magas toxicitást figyeltünk meg. Feltehetőleg ezeket az értékeket a minta erőteljes színe okozta (a minta magas hematit tartalma miatt). A Flash rendszerrel ugyanakkor ezek a minták – a színcorrekciót figyelembe véve – nem mutatkoztak toxikusnak

A teszteljárást szisztematikusan összevetve irodalomban leközölt, különböző extraháló szereket alkalmazó munkákkal (a vizsgált extraháló szerek metanol, DCM, DMSO, hexán, ill. víz voltak) megállapítható volt, hogy a direkt kontakt teszt EC_{50} értéke a metanollal készült kivonat toxicitásának felelt meg. Ennek értelmében a direkt kontakt teszt alkalmazása egyenértékű lehet az erős szerves oldószert alkalmazó vizsgálattal, ezekkel ellentétben olyan expozíciós utat reprezentál, amely során a való világban a hatásviselők találkozhatnak a toxikus komponenseket is tartalmazó porszemcsékkel (Kováts et al. 2021).

3.2 Városi környezet levegőminőségének vizsgálata

Budapesti téli és nyári minták ökototoxicitásának összevetése egyértelműen a téli minták lényegesen magasabb ökototoxicitását mutatta, amelynek okai a téli időszakban jellemző lakossági fűtés, kisebb mértékű fotó oxidáció (Turóczy et al. 2012), továbbá szemi-illékony komponensek fokozottabb kondenzációja az alacsonyabb hőmérsékleten. Hasonló eredményt kaptunk Coimbra (Portugália) területén vett minták elemzése során (Alves et al. 2021). Nemcsak azt volt megállapítható, hogy a téli időszak jelentősen magasabb emissziót jelent, hanem azt is, hogy ebben az időszakban a jellemző emissziós forrás a biomassa égetése. Ezt alátámasztotta, hogy a biomassa égetésre jellemző anhidrocukrok szignifikáns korrelációt mutattak a mért ökototoxicitás értékekkel. Emellett jó korreláció mutatkozott a toxicitás értékei valamint a közlekedésre jellemző emisszióban megtalálható fémek (pl. Fe, Cu, Zn) koncentrációja között.

Budapesten, téli időszakban vett minták napszakos mintázatának elemzése során kimutatható volt, hogy a nappali időszakban (a mintavétel beosztása szerint 11.00 és 17.00 h között) vett minták ökototoxicitása a legalacsonyabb, nincs ugyanakkor számottevő különbség a reggel (5.00-11.00 között), este (17.00-23.00 között) és éjszaka (23.00-5.00 között) vett minták ökototoxicitása között (1. ábra).



1. ábra A toxicitás napszakos eloszlása Budapesten. Éjjel: 23.00-5.00; este: 17.00-23.00; napközben: 11.00-17.00; reggel: 5.00-11.00 között történt a mintavétel.

Bragança (Portugália) területén vett téli minták napszakos mintázatának elemzésekor megállapítottuk, hogy szignifikáns korreláció volt megfigyelhető a toxicitás és specifikus PM_{10} -

hez kötött komponensek között: OC ($r^2 = 0,65$), EC ($r^2 = 0,64$), Zn ($r^2 = 0,68$), K ($r^2 = 0,54$), levoglukozán ($r^2 = 0,86$), mannozán ($r^2 = 0,81$), galaktozán ($r^2 = 0,84$), NO_3^- ($r^2 = 0,45$) és NH_4^+ ($r^2 = 0,48$), amely szintén arra utal, hogy a biomassa égetés jelentősen befolyásolja a téli levegőminőséget (Cipoli et al. 2023). Ennek a munkának a során két napszakban történt a mintavétel, nappali (08.00 – 18.00) és éjszakai (18.30 – 7.30) felbontásban. Az irodalmi adatoknak megfelelően az éjszakai periódusban vett minták toxicitása számottevően (38%-kal) magasabb volt.

São Paulo (Brazília) petrokémiai ipari területének hatását vizsgáltuk, ennek érdekében elemeztük a $\text{PM}_{2.5}$ toxicitását. A számított TU értékek alapján a minták 64%-a mutatkozott toxikusnak, ami a lakosság krónikus expozícióját indikálja. A PM oxidatív potenciáljának vizsgálata során megállapítható volt, hogy az aszkorbát teszt és az ökototoxicitás értékei között jó korreláció mutatkozott (Caumo et al. 2023).

