

Válasz dr. Mihucz Viktor Gábor, az MTA kémia tudományok doktorának bírálati véleményére

Öszinte köszönettel tartozom dr. Mihucz Viktor Gábor professzor úrnak, amiért dolgozatom átolvasására és bírálatára jelentős időt és figyelmet fordított. Nagyra értékelem elismerő szavait, amellyel az elvégzett munkát méltatta. Köszönöm továbbá azokat a javaslatokat és észrevételeket, amelyek a további kutatás szempontjából irányadók lehetnek.

Az 'Észrevételekre' a következőképpen szeretnék reflektálni:

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.

Köszönöm a felvetést. Ilyen jellegű meta-analízist elsősorban más szilárd fázisú minták, azaz elsősorban üledék és talaj esetében tartanék kivitelezhetőnek és szükségesnek.

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.

Igen, köszönöm a javaslatot. Ilyen módon például különbséget tudnánk tenni a beltéri levegő minőségét befolyásoló szennyezőforrások között (pl. konyhai munkák, fűtés, stb.).

A kérdésekre adott válaszaim a következők:

1. Milyen lépések szükségesek ahhoz, hogy a direkt kontakt protokollhoz egyértelmű, reprodukálható QA/QC csomag készüljön, amely laborok között is átvihető?

A direkt kontakt protokollnak 3 lépése van, amelyek meghatározóak a teszt végén mért adatok minőségét illetően: (1) mintavétel; (2) mintaelőkészítés és (3) a 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/ szabvány alapján a mérés végrehajtása.

(1) Mintavétel. Munkáink során kvarc filtert használtunk (Advantec QR-100 Ø150 mm). Ennek esetében megbizonyosodtunk arról, hogy a filter anyaga inert (azaz 'vak' filtert is alávetettünk a mintaelőkészítési eljárásnak és az ökotoxicitás vizsgálatnak, amelynek eredménye negatív volt, azaz a kvarc filter anyaga önmagában nem váltott ki ökotoxikus választ). Mindenképpen ajánlott kvarc filter használata (a szakirodalomban található munkák egyébként is jellemzően kvarc filtert alkalmaznak). A mintaelőkészítési eljárást teflon filter esetében is kipróbáltuk, amely viszont nem bizonyult kellőképpen jól kezelhetőnek.

(2) Mintaelőkészítés. A szuszpenzió elkészítéséhez a filterből adott átmérőjű korongot vágunk ki, amelyet achát mozsárban porítunk, majd tiszta 4 ml-es üvegcsékbe töltjük egy PTFE bevonatú spatula segítségével. Ehhez 2 ml MilliQ vizet töltünk. A kivágott átmérő az egyes munkák esetében némiképp eltért, az eredeti cikkben (Kováts et al. 2012) 25 mm szérepelt, míg pl. Vicente et al. (2022) 14 mm-es spotokat alkalmazott. Egy adott méréssorozaton belül ugyanakkor a szuszpenzió 'töménysége' megegyezik.

(3) ISO 21338:2010 végrehajtása. Értelemszerűen a szabványban rögzített lépések adottak. A mérés teljes mértékben automatizált, emberi hibának nem ad teret.

A kérdésre röviden válaszolva: az ISO 21338:2010 szabványban rögzített protokollhoz megadható olyan kiegészítő csomag, amely tartalmazza a mintavétel/mintaelőkészítés lépéseit, eszközeit, eleget téve a minőségbiztosíthatóság, elsősorban a reprodukálhatóság alapkövetelményeinek.

2. Hogyan lehetne a mért TU-tartományokat humán expozíciós scénáriókhoz (kültér/beltér, időtartam, érzékeny csoportok) kötni?

Ez eseti számítást igényel. Különböző munkáink eltérő expozíciós időtartamot jelenthetnek. Mongol beltéri minták esetében például elvégeztük a teljes élettartamra számított rák előfordulásának kockázat számítását (incremental lifetime cancer risk: ILCR), amely esetében az input adatokat a PAH értékek adták (Sainnokhoi et al. 2022, 2025). Az expozíció gyakoriságát 180 nap/évben határoztuk meg (a hideg szezon hossza). A felhasznált források szerint az expozíció időtartama felnőttekre 70 év, gyermekekre 14 év, azaz lehetséges két korcsoportra is számítást végezni. Levegőszennyezés tekintetében a gyermekek kiemelt kockázatú csoportnak számítanak (Hobbs et al. 2025).

Az ILCR-számítást PAH-okon kívül nehézfémekre is alkalmazzák (Kouras et al. 2025). Mivel mintáink jelentős részében PAH és/vagy nehézfém analízist végeztünk, a TU értékek akár ILCR számításokkal is összefüggésbe hozhatók.

Szeretném ugyanakkor hangsúlyozni, hogy az expozíciós idő más esetekben rendkívül eltérő lehet: városi terhelést minősítő munkáink ennél hosszabb, egész éves expozíciót feltételeznek (ld. Caumo et al. 2023, Cipoli et al. 2023). Városi/utcai porszennyezés esetében pld. Škrbić et al. (2019) élethosszig tartó expozícióval számolják az ILCR értékeket. Ugyanakkor pl. a konyhai főzés során keletkező levegőszennyezés vizsgálat esetében átlagosan 2 óra volt a receptek elkészítéséhez szükséges idő, azaz a feltételezett expozíció (Alves et al. 2021).

