

Opponensi vélemény

Nagy Attila:

OPTIKAI MÓDSZEREK ALKALMAZÁSA DISZPERZ RENDSZEREK VIZSGÁLATÁRA

című MTA doktori értekezéséről

A cím lehetne konkrétabb, mivel a cím alapján úgy tűnik, ez inkább egy összefoglaló monográfia, mint saját kutatás ismertetése. A bevezetőben leírt mondat is „*Disszertációm diszperz rendszerek vizsgálati módszereiről ad egy áttekintést...*” mintha arra utalna, hogy ez egy módszertani összefoglaló mű, nem saját eredmények ismertetése lenne. A disszertációt tovább olvasva azonban megnyugszik a bíráló, van benne saját vizsgálat, saját eredmény bőven.

A disszertáció négy, különböző, egymástól független vizsgálat eredményeit foglalja egybe (2.-5. fejezetek). Mind a négy témánál külön-külön tárgyalja a probléma felvetést, a célokat, a módszertant, az eredményeket és az összegzést. Nem alkot egy koherens rendszert, ami nem szokványos a doktori értekezésekben, de nem is üldözendő. Talán emiatt sem lehetett volna konkrét címet adni, túl hosszú lett volna. A dolgozat tehát tulajdonképpen 4 darab mini disszertációnak is felfogható, egy kötetben (fájlban).

A fejezetenként, egyenként részletezett áttekintés, probléma feltevés, célok, megvalósítás, értékelés, összegzés részek logikus sorrendben követik egymást, jó áttekintést nyújtanak az elvégzett kutatásokról. E fejezetek teszik ki a dolgozat érdemi részét, ami 108 oldal, egyenként 23-33 oldal terjedelemmel. Az egész dolgozat terjedelme, mindennel együtt összesen 139 oldal. A nagyszámú irodalomjegyzék 204 hivatkozást tartalmaz. A dolgozat felépítése megfelelően arányos terjedelmű részeket tartalmaz.

Általában véve a vizsgálatokhoz alkalmazott eszközök – mind a kereskedelemben kaphatók, mind a saját fejlesztésűek – módszertanilag megfelelőek. Megjegyzendő, hogy igen nagyszámú kísérleti berendezés lett bevetve, tekintettel arra, hogy a munka többféle aspektusból kívánta az aeroszol részecskéket vizsgálni. Ez feltételezhetően rengeteg technikai munkával járt. Jelölt nem csak a mérés-technika területén, hanem az elméleti számítások, modellezések síkján is jártas, a vizsgálatok – ahol szükséges – alapos, megfelelő számítási, modellezési háttérrel vannak alátámasztva.

Az ábrák, táblázatok szemléletesek, jól szerkesztettek, informatívak. A dolgozat stílusa jó, fogalmazása könnyen olvasható. Helyesírási, elütési, stilisztikai hiba csak elvétve található, kivéve az egybe-külön problémával kapcsolatban, abból viszont sokkal több van. Pl. „*angolnyelvű*” „*széleskörben*” „*aeroszolmintán*”, „*vezeték nélküli*” de ezek legalább konzekvensen, mindenütt egybe vannak írva. Így jönnek létre azután ilyen szörnyek, mint pl. a *fluoreszcenciaintenzitás-fluktuáció*.

A következőkben, a dolgozat szerkezetéhez hasonlóan, a munkát fejezetenként értékelem, a kérdéseket is ott teszem fel.

Az első részben

(2. fejezet) laboratóriumi kísérleti berendezést hozott létre az aeroszol részecskék méreteloszlásának és komplex törésmutatójának egyidejű, gyors mérésére. Laboratóriumi kísérletekkel igazolta, hogy a javasolt módszer alkalmazható, és 10%-os hibahatáron belül képes meghatározni a tesztrészecskék méretét, és 15%-on belül a komplex törésmutatójának valós és képzetes részét. Ezek az értékek, figyelembe véve a szakterületen alkalmazott mérés technikák közti, néha 2-es faktorú különbséget, jónak mondható. Mérési kampányokban is alkalmas a kifejlesztett módszer az aeroszol részecskék abszorpciós tulajdonságainak vizsgálatára városi környezetben. A mérőberendezés, illetve a módszer kidolgozása figyelemre méltó eredmény, számos területen alkalmazható.

