



GENETIKA A METÁNCSSÖKKENTÉS SZOLGÁLATÁBAN I.

A GENETIKAI SZELEKCIÓ ALAPJAI (FOLYTATÁS)

**Szakértő
munkatársunk írása**
Állattenyésztési
Teljesítményvizsgáló Kft.

Cikkünk első részében bemutattuk, hogy a genetikai szelekció eredményessége elsősorban a tenyészcélok körütekintő meghatározásától és a tenyésztértékelés pontosságától függ. Továbbá kiemeltük, hogy a hosszú távú genetikai célok kitűzése önmagában még nem garantálja a kívánt előrehaladást. Ahhoz olyan jól öröklődő és pontosan mérhető fenotípusos tulajdonságok kijelölésére is szükség van, amelyek egyrészt elősegítik e célok elérését, másrészt megbízható szelekciós alapként szolgálnak.

A folytatásban ezért először azt foglaljuk össze, hogy milyen fenotípusos tulajdonságok és mutatók vehetők figyelembe a szarvasmarhák metán- (CH_4 -) kibocsátásának csökkentésére irányuló tenyésztési stratégiákban. Majd áttekintjük a tejtermelés és a különböző CH_4 -kibocsátási jellemzők közötti genetikai összefüggéseket, amelyek feltárása hozzájárul a szelekció hosszú távú hatásainak pontosabb előrejelzéséhez.

Proxyk és CH_4 -kibocsátási jellemzők a szelekcióban

A kutatások során gyakran felmerülő kérdés, hogy a szarvasmarhák enterális CH_4 -termelésének csökkentésére irányuló jövőbeli tenyésztési programokban mely tulajdonságokra (mutatókra) érdemes összpontosítani. Vajon célszerűbb a közvetlenül mért napi CH_4 -kibocsátásra, esetleg az abból képzett mutatókra (különböző kibocsátási jellemzőkre) támaszkodni, vagy inkább a CH_4 -termeléssel összefüggő, ún. proxytulajdonságok alakulását tanácsos figyelembe venni, melyek alapján közvetett módon jelezhető előre az állatok CH_4 -termelése? Az utóbbiak közé tartozik például a tej MIR- (mid-infrared – közép-

infravörös) spektruma, a takarmányértékesítés hatékonysága, a kérődzési idő vagy a bendőmikrobiota összetétele.

A **proxykra (helyettesítő tulajdonságokra) épülő becslések** általában költséghatékonyabbak és gyorsabbak a közvetlen méréseknél, de csak akkor tekinthetők valós alternatívának, ha a kiválasztott proxytulajdonság szoros genetikai kapcsolatban áll az enterális CH_4 -termeléssel, örökölhetősége meghaladja a CH_4 -kibocsátását, rutinszerűen mérhető, valamint a hozzá kapcsolódó adatok széles körben elérhetők (Wall



és mtsai., 2010). Amennyiben ezek a követelmények nem teljesülnek, akkor a becslések pontossága és megbízhatósága jelentősen romolhat, ami téves szelekciós döntésekhez vezethet. A proxyalapú eredményeket ezért mindig kellő óvatossággal kell kezelni, figyelembe véve az alkalmazott módszerek (a helyettesítő tulajdonság mérésének és a CH_4 -kibocsátás számításának) korlátait, a becslési modellek sajátosságait, valamint a lehetséges hibaforrásokat.