3.3 A levegő optikai tulajdonságain alapuló mérőműszer kalibrálása

Az általam kifejlesztett direkt kontakt teszt szolgáltatja az alapot egy új, a levegő optikai tulajdonságain alapuló mérőműszer kalibrálásához. A kalibrációs adatokhoz 2 hónapos folyamatos mintavétel történt, 2 helyszínen (Budapest és Szeged), 6 órás felbontásban. Gyenge ($r = 0,09$) ill. mérsékelt ($r = 0,448$) korreláció mutatkozott a légköri széntartalmú szálló por (carbonaceous particulate matter, CPM) EC_{50} értékei és az AAE (Absorption Angström Exponent) értékek között. Ennek alapján a fotoakusztikus mérésekkel meghatározott AAE értékek first screening jelleggel indikálhatják a levegő ökototoxicitását (Pintér et al. 2017).

3.4 Közlekedésből származó emissziós jellegű PM ökototoxicitása

Nehézgépjárművek (különböző környezetvédelmi osztályba tartozó és eltérő futásteljesítményű autóbuszok) esetében jelentős korrelációt állapítottam meg a környezetvédelmi osztálybesorolás és a TU értékkel jellemzett ökototoxicitás között (Kováts et al. 2013).

A vizsgált, szintén különböző környezetvédelmi osztályba tartozó, eltérő életkorú és futásteljesítményű személyautók esetében nem volt kimutatható összefüggés az emissziós jellemzők ill. a környezetvédelmi osztály besorolás között. Szignifikáns korreláció mutatkozott viszont a futásteljesítmény és a PAH kibocsátás között, megegyezően más szerzők által publikált tanulmányokkal (Ács et al. 2013).

3.5 Közlekedésből származó nem emissziós jellegű szálló por ökototoxicitása

A közlekedéshez köthető PM terhelés tekintetében várható, hogy az egyre szigorúbb szabályozás ill. műszaki fejlesztéseknek köszönhetően csökken a gépjármű emisszióból származó terhelés, ugyanakkor a nem emisszió eredetű PM (azaz a fékek, autógumi, úttest, stb. kopásából származó reszuszpendált por) aránya és jelentősége megnő. Autópályán gyűjtött minták esetében valamennyi minta esetében kimutatható volt a toxicitás, a potenciálisan ökotoxikus elemek közül Zn, Cu és Cr fordult elő magas koncentrációban (Rienda et al. 2023a, 2023b). Mivel a minták jellemzően számos egyéb nehézfémeket is tartalmaztak, nem zárható ki az additív vagy szinergista hatás.

Szintén nem emissziós jellegű, közlekedésből származó reszuszpendált por vizsgálatát végeztük el különböző parkolóhelyeken Aveiro (Portugália) területéről származó minták esetében (Rienda et al. 2023c). Kimutatható toxicitást mértünk valamennyi minta esetében. A fékbetétek, autógumik, egyéb alkatrészek, ill. magának az úttestnek a kopásához köthető elsősorban nehézfém szennyezőkkel a *Vibrio* teszt által mért ökototoxicitás nem mutatott

korrelációt. Összefüggés mutatkozott ugyanakkor az ökototoxicitás értékek és az egyedi PAH szennyezők között.

3.6 Hulladék égetéséből származó PM elemzése

Ellenőrzött, gyakorlatilag standardizált körülmények között égettünk különböző, egyedileg szelektált hulladékfajtákat, amelyek égése során keletkezett PM emisszióból vettünk mintát.

A kiválasztott minták háztartási hulladékban jellemzően megtalálható hulladéktípusok voltak: polisztrén (PS), polietilén (PE), polipropilén (PP), polivinil-klorid (PVC), poliuretán (PU), bútorlap (OSB) és rongy (RAG) minták összehasonlító elemzését végeztük el. A *V. fischeri* teszt mellett elvégeztük a *Daphnia magna* immobilitás tesztet (OECD 202 szabvány alapján), továbbá a *Sinapis alba* csíranövény tesztet (ISO 11269-1:2012 szabvány alapján). A minták genotoxicitását is jellemeztük, az SOS Chromotest segítségével (Kováts et al. 2022).