Megjegyzések, kérdések:

A 2.18 ábra bal oldali részén először is az látható, hogy az abszorbeáló részecskék arányát elsősorban a szubmikron részecskék határozzák meg. Ami teljesen nyilvánvaló, hiszen a 0,6-1,0 mikrométer közötti szubmikron tartományba eső részecskék száma jóval nagyobb az a fölöttikénél. Másrészt a szubmikron részecskék számbeli aránya nagyságrendi változást mutat a vizsgált fél hónap alatt. Az első két és fél nap után ugrásszerű változást látunk, aminek nyilván van valami fizikai oka. Jelölt elsősorban a részecskék öregedését okolja, azonban ez nem túl meggyőző, mi indokolná az „öregedési” folyamatok ugrás szerű változását, Inkább a források különbözőségére kellene gyanakodni? Ami egyébként említve is lett. Fontos információ lehetett volna az ábrán az abszolút számbeli koncentráció menete mindhárom mérettartományban, vagy utalni a 2.21. ábrára ez ügyben.

A második részben

(3. fejezet) jelölt arra a kérdésre keresi a választ, hogy mennyiben alkalmazhatók optikai mérési módszerek az aeroszokok egészségi hatásainak meghatározására, optikai módszerekkel. Mégpedig: a) hogyan befolyásolja az egészségügyi dolgozók napi tevékenysége a részecskék koncentrációját és méreteloszlását egy kórteremben; b) indokolt-e az aeroszol képződéssel járó légzésfunkciós és bronchoszkópos vizsgálatok korlátozása, a megfertőződés veszélye miatt? Érdekes újszerű vizsgálatokat és megállapításokat tesz, ami különösen a Covid óta kiemelt figyelmet érdemel. Ugyancsak vizsgálja az adagolandó gyógyszerek méreteloszlását, ami lényeges szempont a gyógyszerek célterületre juttatásakor.

Megjegyzések, kérdések:

E fejezetben a tudományos előzmények túl részletesek, a trivialisokat el lehetett volna hagyni.

A 40. oldalon említett Mie-elmélet szerinti méret korrekció hogyan történt? Kicsit részletesebben kéne ismertetni a számításokat.

A 40. oldal alján írja „*a légutakban keletkező részecskéknek nemcsak az optikai tulajdonságaik, hanem a sűrűségük is eltér a PSL részecskékétől, ... irodalmi adatok alapján ez a sűrűség 1,7 g/cm³*” Az oldal tetején pedig ez áll: „*légzőrendszerből kilépő részecskék ... általában szerves és szervetlen oldott anyagok híg izotóniás vizes oldata... melynek optikai tulajdonságai közel állnak a vízéhez*”. Létezik, hogy egy híg izotóniás oldatnak ilyen nagy sűrűsége legyen?

Hogyan határozta meg a 3.5. ábrán látható hullámformát irodalmi adatok alapján?

Ebben a fejezetben elég sok a feltételezés és empiria, emiatt az eredmények félkvantitatívnak tekinthetők, ennek ellenére ezek hasznos információk.

A 3.7 ábra függőleges tengelye csak erős jóindulattal nevezhető koncentrációnak, mivel ez térfogatarány.

