

Bírálat

Kovács Nóra: *Légköri szálló por környezeti kockázatának jellemzése – MTA doktori értekezéséről*

Kovács Nóra MTA doktori értekezésének központi kérdése a légköri szálló por (PM_{10} , $PM_{2.5}$) környezeti és egészségi kockázatának **ökotoxikológiai** megközelítésű jellemzése, különös tekintettel a *Vibrio fischeri* baktérium biolumineszcencia-gátláson alapuló teszt **direkt kontakt** változatának kidolgozására és széles körű alkalmazására. A téma kiemelten időszerű: a városi levegőminőség, a biomassza-égetés, a közlekedési (emissziós és nem emissziós) részecskeforrások, továbbá a beltéri kitettség (fűtés, főzés) egyaránt napirenden lévő, jelentős népegészségügyi és környezetvédelmi kihívások. A Jelölt átfogó, több helyszínt és forrástípust lefedő, **metodikailag innovatív és alkalmazásorientált** vizsgálatokat mutat be.

1) Az értekezés felépítése és formai kivitele

Az értekezés jól strukturált, a **preambulum–célkitűzések–irodalmi áttekintés–kísérletek–összegzés** logikáját követi. Fejezetszámok nincsenek megjelölve, viszont a mű részletes módszertani és városi, közlekedési, hulladékégetési, beltéri/életviteli, ipari petrokémiai környezet) esettanulmány-fejezeteket tartalmaz. Az értekezés 22 Q1/Q2/D1 saját nemzetközi publikáció eredményeire épül. Az értekezés 137 oldal terjedelmű és kb. 300 irodalmi számozatlan hivatkozást tartalmaz.

2) A tudományos eredmények összegzése és értékelése

A Jelölt fő új tudományos eredménye módszertani hozzájárulás, azaz **direkt kontakt (szűrő anyagán lévő szállópor–baktérium) ökotoxicitási teszt** kialakítása és validálása, amely a reális expozíciós útvonalat jelenti.

Főbb eredmények összegzése és értelmezésük

A mintavételek **széles földrajzi és forrásspektrumot** (Budapest, K-puszt, Szeged, Coimbra/Bragança/Aveiro, São Paulo, Ulánbátor; laboratóriumi dízel és különféle hulladékégetési kísérletek) fednek le. A szűrőkre gyűjtött szállóporokra **kinetikus** diagram felvétele 96 lyukú mikrotiter platformon, 30 s folyamatos jelrögzítéssel, EC_{20}/EC_{50} és toxicitási egység (TU) számítással következetes. A különböző vegyületekre (pl. PAH-ok, fémek, OC/EC, anhidrocukrokra) végzett korrelációs vizsgálatok egységesek. A direkt kontakt teszt **megbízható és robosztus**. Színes/lebegőanyagtartalmú mintáknál nem ad túlbecslést, ellentétben több extraktumalapú megoldással; az érzékenység a szerves oldószerekkel kapott extraktumokéval ekvivalens, így a valós expozíciót modellező módszer szűrőtesztként is jól működik.

Városi levegő esetén télen **nagyobb az ökotoxicitás** Budapesten és Coimbrában is; a különbségek a lakossági fűtéshez, gyengébb fotokémiához és félillékony komponensek kondenzációjához köthetők. A korrelációk a **biomassza-markerekkel** (levoglukozán, mannozán, galaktózán) és több **közlekedési fém**mel (Fe, Cu, Zn) meggyőzőek. Az ipari

tevékenységgel nem jellemezhető portugál kisvárosban (Bragança) az éjszakai PM₁₀ minták OC/EC, Zn, K és anhidrocukrok tartalma erős kapcsolatot mutatnak a TU-val. A petrolkémiai, **São Paulo-i** térség közelében a PM_{2.5} minták **jelentősen toxikusak**, ami **krónikus lakossági expozíciót** jelez. Az oxidatív potenciál (aszkbát teszt) és a *Vibrio fischeri* teszt eredmények **jó korrelációt** mutatnak.

