

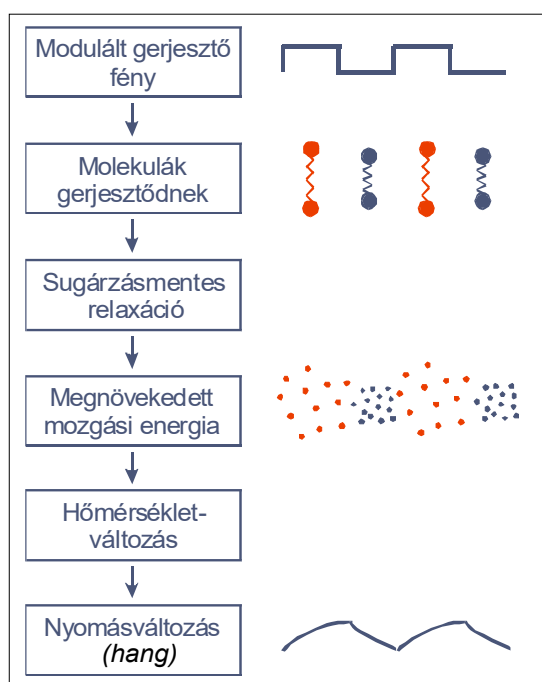
# FOTOAKUSZTIKUS GÁZ- ÉS AEROSZOLDETEKTÁLÁS – A FIZIKAI ALAPOKTÓL A GYAKORLATI ALKALMAZÁSOKIG

Bozóki Zoltán

Szegedi Tudományegyetem, Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Szeged  
E-mail: zbozoki@physx.u-szeged.hu

## Háttér és motiváció

A fotoakusztikus (PA) gáz- és aeroszoldetektálás a fény és az anyag kölcsönhatásán alapuló mérési módszer (1. ábra), amelyben az elnyelt elektromágneses sugárzás hatására a közeg lokálisan felmelegszik, majd ennek következtében periodikus nyomásváltozás, azaz hanghullám keletkezik. Ez az akusztikus jel megfelelő érzékenységgű detektorral mérhető, és amplitúdója közvetlen kapcsolatban áll az abszorbeált energia mennyiségével, így a vizsgált gáz koncentrációjával. A módszer fizikai alapja tehát viszonylag egyszerű, ugyanakkor a gyakorlati megvalósítás során számos olyan tényező lép fel, amely a mérés pontosságát, megbízhatóságát befolyásolja.



1. ábra. Fotoakusztikus jelkeltés



Bozóki Zoltán fizikus, a Szegedi Tudományegyetem professzora, a fotoakusztikus gázdetektálás nemzetközileg elismert kutatója. Kutatásai a lézeres spektroszkópia és a környezeti mérés technika határterületére esnek. Munkássága jelentősen hozzájárult a fotoakusztikus módszer gyakorlati alkalmazásainak fejlesztéséhez, különösen ipari és környezeti mérőrendszerek területén. Számos nemzetközi publikáció és szabadalom fűződik a nevéhez.

A múlt század hetvenes és nyolcvanas éveiben a fotoakusztikus mérés technika világszerte rendkívül nagy figyelmet kapott, mivel különböző laboratóriumi kísérletekben egyedülállóan nagy érzékenységet értek el a módszerrel. Ezek a „világ bajnok” rendszerek jellemzően nagyméretű laboratóriumi szén-dioxid- vagy szén-monoxid-lézereken alapultak, és lehetővé tették igen kis, akár ppb vagy ppt nagyságrendű koncentrációk kimutatását is. Tudományos szempontból ezek az eredmények valóban kiemelkedő jelentőségűek voltak, ugyanakkor ezeknek a kezdeti fotoakusztikus rendszereknek a mérete, bonyolultsága és működtetési igénye jelentősen korlátozta a lehetséges gyakorlati alkalmazhatóságukat. Éppen ezért ezeket a berendezéseket jellemzően nagyméretű, nehezen mozgatható platformokra (pl. teherautókra) telepítették, és folyamatos szakértői felügyelet mellett működtették.