Hivatkozások

Alves, C. A., Vicente, E. D., Evtyugina, 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.

- Caumo, S., Yera, A. B., Alves, C., Rienda, I. C., Kovats, 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*, 101, 104170.
- Cipoli, Y. A., Alves, C., Rapuano, M., Evtyugina, M., Rienda, I. C., Kováts, N., ... & Feliciano, M. (2023). Nighttime–daytime PM₁₀ source apportionment and toxicity in a remoteness inland city of the Iberian Peninsula. *Atmospheric Environment*, 303, 119771.
- Hobbs, M., Deng, B., Woodward, L., Marek, L., McLeod, G., Sturman, A., ... & Boden, J. (2025). Childhood air pollution exposure is related to cognitive, educational and mental health outcomes in childhood and adolescence: A longitudinal birth cohort study. *Environmental Research*, 274, 121148.
- Kouras, A., Manoli, E., Avgenikou, A., Paraschaki, A., Voutsas, D., Samara, C., & Foska, E. (2025). Inhalation health risk assessment in the port of Volos, Greece, based on multiannual evolution of PM₁₀-bound polycyclic aromatic hydrocarbons and metals/metalloids: implications for EU-regulated PM₁₀ pollutants. *Atmospheric Environment*, 358, 121348.
- Sainnokhoi, T. A., Kováts, N., Gelencsér, A., Hubai, K., Teke, G., Pelden, B., ... & Galsuren, J. (2022). Characteristics of particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in indoor PM_{2.5} of households in the Southwest part of Ulaanbaatar capital, Mongolia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(9), 665.
- Sainnokhoi, T. A., Tuvshinbayar, Y., Bat-Ochir, M., Eck-Varanka, B., Hubai, K., Teke, G., ... & Kováts, N. (2025). Indoor environments: Evaluating air quality in Ulaanbaatar's traditional gers. *Chemosphere*, 377, 144338.
- Škrbić, B., Đurišić-Mladenović, N., Živančev, J., & Tadić, Đ. (2019). Seasonal occurrence and cancer risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in street dust from the Novi Sad city, Serbia. *Science of the Total Environment*, 647, 191-203.

3. Hasznos lenne-e egy olyan keretmodell, amely a toxicitási eredményeket kockázatkommunikációs kategóriákba rendezi?

Keretmodellről illetően a 306/2010. (XII. 23.) Korm. rendelet - a levegő védelméről-ben alkalmazott rendszert tudok elképzelni, amely bizonyos levegőszennyező komponensekre, többek között PM_{2.5}-re és PM₁₀-re napi határértéket ír elő, és amely határértékek (egészségügyi, tájékoztatási, riasztási) túllépése esetén különböző intézkedéseket fogalmaz meg.

A munkáimban hivatkozott TU értékek elősorban arra szolgálnak, hogy adott mintavételi kampányon belül tudjuk összevetni és rangsorolni az egyes minták ökotoxikus hatását. A 2. pontban adott válaszomban kiemelttem, hogy egyes munkáinkban eseti mintavételi idővel, azaz másképpen kifejezve expozíciós idővel számoltunk, pl. a főzés során keletkezett emisszió vizsgálata során jellemzően a receptek elkészítéséhez szükséges kb. 2 órányi időtartammal.

Több olyan munkánk is van ugyanakkor, amelyeket városi, lakókörnyezetben valósítottunk meg és amelyekben a mintavétel jellemzően 24 órás volt, akár hosszabb mintavételi kampányt

követve. Ezek eredményeit részben már a dolgozatban tárgyalom, ill. több olyan vizsgálatunk is van, amelyek a dolgozat benyújtása után készültek:

- 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.
- 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.
- Cipoli, Y.A., Alves, C., Rapuano, M., Evtyugina, 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.
- 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.
- Pereira, G. M., Yoshiaki Kamigauti, L., Pereira, R. F., Monteiro dos Santos, D., da Silva Santos, T., Martins, J. V., ... Kováts, N., ... de Fatima Andrade, M., 2025. Source apportionment and ecotoxicity of PM_{2.5} pollution events in a major Southern Hemisphere megacity: influence of a biofuel-impacted fleet and biomass burning. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25(8), 4587-4616.
- 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 PM_{2.5} of households in the Southwest part of Ulaanbaatar capital, Mongolia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(9), 665.
- Sainnokhoi, T. A., Tuvshinbayar, Y., Bat-Ochir, M., Eck-Varanka, B., Hubai, K., Teke, G., ... Kováts, N., 2025. Indoor environments: Evaluating air quality in Ulaanbaatar's traditional gers. *Chemosphere*, 377, 144338.
- Sainnokhoi, T. A., Kováts, N., Pelden, B., Tuvshinbayar, Y., Bat-Ochir, M., Eck-Varanka, B., ... Hubai, K., 2024. Winter indoor air quality in traditional Mongolian yurts, in a Ger district of Ulaanbaatar. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 110, 104538.

Ezek az eredmények összevethetők egymással, ill. akár a hivatkozott kormányrendelethez hasonló ‘határérték’, vagy kockázati érték megfogalmazását téve lehetővé. Ez azért is feltételezhető, mivel ezen munkák jelentős részében PM₁₀ és/vagy PM_{2.5} meghatározás is történt, így például a Cipoli et al. cikkünkben szerepel, hogy a mintavételi kampány alatt a napok hány százalékában történt PM₁₀ és PM_{2.5} határérték túllépés.