Közlekedési források esetén i) az **emissziós**, azaz dízel buszoknál a környezetvédelmi osztály és a toxicitásegységek között jelentős kapcsolat mutatkozik; személyautóknál a **PAH-kibocsátás** inkább a **futásteljesítménnyel** korrelál; ii) a **nem emissziós jelenségeknél**, mint pl. **útkopás, fém/gumi**, autópályai és parkolóházi **reszuszpendált porok** mindenütt toxikusak; jellemző fémek a **Zn, Cu, Cr**, de a TU gyakran **PAH-ok koncentrációjával** korrelál erősebben, additív/szinergista kockázatot jelezve.

Illegális hulladékégetés esetén a standardizált körülmények közt a különböző frakciók (PS, PP, PVC, PU, OSB, rongy, PET) **erősen eltérő toxikológiai profilt** adnak. A **PVC** és több **PU** minta **nehézfém (Cd, Zn)** dominanciát, a **PS/PP** pedig **PAH-dominanciát** mutat; **genotoxicitás** több esetben igazolt (pl. SOS Chromotesttel végezve). A **PET** égetésekor az **Sb koncentrációja** minden esetben nagy; rákkeltő PAH-ok (pl. **BbF** és **Cry**) is kimutathatók. A színes vs. színtelen PET között az ökotoxikológiai különbség **nem szignifikáns**.

Beltéri források taglalásánál **fűtés** esetén zárt tűzterű berendezések kedvezőbbek; az **A549** citotoxicitás és a *Vibrio fischeri* teszt eredmények **összhangban** vannak; biomassza-specifikus markerek és egyes PAH-ok szignifikáns korrelációt mutatnak a toxicitással. **Ulánbátorban** a szénfűtéses háztartások beltéri PM-je **jelentős ökototoxicitást** és **jelentős PAH-terhelést** mutat, főként a **nagyobb gyűrűtagszámú PAH-ok** járulnak hozzá. **Konyhai tevékenységeknél**, pl. a **grillezett sertéshús** készítése idézte elő a **legmagasabb PM és toxicitás** értékeket; a TU a **nagy molekulatömegű PAH-okkal** mutat **nagyon erős** kapcsolatot ($r^2 \approx 0,94$). Faszélen grillezve a sertésből és a halból származó PAH emisszió is **szignifikánsan toxikus**.

A légköri humuszjellegű frakció **ökotoxicitása** a természetes vízi humuszformákéval **összemérhető**, ami felhívja a figyelmet a természetes humuszanyagok potenciális **bioaktivitására/toxicitására** is.

A Jelölt által közölt adatok hitelesek és megbízhatóak. A mintavétel(ek) és mintaelőkészítés részletei (helyszín, idő, eszközök, szűrő-típusok, gravimetriás mérés), a mérési protokollok (pl. ISO, MSz), a számítási képletek (INH%, EC₅₀/EC₂₀; TU-definíció), a korrelációk és PCA-eredmények statisztikailag korrekt módon vannak megjelenítve az értekezésben. A módszer(ek) korlátai (színes/zavaros minták, kis mennyiség, kivonószer-artefaktumok) transzparenssek, és ahol szükséges, a Jelölt kísérleti kontrollokkal kezelte.

Az új tudományos eredmények terén az alábbiakat emelem ki a Jelölt munkájából:

a) A direkt kontakt PM-mintákra történő validált adaptációja (ISO 21338:2010), a „**whole aerosol**” koncepció bevezetése; a módszer érzékenységének és „**virtuális toxicitást**”

kiküszöbölő képességének kísérleti igazolása lebegőanyag és színes mintákon mint **módszertani innovációt**. A kapott EC_{50} -értékek összevetése több extraktumos protokollal (metanol, diklór-metán, DMSO, hexán, víz) és a **módszertani „átjárhatóság” kvantifikálása**. A *Vibrio fischeri* teszt és humán A549 sejt citotoxicitás közti jó egyezés beltéri biomasz-égetés mintáiban.