Amikor a múlt század kilencvenes éveiben Szegeden fotoakusztikus mérésekkel kezdtünk el foglalkozni, a tudományos közösségben már egyértelművé vált, hogy a módszer szélesebb körű alkalmazásának nem az érzékenység hiánya, hanem a gyakorlati használhatóság korlátjai szabnak határt. Ez a felismerés alapvetően meghatározta kutatási stratégiánkat. A cél nem az volt, hogy a már így is rendkívül alacsony kimutatási határokat tovább javítsuk, hanem hogy olyan mérőrendszereket fejlesszünk, amelyek hosszú távon stabilan, megbízhatóan és minimális beavatkozással működnek.

Ennek megfelelően a fejlesztések során a robusztus felépítésre és az üzembiztos működésre helyeztük a hangsúlyt, ami viszont szükségszerűen együtt járt a legkisebb kimutatható koncentráció bizonyos mértékű romlásával, ami jellemzően a ppm vagy jobb esetben a szub-ppm. tartományba került. A gyakorlati alkalmazások szempontjából azonban ez a kompromisszum elfogadhatónak, sőt sok esetben optimálisnak bizonyult, mivel a mérési stabilitás és a reprodukálhatóság jellemzően sokkal fontosabb tényező, mint az érzékenység további növelése.

A fotoakusztikus rendszerek egyik alapvető technikai kihívása a rendkívül gyenge (gyakran az emberi hallásküszöb alatti) akusztikus jelek érzékelése, feldolgozása. Ráadásul ezek a jelek gyakran jelentős háttérzajban jelennek meg, amely származhat mechanikai rezgésekből, áramlási jelenségekből vagy akár a mérőrendszer elektronikus zajából is. Emiatt elengedhetetlen a fázisérzékeny (lock-in) alapú jelfeldolgozás alkalmazása, amely egyrészt lehetővé teszi a hasznos jel kiemelését a zajból, másrészt



2. ábra. Az általunk fejlesztett műszerek különböző robbanásbiztos változatai az olaj- és gázipar számára

ről ez a megoldás, valamint a szükséges lézervezérlés és jelfeldolgozó elektronika jelentősen megnöveli a fotoakusztikus műszer árát és összetettségét. A módszer költségvonzata különösen akkor válik hangsúlyossá, amikor egyszerűbb alkalmazások esetén más mérési technikák is rendelkezésre állnak, és árban jóval versenyképesebbek, mint a fotoakusztika. Ilyen esetekben a fotoakusztika nem feltétlenül jelent gazdaságos megoldást. Ugyanakkor számos olyan alkalmazás létezik, ahol a módszer egyedi előnyökkel rendelkezik; pl. a fotoakusztika különösen jól alkalmazható összetett, változó összetételű gázkeverékek vizsgálatára, ahol a hagyományos optikai vagy kémiai módszerek pontossága és megbízhatósága korlátozott. Ez a felismerés kutatásainkat olyan alkalmazási területek felé terelte, ahol a robusztus működés és a szelektív kimutatás kulcsfontosságú. Ilyenek például a földgáz összetételének a vizsgálata, illetve a belső égésű motorok kipufogógázának mérése, ahol a gázkeverék összetétele és a környezeti feltételek egyaránt gyorsan változhatnak. Ezekben az esetekben a mérési módszer megbízhatósága gyakran fontosabb, mint a maximális érzékenység.

A gyakorlati alkalmazások során további problémák is felmerültek, amelyek új műszaki megoldásokat igényeltek. Ilyen például a lézer hullámhosszának stabilitása, amely a fotoakusztikus mérés pontossága szempontjából kritikus tényező. Ennek biztosítására speciális stabilizációs eljárásokat kellett kidolgozni. Hasonló kihívást jelentett az is, hogy a gázösszetétel változása befolyásolja a fotoakusztikus cella akusztikus rezonanciafrekvenciáját, ami a mérési jel amplitúdójának változásához vezethet. Ennek kezelésére valós idejű rezonanciakövető módszereket fejlesztettünk ki.

Ezek a példák jól szemléltetik, hogy a gyakorlati alkalmazások felé történő elmozdulás nem csupán mérnöki feladat, hanem új fizikai problémák megoldását is megköveteli. *A fotoakusztikus technika fejlődése ezért szoros kölcsönhatásban áll az alapkutatással:* az alkalmazási igények új kérdéseket vetnek fel, amelyek megválaszolása a fizikai folyamatok mélyebb megértését igényli, míg az

elméleti eredmények új lehetőségeket nyitnak a mérési technika továbbfejlesztésére.