A harmadik részben

(4. fejezet) jelölt célja az irányított energiadepozíciós technikán alapuló, por alapú 3D fémnyomtatás közben, az intenzív lézerfény-fém kölcsönhatás során levegőbe jutó aeroszol részecskék fizikai és kémiai tulajdonságainak meghatározása, mennyiségi és minőségi analízise. Meghatározta a nyomtatás során felszabaduló részecskék méreteloszlását, szám- és tömeg-koncentrációját, analizálta a részecskék morfológiai tulajdonságait, valamint meghatározta a részecskék elemi összetételét különböző méretfrakcióban. Továbbá egy analitikai modellel leírta a koncentráció időbeli változását is. Újszerű, figyelemre méltó eredmények, amik aláhúzzák a fémszennyezés elleni védekezés szükségességét s.

Megjegyzések, kérdések:

A 72. oldalon leírt kaszkád impaktoros mintavételnél volt-e back-up filter a 70 nm-nél kisebb részecskék felfogására? A 83. oldalon említi, hogy az egyedi részecskék mérete jóval az impaktor alsó mérethatára (70 nm) alatt van, vannak 10-20 nm közötti átmérőjű részecskék.

Ugyanezen oldalon a: „Továbbá egy zárt térben nem elhanyagolható mértékű veszteségeket okoz a falra és egyéb tárgyakra történő kiülepedés és a részecskék aerodinamikai méretétől függő gravitációs kiülepedés sem.” mondat értelmezhetetlen, talán, ha a *sem* helyett *is*-t íránk?

A 4.1 egyenletben a κ kiülepedési együttható a részecskeméret függése el lett hanyagolva. Milyen hibát okoz ez a becslésekben, tekintettel arra, hogy a méret függvényében jelentősen változik κ értéke. Gondolva, hogy részecske halmaz nem monodiszperz, ahogy 4.5 formula alatt meg is lett említve. Ráadásul a méret még az időben is változik, l. 4.8 ábra.

A negyedik részben

(5. fejezet) jelölt célja egy olyan mérési protokoll kidolgozása és kísérleti igazolása volt, amely valós fizikai modellek alapján veszi figyelembe a gerjesztési szaturáció hatását, és a mindennapi labormunka során is rutinszerűen alkalmazható. Fluoreszcens molekulák kétállapotú modelljéből kiindulva meghatározta az érzékelő térfogat alakjának és méretének változását magasabb gerjesztési szinteken, mind egy-, mind kétfotonos gerjesztés esetére. Meghatározta a térfogat fenti változásának hatását a fluoreszcencia fluktuációs spektroszkópiai mérések során felvett korrelációs görbékre, továbbá meghatározta a korrelációs függvény amplitúdójának és relaxációjának skálázási paramétereit, ami alapján új mérési, adatkiértékelési és kalibrációs eljárást dolgozott ki. Az eljárást kísérletekkel tesztelte.

Újszerű, jó ötletek megvalósításával született tudományos eredmények születtek úgy tűnik, a fluoreszcencia mérések egy új paradigmája körvonalazódott.

Megjegyzések, kérdések:

Szerintem az 5.1 fejezet, ami az elméleti, tudományos háttérrel írja le, indokolatlanul hosszú (14 oldal) már-már tankönyv szerű. Érdemesebb lett volna a munkához szorosan kapcsolódó lényegét néhány oldalban leírni.

A 105. oldalon említi, hogy a mérések hibáit az irodalomban található módszerekkel határozta meg. Ezeket röviden meg kéne említeni. Konkrétan, röviden ezek milyen módszerek voltak?

Az ezen az oldalon említett rezisztivitás ugye fajlagos ellenállást jelent?

Általános megjegyzések:

Egy angol és egy magyar nyelvű, 1-1 oldalas összefoglaló nem ártott volna.

A dolgozatban szereplő mondat miszerint „**Egyes prognózisok szerint az üvegházhatású gázoknak nagy szerepe van a globális éghajlatváltozásban...**” így olvasva azt sugallja, hogy ez az elmélet szórványos. Ezzel ellentétben a tudományos közösség túlnyomó többsége bizonyítottan tekinti a korábbi hipotézist.

