Vélemény

Kováts Nóra:
Légköri szálló por környezeti kockázatának jellemzése
című MTA Doktori Értekezéséről

Kováts Nóra MTA Doktori Értekezése 137 számozott oldalból áll. 29 ábrát, 22 számozott táblázatot, 313 irodalmi hivatkozást tartalmaz. A dolgozat 7 fő fejezetből áll, de a Jelölt nem számozta sem a fő, sem az alfejezeteket. Ezt hiányosságként értékelem, mert a számozás elmaradása az olvasó számára megnehezíti az írásműben történő tájékozódást. A tartalomjegyzéket követő **Rövidítések jegyzéke** ilyen analitikai témájú dolgozatban igen hasznos. Hatékonyan segíti az olvasót a szakmai szöveg gyors megértésében. Az anyag olvasása közben hamar kiderült azonban, hogy a rövidítések jegyzéke nagyon hiányos. A felsorolt rövidítések többszöröse fordul elő a szövegben. Habár a rövidítés környezetében a magyarázat megtörtént, de ha az olvasó csak egy kiválasztott fejezetre kíváncsi, nem kötelezhető, hogy más fejezeteket is elolvasson a rövidítések megfejtéséhez.

A **Preambulum** azokat a légszennyezéssel kapcsolatos nemzetközi jogszabályokat, jelentéseket mutatja be, amelyek környezetünkben előforduló veszélyek miatt különösen indokolttá teszik, hogy a levegő tisztaság vizsgálatát minél részletesebben, árnyaltabban vizsgáljuk meg.

A **Célkitűzések** fejezetben a Jelölt arra hívja fel a figyelmet, hogy a szálló porok kémiai és ökotoxikológiai vizsgálatok egymást kiegészítik. Az ökotoxikológiai tesztek analitikai mérések nélkül önmagukban nem állják meg a helyüket. Ezek a tesztek általában az adott környezeti minta összesített mérgezőképességét indikálják, a toxikus hatás mechanizmusának feltárásához szükséges a mérgező hatásért felelős komponensek minőségi és mennyiségi meghatározása is. Mérlegelni kell azt is, hogy a szálló porok felületén tapadó komponensek mely része a biológiailag felvehetőn frakció, amely az élő világra hatást gyakorol.

A Jelölt ebben a fejezetben jelzi, hogy olyan teszteljárást dolgozott ki, amely lehetővé teszi a légköri szennyezők közül a szálló por toxikus komponenseinek közvetlen elemzését. A kidolgozott teszteljárás a *Vibrio fischeri* biolumineszcens baktérium alkalmazására alapuló kinetikus teszt (Flash teszt) speciálisan adaptált változata. Az alkalmazott mérési protokoll szerint e baktériumok magukkal a szálló por szemcsékkel, ill. a rajtuk levő potenciálisan toxikus szennyezőkkel direkt kontaktusba kerülnek, anélkül, hogy a mintát előzetesen extrahálni kellene. A bemutatott munka egyik alapvető célkitűzése magának a teszteljárásnak a validálása.

Figyelembe véve a levegőszennyezés globális jellegét, a Jelölt további célja olyan alkalmazási területeknek az ismertetése és értékelése, amelyek esetében a teszteljárás valóban új lehetőséget biztosított az adott területen jelentkező problémák feltárására és elemzésére. Ebből a szempontból kiemelt a városi (települési) levegő, a közlekedési eredetű levegőszennyezés vizsgálata. A gépjármű emisszióból származó terhelés mellett kiemelt a nem emisszió jellegű terhelés jellemzése. Illegális hulladék égetéséből, beltéri emberi tevékenységből (fűtés, főzés) származó emisszió ökotoxikológiai jellemzése. valamint légköri humusz-szerű anyagok (HULIS: Humic Like Substances) vizsgálata.