## Fotoakusztikus rendszerek az olaj- és gázipar számára

Fotoakusztikus fejlesztéseink egyik korai és meghatározó alkalmazási területe az olaj- és gázipar volt. A  $H_2S$  (hidrogén-szulfid) koncentrációjának mérése különösen fontos, mivel ez a gáz már kis koncentrációban is mérgező, és jelenléte jelentős biztonsági kockázatot jelent az ipari folyamatok során.

Korai munkánk során olyan fotoakusztikus mérőrendszert fejlesztettünk ki, amely képes volt a  $H_2S$  koncentrációjának folyamatos, valós idejű meghatározására földgázban [1]. Ez több szempontból is újszerű megközelítést jelentett. Egyrészt a fotoakusztikus módszert korábban nem alkalmazták robbanásveszélyes környezetben, másrészt a rendszernek szigorú ipari követelményeknek kellett megfelelnie, beleértve a robbanásbiztos kivitel biztosítását is (2. ábra).

A fejlesztés során nemcsak a mérési elv működőképességét kellett igazolni, hanem a teljes rendszer megbízhatóságát is. Ipari környezetben a mérőműszereknek hosszú időn keresztül, folyamatos működés mellett stabilan kell működniük, miközben a környezeti feltételek – például hőmérséklet, a nyomás vagy a gázösszetétel – jelentősen változhatnak. A fotoakusztikus módszer robusztussága ebben az esetben kulcsfontosságú előnyt jelentett.

A fotoakusztikus fejlesztéseinkkel egyidőben egy másik mérési elv, azaz az optikai abszorpciós spektroszkópia is megjelent a földgázipar és általában a gázdetektálás területén, és rövid idő alatt a fotoakusztika komoly versenytársává vált. Szerencsénkre a 2001-ben a Rice Egyetemen (Houston, Texas) elvégzett összehasonlító vizsgálataink bebizonyították, hogy a fotoakusztikus módszer egyértelmű előnyökkel rendelkezik az optikai abszorpcióhoz képest [2]. Ezen előnyök

ellenére a módszer ipari bevezetése nem volt azonnali: több év fejlesztési munka és optimalizálás volt szükséges ahhoz, hogy a rendszer elérje a kívánt megbízhatósági szintet.

Ez a folyamat jól mutatja, hogy egy fizikai mérési elv ipari alkalmazása nemcsak tudományos kérdés, hanem hosszú fejlesztési és mérnöki munka eredménye is.

## Repülőgépre telepített fotoakusztikus rendszer

A fotoakusztikus mérési módszer gyakorlati alkalmazhatóságát jól szemlélteti egy különösen szigorú követelményeket támasztó mérési feladat: a légköri vízgőz és a teljes víztartalom (azaz vízgőz plusz felhőcseppek, esőcseppek, jégcseppek) repülőgépes mérése. A vízgőz a légkör egyik legfontosabb összetevője, mivel közvetlenül befolyásolja a Föld sugárzási mérlegét, valamint közvetett módon, a felhőképződésen keresztül is hatással van az éghajlati rendszerre, továbbá a légkörkémi folyamatok is különböznek aszerint, hogy felhőkben vagy felhőmentes környezetben játszódnak le. Különösen fontos a megfelelő mérések végrehajtása a felső troposzféra és az alsó sztratoszféra tartományában, ahol a vízgőz koncentrációja kicsi, ugyanakkor a cirrusfelhők keletkezésében és fejlődésében meghatározó szerepet játszik.

Ezen a területen a mérési feladat rendkívül összetett. A műszernek kis koncentrációkat kell nagy megbízhatósággal mérnie alacsony nyomáson és alacsony hőmérsékleten, miközben egy utasszállító repülőgép csomagterébe telepített másfél tonnás környezetmegfigyelési állomás részeként működik. A repülőgépes környezetben a műszer erős mechanikai és akusztikai zajnak, változó nyomás- és hőmérsékleti viszonyoknak, valamint korlátozott karbantartási lehetőségeknek van kitéve. Ezért ebben az alkalmazásban nem elegendő az, hogy a fotoakusztikus mérési elv laboratóriumi körülmények között érzékeny legyen: a műszernek hosszú időn keresztül, automatikusan és megbízhatóan kell működnie.