A tej MIR-spektroszkópiás vizsgálata – amelyet széles körben alkalmaznak a tejátvételi és termelésellenőrzési folyamatok során – az enterális CH_4 -termelés előrejelzésének egyik legelterjedtebb módszere, mivel a tejsíróösszetétel szoros összefüggést mutat a bendőfermentáció során keletkező CH_4 -mennyiségével. Az eljárás legnagyobb előnye, hogy nagymintás, rutinszerű alkalmazásával jelentős mennyiségű adat gyűjthető a későbbi CH_4 -számításokhoz. Kanada vezető szarvasmarha-tenyésztési szervezetének, a Lactanet vizsgálataiban az így előre jelzett CH_4 -értékek 85%-os genetikai korrelációt mutattak a tényleges CH_4 -mérési adatokkal, örökölhetőségük pedig 23% ($h^2 = 0,23$) volt (Sweett, 2023). Van Engelen és mtsai. (2015) szerint a tejsíróösszetétel alapján becsült CH_4 -termelés h^2 -értéke általában a 0,12–0,44 tartományba esik, míg a takarmányfelvételtől kalkulálté 0,35 és 0,44 között változik.



Egy nagymintás vizsgálatban (Kandel és mtsai., 2017) MIR-adatokon alapuló előrejelzési modellek segítségével becsülték meg 56 957 első laktációs és 34 992 második laktációs holstein-fríz tehén napi CH_4 -kibocsátását, valamint log-transzformált CH_4 -intenzitását (log-transformed methane intensity, LMI: az egységnyi termelt tejre vetített CH_4 -kibocsátás logaritmizált értéke). A log-transzformáció célja az adatok szórásának mérséklése, valamint a különböző tulajdonságok relatív változásainak összehasonlíthatóvá tétele volt. Az eredmények szerint

a napi átlagos CH_4 -kibocsátás a második laktációban kissé meghaladta az első laktációs értéket (433 g/nap vs. 453 g/nap), míg a LMI enyhén csökkent (2,93 vs. 2,86). Ez arra utal, hogy az idősebb tehenek nagyobb mennyiségű CH_4 -t termelnek, de az egységnyi termelt tejre jutó kibocsátásuk mérsékeltebb. Az örökölhetőség értéke mindkét CH_4 -tulajdonság esetében 0,2 körül alakult.

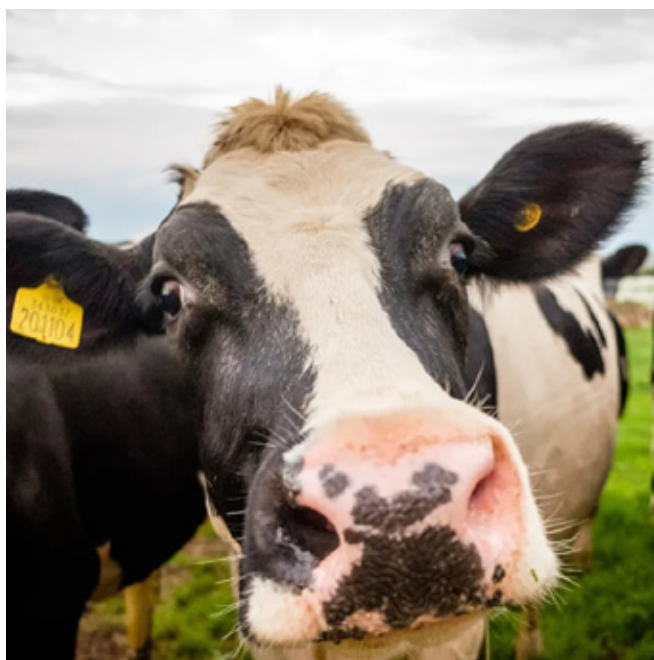
Az enterális CH_4 -kibocsátás mérséklését célzó szelekció során nemcsak proxyk használhatók, hanem olyan összetett jellemzők (indikátorok) is, amelyek **a CH_4 -kibocsátást más fenotípusos tulajdonságokkal kombinálva fejezik ki**. Ezek kialakítására két fő megközelítés létezik:

1. arányképzés – ebben az esetben a CH_4 -kibocsátást egyik másik fenotípusos tulajdonsághoz viszonyítják, például a CH_4 -hozamnál a takarmányfelvételhez/DMI-hez, a CH_4 -intenzitásnál pedig a tejhozamhoz/ECM-hez (lásd a táblázatot; DMI [dry matter intake]: szárazanyag-felvétel, ECM [energy corrected milk]: energiakorrigált tejhozam);
2. többszörös regressziós modellek alkalmazása – ilyenkor a CH_4 -kibocsátás meghatározása több fenotípusos tényező, például a tejhozam, a takarmányfelvétel, a testtömeg és egyéb paraméterek együttes figyelembevételével történik. Ezt a módszert alkalmazzák a reziduális CH_4 -kibocsátás (RMet) meghatározására is, amely a ténylegesen mért CH_4 -kibocsátás és a különböző prediktorok (tejhozam/ECM, [metabolikus] testtömeg, illetve DMI) alapján számított várható CH_4 -kibocsátás közötti eltérést jelzi.

Mindkét megközelítés értékes információkkal szolgálhat a CH_4 -kibocsátás csökkentésére irányuló tenyésztési stratégiákban, ám megvannak a maguk korlátai is. Ha például a szelekció célja a CH_4 -hozam vagy a CH_4 -intenzitás csökkentése, az nagy valószínűséggel a viszonyítási alapként szolgáló jellemzők – vagyis a takarmányfelvétel/DMI, illetve a tejtermelés/ECM – növelését ösztönzi. Ez pedig hosszú távon egyoldalú genetikai előrehaladáshoz vezethet, és olyan nem kívánt mellékhatásokkal járhat, mint a tej beltartalmi paramétereinek romlása, az állatok élettartamának rövidülése vagy reprodukciós teljesítményük csökkenése.



Az arányképzés további hátránya, hogy nem mindig tükrözi pontosan a szelekció genetikai hatásait, mivel az egymáshoz viszonyított tulajdonságok eltérő ütemben változhatnak. Ennek következtében előfordulhat, hogy a CH_4 -hozam vagy a CH_4 -intenzitás csökkenése nem a CH_4 -termelés tényleges mérséklődéséből adódik, hanem a DMI/takarmányfelvétel, illetve a tejhozam/ECM növekedéséből. Ilyen esetekben a CH_4 -kibocsátás változatlan maradhat, sőt, akár emelkedhet is, miközben az aránytulajdonságok látszólagos javulást mutatnak. Mindez félrevezető lehet a szelekciós döntések során, mivel az állatok környezeti hatása valójában nem csökken. Ráadásul az aránytulajdonságok összetett jellegük miatt közvetlen méréssel nem, vagy csak nagy nehézségek árán határozhatók meg.



A **reziduális indikátorok**, vagy más néven „maradék-tulajdonságok”, olyan fenotípusos jellemzők, amelyekből többszörös regressziós modellek segítségével kiszűrték az adott tulajdonságot befolyásoló főbb tényezők hatásait. Következésképp e mutatók a „maradékvarianciát” reprezentálják, amely az adott tulajdonság mögött meghúzódó genetikai különbségekre utal. A reziduális indikátorok közé tartozik a már említett RMet is. Ennek kiszámításakor a mért CH_4 -kibocsátásból levonják a tejhozam (ECM), a takarmányfelvétel/DMI, valamint a (metabolikus) testtömeg súlyozásával becsült kibocsátási értéket. Így e mutató azt tükrözi, hogy az adott állat CH_4 -kibocsátása milyen mértékben tér el az elvárttól. A RMet alkalmazásával lehetővé válik, hogy a szelekció azokra az egyedekre összpontosuljon, amelyek a takarmányfelvételükhöz és a termelési szintjükhez

képest kevesebb CH_4 -t termelnek, tehát genetikailag kedvezőbb CH_4 -kibocsátási profillal rendelkeznek.

Reziduális indikátor még a reziduális takarmányfelvétel (residual feed intake, RFI) is, amely az állatok tényleges takarmányfelvétele és a testtömegük, valamint a tejtermelésük alapján becsült takarmányfelvétel közötti eltérést mutatja.