Az **Irodalmi áttekintés** részletesen tartalmazza a levegő szennyező komponenseit, a szálló porok méreteloszlását, a porszemcséken kötődő szervetlen vegyületeket, szerves anyagokat. Bemutatja e szennyező anyagok egészségügyi hatásait a tüdőráktól az újabban észlelt kognitív zavarokig, amely hatásokra a gyermekek és idős személyek különösen érzékenyek lehetnek. E hatások az emberen kívüli organizmusokat is károsíthatják. A növényekre kiülepedő por ökológiai hatása következtében a levelek egészséges működését korlátozhatja, vagy oxidatív stresszt idézhet elő.

A fenti rendszerekre vonatkozó ökotoxikológiai vizsgálatok arra irányulnak, hogy egyértelmű ok okozati összefüggés legyen megállapítható az adott stresszor és a kiváltott ökotoxikus hatás(ok), végpont(ok) között (kauzalitás elve). Az egyértelmű összefüggéseket nehezíti, hogy a szállóporon kötődő számos komponens eredő hatása a környezetre lehet additív, antagonista vagy szinergista jellegű is.

A légszennyezéseknek az élő környezetre gyakorolt hatásai meghatározására a szakirodalomban nagyszámú módszerrel találkozunk. Épp amiatt, hogy az élő környezeti rendszerekre irányuló hatásokról van szó, előszeretettel alkalmaznak detektorként élő rendszereket, amelyeknek a toxikus szennyezőkkel történő érintkezésével megváltozik a működése, aminek valamilyen mérhető, számszerűsíthető következménye van. Az irodalmi adatok szerint az egyik legérzékenyebb ilyen tesztrendszer a Vibrio fischeri, amely biolumineszcencia gátláson alapul.

Az irodalmi áttekintésről megállapítható, hogy a Jelölt az értekezése témakörének gyakorlatilag a teljes szakirodalmát ismeri, az adatok alkotó felhasználásának birtokában van.

A Jelölt a következő 77 oldal terjedelmű fő fejezetnek a **Kísérletek** címet adta. Ebben a fejezetben mutatja be az új módszert, amelyet a szálló porok ökotoxikológiai hatásának vizsgálatára dolgozott ki. Mivel a Vibrio teszt kinetikus változata esetében a mintát lehetséges olyan szuszpenzió formájában vizsgálni, amely tartalmazza a szállóporminta szilárd szemcséit, ezekkel direkt kontaktusba kerülhet a baktérium, valós expozíciós utat utánozva.

A Vibrio Fischeri baktérium (Photobacterium Phosphoreum) emésztési folyamata során fényt bocsát ki, melynek intenzitása luminométerrel mérhető. Ha a baktériumot toxikus hatásnak tesszük ki, a fénykibocsátása lecsökken. A fényintenzitás csökkenése jól jellemzi a toxicitás mértékét. A módszer előnye, hogy lényegesen gyorsabb, mint a többi toxikológiai vizsgálat. Nem szubjektív megfigyeléssel, hanem objektív fizikai mennyiség mérésével lehet kiértékelni.

A Jelölt által bevezetett új módszer fontos előre lépés az ökotoxikológiai vizsgálok területén. Az új módszer előnye többek között, hogy alkalmazásával a környezeti aeroszol közvetlenül érintkezik az élő rendszerrel, kiváltva a mérhető toxikus hatást. Ez a kapcsolat jól modellezi a természetben is lezajló hatásokat.

A Jelölt kidolgozott módszerrel igen nagy számú kísérletes analitikai munkával mintegy 22 típusú aeroszol, PM ökotoxikus hatását vizsgálta meg és hasonlította össze. A mintatípusok körébe tartoztak többek között városi, települési szállóporok, azok szezonális, és napszak szerinti gyűjtései, hulladékégetéskor keletkező minták, gépjárművek által előidézett

aeroszoloktól a sütéssel, főzéssel keletkező toxikus anyagok ökotoxikus elemzése, nem kipufogógázokból keletkező közlekedési aeroszolok, sőt vörösiszap kiporzásából származó anyagok vizsgálata. A hazai források mellett brazil, portugál, mongol területeken gyűjtött aeroszolok is kerültek elemzésre.