Az általunk kifejlesztett WaSul-Hygro műszer ilyen célra készült [3]. A rendszer a CARIBIC kutatási program



3. ábra. Az általunk fejlesztett WaSul-Hygro műszer működési környezete

(<https://www.caribic-atmospheric.com/>) keretében egy kereskedelmi repülőgép csomagterében működik 2002 óta (azaz lassan 25 éve!), és teljes 10–12 órás repülési útvonalakon végez vízgőz- és teljesvíztartalom-méréseket. A műszer alapja egy telekommunikációs típusú diódalézer, amely 1371 nm hullámhosszon működik. Ez a lézertípus kisméretű, hosszú élettartamú, megbízhatóan és automatikus módon üzemeltethető (3. ábra).

A WaSul-Hygro egyik fontos sajátossága a kétcsatornás fotoakusztikus felépítés. A repülőgép orra alá szerelt egyedi mintavételezési rendszer kétféle mintavételezési egységgel rendelkezik: az egyik (amelyik merőleges a repülőgép hossz tengelyére) a vízgőz mérésére, a másik (amely párhuzamos a repülőgép hossz tengelyével) a teljes víztartalomnak – vagyis a vízgőz és a felhőcseppekben, illetve jégkristályokban lévő víz együttes mennyiségének – meghatározására szolgál. A mintavételi egység és a műszerkonténer közötti mintavételezési gázvezeték fűtött, így a felhőrészesek víztartalma a mérőcellába jutás előtt elpárolog, és így a mérés végül mindkét fotoakusztikus kamrában a gázfázisban történik. Derült, felhőmentes körülmények között a két mérőkamra azonos vízgőz-koncentrációt mér. Felhőben repülve viszont a teljes víztartalom mérésére szolgáló csatorna nagyobb jelet ad, és a két mérés különbségéből meghatározható a felhővíz vagy felhőjég mennyisége.

A fotoakusztikus módszer egyik alapvető előnyét, azaz a szelektivitást jól mutatták azok az összehasonlító vizsgálatok is, amelyekben a fotoakusztikus vízgőzmérőt harmatponti higrométerrel vetették össze. A fotoakusztikus módszer előnye különösen akkor jelentkezett, amikor a vízgőz mellett más, zavaró komponensek – például salétromsavgőz – is jelen voltak. Mivel ezek a zavaró komponensek a fotoakusztikus mérések hullámhosszán egyáltalán nem nyelnek el, a fotoakusztikus mérés vízgőzre szelektív maradt, míg a hagyományosabb mérési elvű műszereket megzavarta az interferáló komponensek jelenléte.

A műszer másik lényeges tulajdonsága a gyors válaszidő. A fotoakusztikus cellák kis térfogata és a megfelelő térfogatáram lehetővé teszi, hogy a cellában lévő levegőminta körülbelül egy másodperc alatt kicserélődjön. Egy utasszállító repülőgép körülbelül 250 m/s sebessége mellett ez néhány száz méteres térbeli felbontásnak felel meg. Ez különösen fontos a felső troposzféra és alsó sztratoszféra erősen változó szerkezetének vizsgálatakor, ahol a vízgőz-koncentráció és a felhőképződési folyamatok térben gyorsan változhatnak.

A hosszú távú repülőgépes működés egyik tanulsága az volt, hogy a műszernek önellenőrző és önkorrekciós eljárásokra is szüksége van. A repülőgép fedélzetén nincs lehetőség napi laboratóriumi beállításra vagy karbantartásra, ezért a rendszernek automatikusan kell felismernie és korrigálnia bizonyos változásokat. Ilyen probléma lehet például a diódalézer hullámhosszának lassú eltolódása, amely a vízgőz abszorpciós vonaláról való lehanglódást okozhatja. Ezt a problémát úgy kezeltük, hogy

egy harmadik fotoakusztikus kamrával (úgynevezett referencia-kamrával) egészítettük ki a rendszert, amely nedves levegőt tartalmaz, és így a lézer hullámhossza ráhangolható a vízgőz elnyelési vonalának maximumára. Ugyancsak fontos volt a mérőrendszer nyomás- és koncentrációfüggő érzékenységének kalibrálása, amely nélkül a mérési eredményekben szisztematikus eltérések jelentkezhettek volna.