Bár a maradéktulajdonságok hasznosak lehetnek a genetikai szelekcióban, önmagukban nem biztosítják az optimális genetikai előrehaladást. Ennek oka, hogy a gazdaságilag fontos tulajdonságokkal (például a tejtermeléssel vagy a takarmányhasznosítással) nem mutatnak szoros genetikai kapcsolatot. Így például a RMet csökkenése nem garantálja, hogy az állat magas tejtermelési szinttel vagy jó takarmányhasznosítással is rendelkezik.

Továbbá, összetett jellegük miatt a maradéktulajdonságokra nem végezhető közvetlen szelekció, és az eredmények értelmezése is fokozott körültekintést kíván. E mutatók ugyanis könnyen félrevezetők lehetnek, ha nem vesszük figyelembe a genetikai és környezeti hatások összetettségét, illetve a modellezési hibákból adódó torzításokat.

Ezért a tenyésztési programokban sok szakértő inkább a stabilabb és könnyebben értelmezhető napi CH_4 -kibocsátás használatát részesíti előnyben, még akkor is, ha azt jelentősen befolyásolják olyan tényezők, mint a takarmányfelvétel, a takarmány összetétele, a fermentáció paraméterei (például a bendőtérfogat vagy a takarmány bendőben való tartózkodási ideje), az állat fiziológiai állapota stb.

A szarvasmarhák enterális CH_4 -kibocsátásának csökkentése jelenleg csupán néhány ország tenyésztési programjában szerepel explicit szelekciós célként, és a szakma egyelőre még nem jutott egységes álláspontra abban a kérdésben, hogy az ismertett fenotípusos kibocsátási jellemzők (napi CH_4 -kibocsátás, CH_4 -intenzitás, CH_4 -hozam, RMet) közül melyik lenne legalkalmasabb szelekciós alapként. További nehézséget jelent a CH_4 -kibocsátás csökkentésének – mint szelekciós célnak – a megfelelő súlyozása az összetett tenyészértékindexekben, hiszen a CH_4 -kibocsátás jelenleg még nincs „beárazva”, tehát nincs közvetlen (negatív) piaci értéke, csupán környezeti teherként jelenik meg.



Táblázat: Az enterális CH₄-kibocsátással kapcsolatos szelekciós jellemzők

Jellemző			
neve	meghatározása (mértékegysége)	használatának előnye	használatának hátránya
CH ₄ -kibocsátás	Egy nap alatt kibocsátott CH ₄ -mennyiség (g CH ₄ /nap)	Közvetlenül mérhető, számításához nincs szükség egyéb fenotípusos (pl. tejtermelésre, testtömegre vagy DMI-re vonatkozó) adatokra	Erős genetikai korrelációt mutat a takarmányfelvétellel (DMI-vel) és a tejtermeléssel, ezért a CH ₄ -kibocsátás csökkentésére irányuló szelekció során elengedhetetlen e két tulajdonság megfelelő súlyozása
CH ₄ -intenzitás	A CH ₄ -kibocsátás egységnyi termelési outputhoz viszonyított értéke, pl. egységnyi termelt tejre vagy ECM-re jutó CH ₄ -kibocsátás (g CH ₄ /l tej)	Jól tükrözi az állatok termeléssel összefüggő környezeti hatását, így hasznos mutató lehet a tejtermelés fenntarthatóságának értékelésében	Összetett tulajdonság, amely közvetlen szelekcióra kevésbé alkalmas; a tejtermeléssel fennálló szoros kapcsolata torzíthatja a szelekciós értékeléseket
CH ₄ -hozam	A CH ₄ -kibocsátás egységnyi inputhoz viszonyított értéke, pl. egységnyi DMI-re/takarmányra jutó CH ₄ -kibocsátás (g CH ₄ /kg DMI vagy takarmány)	Hasznos indikátor lehet a takarmányhatékonyság javítására irányuló szelekcióban, valamint a többtényezős szelekciós stratégiákban	Összetett tulajdonság, amelyre nehéz közvetlen szelekciót végezni; folyamatos és megbízható adatgyűjtést igényel, ami nehézségbe ütközik
Reziduális CH ₄ -kibocsátás	A mért (tényleges) és a becsült (elvárt) CH ₄ -kibocsátás közötti különbség (g CH ₄ /nap)	Fontos statisztikai mutató, amelyet a CH ₄ -termelést befolyásoló tényezők ([metabolikus] testtömeg, DMI, tejhozam/ECM) figyelembevételével határoznak meg; közvetett módon támogatja a szelekciós döntéseket	Nehezen értelmezhető tulajdonság, mivel a CH ₄ -kibocsátás azon részét tükrözi, amely az ismert befolyásoló tényezők hatásának kiszűrése után fennmarad; nem alkalmazható közvetlen szelekciós célként; örökölhetősége általában alacsonyabb, mint más CH ₄ -kibocsátási jellemzőké*