Az OSB, PE és RAG minták szennyezettsége kismértékű volt. A toxikus minták kémiai elemzése azt mutatta, hogy jellemzően elkülönültek a PAHok, nehézfémek ill. mindkét csoport által szennyezett minták. A polisztrén (PS) és polipropilén (PP) minták tipikus 'PAH-típusú' minták voltak. Kémiai összetételét tekintve a poliuretán (PU) minta kevert jelleget mutatott: jellemző szennyező nehézfém a Cd volt, ugyanakkor a minta PAHokat is jelentős mennyiségben tartalmazott. A PVC minta rendkívül magas koncentrációban tartalmazott Cd-ot és Zn-et, tipikus 'nehézfém jellegű' mintának bizonyult.

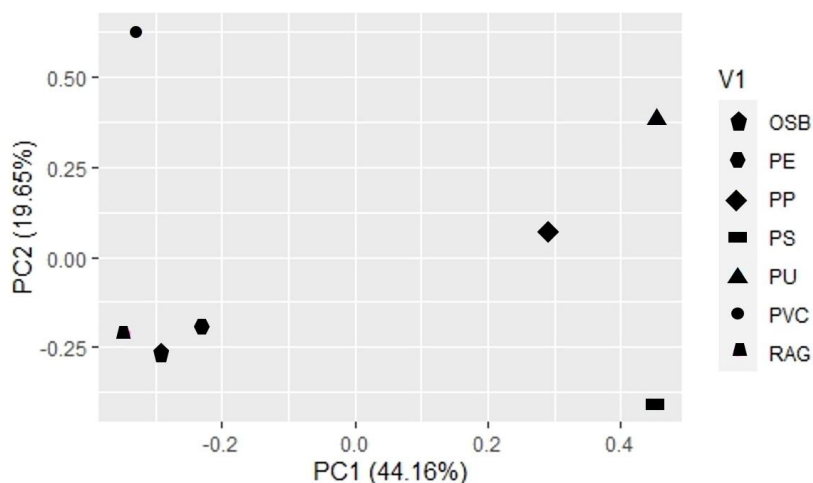
A mintákon elvégzett tesztek érzékenységet összevetve megállapítható volt, hogy a *Vibrio* TU értékei szignifikáns korrelációt mutattak a *Daphnia* tesztel. A csíranövény teszt ugyanakkor egyik minta esetében sem mutatott ki ökotoxikus hatást. Genotoxicitás a PU, PVC, PS and PP minták kontrollált égetése során nyert PM minták esetében mutatkozott, azaz a genotoxicitás minősítésére alkalmazott SOSIF érték 1,5 felett volt. Szignifikáns korrelációt találtunk a SOSIF értékek és több PAH között.

A minták csoportosítását az analitikai vizsgálatok (PAH- és nehézfém tartalom) ill. az ökotoxikológiai tesztek alapján PCA analízissel végeztük el (3. ábra).

A PC1 főkomponens a teljes variancia 44,16 %-át, a PC2 főkomponens pedig 19,65%-át tette ki. Az ábra alapján elmondható, hogy 3 fő csoport különböztethető meg: az OSB, RAG és PE minták alkották az első csoportot, ezek szennyezettsége ill. a mutatott ökotoxikus hatás alacsony volt. A PP, PU és PS minták a második csoportot alkották, a PS és PP minták tipikus 'PAH-típusú' minták voltak, míg a PU 'kevert' minta, amely nehézfémeket és PAHokat is tartalmazott. A PVC minta valamennyi egyéb mintától élesen elkülönült.

Külön mérésorozatot keretében elvégeztük a PET palackok égetése során keletkezett PM vizsgálatát, kétféle mintából végeztünk elemzéseket: külön égettünk, színes ill. színtelen palackokat (Kováts et al. 2023). Az analitikai elemzések valamennyi mintában magas antimónium (Sb) koncentrációt mutattak ki, ez az elem bizonyítottan ökotoxikus hatású. A PAHok elemzése során kimutattuk a bizonyítottan rákkeltő BbF és Cry jelenlétét. Valamennyi minta toxikusnak bizonyult, ugyanakkor sem az analitikai mérések, sem a toxicitás vizsgálata nem tett jelentős különbséget a színes vs. színtelen palackok égetéséből származó emisszió között.

kovats_164_23



2. ábra A minták analitikai elemzése és ökototoxicitása alapján készített PCA diagram. PP: polipropilén, PS: polisztiirén, PU: poliuretán, PE: polietilén, PVC: polivinil-klorid, RAG: rongy, OSB: bútortap.

