



CLARA BASTIAN / VCHAL/GETTY

A KLÍMAVÁLTOZÁS ÁLLAT- TENYÉSZTÉSI VONATKOZÁSAI

A SZARVASMARHÁK METÁNKIBOCSÁTÁSÁNAK VIZSGÁLATA MIKROMETEOROLÓGIAI MÓDSZEREKKEL ÉS VONALMÉRÉSEKKEL

**Szakértő
munkatársunk írása**
Állattenyésztési
Teljesítményvizsgáló Kft.

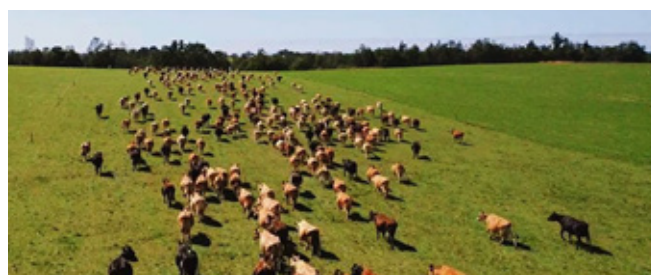
A rovatunk korábbi írásaiban tárgyalt pontmérési és kamratechnikák a szarvasmarhák kilégzéséből és bőfögéséből, illetve más kisebb forrásokból (például a trágyatárolókból) származó metángáz (CH_4) légköri koncentrációját vagy emissziós rátáját mérik egyedi szinten. (Az emissziós ráta az egységnyi idő alatt levegőbe bocsátott CH_4 mennyiségét jelenti.) Jelen cikkben – elsősorban az Egyesült Államok Antropogén Eredetű Metánkibocsátásával Foglalkozó

Bizottság 2018-as átfogó kiadványa, valamint Harper és mtsai.-nak (2011), illetve Hu és mtsai.-nak (2014) munkái alapján – ezeknél nagyobb léptékű mérési módszereket ismertetünk, melyek főként legelőkön alkalmazhatók. Bár Magyarországon a nagyüzemi tehenészeti telepek esetében ritka a legeltetési tartásmód, e technikák bemutatása mégis fontos lehet, lévén, hogy azok alternatív megoldást kínálnak a környezeti hatások szélesebb körű vizsgálatára.

1. Mikrometeorológiai módszerek

A pontmérések és a kamratechnikák kis mérési teljesítménye jelentette korlát többek között mikrometeorológiai módszerekkel hidalható át, melyek keretében nagy, nyílt területeken tartott szarvasmarhák üvegházhatásúgáz- (ÜHG-) kibocsátásával kapcsolatos adatok gyűjtésére kerül sor, az állatok zavarása nélkül. Az ilyenkor használt, gyors reagálású CH_4 -érzékelőkkel és szélesebbég/-irányérzékelőkkel ellátott, magas mérőtornyok akár évekig is szolgáltathatnak információkat. A mikrometeorológiai módszerek alkalmazása nagy kiterjedésű területekre irányul, így csak az ott tartózkodó

állományok egészének (vagy más emissziós források összességének) kibocsátása határozható meg általuk, az egyedeké (az egyes forrásoké) külön-külön nem; ráadásul nem kaphatunk részletes információkat az emisszió heterogenitásáról sem.



1.1. Hagományos mikrometeorológiai módszerek

A mikrometeorológiai megközelítés arra a jelenségre épül, hogy az állatoktól, valamint a talaj- és vízfelületekről légkörbe kerülő gázok a szél által keltett örvénylő légáramlások hatására tovaterjednek. Így a felszínközeli légáramlás sebességének és a CH_4 -koncentráció folyamatos mérésével, illetve egyéb légköri paraméterek figyelembevételével meghatározható a CH_4 -kibocsátások mértéke. (A felszínközeli réteg, más néven belső határréteg, a légkör Föld felszínéhez legközelebb eső 5–10%-a, ahol a gázok turbulens diffúziója, a szélesebbesség magasság szerinti változása, valamint a szélirány magasságtól való függetlensége észlelhető.) Fontos megjegyezni, hogy a mikrometeorológiai mérések során mindenkor szükség van bizonyos egyszerűsítésekre a légáramlás egyenletességével és homogenitásával kapcsolatban.

