

Válasz Dr. Nagy Attila Tibor, az MTA fizika tudományok doktorának bírálati véleményére

Őszinte köszönettel tartozom Dr. Nagy Attila Tibornak, amiért dolgozatom átolvasására és bírálatára jelentős időt és figyelmet fordított. Nagyra értékelem elismerő szavait, mellyel a disszertációm és kutatói tevékenységemet méltatta, valamint a kedvező összehasonlást tükröző értékelését. Hálásan köszönöm azokat az észrevételeket, kérdéseket és javaslatokat is, amelyek a dolgozat esetleges hiányosságaira rávilágítva további fejlődési irányokat mutatnak.

1. Történt-e hasznosítás, született-e szabadalom az alkalmazott eljárásokból?

Igen, történt hasznosítás. A 4 λ -PAS mérőrendszer prototípusát a Karlsruhe Institute of Technology, Institute of Meteorology and Climate Research, Atmospheric Aerosol Research (KIT IMK-AAF) megvásárolta, és azóta is sikeresen alkalmazza nemzetközi mérési kampányaiban. A piaci bevezetés további szélesítésének jelenleg legfőbb technológiai korlátját a mérőműszer fényforrásának összetettsége, valamint az egykamrás mérési elrendezésre történő átállás szükségessége jelenti. A kutatócsoport jelenleg ezen kihívások megoldásán dolgozik: a következő évben tervezzük bemutatni az új, független fényforrásokat és egykamrás detektálást alkalmazó, négy hullámhosszon mérő, továbbfejlesztett berendezést, amely jelentősen javítja a rendszer ipari és nemzetközi piaci hasznosíthatóságát.

2. Végeztek-e összehasonlító méréseket a 4 λ -PAS berendezéssel, történtek-e összehasonlító hibaelemzések különböző mérések eredményeinek feldolgozása során?

A 4 λ -PAS mérőrendszert a gyakorlati alkalmazások szempontjából kiemelt jelentőségű, filteren felhalmozott aeroszolok transzmissziós mérésén alapuló, hét hullámhosszú Aethalometerrel (AE33) számos hazai és nemzetközi mérési kampányban hasonlítottuk össze. Eredményeink az elsők között igazolták, hogy az Aethalometer adatkiértékelési protokolljában alkalmazott korrekciós faktorok hely-, idő- és hullámhossz-függők, így az irodalmi korrekciós értékek alkalmazása jelentős bizonytalanságot eredményez az optikai abszorpciók együtthatók meghatározásában.

Az eltérő mérési módszerekkel és eszközökkel végzett összehasonlító hibaelemzés kimutatta, hogy a mérési bizonytalanságok meghatározó része a terepi mérések során a légköri aeroszol-részecskék koncentráció-ingadozásából, valamint a mintavételi eltérésekből adódik.

Ugyanakkor a filteralapú transzmissziós mérőműszerek esetében a legnagyobb adatmegbízhatósági kockázatot nem a 10–20%-os mérési bizonytalanság, hanem a filteres mintavételből származó mérési artefaktumok jelentik. A filteralapú technikák mérési pontossága – az alkalmazott korrekciós faktorok és a mért aeroszol-összetétel függvényében – a valós értéket akár 2–4-szeresen is felülbecsülheti.

Az összehasonlító mérések egyértelműen megerősítik a tudományos közösségben régóta ismert tényt, hogy a filtermentes mintavételt alkalmazó fotoakusztikus mérési módszer jelenleg a legmegbízhatóbb méréstechnika a légköri aeroszokok abszorpciós spektrumának pontos és megbízható meghatározására. A 4λ-PAS mérőműszer mérési bizonytalansága a mintavételi körülményektől függően 5–10%, ami lényegesen kedvezőbb a filteralapú eljárásokénál, így kiemelkedő pontosságot és reprodukálhatóságot biztosít az aeroszokok optikai tulajdonságainak vizsgálatában.

3. *Az aeroszokkal foglalkozó tudományterületen az aeroszol definíció szerint a részecskék és az azokat tartalmazó közeg együttese (diszperz rendszer). Például a 22. oldalon is keverednek ezek a fogalmak (aeroszol, aeroszol részecske).*

Egyetértek azzal a meghatározással, hogy az aeroszol fogalma a diszpergált anyag és a környező gázfázis együttesét jelöli. A tudományos szakirodalomban azonban gyakran előfordul, hogy az „aeroszol” kifejezést kizárólag a diszpergált részecskékre alkalmazzák, ami terminológiai pontatlanságot és félreértéseket eredményezhet. Dolgozatomban ezért a fogalom egyértelműsítése érdekében túlnyomórészt az „aeroszolz részecskék” vagy „légköri aeroszolz részecskék” megnevezést használtam. Elismerem ugyanakkor, hogy néhány helyen – nem kellően következetesen – csupán „részecskék”-ként hivatkoztam ezekre.