* Manzanilla-Pech és mtsai. (2021) adatai szerint.

Megjegyzés: Természetesen a kibocsátott CH₄ mennyisége nemcsak grammal, hanem literben is mérhető, a tejtermelés pedig kilogrammban is kifejezhető.

Forrás: de Haas és mtsai. (2017) nyomán saját összeállítás.

A tejtermelés és a CH₄-kibocsátás kapcsolata

A különböző tenyészcél-tulajdonságok közötti összefüggések megértése és figyelembevétele alapvető jelentőségű, hiszen egyes jellemzők egymást erősítve (szinergikus kapcsolat), míg mások ellentétes irányba hatva (antagonisztikus kapcsolat) befolyásolják a tenyésztési eredményeket.



Az előbbiekre tipikus példa a takarmányértékesítés és a tejtermelés viszonya: azok a tehenek, amelyek hatékonyabban alakítják át a felvett takarmányt tejjé, jellemzően nagyobb tejhozamot érnek el. Ezzel szemben a tejtermelés és a szaporodási mutatók között jellemzően antagonisztikus összefüggés figyelhető meg: a nagyobb tejhozam gyakran jár a vemhesülési arány csökkenésével és a szervízperiódus (két ellés közötti idő) meghosszabbodásával, ami kedvezőtlenül befolyásolhatja a gazdasági eredményeket. Ezért a szelekciós stratégiák kidolgozásakor kiemelten fontos a tenyésztési célok megfelelő súlyozása, hogy egy adott szelekciós kritérium előnyben részesítése ne vezessen más tulajdonságok romlásához.

A tenyészcélként kijelölt tulajdonságok és az enterális CH₄-kibocsátás közötti kapcsolat feltárása két szempontból is lényeges. Egyrészt segít megérteni, hogy a jelenlegi tenyésztési irány milyen hatást gyakorol az



állatok CH_4 -termelésére, másrészt előrevetíti, hogy egy esetleges CH_4 -csökkentésre irányuló szelekció hosszabb távon milyen következményekkel járna a különböző termelési és takarmányhasznosítási tulajdonságok alakulására. Szakirodalmi adatok szerint az állatok egészségi és szaporodásbiológiai jellemzőinek kapcsolata a CH_4 -termeléssel gyenge vagy elhanyagolható, ami azt jelenti, hogy az utóbbi csökkentése várhatóan nem gyakorol számottevő hatást ezekre a tulajdonságokra (Zetouni és mtsai., 2018).

Tekintettel a tejtermelés központi szerepére a tejhasznú szarvasmarhák szelekciós programjaiban, a továbbiakban annak genetikai összefüggéseit elemezzük a már bemutatott CH_4 -kibocsátási jellemzőkkel.