Az aeroszol jelentőségénél meg lehetett volna említeni legjelentősebb szerepét, nélküle nem lenne felhő és csapadékképződés (és mi sem).

A jelölések jegyzékében M nem a tömegkoncentrációt (g/dm^3), hanem az anyagmennyiség koncentrációt jelenti (molaritás, mol/dm^3).

A 2.1 ábrához: általában 3 részecske módust különböztetnek meg: nukleációs, akkumulációs és durva módust. Az Aitken inkább egy tartományt jelent, és kissé archaikus.

12. oldal „szűrőpapírra kiüledő mintán...” cellulóz szűrő esetén igaz, bár a papír kifejezés nem szakszerű, de pl. kvarc, vagy Teflon szűrők kevésbé nevezhetők papírnak.

49. oldal: „A betegek vizsgálatát a kabinon kívül álló technológus végezte...” kicsit furcsa, újabban a betegek vizsgálata egy gyártási folyamat? Sok helyen használja a technológia kifejezést technika, vagy műszaki értelemben, ami ugye az angol tükörfordítás miatt sajnos elterjedt, kiszorítva az általánosabb jelentésű technika szavunkat, ezáltal szegényítve a szókincsünket.

Általános kérdés:

Szabadalmaztatta-e a saját fejlesztésű műszereket és ha nem, meg lehet-e tenni ezt a jövőben?

TÉZISEK

Jelölt a [TX] jelölés szerint 16, az [X.X.] jelölés szerint 14, az [X.]+[X.X.] jelölés szerint 19 tézispontban foglalta össze eredményeit. Ez egy kicsit sok, össze lehetett volna vonni több, egymással szoros összefüggésben álló tézispontot. Még így is maradt volna 6-7, ami egy disszertációban több mint elég. Tulajdonképpen nem tudtam eligazodni, hogy pl. az 1. bekezdés

az 1.1.-1.2.-1.3. pontok preambuluma, vagy önálló tézispont mindegyik. Így csak az X.X. számozású, részletes pontokat értékeltem.

1.1. Kidolgozott egy, az aeroszol részecskék méretét és komplex törésmutatóját egyidejűleg meghatározó módszert. Modellszámításokkal is igazolta, hogy az új módszer a 10%-os hibahatáron belül képes meghatározni a tesztrészecskék méretét, és 15%-on belül a komplex törésmutatójának valós és képzetes részét.

*Ez inkább műszaki fejlesztés, de tézisnek **elfogadható**.*

1.2. A műszerrel végzett terepi mérések során a méreteloszlásra és a számszerinti koncentrációra kapott eredmények jó egyezést mutattak a kalibrált, referenciaműszernek használt optikai részecskeszámláló adataival az átfedő mérettartományban (0,6–5 μm , $r = 0,95$, $p < 0,05$). A szubmikrométeres tartományban erős korrelációt tapasztalt az optikai részecskeszámláló és az aethalométer koncentrációadatai között ($r = 0,74$, $p < 0,05$), ami arra utal, hogy ebben a mérettartományban jelentős mennyiségű abszorbeáló anyag van, amelynek nagy része égéstermékekből származik.

*Utóbbi eddig is tudtuk, de megnyugtató, hogy megint sikerült bizonyítani. A műszer validálása terepi mérésekkel része a műszaki fejlesztésnek, **elfogadható**, bár egyszerűbb lett volna összevonni 1.1.-gyel, így a tézisek jelentős száma is csökkent volna.*