Elemeztük kétkomponensű hulladékminták elégetése során felszabaduló füstgáz toxicitását, a következő összetétel szerint: papír (kartonpapír és fényes papír), műanyagok (polipropilén és PET) valamint textilféleségek (poliészter és pamut) (Mentes et al. 2022). Az égetési hőmérsékletek 600 és 900 C között 50C fokos emelkedéssel változtak. Valamennyi mintára jellemző volt, hogy a toxicitás az égési hőmérséklet növekedésével csökkent, ugyanakkor a PAHok, elsősorban a 3-gyűrűs vegyületek koncentrációja növekedett. Legmagasabb ökototoxicitást a papírféleségek égetéséből származó minta mutatta.

3.7 Fűtés hatása a beltéri levegőminőségre

A fatüzeléshez köthető emisszió számszerű ökotoxikológiai becslésére összehasonlító elemzést végeztünk nyílt ill. zárt égésterű tüzelőberendezések (Vicente et al. 2012), továbbá különböző pelletféleségek esetében (Vicente et al. 2022).

A nyílt ill. zárt égésterű tüzelőberendezések esetében értelemszerűen, a hipotézisünk szerint elvárható módon, a zárt égésterű kályha emissziója lényegesen alacsonyabb volt. Az összehasonlító vizsgálat legfontosabb eredménye ugyanakkor az volt, hogy a párhuzamosan végzett humán tüdősejtvonallal dolgozó A549 tesztel becsült citotoxicitás jó korrelációt mutatott a *V. fischeri* biolumineszcencia gátlás tesztel, tovább erősítve a bakteriális teszt eredményeinek extrapolálhatóságát különböző hatásviselőkre. Számos egyedi szennyezőre (pl. levoglukozán, mannozán, egyes PAHok, pld. fenantrén, fluorantén, krizén) is szignifikáns korrelációt tapasztaltunk.

A különböző alapanyagból készült (kereskedelmi forgalomban kapható, ill. a vizsgálólaboratóriumban egyedi jelleggel akáciából formált) pelleték égetésekor keletkezett kibocsátás jellemzésekor megállapíthattuk, hogy egyrészt jelentős különbség mutatkozott a pelletgyártáskor alkalmazott alapanyag tekintetében (kimagasló ökototoxicitást, ill. káros emissziót az akáciából készült pellet eseténben tapasztaltunk). Itt is egyezés mutatkozott a *V. fischeri* teszt elvégzése során kapott eredmények és az A549 sejtvonallal mért citotoxicitás között.

Mongol-magyar együttműködés keretében lehetőségünk nyílt Ulánbátor ún. 'ger' (jurta) területéből származó beltéri minták elemzésére (Sainnokhoi et al. 2022). Ulánbátor egyike a világ 5 legrosszabb levegőminőséggel rendelkező fővárosának, ugyanis a lakosság mintegy 98%-a szénrel fűt. A hosszú és hideg telek következtében az emberek jelentős mértékben töltik

az idejüket zárt terekben, ezzel növelve az egészségkárosodás kockázatát. 10, szénfűtést alkalmazó háztartásból származó mintát vizsgáltunk, amelyek esetében jelentős ökototoxicitást és PAH terhelést tapasztaltunk. A mérési eredmények szerint az ökototoxicitás értékeiért elsősorban a nagyobb molekulatömegű (gyűrűszámú) PAHok voltak felelősek.