4. Alkalmazható-e gépi tanulásos multimodális kalibráció (optikai, kémiai, meteorológiai prediktorok) a TU becslésére?

A TU (toxic unit) konkrét, számszerű érték amelyet a teszt során kapott EC_{50} értékből származtatunk: $TU = 100/EC_{50}$. 'Hagyományosan' a következő kategóriákat alkalmazzuk a toxicitás értékelésére: $TU < 1$ nem toxikus, $1 < TU < 10$ toxikus, $10 < TU < 100$ nagyon toxikus (Chang et al. 2013). Mind a toxikus, mind a nagyon toxikus kategória ennek értelmében rendkívül tág, valójában minőségi becslést ad (elhanyagolható/közepes/magas kockázat).

A kérdést éppen ezért ketté bontanám: Alkalmazható-e gépi tanulásos multimodális kalibráció (optikai, kémiai, meteorológiai prediktorok) a TU mennyiségi ill. minőségi becslésére? Azaz megadható-e egy közelítő számszerűsíthető TU érték vagy megadható-e egy az előbbiek értelmében viszonylag tág toxicitási/kockázati kategória?

Kémiai prediktorok

Bizonyos kimutatott ökotoxikus/toxikus hatással bíró szennyezők előfordulása (az általunk vizsgált mintákban elsősorban PAH-ok és nehézfémek) közvetlenül köthető a toxicitás megjelenéséhez. A légköri minták általában rendkívül komplexek, azaz számos szennyező együttes jelenléte várható. Ezek egymás toxicitását is befolyásolják, additív, antagonistá vagy szinergista jelleggel. A szakirodalomban léteznek olyan munkák, amelyek egyes szennyezők, elsősorban nehézfémek együttes toxikus hatását vizsgálják, ezekben az esetekben az összevetés általában páronként, ill. kisebb csoportokban történik. Értelemszerűen a szennyezők számának növekedése növeli a becslés bizonytalanságát is. Ugyanakkor elmondható, hogy légköri minták kémiai összetételéről, ill. az egyedi szennyezők ökotoxikus hatásáról olyan széles adatbázis áll rendelkezésre, amely lehetővé tesz kémiai prediktorok alapján a TU értékének közelítő becslését, továbbá a toxicitási kategóriák előrejelzését.

Meteorológiai prediktorok

A szakirodalomban rendkívül sok olyan munka található, amelyek a levegőszennyezettséget meteorológiai paraméterekkel korrelálják, sőt (részben) meteorológiai paraméterek alapján olyan modellek is kidolgozásra kerültek, amelyek predikciós jelleggel bírnak. Guo et al. (2020) pl. a levegőszennyezettség minősítésére szolgáló AOI (Air Pollution Index – levegőszennyezettségi index) előrejelzésére alkalmazott meteorológiai input adatokon alapuló modellt, ebben az esetben a meteorológiai változók közül az átlaghőmérséklet, átlag vízgőznyomás, minimum és maximum hőmérséklet mutatott a legjobb korrelációt. Cogliani (2001) szerint a szélsőbesség is jelentős szerepet játszik az API értékében. A Cogliani (2001) által alkalmazott API ugyanakkor csak gáznemű szennyezőket vesz figyelembe (NO_2 , CO és O_3).

Qi et al. (2021) viszont kifejezetten szálló por típusú szennyezőkkel foglalkozott. Munkájukban egy éves Pekingre vonatkozó adatsort tekintettek át, amely tartalmazta a levegőszennyezettségi és meteorológiai paramétereket. Korrelációs számítások szerint egy-egy eseti meteorológiai változónak nem, ezek páronkénti előfordulásának viszont jelentős hatása volt a légszennyező

komponensek eloszlására. A páros paraméterek a következők voltak: hőmérséklet-szélsőbesség; hőmérséklet-légnyomás ill. a nedvességtartalom-szélsőbesség. Egy szintén Pekingben készült munka a meteorológiai faktorok között egy további jól számszerűsíthető paramétert, a napsütéses órák számát is kiemelte (Zhang 2019). Zhang et al. (2015) szerint a meteorológiai paraméterek és a szálló por (PM_{2.5} és PM₁₀) mintázatok közötti összefüggés a várható levegőszennyezettség predikciójára is alkalmas, ezzel hatékonyabb védekezést téve lehetővé. Hasonló munkák európai viszonylatban is születtek (pld. Gualtieri et al. 2015, Hoffmann et al. 2024).

Walraff et al. (2021) továbbá összefüggést mutatott ki a szélirány/sebesség és a PM_{2.5} koncentrációja, kémiai összetétele és Microtox teszttel mért toxicitása között.

Összefoglalóan elmondható, hogy meteorológiai paraméterek és egyes levegőszennyezők mozgása, viselkedése közötti kapcsolatrendszerrel olyan méretű adatbázis áll rendelkezésre, amely lehetővé teszi a kiemelt meteorológiai változók és a jóslott levegőszennyezésből eredő várható toxicitás becslését.

Optikai prediktorok

A legjelentősebb abszorpcióval rendelkező légköri PM a korom és az ásványi por (Moosmüller et al. 2009), amelyek közül elsősorban a koromrészecskék (széntartalmú aeroszol) kutatása kiemelt fontosságú. A kutatások iránya lehet a koromrészecske forrásának meghatározása (Liu et al. 2018), például szénégetés során keletkező részecskék jellemzése (Pintér et al. 2018); fatüzelésből származó részecskék jellemzése (Cuesta-Mosquera et al. 2024). Jelentek meg olyan munkák is, amelyek a kémiai összetétel és adszorpciós kapacitás összefüggését elemezték, Sengupta et al. (2018) pl. azt vizsgálta, hogy a fatüzelésből származó aeroszokok poláris és nem-poláris szerves összetevői milyen mértékben befolyásolják az adszorpciós kapacitást.