1.3. A mérések során az abszorpcióra kapott eredményekre vonatkozóan jó egyezést tapasztalt az irodalomból vett, valamint a fotoakusztikus spektrométerrel és az aethalométerrel mért adatokkal. Voltak időszakok, amikor az aethalométer fekete korom koncentrációs adatsorai erős korrelációt mutattak az aeroszolanalizátorral meghatározott abszorbeáló részecskék koncentrációval ($r = 0,83$, $p < 0,05$), míg a teljes adatsorra közepesen erős korrelációt tapasztalt ($r = 0,53$, $p < 0,05$). Megállapította, hogy a részecskék méreteloszlása, koncentrációja és optikai tulajdonságai a hőmérséklet és a páratartalom mellett függenek az aktuális széliránytól is, amit visszavezetett a különböző jellegű területeken (kertvárosi környezet, forgalmas útvonal, belvárosi régió) jelenlévő eltérő források hatására. Az aeroszol analizátor által meghatározott átlagos abszorpció (a törésmutató képzetes része) 0,7 körül ingadozott, ami jó egyezést mutat a 0,8-as irodalmi értékkel.

*Ez egy többsíkú tézispont, érinti a műszerek interkalibrációját, ami inkább az előző pontokhoz tartozik. Másrészt érinti a részecske karakterisztikák és a környezeti faktorok közti kapcsolatot, ami nem újdonság. Az abszorpcióra vonatkozó eredmények **elfogadhatók** akár tézispontként is.*

1.4. A kifejlesztett módszer alapján megépített berendezés több aeroszolvérő műszer kiváltására alkalmas (optikai részecskeszámláló, aethalométer, kaszkád impaktor, nefelométer), mivel rövid mintavételezési idővel méri egyidejűleg az aeroszol részecskék négy független paraméterét, így azok a méret és az optikai tulajdonságok függvényében is vizsgálhatók. A kifejlesztett új módszer és berendezés alkalmas a különböző aeroszolfrakciók eredetének és forrásainak a vizsgálatára is.

*Ez egy lényeges tézispont. Elég lett volna 1-4 összevonásával egy műszaki fejlesztési és alkalmazási önálló tézis, de tulajdonképpen így is megállja a helyét, **elfogadható**.*

2.1. A kórteremben optikai mérési módszerek alapján megállapította, hogy a szubmikronos részecskék számának növekedése a különböző beteg- és egészségügyi dolgozói tevékenységek eredményeként nem korrelált a kórteremben tartózkodó személyzet létszámával, és csak gyenge

és nem szignifikáns ($p > 0,05$) korrelációt mutatott a tevékenység időtartamával. Ezzel szemben a nagyobb részecskék ($> 1 \mu\text{m}$) számának növekedése közepesen erősen korrelált a kórteremben levők számával ($r = 0,66$, $p < 0,05$) és erősen korrelált a tevékenység időtartamával ($r = 0,82$, $p < 0,05$).

*Fontos újszerű eredmény, különösen a Covid-19 megjelenése óta került ez a téma a figyelem fókuszába, **elfogadható**.*

2.2. A tüdőgyógyászati diagnosztikában kiemelt jelentőséggel bíró légzésfunkciós és bronchoszkópos vizsgálatok és kezelések alatt végzett mérések alapján megállapította, hogy a tevékenységek során a levegőbe kerülő részecskék **literenkénti száma nagyságrendileg hasonló** a normál légzés vagy beszéd során kibocsátott részecskekoncentrációhoz. Megállapította továbbá, hogy a méreteloszlásuk is hasonlóan alakult, és a részecskék több mint 97%-a szubmikronos méretű. Megfigyelte, hogy a részecske kibocsátás jelentős egyéni varianciát mutat, és nem, vagy csak gyengén függ a vizsgálat típusától. Megállapította, hogy a megfertőződés kockázata nem indokolja a vizsgálatok mellőzését, azok a megfelelő biztonsági protokollok betartása mellett elvégezhetők.