3.8 Konyhai tevékenység során keletkezett PM emisszió ökototoxicitásának értékelése

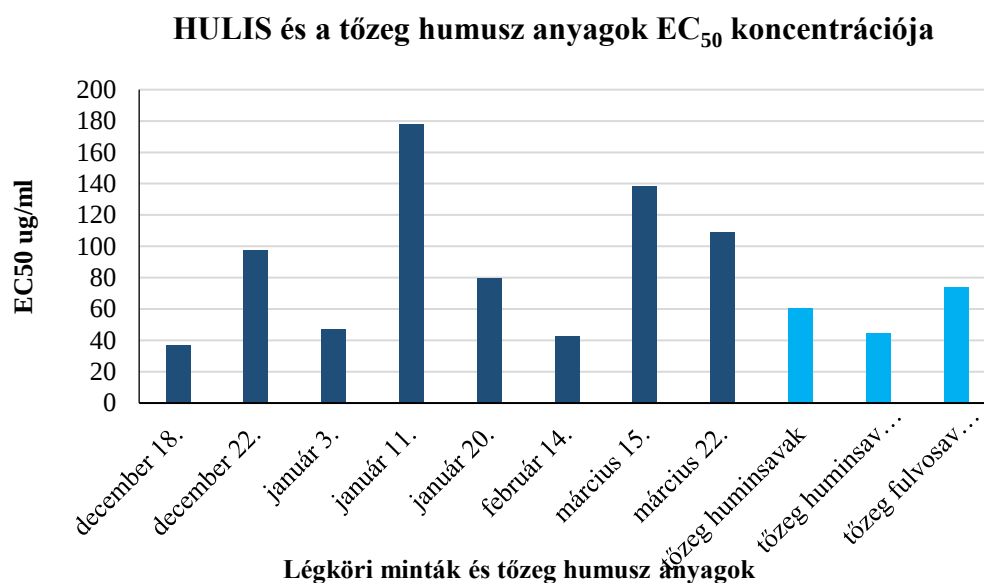
A sütés/főzés során generált káros emissziók egyrészt jelentősen befolyásolhatják a beltéri levegő minőségét, ill. számottevő és kimutatott hatással bírnak az emberi egészségre. Ellenőrzött körülmények között vizsgáltuk (1) főzés (Alves et al. 2021), ill. (2) grillezés (Alves et al. 2022) során keletkezett komponensek jelenlétét, ill. az említett tevékenységek során generált PM ökotoxikus hatását.

Négy, a mediterrán konyhára jellemző recept elkészítése során keletkezett károsanyag kibocsátást vizsgáltunk, ezek sült hal (makrél), töltött csirke, sült ill. grillezett sertéssült voltak. A kinetikus *V. fischeri* biolumineszcens baktérium tesztel mért eredmények alapján a legtoxikusabbnak a grillezett sertéssült elkészítése során keletkezett PM mutatkozott. A PM kibocsátás szintén ebben az esetben volt a legmagasabb. Megállapítható volt, hogy a kis molekulású PAHok nem, míg a nagy molekulású PAHok jelentősen szignifikáns összefüggést mutattak a mért toxicitás értékekkel ($r^2 = 0.94$).

Faszénen történő grillezés során keletkező emisszió jellemzése során megállapítható volt, hogy az egyes alapanyagok (sertéshús ill. hal: szardínia és lazac) elkészítése során keletkező PM jelentős ökototoxicitással bírt. A mért toxicitás értékek jó korrelációt mutattak a PAHok, alkil-PAHok, anhidrocukrok, savak ill. fenolvegyületek koncentrációjával.

3.9 Humuszszerű vegyületek (Humic Like Substances – HULIS) ökotoxikológiai elemzése

Kinetikus tesztel vizsgáltuk a HULIS frakció ökototoxicitását (Kiss et al. 2021). A téli minták elemzése során megállapítottam, hogy a légköri HULIS és a természetes humuszformák ökototoxicitása hasonló volt (6. ábra). Ez egyben felhívja a figyelmet a természetes vízi humuszformák potenciális toxicitására.



3. ábra Légköri HULIS minták és vízi/vizes környezetből származó huminsavak ökototoxicitása

4. Összegzés és kitekintés

Irodalmi adatok alapján a *Vibrio fischeri* biolumineszcencia-gátlásán alapuló tesztet alkalmazzák a legelterjedtebben légköri szálló por (PM) ökototoxicitásának minősítésére. A hivatkozott munkák jelentős része ugyanakkor azt az amerikai Microtox rendszert alkalmazza, amely vizes vagy valamilyen szerves oldószerrel készített folyékony fázissal dolgozik. Ennek alternatívájaként olyan ún. direkt kontakt tesztet dolgoztam ki, amelyben a tesztbaktériumok közvetlen fizikai kontaktusban vannak a mintában található szennyezett szemcsékkel.