4. *A 29. oldalon a vizsgálatokhoz használt műszerek felsorolásakor a szerző azt állítja, hogy egy Thermo-Scientific: model 5012 Multi Angle Absorption Photometer segítségével határozta meg az aeroszolelegy optikai abszorpciós együtthatóját 632 nm-es hullámhosszon. A gyártó adatlapja szerint a műszer 670 nm-es hullámhosszon dolgozik, de elérhető irodalmi adatok 637 nm-es valós hullámhosszról is. A 632 nm saját mérésen alapul?*

A Thermo-Scientific Model 5012 Multi Angle Absorption Photometer műszert Andreas Petzold (Institut für Physik der Atmosphäre, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Wessling, Németország) fejlesztette ki. Egy közös nemzetközi mérési kampány során Ő hívta fel a figyelmet arra, hogy a gyártó által megadott 670 nm-es gerjesztési hullámhossz érték nem helytálló, a készülék gerjesztő fényforrásának tényleges hullámhossza 637 nm. A dolgozatban

szereplő 632 nm-es érték elírás, a helyes adat az irodalomban is többször hivatkozott 637 nm. Mivel a légköri koromrészecskék optikai abszorpciójának hullámhossz-függése ezen a tartományon belül a hullámhossz inverzével arányosan változik, a 632 nm és 637 nm közötti eltérésből adódó abszorpciós együttható-különbség a mérési bizonytalanságon belül marad. Ennek megfelelően az elírás nem befolyásolja a mérési eredményekből levont tudományos következtetések megbízhatóságát.

5. *A 31. majd a 40. oldalon is használja a szerző azt a feltételezést, hogy Szegeden az egyedi fűtési módok között a fatüzelés dominál. Mivel tudná ezt alátámasztani?*

A feltételezést alátámasztják a KSH 2007. évi adatai, amelyek szerint Szegeden a lakosság körében kiemelkedően magas arányban alkalmaznak egyedi fűtést [KSH, 2007]. Bár az egyedi fűtési módokon belüli részletes megoszlásról nem áll rendelkezésre hivatalos statisztika, a költséghatékonysági szempontok alapján valószínűsíthető, hogy a fatüzelés a domináns fűtéstípus. Ezt a következtetést a mérések során megfigyelt rendkívül magas LG-koncentráció is megerősíti.

6. *Az AEE hullámhossztól függő változásait hullámhosszpárokon keresztül mutatja be a szerző. Mi alapján választotta ki a konkrét párokat (Pl. AEE1064-266 nm, AEE532-266 nm, AEE355-266 nm, AEE532-1064 nm, AEE266-532 nm)? Miért nem a szomszédos hullámhosszokat választotta?*

Teljes mértékben egyetértek a bíráló megállapításával, hogy azokban az esetekben, amikor az értekezésben nem a szokásos szomszédos hullámhosszpárokból származtatott AAE-értékek kerültek bemutatásra és elemzésre, indoklás megadása szükséges lett volna. Három ilyen eset azonosítható:

35. oldal, 4.1.1. ábra – A szövegben szereplő „AAE_{532-266 nm}” megjelölés elírás, helyesen AAE_{532-355 nm}.

47. oldal – Az AAE és az 1/EC₅₀ közötti összefüggést két szomszédos hullámhosszpárra (355–532 nm, 532–1064 nm), valamint a nem szomszédos 355–1064 nm hullámhosszpárra vizsgáltam. A legerősebb korrelációt ($R = 0,45$) a 355–532 nm-re találtam, amit a 4.2.5. ábra szemléltet. A 355–1064 nm hullámhosszpár esetében a korreláció gyengébb, de pozitív ($R = 0,31$). Ezt az AAE_{355-1064 nm} értéket azért mutattam be, mert e hullámhosszpárra is kimutatható pozitív kapcsolat, amit a szövegben külön is jelezni kellett volna.

79. oldal, 4.7.9. ábra – Itt szintén két nem szomszédos hullámhosszpárra (AAE1064–355 nm) számolt érték szerepel. Ennek oka, hogy a 266 nm-es fényforrás a mérési időszak alatt technikai okból nem állt rendelkezésre, továbbá a 355–1064 nm-re számolt AAE-értékek a 532–1064 nm és 355–532 nm hullámhossz pároknál erőteljesebb dinamikát mutattak. A választás tehát az összefüggések egyértelműbb bemutatását szolgálta, de ezt a dolgozatban magyarázatként fel kellett volna tüntetni.