*Hozzátenném, hogy a részecskéknek valószínűleg nem csak a literenkénti száma, hanem köbcentiméterenkénti, vagy köbméterenkénti száma is ugyanúgy hasonlítana. Egyébként l. az előző 2.1-hez írt véleményemet, jelenős új eredmény, **elfogadható**.*

3.1. Újonnan fejlesztett optikai mérési módszerekkel vizsgálta a részecskék légúti kiülepedési tulajdonságokat meghatározó méreteloszlását valós légzési mintázatok esetén, és megállapította, hogy a tömeg szerinti medián aerodinamikai átmérőjük és diszperziós tulajdonságuk alapján alkalmasak a célterületre, a tüdő mélyebb régióiban található alveolusokba történő hatékony eljuttatásra. Az általa meghatározott MMAD értékek és a méreteloszlások jó egyezést mutattak a gyógyszeriparban szabványos impaktoros mérések eredményeivel. A módszer hatékonyan alkalmazható az aeroszol gyógyszerek méreteloszlásának optimalizálása, valamint a tüdőben kiülepedő dózisok kontrollálása során, és a hagyományos eljárásokkal szemben számos előnnyel rendelkezik.

*Ez szintén egy lényeges, fontos műszeres fejlesztés és annak bizonyítása, hogy a módszer alkalmas klinikai alkalmazásra, **elfogadható**, a 3.2. ponthoz írtak figyelembevételével.*

3.2. Kísérleti úton meghatározta két szárazpor gyógyszer részecskéinek méreteloszlását a belégzési paraméterek függvényében. Megállapította, hogy az MMAD $\sim 3 \mu\text{m}$ és $1,6 \mu\text{m}$ között változik, és a maximális belégzési légáram és a belélegzett levegőmennyiség növekedésével csökken. Az MMAD értéke egy idealizált felső légúti modell után mérve $\sim 10\%$ -kal csökkent. Megállapította, hogy a belégzés hossza csak kis mértékben befolyásolja az MMAD értékét, a meghatározó faktorok a maximális belégzési légáram és a belélegzett levegőmennyiség, melyek között erős korrelációt tapasztalt.

*Ez a tézisponst szorosan összefügg az előzővel, a kettő együtt egy tézispontként **elfogadható**.*

4.1. Pásztázó mobilitási részecskeméret-mérő berendezéssel végzett mérések alapján megállapította, hogy az additív technikát alkalmazó 3D fémnyomtatás közben az újonnan képződő részecskék többsége az ultrafinom tartományban van, és a részecskeokaság koncentrációja és jellemző statisztikai mutatói egy viszonylag szűk sávban mozognak, kevésbé függenek a felhasznált fémpor anyagi minőségétől. A termikus koagulációt és a részecskék határfelületekre történő gravitációs és diffúziós kiülepedését figyelembe vevő analitikai modellt

alkalmazva leírta a koncentráció időbeli változását a nyomtatás közben és után. Az alkalmazott modell jó egyezést mutatott a kísérleti úton kapott eredményekkel. A pásztázó elektronmikroszkópos felvételek alapján végzett morfológiai vizsgálatok megerősítették, hogy az újonnan keletkezett részecskék 10 nm körüli méretű, gömb alakú elsődleges részecskékből összeállt aggregátumok, illetve agglomerátumok.

Lényeges új megállapítás, elfogadható.

4.2. Aerodinamikai részecskeszámlálóval végzett mérésekkel megállapította, hogy az újonnan keletkezett ultrafinom méretű aeroszol részecskék mellett sok esetben kimutatható egy a finom vagy a mikronos tartományba eső aeroszol módus is. Ezen módus részecskéi vagy közvetlenül az olvadt fémből keletkeztek, vagy már eleve jelen voltak a fémporban, és vagy a poradagolóban, vagy pedig a lézerfényvel való interakció során váltak le a hordozó porszemcsékről. Ezeknek a részecskéknél a koncentrációja lényegesen kisebb a keletkező ultrafinom részecskék számszerinti koncentrációjánál, azonban azzal összehasonlítható tömeget képviselnek. A fentieket a pásztázó elektronmikroszkópos felvételek alapján végzett morfológiai vizsgálatok is megerősítették, melyek szerint az aeroszol minták tartalmaztak nagyobb méretű (0,2–10 μm) gömb alakú részecskéket is, melyek összetétele jó közelítéssel megegyezett a kiinduló por összetételével.