Az értekezésben tárgyalt közlemények az általam kidolgozott mérési protokollon alapulnak. A direkt kontakt teszt egyrészt alkalmas arra, hogy szálló por mintákra általában jellemző színyanyagok által okozott hamis (virtuális) toxicitást kiküszöbölje, érzékenysége ugyanakkor megfelel szerves oldószerekkel készített extraktumokból végzett mérések érzékenységének.

A mérési protokollt sikeresen alkalmaztuk városi, közlekedésből ill. biomassza égetésből származó minták esetében, közlekedési eredetű de nem emissziós jellegű minták esetében, továbbá illegális hulladékégetéshez köthető szálló por ökototoxicitásának meghatározására. A módszer egyik legnagyobb előnye, hogy alkalmas kis mintamennyiség (egyedi filterek) feldolgozására. A teszt során kiküszöbölhető a minta zavarosságából (lebegő anyag) ill. színyanyagából eredő virtuális toxicitás.

A direkt kontakt teszt jellemzően jó korrelációt mutatott a minták PAH tartalmával, esetenként nehézfém tartalmával. Beltéri biomassza égetés (fűtés) vizsgálata során kapott minták elemzése során a *Vibrio* tesztrel mért ökototoxicitás jó korrelációt mutatott a párhuzamosan végzett humán tüdősejtvonallal dolgozó A549 tesztrel becsült citotoxicitás értékeivel.

Ugyanakkor figyelembe kell azt is venni, hogy az (amerikai) Microtox rendszer és az általa követett ISO 11348 szabvány lényegesen elterjedtebb a nemzetközi gyakorlatban.

Hivatkozott irodalom

- Chang, S.C., Wang, Y.F., You, S.J., Kuo, Y.M., Tsai, C.H. et al. (2013). Toxicity evaluation of fly ash by Microtox®. *Aerosol and Air Quality Research* 13, 1002–1008.
- DeVizcaya-Ruiz, A., Gutiérrez-Castillo, M.E., Uribe-Ramírez, M., Cebrián, M.E., Mugica-Alvarez, V. et al., 2006. Characterization and in vitro biological effects of concentrated particulate matter from Mexico City. *Atmospheric Environment* 40, 583–592
- Lappalainen, J., Juvonen, R., Vaajasaari, K., Karp, M., 1999. A new flash method for measuring the toxicity of solid and colored samples. *Chemosphere* 38(5), 1069-1083.
- Lappalainen, J., Juvonen, R., Nurmi, J., Karp, M., 2001. Automated color correction method for *Vibrio fischeri* toxicity test. Comparison of standard and kinetic assays. *Chemosphere* 45, 635-641.
- Mortimer, M., Kasemets, K., Heinlaan, M., Kurvet, I., Kahru, A., 2008. High throughput kinetic *Vibrio fischeri* bioluminescence inhibition assay for study of toxic effects of nanoparticles. *Toxicology in Vitro* 22, 1402-1417.