Az enterális eredetű takarmányfermentációból és az állati trágyából származó CH_4 -emisszió fluxusának – tehát az egységnyi területről, időegység alatt légkörbe kerülő CH_4 -mennyiség – meghatározására többféle mikrometeorológiai megközelítés alkalmazható. Ezek közé tartozik például a fluxus-gradiens- (FG-), az örvénykovariancia- (más néven eddy-kovariancia-), a relaxált eddy-akkumulációs (relaxed eddy accumulation, REA-), az integrált horizontálisfluxus- (integrated horizontal flux, IHF-), a határréteg-anyagegyensúly- (boundary-layer budgeting, BLB-), valamint az ún. módosított tömegkülönbségen alapuló (modified mass difference, MMD-) módszer, melyek közül párat részletesen is ismertetünk a továbbiakban. Bár az itt említett eljárások mindegyikénél a szélesebbesség és a CH_4 -koncentráció kerül rögzítésre, a mérési pontok számában és a CH_4 -emissziós fluxus számításának elméletében nagy eltérések mutatkoznak közöttük.

Amennyiben a tehenek csak kis területen tartózkodnak, és/vagy a szenzorok magasabb légrétegben helyezkednek el, szükség lehet a mérőeszközök „lábnyomának”, vagyis az általuk monitorozott területre, illetve annak nagyságának meghatározására. A fluxusbecslés akkor lesz pontos, ha e mérési lábnyom nagy hányadot fed le a vizsgált forrásból. Amennyiben ez nem teljesül, a kibocsátás változékonysága csak részben detektálható, ami pontatlan vizsgálati eredményekhez vezethet.

A mikrometeorológiai technikák többsége elméletileg térben egyenletes forráskibocsátást feltételez. Ez a trágyatárolóknál szinte teljes mértékben teljesül, a legelőn tartózkodó állatok esetén azonban csak kevésbé. Az utóbbi probléma megoldására két lehetőség kínálkozik: 1. GPS-egységek alkalmazásával a szarvasmarhák pontforrásokként való kezelése; valamint 2. az állomány és a mérési pont közötti távolság növelése, ami csökkenti az eredmények forráseloszlásra vonatkozó érzékenységet.

A mikrometeorológiai méréseket általában érzékeny műszerekkel (például gázérzékelőkkel, szélesebbesség- és széliránymérőkkel stb.) végzik, melyeket több magasságban, toronyszerű szerkezetekre telepítenek.

1. kép: Egy szenzorokkal és mérőműszerekkel felszerelt mérőtorony



Forrás: Az Egyesült Államok Nemzeti Óceán- és Légkörkutató Hivatalának Fizikai Tudományok Laboratóriuma.

Ezeknek az eszközöknek nemcsak a beszerzési, de a fenntartási és a karbantartási költségei is magasak, a hatékonyságukat pedig több tényező, egyebek mellett a mérés magassága, a domborzati jellemzők, a változó szélesebbesség, illetve az állatok mozgása is befolyásolhatja. A műszereken kívül nagy kapacitású számítástechnikai eszközökre is szükség van a jelentős mennyiségben gyűjtött adatok tárolásához.



Tömegmérleg-technikák

A tömegmérleg-technikák alkalmazásakor a mérési területre, szarvasmarhák esetén az őket körülvevő, ún. vizsgálati oszloptérfogatba belépő és az onnan kilépő gázfluxusokat vetik össze különböző magasságokban, a tömegmérlegelv alkalmazásával.

Az ebbe a csoportba tartozó **integrált horizontálisfluxus- (IHF-) technika** egy viszonylag egyszerű módszer, amelynek alapja, hogy a szarvasmarhák révén levegőbe került CH_4 -t a felettük áramló légtömeg horizontálisan elszállítja. A gyakorlati alkalmazás során egymástól meghatározott távolságban, az állatokhoz képest szélirányban és azzal ellentétesen mérőtornyokat állítanak fel, majd ezeken több magasságban (az 1. ábrán a talajszinttől Z_p magasságig) mérőeszközöket, szenzorokat helyeznek el a szélesség, valamint a CH_4 -koncentráció rögzítésére. Az állomány CH_4 -emissziójának fluxusát az ellentétes irányokban mért gázkoncentrációk különbségeinek, valamint az átlagos szélesség szorzatának integrálja adja. A kalkuláció során emellett a szél által megtett távolságot (az ábrán x -szel jelölve) és a mérési magasságot is figyelembe veszik, továbbá két feltételezéssel élnek: 1. a szarvasmarhák felett egy bizonyos magasságban a CH_4 -koncentráció már megegyezik a környezeti háttér-koncentrációval; valamint 2. a vizsgálati oszloptérfogat határainál (tehát a tornyokon) mért szélesség minden magasságban azonos.