A WaSul-Hygro műszer fejlesztése jól mutatja, hogy a fotoakusztikus módszer gyakorlati alkalmazása nem egyszerűen egy laboratóriumi mérési elv „kihelyezése” terepi környezetbe. A repülőgépes alkalmazás során a teljes mérőrendszert újra kellett gondolni: a mintavételt, a kamrageometriát, a lézermódulációt, a zajsűrést, a kalibrációt és az automatikus működést egyaránt a különleges környezeti feltételekhez kellett igazítani. Ez a fejlesztési folyamat ugyanakkor azt is bizonyítja, hogy a fotoakusztikus spektroszkópia nemcsak érzékeny laboratóriumi módszer, hanem megfelelő mérnöki és fizikai optimalizálással hosszú távon működő, repülőgépes légkörkutató mérőrendszer alapja is lehet.

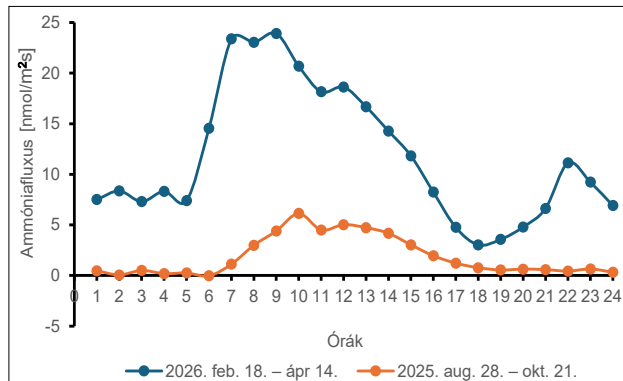
A repülőgépes vízgőzmérés ezért különösen jó példája annak az általános tanulságnak, amely a fotoakusztikus fejlesztések több területén is megjelenik: a gyakorlati alkalmazhatóságot nem pusztán a kimutatási határ határozza meg. Legalább ilyen fontos a szelektivitás, a válaszidő, a teljes mérési tartomány, a robusztuság, az automatikus működés és a hosszú távú stabilitás. A WaSul-Hygro esetében ezek a szempontok együtt tették lehetővé, hogy a fotoakusztikus módszer egy nagy nemzetközi légkörkutató programban, kereskedelmi repülőgép fedélzetén is alkalmazhatóvá váljon.

## Terepi alkalmazás ammóniaemisszió mérésére mezőgazdasági környezetben

A fotoakusztika egy másik ígéretes alkalmazási területe a mezőgazdasági és a biológiai rendszerek vizsgálata. A talajból származó gázkibocsátások, a növényi anyagcsere folyamatai, illetve az evapotranszpiráció során keletkező nyomgázok mérése fontos információkat szolgáltat a szén- és nitrogénkörforgás megértéséhez. Ezek a folyamatok nemcsak alapvető tudományos szempontból érdekesek, hanem a fenntartható mezőgazdasági gyakorlatok kialakításában is szerepet játszanak.

A fotoakusztikus detektálás egyik fontos, az utóbbi években egyre nagyobb figyelmet kapó alkalmazási területe a mezőgazdasági eredetű gázkibocsátások vizsgálata. A műtrágyázás következtében a talajból jelentős mennyiségű ammónia ( $\text{NH}_3$ ) kerülhet a légkörbe, amely egyrészt a tápanyag-hasznosulás szempontjából veszteséget jelent, másrészt a légkörkémiailag folyamatokban is szerepet játszik, káros környezeti hatásokkal párosulva.

Terepi méréseink során fotoakusztikus elven működő, lézeres spektroszkópiailag módszert alkalmaztunk az ammónia koncentrációjának folyamatos nyomon követésére egy műtrágyázott repecultúra felett. A mérő-



4. ábra. Az ammóniafluxus napi menete műtrágyázást követően

rendszer robusztus kialakítása lehetővé tette a több héten keresztül történő, megszakítás nélküli működést valós környezeti feltételek mellett. A koncentrációméréseket mikrometeorológiai módszerekkel kombinálva meghatározhatóvá vált az ammónia talaj és légkör közötti fluxusa is (4. ábra).