Az értekezés témakörében megjelent publikációk

- Alves, C., Rienda, I.C., Vicente, A., Vicente, E., Gonçalves, C., Candeias, C., Rocha, F., Lucarelli, F., Pazzi, G., Kováts, N., Hubai, K., 2021. Morphological properties, chemical composition, cancer risks and toxicological potential of airborne particles from traffic and urban background sites. *Atmospheric Research*, 264, 105837. (IF: 5,965; Q1)
- Alves, C.A., Vicente, E.D., Evtugina, M., Vicente, A.M., Sainnokhoi, T.A., Kováts, N., 2021. Cooking activities in a domestic kitchen: Chemical and toxicological profiling of emissions. *Science of the Total Environment*, 772, 145412. (IF: 10,753; Q1)
- Alves, C.A., Evtugina, M., Vicente, E., Vicente, A., Gonçalves, C., Neto, A.I., Nunes, T., Kováts, N., 2022. Outdoor charcoal grilling: Particulate and gas-phase emissions, organic speciation and ecotoxicological assessment. *Atmospheric Environment*, 285, 119240. (IF: 5; Q1)
- Ács, A., Ferincz, Á., Kovács, A., Jancsek-Turóczi, B., Gelencsér, A., Kiss, G., Kováts, N., 2013. Ecotoxicological characterisation of exhaust particulates from diesel-powered light-duty vehicles. *Central European Journal of Chemistry*, 11, 1954-1958. (IF: 1,329; Q2)
- Caumo, S., Yera, A. B., Alves, C., Rienda, I. C., Kováts, N., Hubai, K., de Castro Vasconcellos, P., 2023. Assessing the chemical composition, potential toxicity and cancer risk of airborne fine particulate matter (PM_{2.5}) near a petrochemical industrial area. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 104170. (IF: 4,2; Q1)
- Cipoli, Y.A., Alves, C., Rapuano, M., Evtugina, M., Rienda, I.C., Kováts, N., Vicente, A., Giardi, F., Furst, L., Nunes, T., Feliciano, M., 2023. Nighttime–daytime PM₁₀ source apportionment and toxicity in a remoteness inland city of the Iberian Peninsula. *Atmospheric Environment*, 119771. (IF: 4,2; Q1)
- Eck-Varanka, B., Kováts, N., Horváth, E., Ferincz, Á., Kakasi, B., Nagy, S. T., Imre, K., Paulovits, G., 2018. Eco-and genotoxicity profiling of a rapeseed biodiesel using a battery of bioassays. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 151, 170-177. (IF: 4,527; Q1)
- Gelencsér, A., Kováts, N., Turóczi, B., Rostási, Á., Hoffer, A., Imre, K., Nyirő-Kósa, I., Csákberényi-Malasics, D., Tóth, A., Czitrovszky, A., Nagy, A., 2011. The red mud accident in Ajka (Hungary): characterization and potential health effects of fugitive dust. *Environmental Science & Technology*, 45(4), 1608-1615. (IF: 5,228; Q1)
- Hubai, K., Kováts, N., Eck-Varanka, B., Teke, G., 2023. Pot study using Chlorophytum comosum plants to biomonitor PAH levels in domestic kitchens. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(18), 51932-51941. (Q1)
- Kiss, G., Gango, M., Horváth, E., Eck-Varanka, B., Labancz, K., Kováts, N., 2021. Assessment of ecotoxicity of atmospheric humic-like substances using the *Vibrio fischeri* bioluminescence inhibition bioassay. *Atmospheric Environment*, 261, 118561. (IF: 5,755; Q1)
- Kováts, N., Ács, A., Kovács, A., Ferincz, Á., Turóczi, B., Gelencsér, A., 2012. Direct contact test for estimating the ecotoxicity of aerosol samples. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 33(2), 284-287. (IF: 2,005; Q2)
- Kováts, N., Ács, A., Ferincz, Á., Kovács, A., Horváth, E., Kakasi, B., Jancsek-Turóczi, B., Gelencsér, A., 2013. Ecotoxicity and genotoxicity assessment of exhaust particulates from diesel-powered buses. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 8707-8713. (IF: 1,679; Q2)
- Kováts, N., Horváth, E., 2016. Bioluminescence-based assays for assessing eco-and genotoxicity of airborne emissions. *Luminescence*, 31(4), 918-923. (IF: 1,509; Q2)
- Kováts, N., Fábíán, V.A., Hubai, K., Diósi, D., Sainnokhoi, T.A., Békéssy, Z., Teke, G., 2020. Seasonal differences in rural particulate matter ecotoxicity. *Aerosol Science and Engineering*, 4, 169-177. (Q2)
- Kováts, N., Hubai, K., Diósi, D., Sainnokhoi, T. A., Hoffer, A., Tóth, Á., Teke, G., 2021. Sensitivity of typical European roadside plants to atmospheric particulate matter. *Ecological Indicators*, 124, 107428. (IF: 6,263; Q1)
- Kováts, N., Hubai, K., Sainnokhoi, T.A., Hoffer, A., Teke, G., 2021. Ecotoxicity testing of airborne particulate matter—comparison of sample preparation techniques for the *Vibrio fischeri* assay. *Environmental Geochemistry and Health*, 43, 4367-4378. (IF: 4,898; Q1)