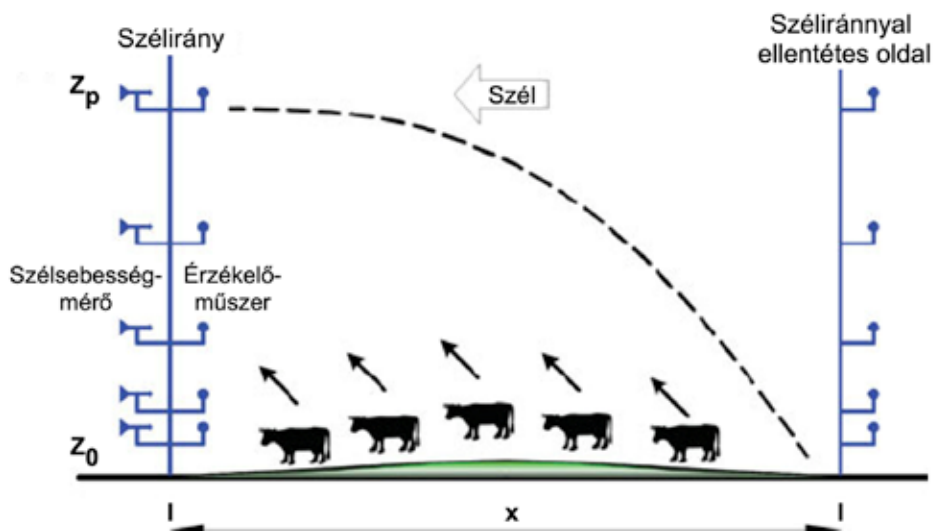
Az IHF-technika leginkább homogén, sík felületek esetén használható hatékonyan, ahol biztosított

az egyenes, vízszintes irányú gázáramlás. Ha azonban ezt különböző építmények, technológiai berendezések vagy a domborzati viszonyok akadályozzák, „lábnyomprobléma” léphet fel, mivel az érzékelők csak a terület kis részét képesek monitorozni. E probléma kezelésére javasolható a gázkoncentráció és a szélesség mérése legalább öt különböző magasságban, illetve a hagyományos pontszenzorok helyett nyílt fényutas lézerek vagy Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia alkalmazása. Az utóbbiaknál ugyanis a szenzorok által lefedett távolság (úthossz) általában csak kismértékben marad el a vizsgált terület teljes hosszától.

Az IHF-technika előnye, hogy a mérésekhez viszonylag egyszerű műszerek is elegendők, hátránya viszont, hogy az állatok egyenes elhelyezkedését feltételezi, továbbá nem veszi számításba a vízszintes gázszállítás széliránnyal ellentétes, ún. turbulensfluxus-komponensét (erről lásd az eddy-kovariancia-módszert), ami a kibocsátások 5-15%-os túlbecsléséhez vezethet.



1. ábra: A CH_4 -kibocsátás IHF-technikán alapuló mérésének sematikus rajza



Megjegyzés: Z_0 magasságban a szélesség 0 m/s, Z_p magasságban pedig a CH_4 koncentrációja feltételezhetően megegyezik a környezeti háttér-koncentrációval. Forrás: Ryden és McNeill (1984), illetve Harper és mtsai. (1999) alapján.