A publikációk nagy számától eltekintve, rendkívül kevés munka foglalkozik az abszorpciós jellemzők és a toxikus potenciál közötti összefüggés közvetlen kimutatásával. Chan et al. például különböző fafajták elégetéséből származó aeroszol minták toxicitását és abszorpcióját vizsgálta. Bár az egyes fafajták elégetéséből származó emisszió toxicitása jelentős mértékben eltért, ez nem volt összefüggésben a minták abszorpciójával. Saját munkánkban (Pintér et al. 2017) gyenge ($r = 0,09$) ill. mérsékelt ($r = 0,448$) korrelációt mutattunk ki a légköri széntartalmú szálló por (carbonaceous particulate matter, CPM) EC₅₀ értékei és az AAE (Absorption Angström Exponent) értékek között. Hasonló összefüggésre ugyanakkor más irodalmi hivatkozást nem találtam.

Összefoglalóan elmondható, hogy a jelenleg rendelkezésre álló adatbázis alapján optikai prediktorok önmagukban nem elégségesek az aeroszol ökotoxikus potenciáljának becslésére.

A kérdésben felvetett gépi tanulós multimodális kalibráció érdekes folytatása lehet az eddigi munkának, de ennek a megközelítésnek is vannak korlátai. Az ilyen gépi tanulós

módszerekhez sok (és főleg jó, megbízható) adat szükséges a tanulási/tanítási és validációs fázisban. Amint a válasz korábbi részében írtam, ez nem mindig áll rendelkezésre. A gépi tanulós módszer ugyanakkor rendkívül jól alkalmazható lenne arra, ha egyszerre több prediktort szeretnénk figyelembe venni. Erre már található irodalmi hivatkozás: Lilhore et al. (2025) cikkében például a bemenet szatellit és meteorológiai adatok, a kimenet meg AQI (Air Quality Index), PM2.5, PM10, és O₃. A cikkben részletezett módszereket, modelleket valószínűleg lehetne úgy alakítani, hogy a bemenetek kémiai, optikai, meteorológiai prediktorok legyenek, a kimenet pedig egy becslés TU-ra vagy annak minőségi becslésére.

Panaite et al. (2024) hasonló input adatokkal dolgozva a PM2.5 koncentráció előrejelzésére alkalmazható modellt vizsgált. Cikkükben hangsúlyozzák, hogy a gépi tanulósnak elsősorban az előrejelzés, predikció megvalósíthatósága miatt lehet elsődleges szerepe.

Az idézett munkák jelentős része ugyanakkor elsősorban arra koncentrál, hogy az input paraméterek közül melyek azok, amelyek alkalmasak lehetnek ilyen jellegű előrejelzés elvégzésére, például elemezve, ezek közül melyek azok, amelyek korrelálnak a ténylegesen mért PM koncentrációkkal.

A gépi tanulós megközelítés másik lehetséges iránya a kémiai szennyezők együttes ökotoxicitásának előrejelzése (Wang és Zhang 2025). Ezek a módszerek arra is alkalmasak lehetnek, hogy a szennyezők együttes hatását olyan szervezetekre, fajokra is megjósolják, amelyek egyébként nem szerepelnek a szabványos vagy gyakrabban alkalmazott tesztfajok között. Ilyen módon az elvégzendő ökotoxicitás tesztek számát is lehet csökkenteni, amely etikai szempontból is kívánatos, elsősorban gerinceseken végzett tesztek esetében (Dong et al. 2025).

Hivatkozások

- Chan, L. K., Nguyen, K. Q., Karim, N., Yang, Y., Rice, R. H., He, G., ... & Nguyen, T. B. (2020). Relationship between the molecular composition, visible light absorption, and health-related properties of smoldering woodsmoke aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(1), 539-559.
- Cogliani, E. (2001). Air pollution forecast in cities by an air pollution index highly correlated with meteorological variables. *Atmospheric Environment*, 35(16), 2871-2877.
- Cuesta-Mosquera, A., Glojek, K., Močnik, G., Drinovec, L., Gregorič, A., Rigler, M., ... & Müller, T. (2024). Optical properties and simple forcing efficiency of the organic aerosols and black carbon emitted by residential wood burning in rural central Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(4), 2583-2605
- Dong, X., Zhao, G., Chen, X., Li, M., Shen, C., & Yan, Z. (2025). Machine learning in ecotoxicology: Pollutant exposure levels and detection, biotoxicity and environmental behavior prediction. *Science of the Total Environment*, 1008, 180985.
- Gualtieri, G., Toscano, P., Crisci, A., Di Lonardo, S., Tartaglia, M., Vagnoli, C., ... & Gioli, B. (2015). Influence of road traffic, residential heating and meteorological conditions on PM10