A 7 oldal hosszúságú **Összegzés-**ben próbálja levonni az értekezésben bemutatott vizsgálatokból levonható következtetéseket. Ez a fejezet túl hosszúra sikerült. Az értekezést **Köszönetnyilvánítás**, majd a 313 irodalmi adatot tartalmazó **Irodalomjegyzék** zárja

A benyújtott értekezés egy időszerű, nemzetközileg is intenzíven kutatott tématerülethez kapcsolódik: a légköri szálló por (PM) ökotoxikológiai kockázatának vizsgálatához. A munka központi eleme egy Vibrio fischeri biolumineszcencián alapuló, direkt kontaktusú („whole aerosol") tesztprotokoll adaptálása és alkalmazása, amely kétségtelenül saját módszertani hozzájárulásként értékelhető. Az értekezés terjedelme, szakirodalmi megalapozottsága és empirikus bázisa összességében megfelel egy doktori disszertációval szemben támasztott elvárásoknak.

A szerző világosan megfogalmazza fő célkitűzését: egy direkt kontaktusú ökotoxikológiai teszt validálását, valamint annak alkalmazását különböző emissziós forrásokból származó PM minták vizsgálatára. A célkitűzések egyértelműek, a dolgozat egészén végig követhetőek. A Jelölt igen különböző típusú és nagyszámú mintán próbálta ki sikeresen az ökotoxicitás mértékét. A célkitűzésnek megfelelően az új módszer nagyszámú vizsgálat adataival alátámasztott módon sikeres méréstechnika.

Az analitikai kémiában egy módszer validálása olyan gyakorlati lépésekhez kapcsolódik, amelyek végrehajtásával választ kapunk az új módszer pontosságára, precizitására, érzékenységére, kimutatási határára, zavartűrésére, méréstartományára, linearitására. A dolgozat adataiból csak közvetett információt kapunk a bevezetett módszer validálási adatairól. Felmerül a kérdés, hogy milyen statisztikai adatokból, milyen referencia-módszertani kritériumok alapján tekinthetjük a Vibrio fischeri biolumineszcenciás módszert validáltnak.

Az belátható, hogy egy szervetlen és szerveskémiai alkotókat felhasználó analitikai módszer validálása jóval egyszerűbb, mint élő organizmus viselkedésére épülő technika, ahogy ez jelen esetben történik. De a környezeti kockázat objektív feltárása megköveteli, hogy ez a vizsgáló módszer is megbízható és összevethető legyen más független eljárásokkal.

Az ökotoxicitás vizsgálatát az is bonyolítja, hogy a PM felületén kötődött toxikus anyagok nem csak a Vivrio fischerire hatnak, hanem egymásra is hatással vannak. Még komplexebbé teszi az ökotoxikus hatást, hogy a porszemcsék felületén két jól elkülöníthető vegyületcsoport van jelen, a toxikus fémvegyületek és a szerves komponensek fő alkotói a policiklusos aromás szénhidrogének (PAH-ok). A szerves és szervetlen komponenseknek az élettani hatása, hatásmechanizmusa is alapvetően eltérő. Az ökotoxikus hatást még tovább terheli az a tény is, hogy a fémionok arányainak változásával toxicitás mértéke akár additív, antagonista és szinergikus is lehet.

A Jelölt részletesen vizsgálja a PAH-ok szerkezete és az ökotoxikus hatás közötti összefüggést. A dolgozatban viszont nem esik szó a fémszennyezők vegyérték- és kötésállapotainak

szerepéről. Az elmúlt időszak egyik nagy kihívása az analitikában a speciációs analitika, amely szerint az élettani hatás nem a fém összes koncentrációjától függ, hanem az elemmódosulatok koncentrációjától, koncentrációarányaitól.

Az értekezésben aeroszolok változó szemcseméretű frakciói kerültek vizsgálatra. Kérdés, hogy a Jelölt milyen módszerrel különítette el a PM2,5 vagy PM10 frakciókat a nagyobb szemcseméretű szemcséktől, tekintettel a gyűjtött minták kis tömegére.