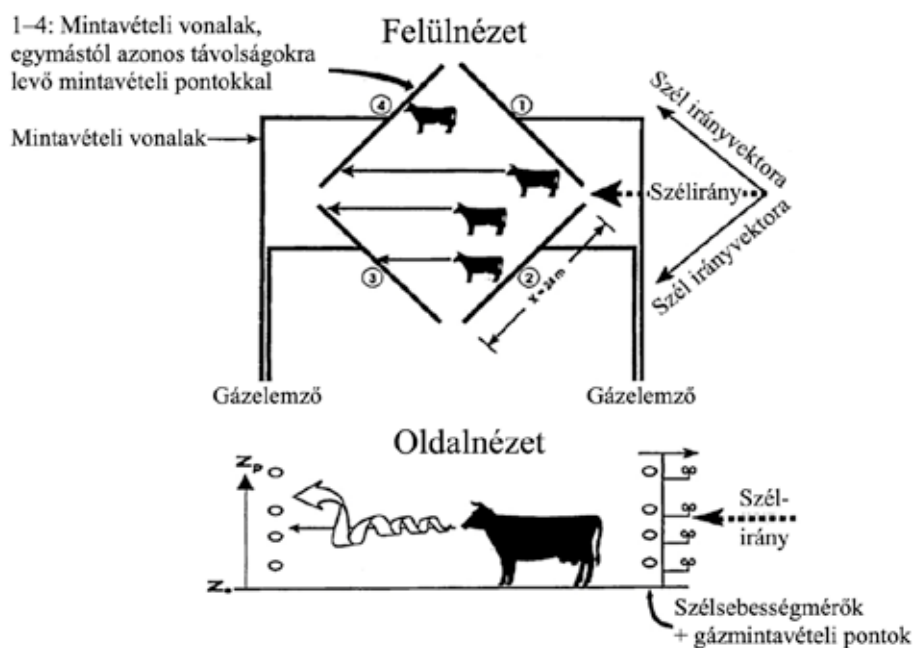


A tömegmérleg-technikákra másik példaként hozható fel az IHF-technika egy továbbfejlesztett változata, az ún. **módosított tömegkülönbség-(MMD-) módszer**, amely abból indul ki, hogy a szarvasmarhák CH_4 -kibocsátását az állatok mozgása miatt háromdimenziós problémaként kell kezelni, és a gázok áramlását az IHF-nél átfogóbban kell elemzi. Az MMD-módszer alkalmazásakor a CH_4 -emissziós fluxust egy elméletben kijelölt, állományt körülvevő vizsgálati oszloptér fogat függőleges oldalainál (a 2. ábrán 1-től 4-ig jelölve) mérik, feltételezve, hogy a talajon és a térfogat felső határoló síkján keresztül nincs gázáramlás. (Az utóbbi megkötés teljesítése érdekében a szélirány szerinti méréseket elegendően nagy magasságban kell végezni.) A vizsgálati oszloptér fogat függőleges oldalain egységnyi idő alatt áthaladó gázmennyiség a különböző magasságokban

rögzített szélességi és gázkoncentrációs adatok szorzata alapján határozható meg. Az állatállomány emissziós fluxusa pedig itt is az ellentétes oldalakon áthaladó gázfluxusok különbségéből adódik.

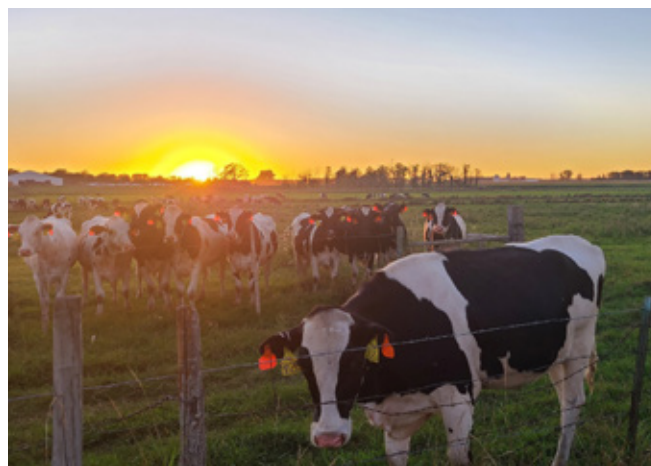
Az MMD-módszer előnye, hogy nem igényli az állatok egyenletes térbeli elhelyezkedését, illetve a terület nagy keresztirányú kiterjedését. Így rugalmasabb megoldást kínál az IHF-technikához képest, különösen kisebb vagy szabálytalan alakú területeken, valamint a már említett lábnyomprobléma felmerülése esetén. Más mikrometeorológiai technikákkal ellentétben az MMD alkalmazása során nem szükséges légköri gázszállításra vonatkozó feltételezésekkel élni, kivéve a nehezen mérhető turbulensfluxus-komponensek – az IHF-módszernél is tárgyalt – elhanyagolását.

2. ábra: A CH_4 -kibocsátás MMD-módszeren alapuló mérésének sematikus rajza



Forrás: Ryden és McNeill (1984), illetve Harper és mtsai. (1999) alapján.