- concentrations during air pollution critical episodes. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(23), 19027-19038.
- Guo, Q., He, Z., Li, S., Li, X., Meng, J., Hou, Z., ... & Chen, Y. (2020). Air pollution forecasting using artificial and wavelet neural networks with meteorological conditions. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(6), 1429-1439.
- Hoffmann, L., Gilardi, L., Schmitz, M. T., Erbertseder, T., Bittner, M., Wüst, S., ... & Rittweger, J. (2024). Investigating the spatiotemporal associations between meteorological conditions and air pollution in the federal state Baden-Württemberg (Germany). *Scientific Reports*, 14(1), 5997.
- Lilhore, U. K., Simaiya, S., Singh, R. K., Baqasah, A. M., Alroobaea, R., Alsafyani, M., ... & Khan, M. M. (2025). Advanced air quality prediction using multimodal data and dynamic modeling techniques. *Scientific Reports*, 15(1), 27867.
- Liu, C., Chung, C. E., Yin, Y., & Schnaiter, M. (2018). The absorption Ångström exponent of black carbon: from numerical aspects. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(9), 6259-6273.
- Sengupta, D., Samburova, V., Bhattarai, C., Kirillova, E., Mazzoleni, L., Iaukea-Lum, M., ... & Khlystov, A. (2018). Light absorption by polar and non-polar aerosol compounds from laboratory biomass combustion. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(15), 10849-10867.
- Moosmüller, H., Chakrabarty, R. K., & Arnott, W. P. (2009). Aerosol light absorption and its measurement: A review. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 110(11), 844-878.
- Panaite, F. A., Rus, C., Leba, M., Ionica, A. C., & Windisch, M. (2024). Enhancing air-quality predictions on university campuses: A machine-learning approach to PM_{2.5} forecasting at the University of Petroșani. *Sustainability*, 16(17), 7854.
- Qi, X., Mei, G., Cuomo, S., Liu, C., & Xu, N. (2021). Data analysis and mining of the correlations between meteorological conditions and air quality: A case study in Beijing. *Internet of Things*, 14, 100127.
- Wallraff, J. P., Ungeheuer, F., Dombrowski, A., Oehlmann, J., & Vogel, A. L. (2022). Occurrence and in vitro toxicity of organic compounds in urban background PM_{2.5}. *Science of the Total Environment*, 817, 152779.
- Wang, Z., & Zhang, F. (2025). An individual response-based machine learning regression method to predict ecotoxicity of chemical mixtures in the absence and presence of dissolved organic matter. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 306, 119360.
- Zhang, Y. (2019). Dynamic effect analysis of meteorological conditions on air pollution: A case study from Beijing. *Science of the Total Environment*, 684, 178-185.
- Zhang, H., Wang, Y., Hu, J., Ying, Q., & Hu, X. M. (2015). Relationships between meteorological parameters and criteria air pollutants in three megacities in China. *Environmental Research*, 140, 242-254.

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

A PVC égetéséből származó minta esetében figyelembe kell venni a tesztorganizmusok eltérő érzékenységét. Irodalmi adatok alapján *Daphnia magna* ill. *Vibrio fischeri* tesztorganizmusokra a következő EC₅₀ értékek jellemzőek:

EC ₅₀	Cd	Zn	Forrás
<i>Daphnia</i>	3,3 µg/L	720 µg/L	Okamoto et al. 2015
	0,19 mg/L/24h 0,1 mg/L/48h		Cui et al. 2018
	21,02 µg/L		Kim et al. 2017
	0,22 mg/L/24h 0,17 mg/L/48h	1,8 mg/L/24h 0,41 mg/L/48h	Teodorovic et al. 2009
	0,19 µg/L PNEC vízi szervezetek	20,6 µg/L PNEC vízi szervezetek	https://www.carlroth.com/safety data sheet Cd
	0,11 mg/L		https://www.pentachemicals.eu/data/
<i>Vibrio</i>	52,51 mg/L	4,64 mg/L	Teodorovic et al. 2009
		1,69 mg/L	Kováts et al. 2005
	10,9 mg/L	0,86 mg/L	Fulladosa et al. 2005
	345 mg/L	1,1 mg/L	Kurvet et al. 2011
	23,6 mg/L	0,4 mg/L	Yang et al. 2016
	52,51 mg/L	4,64 mg/L	Teodorovic et al. 2009
	59,3 mg/L		Mowat és Bundy (2002)

Az értékek széles skálán mozognak, Cd *Daphnia* EC₅₀ esetében pl. Okamoto et al. (2015) rendkívül alacsony értéket adott meg, 3,3 µg/L. A következő ‘ugrás’ a Kim et al. (2017) által leközölt 21,02 µg/L érték. Ehhez képest nagyságrendi különbség mutatkozik a Cui (2018) által megadott értékeknél: EC₅₀24h 0,19 mg/L, 48h 0,1 mg/L. Feltehetően ez utóbbiak szolgáltatták az alapját az egyes forgalmazók által közreadott biztonsági adatlapokon szereplő értékeknek: a Pentachemicals *Daphnia* EC₅₀ értéke 0,11 mg/L, míg pl. a Carl Roth PNEC értéke vízi szervezetekre 0,19 mg/L (Predictive No Effect Concentration, azaz várhatóan káros hatást nem okozó koncentráció). Hasonló a Teodorovic et al. (2009) által számított EC₅₀ 0,22 mg/L érték.

Az általunk végzett analitikai mérések szerint a Cd koncentrációja 22,4 µg/L, azaz a Kim et al. által leközölt 21,02 µg/L-hez rendkívül közel esik. Ennek alapján feltételezhetjük, hogy legalábbis a *Daphnia* teszt esetében a Cd jelentős mértékben meghatározta a megfigyelt ökotoxikus hatást.