A legtöbb kutató egyetért abban, hogy a tejtermelés növekedése általában több takarmány felvételével jár, ami fenotípusos szinten a tehenek **napi CH_4 -kibocsátásának** emelkedését eredményezi (Lassen és Lovendahl, 2016). Genetikai szinten is jellemzően közepesen erős, pozitív korreláció (r_g) figyelhető meg a tejhozam és a napi CH_4 -kibocsátás között. Breider és mtsai. (2019) holstein-fríz teheneknél $r_g = 0,38\text{--}0,57$ értékeket állapítottak meg laktációs szakasztól függően, míg egy 17 tanulmány adatait (40 örökölhetőségi becslést és 32 genetikai korrelációt) összegző metaanalízis (Hossein-Zadeh, 2022) az ECM és a napi CH_4 -kibocsátás genetikai korrelációját 0,45-re becsülte. (Ha két tulajdonság között genetikai kapcsolat van, akkor azok közös, genetikai alapú variabilitást mutatnak.) Ezek az eredmények tehát arra utalnak, hogy a nagyobb tejtermelő képességű tehenek emésztőrendszerében a takarmánylebontás során rendszerint több CH_4 képződik.

Mindemellett a tejhozam és a napi (abszolút) CH_4 -kibocsátás genetikai kapcsolatának erőssége nem olyan mértékű, hogy kizárná a CH_4 -termelés genetikai csökkentésének lehetőségét a tejtermelés változatlan szinten tartása mellett. Ennek hátterében egyrészt az áll, hogy egyes tehenek hatékonyabban hasznosítják a takarmányt, így ugyanabból a mennyiségből kisebb energiavesztéssel, több tejet képesek előállítani. Másrészt a tejhozam és a CH_4 -kibocsátás közötti összefüggés nem lineáris, vagyis az előbbi növekedése nem feltétlenül jár együtt az utóbbi arányos emelkedésével.

A **nagyobb tejhozamú tehenek számos esetben hatékonyabban hasznosítják a takarmányt, így** egységnyi felvett takarmányra (DMI-re) vetítve relatíve kevesebb CH_4 -t termelnek, vagyis a **CH_4 -hozamuk alacsonyabb**. Ez részben annak köszönhető, hogy a CH_4 -kibocsátás nem lineárisan változik a takarmányfelvétel ingadozásával, mivel a bendőmikrobaközösség összetétele és az állatok energiahasznosítása egyedi eltéréseket mutat. Genetikai szinten ezt több kutatás is alátámasztotta. Hossein-Zadeh (2022) metaanalízise szerint a CH_4 -hozam és az ECM genetikai korrelációja $-0,43$, míg egy japán vizsgálatban (Uemoto és mtsai., 2024) a snifferes mérések alapján számított CH_4 -konverziós együttható (a bevitt energia CH_4 formájában távozó hányada) és az átlagos napi tejhozam között közepesen erős, negatív genetikai összefüggést ($r_g = -0,53$) mutattak ki. Ezek az eredmények arra utalnak, hogy a nagyobb takarmányfelvétel (DMI) kedvezőbb fajlagos CH_4 -kibocsátással társul.

Érdekes megfigyelés, hogy a laktáció korai szakaszában – amikor a tehenek megnövekedett energiaigényük egy részét testzsírtartalékaik mobilizációjával fedezik – a CH_4 -hozam (CH_4/DMI és CH_4/NDF) csökkenhet. (NDF: neutral detergent fibre – neutrális detergens rost.) Ennek hátterében az alacsonyabb vérplazma-acetát-koncentráció és a gyorsabb bendőpasszázs áll. Egyes vizsgálatok szerint az intenzívebb testzsírlebontású, nagyobb tejhozamú tehenek az 5. héten alacsonyabb CH_4/DMI és CH_4/NDF értékeket mutattak, mint kisebb tejhozamú társaik, de a laktáció előrehaladtával ez a különbség fokozatosan eltűnt. Mindez arra utal, hogy a testtartalékok mozgósításának mértéke és az ehhez kapcsolódó metabolikus folyamatok hatással lehetnek a CH_4 -kibocsátásra, különösen a laktáció korai szakaszában (Bialek és mtsai., 2016).