Az MMD-módszer hátrányai között kell megemlíteni a kiterjedt terepi mérések – különösen a gázkoncentrációk számos ponton történő rögzítése – okozta kihívást. E probléma a mérési pontok számának csökkentésével orvosolható, ami azonban alapos tervezést igényel. Megoldást jelenthet erre például egy nagy mérési oszloptér fogat kijelölése, amelynek alapterülete jelentősen túlnyúlik az állatállomány által elfoglalt helyen. Ebben az esetben ugyanis feltételezhető, hogy az oszloptér fogat oldalsó felületein már nincs kibocsátáshoz köthető CH_4 -áramlás, így a mérési pontok számát akár az eredeti felére is le lehet faragni.



Függőlegesfluxus-technikák

Egy másik mikrometeorológiai megközelítés a vizsgált gázok függőleges irányú áramlására épül, és azt azonosnak tekinti az állatoktól származó CH_4 -emissziós fluxussal. Az ide tartozó módszerek a korábbiakhoz hasonlóan szintén nem alkalmasak a gázfluxus mikroszintű térbeli változásainak kimutatására, így a mérések itt is kiterjedt, homogén (épületektől és más tereptárgyaktól mentes) terepen zajlanak. A függőleges fluxus figyelembevétele különösen a nagy szarvasmarha-állományok kibocsátásának vizsgálata során bizonyulhat hasznosnak, amelyeknél az egyedek nagy száma és a viszonylag egyenletes állatsűrűség elősegíti a megbízható adatgyűjtést, illetve csökkenti a tehének szabálytalan területi eloszlásából adódó mérési pontatlanságokat.



A legelő állatok CH_4 -kibocsátásának megállapítására a kutatók a mikrometeorológiai technikák közül elsőként a **fluxus-gradiens eljárást** alkalmazták, amely a következőben bemutatásra kerülő örvénykovariancia-módszertől abban különbözik, hogy gradienseket, vagyis gázkoncentráció-változásokat mér különböző magasságokban a szarvasmarha-állomány felett. A CH_4 -fluxust e függőleges gázkoncentrációs gradiensek és a CH_4 – egyéb tényezőkből, például a szélesebből vagy a hőmérséklet magasság szerinti változásaiból származtatott – turbulens diffúziója (intenzív átkeveredése) alapján határozzák meg.

A fluxus-gradiens mérések általában több 100 méter hosszú, homogén terepadottságú legelőkön zajlanak, de a módszer egyéb mezőgazdasági hasznosítású

területek (például rizsföldek vagy vízfelszínek) feletti ŰHG-fluxusok tanulmányozására is használható.

Az **örvénykovariancia- (eddy-kovariancia-) technika** széles körben alkalmazott standard módszer a különféle forrásokból – például az állatállományoktól – származó gázkibocsátások, valamint az egyes ökoszisztémák és a légkör közötti gázcseré tanulmányozására a fluxus-gradiens eljárásnál nagyobb kiterjedésű, akár 2 000 méter hosszú vizsgálati területek esetén. A módszer alapját az a jelenség képezi, hogy a légkörbe kerülő gázokat (jelen esetben a CH_4 -t) tovaszállító, felszínközeli légáramlás kisebb, turbulens mozgást végző légtömegekre (örvényre, angolul eddy) bontható fel (Swinbank, 1951). A magasabb légrétegekben kialakuló örvények általában nagyobbak és hosszabb ideig maradnak fenn, míg az alacsonyabb légrétegekben forgók kisebbek és rövidebb életűek.

Az eddy-kovariancia-rendszerben adott helyeken és időpontokban mérik az örvények által szállított „levegőcsomagok” tömegét és sebességét. Mivel e levegőcsomagok mindegyike egyedi jellemzőkkel (például CH_4 -koncentrációval, hőmérséklettel, páratartalommal stb.) rendelkezik, ezen változók, valamint a levegő függőleges mozgási sebessége alapján meghatározhatók a CH_4 és egyéb gázok vertikális, felfelé vagy lefelé irányuló fluxusai. (Matematikailag tehát ez a módszer a CH_4 -koncentráció és a gázrészecskék függőleges mozgási sebessége közötti kovariancián alapul.)