Összességében elismerem, hogy a nem szomszédos hullámhosszpárok alkalmazását minden érintett esetben kifejezetten indokolni kellett volna, a tudományos következetesség és az értelmezhetőség biztosítása érdekében.

7. A 32. oldalon a 4.1.2. ábrán bemutatott eredmény számomra meglepő, legalábbis a CMD20 módus ilyen markáns jelenléte, amely sokszor nukleációs esemény vagy más friss részecskeképződés során szokott jelen lenni. A szerző leírja, hogy számos korábbi tanulmány igazolta, hogy városi és télies körülmények között a CMD20 módusba eső részecskék frissen emittált dízel korom aeroszolokhoz köthetők. Ugyanakkor más tanulmányok azt mutatják, hogy a dízel korom mérete még a kipufogó rendszerben lezajló koagulációs és aggregációs folyamatok miatt inkább a 80-100 nm-es tartományba esik. Kérem kommentálja ezt.

Teljes mértékben egyetértek a bíráló megállapításával, hogy a 4.1.2. ábrán bemutatott CMD20 módus, amely jellemzően nukleációs eseményekhez vagy más friss részecskeképződéshez köthető, a dolgozatban részletesebb magyarázatot igényelt volna, amikor annak dinamikáját a közlekedési aktivitással hoztam összefüggésbe.

A szakirodalom ugyanakkor egyértelműen alátámasztja, hogy téli, inverziós körülmények között – alacsony hőmérséklet és stabil légköri rétegződés mellett – a kibocsátó forráshoz közel a frissen emittált dízel koromrészecskék számkoncentráció szerinti modális átmérője (CMD) jellemzően 15–40 nm közé esik. *Wehner és Wiedensohler (Atmos. Chem. Phys., 3, 867–879, 2003)* Lipcsében négy éven át vizsgálták a légköri aeroszol méreteloszlását, és kimutatták a bimodális szerkezetet: az alsó módus számkoncentráció szerinti modális átmérője 20 nm körül jelentkezett, dinamikája a közlekedési aktivitással arányosan változott, amit a hétvégi adatok kisebb ingadozása is megerősített. *Zhu és munkatársai (Atmos. Environ., 40, 695–706, 2006)* Los Angelesi téli méréseiben a forgalmi forráshoz közel 20–40 nm CMD-t talált, amely a légköri keveredés és koaguláció hatására csak több száz méteres távolságban nőtt 40–80 nm-re. *Harris et al. (Atmos. Chem. Phys., 15, 12181–12194, 2015)* szintén téli városi környezetben dokumentált 25–35 nm-es domináns módust közvetlen dízelemisszió mellett.

Ezek az eredmények megmagyarázzák, hogy egyes tanulmányok – különösen forrásközei, téli, stabil légköri környezetben – 20 nm körüli friss emissziós módust azonosítanak, míg más vizsgálatok – főként háttérállomásokon vagy hosszabb atmoszferikus tartózkodási idő után – a 80–100 nm-es mérettartományt találják jellemzőnek.

Saját mérési eredményeim is összhangban állnak ezekkel a megfigyelésekkel. A télies körülmények között a CMD20 módus napi dinamikája egyértelműen a közlekedési aktivitással mozog együtt, míg a nagyobb, például CMD100 módus változása nem korrelál a forgalmi ritmusokkal, hanem sokkal inkább a napi ingadozást alig mutató fűtési forrásokhoz köthető (4.1.3. ábra). Ezt a forrás-megkülönböztetést erősíti, hogy a módusok teljes számkoncentrációjának aránya az EC/OC, az LG/TC és az AAE értékekkel arányosan változik (4.2.1. és 4.2.2. ábra).

E következtetéseket a közelmúltban általam publikált összehasonlító forrásazonosító modellek elemzése, amely ugyanazon adatbázis felhasználásával az Aethalometer és továbbfejlesztett fotoakusztikus (PA) forrásazonosító modellel alapján végzett számításokat is alátámasztja. Ezek az eredmények nagyfokú egyezést mutatnak, még úgy is, hogy az Aethalometer modelben az AAE_{kl} és az AAE_{ft} értékek meghatározásához nem, míg a PA modellben alkalmazott számításhoz a móduskoncentrációk és a mért AAE értékek közötti, általam feltárt összefüggéseket használtam fel (Gombi, C., Rahman, A., Hodovány, S. et al. *A demonstrative study of a novel approach for spectral based source apportionment of ambient aerosols*. *Sci Rep* 15, 19501 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04022-3>).