A CH_4 -intenzitás – vagyis az egységnyi tejtermelésre vetített CH_4 -kibocsátás – értelemszerűen **fordított kapcsolatban áll a tejhozammal**: minél több tejet termel egy tehén, annál kisebb lesz a termelt tej egységnyi mennyiségére jutó CH_4 -kibocsátás. A szakirodalom ezt „hígító” hatásként említi. Hossein-Zadeh (2022) elemzése szerint a CH_4 -intenzitás és az ECM genetikai korrelációjának értéke $-0,26$. Kandel és mtsai.-nak (2017) nagymintás vizsgálata – amelyben a tej MIR-spektroszkópiás adatait használták a CH_4 -kibocsátás becslésére – szintén negatív genetikai



korrelációt tárt fel a CH_4 -intenzitás és a tejtermelési tulajdonságok között. Az r_g erőssége azonban változó volt ($-0,21$ -től $-0,88$ -ig!), ami modellfüggő eltérésekből adódott. A becsléseket ugyanis részben torzította, hogy a tejsírsavprofil a kutatók nagyobb súllyal vették figyelembe, mint a tényleges takarmányfelvételt vagy a bendőfermentáció paramétereit. Emiatt a nagyobb tejhozamú tehenek hígabb tejösszetétele a számításokban alacsonyabb CH_4 -kibocsátást eredményezett, függetlenül attól, hogy a valós CH_4 -termelésük mennyiben tért el más állatokétól. Kandel és mtsai. (2017) továbbá azt is megállapították, hogy a LMI (log-transzformált CH_4 -intenzitás) szoros negatív kapcsolatot mutat a tejhozammal.



Manzanilla-Pech és mtsai. (2021) szerint **az ismertett mutatók közül a RMet a legalkalmasabb a szarvasmarhák CH_4 -termelésének genetikai értékelésére**, valamint olyan egyedek azonosítására, amelyek kisebb CH_4 -kibocsátás mellett is fenntartják a termelési szintjüket. Mint korábban említettük, a RMet az állatok CH_4 -kibocsátásának genetikai komponensét tükrözi, mivel a számításakor kiszűrjük a (metabolikus) testtömeg, a tejhozam és a takarmányfelvétel (DMI) közvetlen hatásait. **Alkalmazásával kapcsolatban azonban több módszertani és értelmezési kihívás is felmerül:**

1. átfedések és torzítások a többszörös regressziós modellekben – ezek kedvezőtlenül befolyásolhatják a genetikai paraméterek pontosságát és a szelekciós döntések hatékonyságát;
2. a korrekciós eljárások becslésekre gyakorolt jelentős hatása – nem állapítható meg egyértelműen, hogy melyik módszer nyújtja a legkevesbé torzított genetikai értékeléseket;
3. a RMet kizárólagos szelekciós kritériumként való alkalmazhatóságának korlátai – mivel e mutató önmagában nem garantálja az optimális szelekciós eredményeket, célszerű más tulajdonságokkal együtt használni;

4. nagy mintaméret és adatgyűjtési kihívások – a számításokhoz nagyszámú mérési adat szükséges, amelynek gyűjtése költség- és időigényes;
5. populációspecifikus genetikai korrelációk kérdése – a RMet és a tejtermelés közötti genetikai korreláció populációként eltérő lehet, így egy adott állományban kapott eredmények nem feltétlenül érvényesek más populációkra;
6. modellfüggőség – a statisztikai modellek paraméterezése nem egységes, ami az általuk kimutatott genetikai kapcsolat erősségét és irányát is befolyásolhatja; ezért nem egyértelmű, hogy melyik megközelítés biztosítja a legmegbízhatóbb genetikai értékelést.