2. kép: Egy örvénykovariancia-állomás fényképe

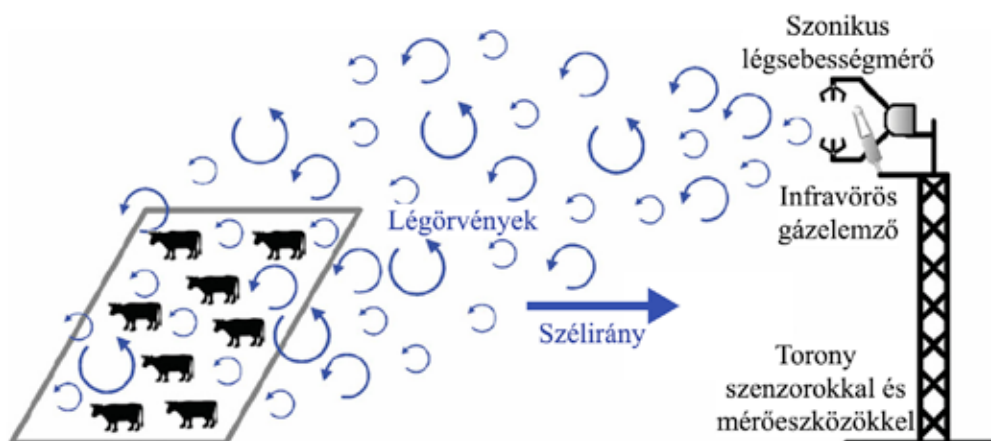


Forrás: WaiBER, 2017.

Az örvénykovariancia-technika alkalmazása a következő elméleti feltételezésekre épül: 1. a szarvasmarha-állomány feletti légmozgás általában egyenletes, és az átlagos függőleges irányú szélsébség elhanyagolható (ami valójában nem mindig áll fenn); 2. az állatok nagy, homogén területen tartózkodnak (amelyet mezőgazdasági telepeken nehéz találni); 3. a légsűrűség ingadozása elhanyagolható. A kibocsátás mértékének meghatározásához ismerni kell az állomány nagyságát és a mérési lábnyomon belüli elhelyezkedését; a vizsgált területre számított CH_4 -fluxus és az állatok emissziós rátája közötti kapcsolat értelmezésére pedig érdemes valamilyen matematikai modellt használni.

Az örvénykovariancia-módszer hátrányai közé tartozik, hogy szélcsend vagy gyenge légmozgás esetén a mérési eredmények kevésbé megbízhatóak. Ennek az az oka, hogy a szarvasmarha-állomány CH_4 -kibocsátása révén kialakuló magasabb CH_4 -koncentrációjú légréteg felfelé áramlásakor a műszerek a valósnál nagyobb koncentrációs értékeket jeleznek. Az adatok torzulása megfigyelhető erősen lejtős területek, illetve a légköri viszonyok gyors változásai esetén is. Továbbá – mint már említettük – e technika nem alkalmas a mikroszintű térbeli változások kimutatására, a pontos becsléseket biztosító, gyors válaszadású eszközök magas beszerzési költsége pedig jelentős anyagi terhet jelent.

3. ábra: A CH_4 -kibocsátás örvénykovariancia-módszeren alapuló mérésének sematikus rajza



Forrás: Hu és mtsai, 2014.



1.2. A gázterjedés inverz modellezése

A gázterjedés inverz modellezése a hagyományos mikrometeorológiai technikáknál rugalmasabb alternatívát kínál a CH₄-kibocsátások mértékének meghatározására. Ez lényegében egy olyan speciális matematikai megközelítés, amely a konvencionális gázterjedési modellek/módszerek fordított alkalmazását jelenti: míg a gázok légköri terjedésének előrejelzése általában egy ismert kibocsátó forrásból kiindulva történik, **az inverz gázterjedési modellek a szarvasmarhától szélirányban bizonyos távolságra mért CH₄-gázkoncentrációk, valamint a környezeti háttér-koncentráció és egyéb paraméterek (például a szélsébség és a szélirány) alapján, retrospektív módon adják meg az adott legelőn megfigyelhető CH₄-emisszió fluxusát.** Ez a megközelítés viszonylag pontos becsléseket tesz lehetővé, ha a műszerek által érzékelt terület (mérési lábnyom) elegendően nagy az emisszió térbeli változékonyságának megragadására.

A CH₄-koncentráció ilyen jellegű mérésére szarvasmarhák esetén többféle megoldás létezik. Egy gyakori módszer a mozgó platformok (például járművek) használata, amelyek lehetővé teszik az adatgyűjtést egy vagy több, előre meghatározott talajszint feletti magasságban, az állománytól bizonyos távolságokra, szélirányban. Más esetekben a jármű feletti légoszlopban mérik a CH₄-koncentrációt, vagy egy adott, szélirányba eső ponton, nyílt útvonalú műszerekkel vizsgálják annak változásait, majd az így nyert adatokból, valamint „háromdimenziós” szélstatistikákból határozzák meg a tehénállományok CH₄-emissziójának volumenét a már korábban említett gázterjedési modellek segítségével.