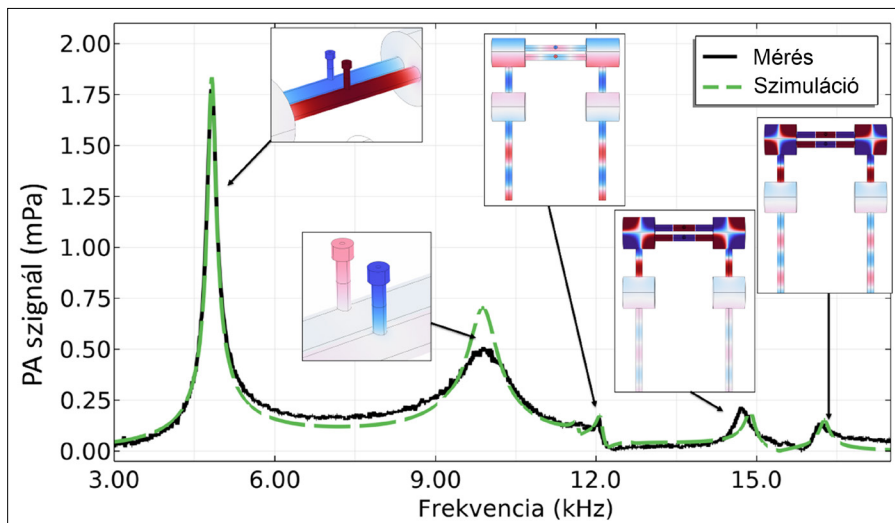
A mérések egyik jellegzetes eredménye az ammónia-emisszió markáns napi menete volt. A fluxus értéke éjszaka alacsony, közel állandó szinten maradt, míg nappal jelentősen megnövekedett. A maximum jellemzően a délelőtti órákban jelentkezett, amit egy kisebb visszaesés követett a kora délutáni időszakban. Ez a viselkedés jól tükrözi a turbulens keveredés, a besugárzás és a felszíni folyamatok napi változását.

A napi ciklus alakulását több tényező együttes hatása szabja meg. Nappal a megnövekedett napsugárzás és a felmelegedő felszín fokozza a turbulens anyagcserét, ami elősegíti az ammónia légkörbe jutását. Ezzel szemben éjszaka a légköri rétegződés stabilabbá válik, a keveredés csökken, és a fluxus nagysága is mérséklődik. A mérések azt is megmutatták, hogy az emisszió időbeli lefolyása szorosan kapcsolódik a műtrágyázást követő napokhoz: kezdetben magasabb értékek jelentkeznek, majd az idő előrehaladtával fokozatos csökkenés figyelhető meg.

Az ilyen típusú terepi vizsgálatok jól példázzák, hogy a fotoakusztikus technika nemcsak laboratóriumi körülmények között alkalmazható nagy érzékenységgel, hanem komplex, változó környezeti rendszerekben is megbízható mérési eszközt jelent. A módszer különösen alkalmas olyan folyamatok vizsgálatára, ahol a koncentrációk és fluxusok időben gyorsan változnak, és ahol a folyamatos, hosszú távú mérés elengedhetetlen.

## Egyéb alkalmazások

Az olaj- és gáziparon és a mezőgazdaságon túl a fotoakusztikus detektálás számos más területen is sikeresen alkalmazható. Kiemelkedő jelentőségű a környezeti mérések területe, ahol a különböző nyomgázok – például a metán ( $\text{CH}_4$ ), a dinitrogén-oxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ), vagy a vízgőz – kimutatása fontos szerepet játszik a légköri folyamatok és a klímaváltozás vizsgálatában.



5. ábra. A fotoakusztikus mérőkamra végesseleles szimulációjának eredményei

A módszer különösen előnyös olyan környezetekben, ahol a gázösszetétel gyorsan változik, vagy ahol több komponens egyidejű jelenléte bonyolítja a mérést. Ilyen esetekben a fotoakusztika szelektivitása és robusztussága jelentős előnyt képvisel más mérési technikákkal szemben.