Vibrio-ra a szakirodalmi adatok magasabb EC₅₀ értékeket adnak, azaz ezek értelmében ez a tesztorganizmus kevésbé érzékeny. Az adatok itt is jelentős szórást mutatnak, a Fulladosa et al.

(2005) által megadott 10,9 mg/L értéktől egész a Kurvet et al. (2011) által megadott 345 mg/L értékig. *Vibrio*-ra ugyanakkor kevesebb a leközlött adat, értelemszerűen *Vibrio* EC₅₀ értékek biztonsági adatlapokon sem szerepelnek.

Zn esetében is gyökeresen eltérő mintázatot mutat a két tesztszervezet érzékenysége. A *Daphnia* érzékenységre kadmiumra, a *Vibrio*-é pedig cinkre magasabb, durva közelítéssel mindkét esetben egy nagyságrendnyi a különbség. Mintánkban a Zn koncentrációja 78,8 µg/L volt, ami önmagában egy tesztszervezetre sem jelenthetett erős ökotoxikus hatást a leközlött EC₅₀ értékek alapján.

Magyarázatként szolgálhat a mintában előforduló nehézfémek, illetve az egyéb, általunk esetleg nem is mért komponensek együttes hatása, amely lehet additív, antagonista vagy szinergista jellegű.

A Cd és Zn jellemzően szinergista hatást váltanak ki vízi környezetben (Arreguin-Rebolledo et al. 2024). Hasonló szinergista hatást írt le Cheng et al. (2025) *Daphnia* esetében. A *Vibrio*-teszt esetében ugyanakkor a (jellemzően kevés) irodalmi adatok egymásnak ellentmondanak. Mowat és Bundy (2002) szerint a Cd *Vibrio*-ra viszonylag alacsony toxicitású, egy több nehézfémek ill. ezek bináris együttes hatását vizsgáló munkájukban 59,3 mg/L EC₅₀ értéket közöltek le. A szerzők szerint ennek az a magyarázata, hogy a Gram-negatív baktériumok sejtfalának külső rétegében olyan exopoliszacharidok találhatók, amelyek megkötik a kadmiumot. Fulladosa et al. (2005) Cd és Zn együttes vizsgálatakor kifejezetten antagonista hatást írt le. Egy másik *Vibrio* fajon (*Vibrio qinghaiensis* sp.-Q67) ugyanakkor Ge et al. (2014) vizsgálta a Cd és Zn együttes hatását és szinergizmust tapasztalt.

Összefoglalóan elmondható, hogy a hulladékminták elégetéséből származó magas toxicitást feltehetően a rendkívül komplex összetételű minták komponensei közötti szinergizmus okozhatta. Cheng et al. (2025) szerint az együttesen ható komponensek számának növelésével nő a szinergista hatások okozta toxicitás.

A PET-palackok égetéséből származó minták toxicitásához jelentős mértékben hozzájárulhatott az Sb jelenléte. A mintában kimutatott koncentrációk a 6.93-16.9 mg/kg tartományban mozogtak. A Hsieh et al. (2014) által kifejezetten *Vibrio*-ra meghatározott EC₅₀ érték 640 µg/L, azaz 0,64 mg/L volt. A két munka közötti extrapolációt ugyanakkor megnehezíti, hogy míg saját adataim szilárd, a Hsieh et al. féle adatok vízes közegre vonatkoznak.

Sajnos arra sincs utólagos adatom, saját méréseinkben melyik oxidációs állapot (Sb(III) vagy Sb(V)) lehetett jelen, holott ezek toxicitása jelentős mértékben eltér (ezt a 6. pontban adott válaszomban fejtem ki részletesebben).

A PET palackok égetéséből származó mintákban ugyanakkor jelentős PAH koncentrációkat mértünk. A négy gyűrűs benzantracén koncentrációja 26.1-41.3 mg/kg között mozgott, a szintén négy gyűrűs krizéné 66.2-105 mg/kg között. Öt gyűrűs PAHok közül legmagasabb

koncentrációban a benzo(b)fluorantén volt jelen (66.9-103 mg/kg), 6 gyűrűs PAHok közül az indeno(1,2,3-cd)pirén (80.14-14.2 mg/kg). Városi minták elemzésekor szignifikáns korreláció mutatkozott a jellemzően magasabb gyűrűszámú PAHok (benzo(a)antracén, 7,12-dimetilbenzo(a)antracén, benzo(b)fluorantén, benzo(k)fluorantén, benzo(e)pirén, benzo(a)pirén, indeno(1,2,3-cd)pirén, dibenzo(a,h)antracén, benzo(g,h,i)perilén) és a *Vibrio* TU értékek között, jelezve, hogy ezek a PAHok is hozzájárulhatnak az adott minta toxicitásához (Alves et al. 2021).

Egyedi PAHok *Vibrio fischeri* tesztbaktériumra gyakorolt hatásáról rendkívül kevés publikáció áll ugyanakkor rendelkezésre, a legtöbb tanulmány komplex környezeti minták (elsősorban szennyezett üledék vagy talaj) minősítésére alkalmazza a tesztet (Čvančarová et al. 2013; Serafim et al. 2013). Ezek a minták ugyanakkor jellemzően tartalmazhatnak nehézfémeket és PAHokat egyaránt; a hivatkozott munkák egyetértenek abban, hogy a nehézfém tartalom jelentősen befolyásolhatja a mért *Vibrio* ökotoxicitást.