Lényeges új megállapítás, elfogadható.

4.3. Pásztázó elektronmikroszkóppal és energiadiszperzív spektroszkópiával végzett vizsgálatok alapján megállapította, hogy a keletkezett 10 nm körüli részecskék és az ezekből képződő aggregátumok/agglomerátumok elemösszetétele megváltozott a kiindulási anyagéhoz képest. A nikkel alapú ötvözetek esetében az aeroszolban mért nikkel-króm arány megfordult az eredeti fémporhoz képest, és bár a mangán mennyisége az eredeti kiindulási porban a kimutatási határérték körül vagy az alatt volt, a lézerrel való interakció során jelentős mennyiség szabadult fel.

Rámutatott az illékonyással kapcsolatos szilárd/gőz összetétel közti különbségre, lényeges új megállapítás, elfogadható.

5.1. Fluoreszcens molekulák kétállapotú modelljéből kiindulva meghatározta az érzékelési térfogat alakjának és méretének változását magasabb gerjesztési szinteken, mind egy-, mind kétfotonos gerjesztés esetére. Megállapította, hogy a mérési térfogat a szaturációs intenzitás környékén növekvő gerjesztési intenzitás mellett emelkedni kezd, míg a fluoreszcencia intenzitása csökken a szaturáció hatását figyelembe nem vevő modellhez képest. Numerikus számításokkal meghatározta a térfogat fenti változásának hatását a fluoreszcencia fluktuációs spektroszkópiai mérések során felvett korrelációs görbékre, és megállapította, hogy a korrelációs görbék amplitúdója csökken, míg relaxációs ideje nő a gerjesztő intenzitás növelésével.

L. 5.3.-hoz írt megjegyzésemet.

5.2. Meghatározta a korrelációs függvény amplitúdójának és relaxációjának skálázási paramétereit, ami alapján új mérési, adatkiértékelési és kalibrációs eljárást dolgozott ki. Az új modell, a szaturációs intenzitás bevezetésével figyelembe veszi a gerjesztési szaturáció hatását is a mért korrelációs függvény alapján számolt paraméterekre.

L. 5.3.-hoz írt megjegyzésemet.

5.3. Konfokális és kétfotonmikroszkóppal végzett kísérletekkel kimutatta, hogy a modellel kapott eredmények a gerjesztési intenzitásnál magasabb intenzitásokon is a valós fizikai folyamatokat tükrözik, vagyis a gerjesztett molekulák száma és diffúziós állandójuk nem függ a gerjesztési intenzitástól.

*Mivel 5.1, 5.2. és 5.3. módszertanilag hasonló, ezeket nem tekinteném önálló tézispontoknak, így összevonva megállapítható, hogy jelentős, újszerű módszerfejlesztési, és modellezési, kutatási eredményeket közölnek, **elfogadhatók**.*

Összegzésképpen

elmondható, hogy Nagy Attila összefoglaló, sokrétű munkája reális koncepciókon alapul. Megvalósítása során komoly műszerezettség került bevetésre, erős elméleti háttérrel megalapozva. Kutatásai jelentős, új eredményeket hoztak, nem beszélve a műszerfejlesztési sikerekről. Eredményeit megfelelően összefoglalja, ismerteti disszertációjában, téziszüzetében. Apróbb megjegyzéseim a disszertáció értékét, jelentőségét, hatását nem befolyásolják, a dolgozat színvonala és teljesítménye kielégíti az MTA doktora megszerzéséhez elvárt követelményeket. Ennek alapján:

javaslom a védés megtartását és Nagy Attila számára az MTA doktora cím odaítélését.

Szeged, 2023-11-12

Prof. Dr. Bozóki Zoltán