A gázterjedés inverz modellezése egyaránt alkalmas egyedi és összetett kibocsátási források vizsgálatára, és különösen nagy, szabálytalan alakú területek esetén számít praktikus megoldásnak. További előnye, hogy az emissziós fluxus kiszámításához csak az alapvető légköri jellemzők és a CH₄-koncentrációk mérésére van szükség, amelyeket szabadon választott helyszíneken, könnyen el lehet végezni.

Mivel ez a technika ideális légáramlást és egyenletes gázkibocsátást feltételez, a mérések megbízhatósága az állatok vizsgálati területen való egyenletes elhelyezkedésétől, valamint attól függ, hogy vannak-e

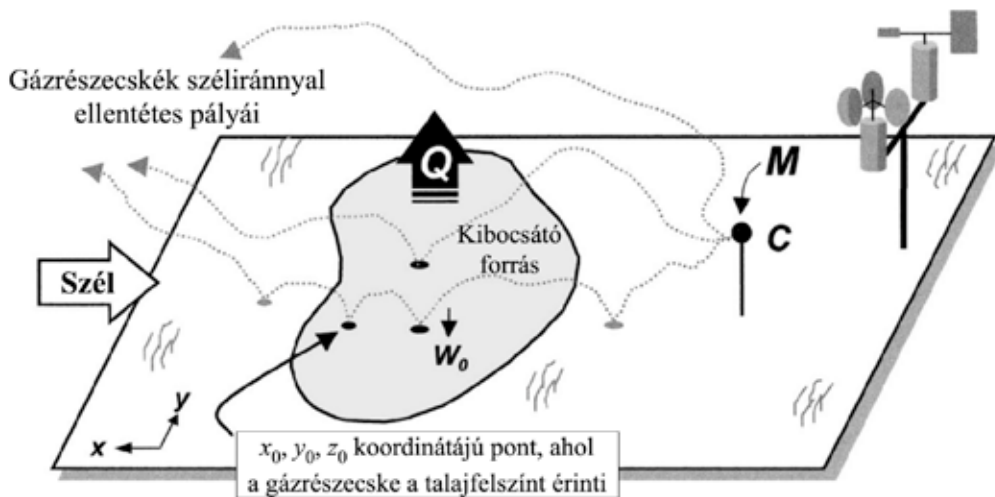
más CH₄-kibocsátók is ott egyidejűleg. A telepi környezet gyakran nem felel meg e két követelménynek, továbbá a legelőkön levő tereptárgyak turbulens légáramlást okozhatnak. Az eredmények pontosságának növelése érdekében ezért mindenkor a mérési helyek gondos kiválasztására kell törekedni, valamint javasolt figyelmen kívül hagyni a kedvezőtlen szélviszonyok között gyűjtött adatokat.



Az inverz technikák közül a Flesch és mtsai. által 1995-ben bevezetett ún. **inverz Lagrange-féle sztochasztikus módszer** mutatjuk be. Ennek megértéséhez tegyük fel, hogy egy tetszőleges alakú területen legelő szarvasmarha-állomány egyenletes, de ismeretlen mértékben (Q) bocsát ki CH₄-t. (Lásd a 4. ábrát.) Egy szélirányba eső M pontban a különböző időpontokban mért CH₄-koncentrációk átlaga C , amely meghaladja a környezeti háttérkoncentrációt (C_b). Az emissziós fluxus meghatározására szolgáló légköri gázterjedési modellek időben és térben visszafelé haladva képesek rekonstruálni a gázrészecskék lehetséges, széliránnyal ellentétes útvonalait (pályáit), figyelembe véve azok véletlenszerű, turbulens mozgását. Az M pontban észlelt gázrészecskék forrása az általuk bejárt útvonaltól függően azonosítható: származhatnak közvetlenül az állatoktól, de más kibocsátó(k)tól is, amikor épp csak „földet érnek” az állomány által elfoglalt területen, majd onnan „visszapattanva” növelik a CH₄-koncentrációt a mérési pont felé haladva. A modell azon pontok koordinátái alapján állapítja meg a gázrészecskék függőleges sebességét, ahol azok a talajt érintik. Az állatállomány emissziójának fluxusa a különböző időpontokban mért CH₄-koncentrációk átlaga (C) és a háttérkoncentráció (C_b) különbségének felhasználásával számítható ki a következő képlet szerint: $Q = \frac{C - C_b}{\left(\frac{C}{Q}\right)_{sim}}$, ahol $\left(\frac{C}{Q}\right)_{sim}$ a CH₄-molekulák forrásterületen történő földet érési pozícióiból adódik.