Hiányolom a dolgozatban az Anyag és módszer fejezetet, ahol össze lehetett volna foglalni a Jelölt által használt előkészítési módszereket, mérőeszközöket

A vizsgálatok eredményét összefoglaló diagramok hibája sok esetben, hogy nincsenek feliratozva a tengelyek, elsősorban a függőleges tengelyek. A tengelyek feliratozása azért fontos, mert a tudományos cikkeket az olvasónak meg kell tudnia érteni, akkor is, ha csak az ábrákat, diagramokat nézi át. A szövegből nyilván kiderül a tengelyek neve, de az olvasó nem kényszeríthető, hogy elolvassa a szöveget. Helytelennek tartom azt is, ha a tengelyek felirata valamilyen rövidítés. Ez is nehezíti a megértést, mert a szövegben utána kell nézni a rövidítés jelentésének. A tengelyek által képviselt mennyiség esetén a tengelyfelirat mellett a mértékegységnek is szerepelnie kell. A 2 – 5. ábrán például helyesen szerepelnek a tengely feliratok (lumineszcencia), de hiányzik a mértékegység, a 6. ábrán a tengely: intenzitás, de nincs mértékegység.

Az értekezés számos hasznos táblázatot tartalmaz. Több táblázatnál (14. és 15. táblázat) és a szövegben is (68. és 70. oldal) tipikus hiba, hogy elsősorban koncentrációk közlésekor a kelleténél jóval több számjegyig adja meg az adatokat. Mivel a legprecízebb műszeres analitikai módszernek sem kisebb a szórása 1 %-nál, értelmetlen egy koncentráció adatot 3 értékes jegynél pontosabban megadni.

A szöveg jól követhető, olvasmányos. A mondatai jól szerkesztettek. De a szövegben sok elütés, betűhiba fordul elő, amelyet egy helyesírási programmal ki lehetett volna javítani. Néhány olyan nem-magyaros kifejezés is kerülendő lenne, mint leközöl, lepublikál, diszkutál.

Az MTA doktori értekezés Tézisfüzete megfelelően szerkesztett, szerkezete áttekinthető, és világosan elkülönülnek benne a kutatási előzményeket, a célkitűzéseket, az alkalmazott módszertan, valamint az új tudományos eredmények. A tézisek összességében koherens képet adnak a jelölt kutatói programjáról és annak tudományos beágyazottságáról. A nyolc tézispontot elfogadom új tudományos eredménynek.

Az értekezés tartalmi kérdéseivel kapcsolatosan néhány kérdést teszek fel.

A dissszertációban részletezett teszt protokollja több ponton laboratórium-specifikus eszközökre és szoftverre épül. Milyen mértékben tekinthető a módszer más laboratóriumok által reprodukálhatónak, és milyen megoldásokat tartana szükségesnek a teszt jövőbeli szabványosítása céljából?

A dolgozat bemutatja a direkt kontakt teszt és különböző extrakciós eljárások eredményeinek összevetését. Mennyire tekinthetők ezek az összehasonlítások kvantitatív értelemben

meggyőzőnek, és indokoltnak tartja-e, hogy a direkt kontakt módszer kiváltsa a hosszadalmasabb, munkaigényes az extrakciós eljárásokat?

Melyek ennek a direkt kontakt módszer általános bevezetésének a legfontosabb korlátozó tényezői, és milyen irányban tartaná szükségesnek a további fejlesztését (pl. érzékenység, specifitás, pontosság stb.)?

Az értekezésben leírtak szerint a lumineszcenciás mérések eredményeit korrigálni kell, ha színes (vörös iszap) és/vagy zavaros oldatok esetén. Mi ennek a korrekciónak az alapelve?

A bemutatott eredmények érdemi hozzájárulást jelentenek a szállóporok ökotoxikológiai kockázatának analitikai megalapozásához, különösen az integrált módszertani keret és a komponens–hatás relációk strukturált feltárása terén. Az értekezés terjedelme, szakirodalmi megalapozottsága és empirikus bázisa összességében megfelel egy MTA doktori disszertációval szemben támasztott elvárásoknak. Ezekre tekintettel a doktori munka tudományos eredményeit elegendőnek tartom az MTA doktori cím megszerzéséhez. Javaslom a nyilvános védés kitűzését.

Debrecen, 2026. 02. 17.

Dr. Posta József
az MTA doktora