b) Komplex terepi alkalmazások - városi szezonális/napszakos PM_{10} , közlekedési emisszió (dízel személyautók és autóbuszok), *nem-emissziós* útszéli reszuspéndált por, illegális hulladékégetés (műanyagok: PS, PP, PVC, PU stb.), beltéri fűtés és főzés, HULIS frakciók, ipari (petrolkémiai) $PM_{2.5}$ – **mind egységes ökotoxikológiai protokollal elvégezve**. Az eredmények következetesen kimutatják a biomasz-égetés és a közlekedéshez köthető PAH/fém komponensek kulcsszerepét az ökotoxikus terhelésben.

c) **Szignifikáns korreláció** a gyűjtött PM-mintákban meghatározott alkotók [pl. PAH-ok, anhidrocukrok (levoglukozán, mannozán, galaktozán) és fémek (Fe, Cu, Zn, Cr stb.)] koncentrációja vs. EC_{50} /TU, illetve az **eredmények értelmezése**.

3) Észrevételek

a) **A kivonat vs. direkt kontakt összehasonlíthatóság** korlátait pontosan tárgyalja a Jelölt értekezésben, de módszertani meta-analízises (cross-study standardizáció) további kvantifikáció segítené a „field-relevance” skála (víz/organikus oldószer/direkt kontakt) általánosíthatóságát.

b) **A jelentős helyszín- és mátrix-heterogenitás** következtében az „egységes épület” feltételezés fogalmi különbségeit érdemes lenne a jövőben célzott mintavétellel szétválasztani főleg beltéri levegőminőség vizsgálatoknál.

Összességében ezek az észrevételek nem érintik a közölt eredmények újdonságértékét, inkább jövőbeli kiterjesztési lehetőségeket jelölnek.

4) Tételes nyilatkozat a tézispontokról

Az értekezés **valamennyi** fent részletezett tézispontját **új tudományos eredményként elfogadom**, noha véleményem szerint hasznos lett volna a tézispontok tömör összegző kijelentések formájában is megfogalmazni.

5) Kérdések

1. Milyen lépések szükségesek ahhoz, hogy a direkt kontakt protokollhoz egyértelmű, reprodukálható QA/QC csomag készüljön, amely laborok között is átvihető?
2. Hogyan lehetne a mért TU-tartományokat humán expozíciós scénáriókhoz (kültér/beltér, időtartam, érzékeny csoportok) kötni?
3. Hasznos lenne-e egy olyan keretmodell, amely a toxicitási eredményeket kockázatkommunikációs kategóriákba rendezi?
4. Alkalmazható-e gépi tanulós multimodális kalibráció (optikai, kémiai, meteorológiai prediktorok) a TU becslésére?

5. Hogyan befolyásolja a PET-ből származó Sb és a PVC-ből származó Cd/Zn a toxicitási profilt?

6. Indokolt lenne-e speciációs vizsgálat - Sb(III)/Sb(V) - a kockázat értékeléséhez?

7. Milyen információt adhatna egy mesterséges tüdőfolyadék extrakció és *V. fischeri* kombinált teszt a biohasznosulásról?

6) A doktori mű nyilvános vitára bocsáthatósága

Az értekezés **tudományos színvonala, újdonságtartalma és közegészségügyi relevanciája kiemelkedő**. A módszertani fejlesztés (direkt kontakt teszt), és annak **széles körű környezetkémiai alkalmazhatósága nemzetközileg is jelentős hozzájárulás**. A direkt kontakt *Vibrio fischeri* teszt jelentős **többletinformációt** nyújt a klasszikus szerves oldószerrel végzett extrakción alapuló eljárásokhoz képest. A bemutatott eredmények **új tudományos értéket** képviselnek, a következtetések **megalapozottak**, és a módszer **gyakorlati hasznosíthatósága** egyértelmű. A mérési adatbázis nagysága és az eredmények minősége, a statisztikai adatfeldolgozás alátámasztottsága, az értekezéshez felhasznált publikációk és az értekezés gondos megfogalmazása megfelel az **MTA doktori szintű követelményeknek**. **Az értekezést nyilvános vitára alkalmasnak tartom, a vita kitűzését javaslom.**

Kelt: Budapest, 2025. december 26.

Mihucz Viktor Gábor

MTA doktora