Hivatkozások

- Arreguin-Rebolledo, U., Gebara, R. C., Valencia-Castañeda, G., Rico-Martínez, R., Frías-Espericueta, M. G., Longo, E., & Páez-Osuna, F. (2024). Toxicity of binary-metal mixtures (As, Cd, Cu, Fe, Hg, Pb and Zn) in the euryhaline rotifer *Proales similis*: Antagonistic and synergistic effects. *Marine Pollution Bulletin*, 198, 115819.
- Cheng, Q., Zhang, J., Dai, B. Y., Wang, X. Y., Ji, G. Z., & Zhao, Y. F. (2025). Significantly enhanced effects of heavy metals on the toxicity, bioconcentration and biomagnification under combined exposure. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 110346.
- Cui, R., Kwak, J. I., & An, Y. J. (2018). Comparative study of the sensitivity of *Daphnia galeata* and *Daphnia magna* to heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 162, 63-70.
- Čvančarová, M., Křesinová, Z., & Cajthaml, T. (2013). Influence of the bioaccessible fraction of polycyclic aromatic hydrocarbons on the ecotoxicity of historically contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 254, 116-124.
- Fulladosa, E., Murat, J. C., & Villaescusa, I. (2005). Study on the toxicity of binary equitoxic mixtures of metals using the luminescent bacteria *Vibrio fischeri* as a biological target. *Chemosphere*, 58(5), 551-557.
- Ge, H. L., Liu, S. S., Su, B. X., & Qin, L. T. (2014). Predicting synergistic toxicity of heavy metals and ionic liquids on photobacterium Q67. *Journal of Hazardous Materials*, 268, 77-83.
- Hsieh, C. Y., Tsai, M. H., Ryan, D. K., & Pancorbo, O. C. (2004). Toxicity of the 13 priority pollutant metals to *Vibrio fischeri* in the Microtox® chronic toxicity test. *Science of the Total Environment*, 320(1), 37-50.
- Kim, H., Yim, B., Bae, C., & Lee, Y. M. (2017). Acute toxicity and antioxidant responses in the water flea *Daphnia magna* to xenobiotics (cadmium, lead, mercury, bisphenol A, and 4-nonylphenol). *Toxicology and Environmental Health Sciences*, 9(1), 41-49.
- Kováts, N., Kovács, J., Paulovits, G., Hiripi, L. (2005). ToxAlert® 100 teszt alkalmazása felszíni vizek szennyezésének kimutatására. *Hidrológiai Tájékoztató*, 45(1), 10-13.

- Kurvet, I., Ivask, A., Bondarenko, O., Sihtmäe, M., & Kahru, A. (2011). LuxCDABE—Transformed constitutively bioluminescent *Escherichia coli* for toxicity screening: Comparison with naturally luminous *Vibrio fischeri*. *Sensors*, 11(8), 7865-7878.
- Mowat, F. S., & Bundy, K. J. (2002). Experimental and mathematical/computational assessment of the acute toxicity of chemical mixtures from the Microtox® assay. *Advances in Environmental Research*, 6(4), 547-558.
- Okamoto, A., Yamamuro, M., & Tatarazako, N. (2015). Acute toxicity of 50 metals to *Daphnia magna*. *Journal of Applied Toxicology*, 35(7), 824-830.
- Serafim, A., Company, R., Lopes, B., Pereira, C., Cravo, A., Fonseca, V. F., ... & Cabral, H. N. (2013). Evaluation of sediment toxicity in different Portuguese estuaries: ecological impact of metals and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 130, 30-41.
- Teodorovic, I., Planojevic, I., Knezevic, P., Radak, S., & Nemet, I. (2009). Sensitivity of bacterial vs. acute *Daphnia magna* toxicity tests to metals. *Central European Journal of Biology*, 4(4), 482-492.
- Yang, X., Yan, J. I., Wang, F., Xu, J., Liu, X., Ma, K. E., ... & Ye, J. (2016). Comparison of organics and heavy metals acute toxicities to *Vibrio fischeri*. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 81(6), 697-705.

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

A két oxidációs állapot toxicitása bizonyítottan eltérő. Obiakor et al. (2021) tanulmányában két halfajon végzett teszteket (ausztrál sügér, *Macquaria novemaculeata* és ausztrál ezüstös sügér, *Bidyanus bidyanus*). Az LC₅₀ értékek a következők voltak: *M. novemaculeata*, Sb(III): 13,6 mg/L, Sb(V): 165,3 mg/L, *B. bidyanus*, Sb(III): 18 mg/L; Sb(V): ebben az esetben a maximális koncentráció sem érte el az 50%-os hatást. Ugyancsak jelentős különbségek mutatkoztak a bioakkumulációs potenciálban is, magasabb biokoncentrációs faktor értékek voltak jellemzőek az Sb(III) esetében, alátámasztva az Sb(III) magasabb biológiai hozzáférhetőségét.