A fotoakusztikus detektálást ipari folyamatok monitorozásában is alkalmazzák, például égési folyamatok diagnosztikájában vagy emissziómérésekben. Az ilyen alkalmazások során gyakran szélsőséges körülmények – magas hőmérséklet, változó gázösszetétel, mechanikai rezgések – mellett kell megbízható mérést végezni, ami különösen nagy kihívást jelent.

Az utóbbi években új kutatási irányként jelentek meg a több hullámhosszú fotoakusztikus rendszerek, amelyek aeroszolok vizsgálatára és optikai tulajdonságaik meghatározására is alkalmasak. Ez tovább bővíti a módszer alkalmazási körét, és új lehetőségeket nyit meg mind az alap kutatás, mind az alkalmazások területén.

## Numerikus szimulációk

A fotoakusztikus rendszerek fejlesztésében a numerikus szimulációk kiemelt szerepet játszanak. A mérőrendszer működése több fizikai folyamat együttes eredménye: az optikai abszorpció, a hőátadás, az akusztikai rezonancia és az áramlási viszonyok egyaránt befolyásolják a mérhető jelet. Ezek együttes vizsgálata analitikus módszerekkel nehéz, ezért a numerikus modellezés elengedhetetlen eszközzé vált. A numerikus szimulációk segítségével optimalizálható a fotoakusztikus cella geometriai kialakítása, meghatározhatók a rezonanciafrekvenciák, valamint előrejelezhető a jel amplitúdója különböző körülmények között. Emellett lehetőség nyílik annak vizsgálatára is, hogy a gázösszetétel, a nyomás vagy az áramlási viszonyok változása hogyan hat a mérési eredményre (5. ábra).

A numerikus modellezés nemcsak a tervezést segíti, hanem a mérések értelmezésében is fontos szerepet játszik. A valós rendszerek gyakran eltérnek az ideális modellektől, és a szimulációk segítségével feltárhatók ezek

az eltérések, valamint azonosíthatók a mérési bizonytalanság forrásai.

Különösen fontos szerepe van a szimulációknak az önellenőrző és önkorrekciós algoritmusok fejlesztésében. Ezek az algoritmusok lehetővé teszik, hogy a mérőrendszer automatikusan alkalmazkodjon a változó környezeti feltételekhez, például a rezonanciafrekvencia eltolódásához vagy a jel amplitúdójának változásához.

Összességében a numerikus szimulációk hidat képeznek az elméleti fizikai megértés és a gyakorlati mérőrendszerek fejlesztése között, és kulcsszerepet játszanak a fotoakusztikus technika továbbfejlesztésében.

## Összefoglalás

A cikkben áttekintést adtam a fotoakusztikus gáزدetektálás fizikai alapjairól és fejlődéséről, különös tekintettel a gyakorlati alkalmazások irányába történő elmozdulásra. Bemutattam, hogyan vált a rendkívül érzékeny, de bonyolult laboratóriumi módszer robusztus, ipari és környezeti mérésekben is alkalmazható technikává. Ismertettem a legfontosabb alkalmazási területeket, valamint a mérőrendszerek fejlesztésében kulcsszerepet játszó numerikus szimulációk jelentőségét. A bemutatott példák jól szemléltetik az alap kutatás és az alkalmazásorientált fejlesztés szoros kapcsolatát.

## Irodalom

1. Varga A., Bozóki Z., Szakáll M., Szabó G. (2006): Photoacoustic system for on-line process monitoring of hydrogen sulfide ( $H_2S$ ) concentration in natural gas streams. *Applied Physics B*, 85, 315–321.
2. Bozóki Z., Mohácsi Á., Szabó G., Bor Z., Erdélyi M., Chen W., Tittel F. K. (2002): Near-infrared diode laser based spectroscopic detection of ammonia: A comparative study of photoacoustic and direct optical absorption methods. *Applied Spectroscopy*, 56(6), 715–719.
3. Szakáll M., Mohácsi Á., Tátrai D., Szabó A., Huszár H., Ajtai T., Szabó G., Bozóki Z. (2020): Twenty years of airborne water vapor and total water measurements of a diode laser based photoacoustic instruments. *Frontiers in Physics*, 8(1), article 384.