Összességében megállapítható, hogy a CMD20 módus téli, forrásközei környezetben dízel eredetű friss emisszióval is magyarázható, jöllehet a hozzá tartozó részecskék pontos forrás-összetétele továbbra is intenzív vita tárgya a szakirodalomban. Ez a válasz tudományosan alátámasztja a dolgozat eredeti megközelítését, ugyanakkor elismeri, hogy a dolgozatban a CMD20 módus forrásmagyarázatát célszerű lett volna részletesebben kifejteni.

8. Az 53-54. oldalon mekkora becsült hibát okozhat a fajlagos abszorpció és szórás együtthatók meghatározásában a gömbalak közelítés?

Köszönöm a bíráló kérdését. A szakirodalom számos helyen hangsúlyozza, hogy a fraktál és a gömbi morfológiájú koromrészecskék spektrális optikai tulajdonságai jelentősen eltérhetnek, és az eltérés mértéke több tényezőtől függ, mint például a fraktáldimenzió, a keveredési geometria, a hullámhossz, illetve a méretparaméter ($x = 2\pi r/\lambda$) stb.

Sorensen, C. M. (2001). *Light scattering by fractal aggregates: A review. Aerosol Science and Technology*, 35(2), 648–687

Liu, D. et al. (2018). *Black-carbon absorption enhancement in the atmosphere determined by particle mixing state. Nature Geoscience*, 11, 184–188

Elméleti számítások igazolták, hogy a térfogategyenértékű Mie-gömb közelítés a frissen emittált, jellemzően $D_f \approx 1.7\text{--}2.1$ fraktáldimenzióval rendelkező korom aeroszolrészecskék esetében a fajlagos abszorpciót a látható tartományban mintegy 10–30 %-kal alul-, míg részlegesen kompaktált, öregedett részecskék esetében 0–40 %-kal felülbecsülheti

Adachi, K., Chung, S. H., & Buseck, P. R. (2010). *Shapes of soot aerosol particles and implications for their effects on climate. Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D15)

Kahnert, M., Nousiainen, T., & Lindqvist, H. (2012). *Review: Model studies on light scattering by soot aggregates. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 113(18), 2352–2367

Liu, S. et al. (2015). *The impact of mixing state and morphology on the hygroscopic growth of black carbon particles. Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 2019–2039

A szórási koefficiens tekintetében a gömbi közelítés – mind frissen emittált, mind öregedett koromrészecskék esetén – általánosan 20–50%-os túlbecslést eredményezhet a látható hullámhosszakon:

Kahnert, M., Nousiainen, T., & Lindqvist, H. (2012). *Review: Model studies on light scattering by soot aggregates. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 113(18), 2352–2367.

Fontos ugyanakkor kiemelni, hogy a mérések során nem egyedi részecskék optikai válaszát, hanem nagyszámú, különböző karakterisztikus méretű, véletlenszerűen orientált és a mintavétel időtartama alatt folyamatosan változó orientációjú részecskék átlagos abszorpciós és szórási koefficiensét határozzuk meg. Ez a tényező a konkrét hibabecslést jelentősen megnehezíti, és várhatóan szűkíti az egyedi részecskére számított hibahatárokat

Lack, D. A., & Cappa, C. D. (2010). Impact of brown and clear carbon on light absorption enhancement, single scatter albedo and absorption wavelength dependence of black carbon. Atmospheric Chemistry and Physics, 10, 4207–4225

Liu, D. et al. (2018). Black-carbon absorption enhancement in the atmosphere determined by particle mixing state. Nature Geoscience, 11, 184–188

További bizonytalansági forrást jelent, hogy adott fraktálparaméterek – például fraktáldimenzió, girációs rádiusz, elsődleges részecskeátmérő és monomerszám – többféle geometriai konfigurációban is előállíthatók, így önmagukban nem határozzák meg egyértelműen a részecske spektrális válaszát.

Munkacsoportunk jelenleg is végez nagy számítási igényű modellezési vizsgálatokat, amelyek célja, hogy különböző térfogat és felületorientált modellek alkalmazásával számszerűsítsük az egyes fraktálparaméterek változtatásának a spektrális válaszra gyakorolt hatását, valamint az ezekhez a paraméterhálókhoz kapcsolódó bizonytalanságokat, és összevessük az egyenértékű gömbi közelítés eredményeivel. A számítások egyik fontos célkitűzése annak becslése, hogy valós kísérleti körülmények között egyáltalán kimutatható-e a gömbi és a fraktál morfológiájú részecskék spektrális válasza közötti különbség?

9. *Az ábrák időnként kissé homályosak, ami nehezíti az olvasást, főleg a kisebb tengelyfeliratok esetében.*

Teljesen egyetértek a bírálóval. Néhány ábra esetén nagyobb figyelmet kellett volna fordítanom az ábrák és az ábrafeliratok minőségére.