- Kováts, N., Hubai, K., Sainnokhoi, T.A., Eck-Varanka, B., Hoffer, A., Tóth, Á., Kakasi, B., Teke, G., 2022. Ecotoxic emissions generated by illegal burning of household waste. *Chemosphere*, 298,134263. (IF: 8,8; D1)
- Kováts, N., Hubai, K., Sainnokhoi, T.A., Eck-Varanka, B., Hoffer, A., Tóth, Á., Teke, G., 2023. Ecotoxicity of PM10 emissions generated during controlled burning of waste PET. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 04118. (IF: 4,2; Q1)
- Mentes, D., Kováts, N., Muránszky, G., Hornyák-Mester, E., Póliska, C., 2022. Evaluation of flue gas emission factor and toxicity of the PM-bounded PAH from lab-scale waste combustion. *Journal of Environmental Management*, 324, 16371. (IF: 8,7; D1;)
- Pintér, M., Utry, N., Ajtai, T., Kiss-Albert, G., Jancsek-Turóczy, B., Imre, K., Palágyi, A., Manczinger, L., Vágvölgyi, C., Horváth, E., Kováts, N. et al., 2017. Optical properties, chemical composition and the toxicological potential of urban particulate matter. *Aerosol and Air Quality Research*, 17(6), 1515-1526. (IF: 2,589; Q1)
- Rienda, I.C., Nunes, T., Amato, F., Lucarelli, F., Kováts, N., Hubai, K., Alves, C. A., 2023. Preliminary assessment of road dust from Portuguese motorways: chemical profile, health risks, and ecotoxicological screening. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 1-12. (IF: 2,9; Q2)
- Rienda, I. C., Nunes, T., Gonçalves, C., Vicente, A., Amato, F., Lucarelli, F., Kováts, N. et al., 2023. Road dust resuspension in a coastal Atlantic intermunicipal urban area with industrial facilities: Emission factors, chemical composition and ecotoxicity. *Atmospheric Research*, 294, 106977. (IF: 4,5; Q1)
- Rienda, I.C, Alves, C.A., Nunes, T., Soares, M., Amato, F., Sánchez de la Campa, A., Kováts, N., Hubai, K., Teke, G., 2023. PM10 Resuspension of Road Dust in Different Types of Parking Lots: Emissions, Chemical Characterisation and Ecotoxicity. *Atmosphere*, 14(2), 305. (IF: 2,5; Q2; Független idézők száma: 3)
- Sainnokhoi, T.A., Kováts, N., Gelencsér, A., Hubai, K., Teke, G., Pelden, B., Tserenchimed, T., Erdenechimeg, Z., Galsuren, J., 2022. Characteristics of particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in indoor PM2.5 of households in the Southwest part of Ulaanbaatar capital, Mongolia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(9), 665. (IF: 3; Q2)
- Simon, B., Tamaska, L., Kováts, N., 2010. Analysis of global and local environmental impacts of bus transport by LCA methodologies. *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 155-158.
- Szabó-Bárdos, E., Kulcsár, P., Kováts, N., Békéssy, Z., Eck-Varanka, B., Horváth, O., 2020. Assessment of the potential bactericide effect of self-cleaning floors: a proposed protocol. *Luminescence*, 35(3), 434-436. (IF: 2,464; Q2)
- Turóczy, B., Hoffer, A., Tóth, Á., Kováts, N., Ács, A., Ferincz, Á., Kovács, A., Gelencsér, A., 2012. Comparative assessment of ecotoxicity of urban aerosol. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(16), 7365-7370. (IF: 5,51; Q1)
- Vicente, E.D., Figueiredo, D., Gonçalves, C., Lopes, I., Oliveira, H., Kováts, N., Pinheiro, T., Alves, C.A., 2021. In vitro toxicity of indoor and outdoor PM10 from residential wood combustion. *Science of The Total Environment*, 782, 146820. (IF: 10,753; Q1)
- Vicente, E.D., Figueiredo, D., Gonçalves, C., Lopes, I., Oliveira, H., Kováts, N., Pinheiro, T., Alves, C.A., 2022. In vitro toxicity of particulate matter emissions from residential pellet combustion. *Journal of Environmental Sciences*, 115, 215-226. (IF: 6,9; Q1)