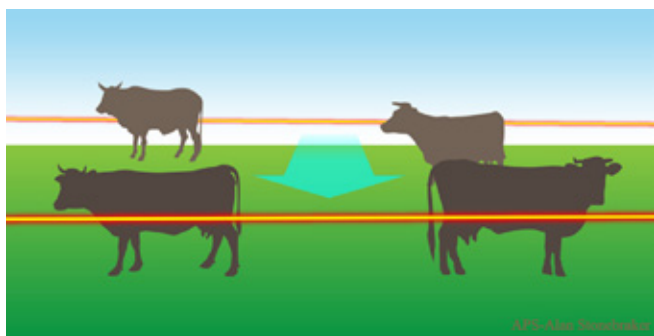
4. ábra: A CH₄-kibocsátás inverz Lagrange-féle sztochasztikus módszeren alapuló mérésének sematikus rajza



Megjegyzés: Az ábrán a szarvasmarha-állományt szürke folt jelzi.
 Forrás: Flesch és mtsai, 2005.

2. Vonalmérések

A mikrometeorológiai módszerekhez hasonlóan a vonalmérések is hatékony eszközként szolgálhatnak a tehenészetek környezeti hatásainak feltárásában, a gázkibocsátások elemzésében. E mérések során nyílt útvonalú spektrométereket (például infravörös vagy hangolható diódalézereket) helyeznek el a telepek, legelők peremén, valamint az azokat övező területeken. A szélirányban és azzal szemben, egy adott vonalban, méterenként telepített műszerek folyamatosan mérik a CH₄ vagy egyéb gázok koncentrációját, lehetővé téve azok terjedésének nyomon követését. A mérési vonal hossza és elhelyezkedése döntő fontosságú a pontos eredmények elérése érdekében, de a vonalon elhelyezett műszereknek is meghatározó szerepük van, hiszen képesnek kell lenniük a légköri gázok koncentrációváltozásainak érzékelésére a szélirány és -sebesség függvényében. Az adatok gyűjtése és elemzése általában valós időben zajlik, így a telepek azonnali visszajelzést kaphatnak a CH₄-szintek változásairól.



A CH₄-emisszió mértékének meghatározása ez esetben is a két irányban mért gázkoncentrációk különbsége és a szélesebbég alapján történik.

Néhány vonalmérési rendszer keretében nemcsak nyílt útvonalú spektrométereket, hanem több magasságban elhelyezett, visszaverő tükröket is használnak, amelyek lehetővé teszik a mérések függőleges síkra való kiterjesztését, és ezáltal a „CH₄-felhő” térbeli eloszlásának részletes vizsgálatát. Ez a struktúra különösen azokban a helyzetekben fontos, amikor a területi elrendezés vagy a környezeti tényezők (például a domborzat) komplexebb megközelítést igényelnek.

A vonalmérésekkel hatékonyan nyomon követhető a vizsgált szarvasmarha-állomány révén egységnyi területről légkörbe kerülő CH₄ mennyisége, illetve az emisszió időbeli alakulása. Kihívást jelenthet azonban az emissziós fluxust befolyásoló terület pontos meghatározása, valamint a módszer hatékony alkalmazásához szükséges topográfiai és meteorológiai feltételek biztosítása. A szélviszonyok változékonysága különösen problémás lehet, mivel jelentősen befolyásolja a mérések megbízhatóságát. Ezért a mérési pontokon rendszerint több műszert helyeznek el, hogy kompenzálják az időjárási változások okozta adattorzításokat. Mindezekon túl a megbízható eredmények biztosítása érdekében szükség van a spektrométerek rendszeres kalibrálására, valamint a vonalmérési technológia és protokollok folyamatos fejlesztésére is.

A felhasznált források listáját a cikk terjedelmi korlátai miatt nem közöljük, az a szerkesztőségben érhető el.