A rendelkezésre álló szakirodalom alapján elmondható, hogy az Sb(III) nagyobb toxicitással rendelkezik, összehasonlítva több munka is foglalkozik vele, mint az Sb(V)-el (Lai és He 2025). Légköri mintákban kimutatható volt az Sb(III) magasabb részaránya, elsősorban méretfrakciótól függően. Iijima et al. (2010) szerint pl. finom frakcióban (0,5–0,7 µm) az Sb(III) koncentrációja 0,0008 ng/m³ míg az Sb(V) koncentrációja 0,15 ng/m³ volt, ugyanakkor a durva frakcióban (3,6–5,2 µm) az előfordulás kiegyenlítettebbnek mutatkozott, Sb(III): 0,44 míg Sb(V): 0,36 ng/m³. Lényeges kihangsúlyozni ugyanakkor, hogy környezetegészségügyi szempontból a finom frakció jelent magasabb kockázatot.

Kifejezetten antimon tartalmú műanyag hulladékok esetében Vogel et al. (2024) kimutatta, hogy étetéssel történő hulladékkezelés során az Sb(III)-ból oxidáció során Sb(V) tartalmú vegyületek keletkeznek. Ennek tükrében javasolható a két oxidációs állapot megoszlásának vizsgálata.

Hivatkozások

- Iijima, A., Sato, K., Ikeda, T., Sato, H., Kozawa, K., & Furuta, N. (2010). Concentration distributions of dissolved Sb (III) and Sb (V) species in size-classified inhalable airborne particulate matter. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 25(3), 356-363.
- Lai, Z., & He, M. (2025). Toxicity and related molecular mechanisms of Sb (V) in the embryos and larvae of zebrafish (*Danio rerio*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 305, 119194.
- Obiakor, M. O., Tighe, M. K., Pereg, L., Taylor, A. M., Maher, W., Krikowa, F., & Wilson, S. C. (2021). Sensitivity of freshwater australian bass (*Macquaria novemaculeata*) and silver perch (*Bidyanus bidyanus*) to waterborne antimony: exposure–dose–response characteristics and ion homeostasis. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 81(4), 621-636.
- Vogel, C., Scholz, P., Kalbe, U., Caliebe, W., Tayal, A., Vasala, S. J., & Simon, F. G. (2024). Speciation of antimony and vanadium in municipal solid waste incineration ashes analyzed by XANES spectroscopy. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26(4), 2152-2158.

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

Tentatív és óvatos. Az általam kidolgozott és többféle minta ill. szennyezés esetében sikeresen alkalmazott direkt kontakt teszt azt az expozíciós utat kívánja követni, amikor is a *V. fischeri* tesztbaktériumok közvetlen kontaktusba kerülnek a PM szemcsékkel és nyilvánvalóan az ezeken hordozott szennyező komponensekkel. Környezeti relevanciája éppen ezért kiemelten fontos, ugyanakkor rendkívül óvatosan kell értékelni bármiféle humán extrapolációt.

Több olyan munka is található, amely a *V. fischeri* tesztet szisztematikusan, több és többféle vegyi komponenst vizsgálva, összehasonlította egyéb toxikológiai és ökotoxikológiai tesztekkel. Kaiser (1998) a tesztet többféle halon végzett adatokkal vetette össze (pl. aranyhal, guppi, szivárványos pisztráng, zebradánió), amelyek nagyon jó korrelációt mutattak. Korai munkák szerint emlősökön (egér ill. patkány) végzett tesztekkel is jó korreláció mutatkozott (Kaiser et al., 1994).

Saját munkáink alapján jó korreláció mutatkozott az A549 humán alveoláris hámsejteken végzett citotoxicitás vizsgálatokkal. Egy frissen, 2026-ban megjelent cikkünkben különböző fafajták ill. műanyag hulladékok égetése során keletkezett emissziót vizsgáltunk. A *Vibrio* teszt jó korrelációt mutatott az Andersson et al. (2004) által kidolgozott kansperma teszt eredményeivel. Ez utóbbi egy olyan citotoxicitás teszt, amely során a végpont spermiumok életképességének, ill. mozgási aktivitásának a gátlása.

A felvetett kísérleti módszer (mesterséges tüdőfolyadék extrakcióval elvégezni a Flash tesztet) véleményem szerint olyan gyakorlati információt adhatna, amely jellemezheti, a tüdőben lezajló folyamatok milyen módon juttatják toxicitás szempontjából 'vizsgálható' állapotba a

szálló porból vett mintát, ilyen módon a lehető leginkább megközelítve azt az expozíciós utat, mely során a tüdőben a toxikus komponensek megjelennek. Ugyanakkor ismételten hangsúlyozom, tartózkodni kell direkt humán vagy emlős extrapolációtól.

Hivatkozások

- Andersson, M. A., Jääskeläinen, E. L., Shaheen, R., Pirhonen, T., Wijnands, L. M., & Salkinoja-Salonen, M. S. (2004). Sperm bioassay for rapid detection of cereulide-producing *Bacillus cereus* in food and related environments. *International Journal of Food Microbiology*, 94(2), 175-183.
- Kaiser, K. L., McKinnon, M. B., & Fort, F. L. (1994). Interspecies toxicity correlations of rat, mouse and *Photobacterium phosphoreum*. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 13(10), 1599-1606.
- Kaiser, K. L. (1998). Correlations of *Vibrio fischeri* bacteria test data with bioassay data for other organisms. *Environmental Health Perspectives*, 106(Suppl 2), 583.
- Kakasi, B., Varga, F. J., Tóth, Á., Jancsek-Turóczi, B., Hoffer, A., Nagy, S. T., Kováts, N., Hubai, K., Gelencsér, A. (2026). Toxicological characterization of flue gases from closed combustion of conventional solid fuels and co-burned plastic wastes. *Science of the Total Environment*, 1014, 181356.k