A RMet és a tejtermelés közötti relációra vonatkozóan csak korlátozott számú szakirodalmi adat áll rendelkezésre. Breider és mtsai.-nak (2018) eredményei szerint e két tulajdonság között gyenge vagy elhanyagolható genetikai korreláció figyelhető meg, vagyis a tejhozam növekedése önmagában nem feltétlenül befolyásolja a RMet értékét, illetve fordítva. A különböző RMet-változatok eltérő erősségű genetikai összefüggéseket mutatnak a tejhozammal, ami elsősorban a modellezési megközelítéstől, a figyelembe vett tényezőktől, valamint a vizsgált populáció sajátosságaitól függ. Például a metabolikus testtömeg, a DMI és az ECM részleges regressziójával, valamint fix hatások (állatok életkora, ellés száma, takarmányozási stratégia stb.) figyelembevételével kalkulált RMet3 genetikai korrelációja a tejhozammal $-0,24$, míg az ECM-mel $-0,17$ volt. A negatív korrelációk hátterében valószínűleg a becslés sajátosságai miatt kialakult, nem kívánt genetikai átfedés állt, különösen a DMI és az ECM kettős figyelembevételének következtében. Hasonló torzítás figyelhető meg a DMI és az ECM részleges regressziójával kalkulált RMet2 esetében is, ahol az ECM hatása szerepelt kétszeresen a modellben. Tehát a RMet ígéretes eszköz lehet a CH_4 -kibocsátás csökkentésében, alkalmazhatósága azonban jelentős mértékben múlik a modell specifikációján és a bevont tényezők közötti kölcsönhatásokon.

Eddig elsősorban a genetikai összefüggésekre helyeztük a hangsúlyt, azonban érdemes röviden kitérni a tejtermelés és a CH_4 -kibocsátás fenotípusos „együttváltozásaira” is. Ezek iránya jellemzően megegyezik a genetikai korrelációkéval, ugyanakkor erősségük eltérhet azokétól. Mivel a fenotípusos



kapcsolatokra számos tényező gyakorol hatást, a szelekciós stratégiák kialakításakor célszerűbb a genetikai alapokra helyezni a hangsúlyt.

Mint arra az előzőekben rámutattunk, a különböző tulajdonságok genetikai összefüggéseit vizsgáló kutatások gyakran ellentmondásos eredményekre jutnak, ami többnyire mérési pontatlanságokból, módszertani különbségekből vagy modellezési torzításokból adódik. (Kamalanathan és mtsai., 2023). Az eredmények értékelésekor ezért elengedhetetlen figyelembe venni a vizsgált populáció, valamint az alkalmazott mérési/becslési módszerek sajátosságait. Különösen fontos szem előtt tartani, hogy a kibocsátási adatok közvetlen (légzőkamrákkal, SF₆-os nyomjelző technikával, GreenFeed-rendszerrel stb. végzett) mérésekből vagy direkt/indirekt adatgyűjtést követő becslésekből (például fejőházi snifferek mérésein alapuló számításokból vagy MIR-spektroszkópián alapuló predikciókból) származnak-e. Az előbbiek ugyanis – mint arról rovatunkban már többször szó esett – kisebb egyedszámra korlátozódnak, de pontosabb és megbízhatóbb adatokat szolgáltatnak, míg az utóbbiak nagyobb populációkra is kiterjeszthetők, ám alkalmazásukat módszertani korlátok nehezítik. A kétféle metodika okozta különbségeket jól szemléltetik Van Engelen és mtsai.-nak (2018) eredményei. Átfogó kutatásukban a tej MIR-spektrumából előre jelzett CH₄-termelés és a tejtermelés között negatív genetikai kapcsolatot mutattak ki, míg a közvetlen mérések (GreenFeed-rendszerrel végzett vizsgálatok)

ezzel ellenkező, pozitív összefüggést tártak fel.

A modellalapú becslések esetében különösen fontos az eredmények óvatos értelmezése, mivel egyes modellek sajátosságai jelentős torzításokat eredményezhetnek. Például, ha a CH₄-kibocsátást a tejhozam alapján becsülik, a kapott korreláció szükségszerűen erős lesz, hiszen a tejtermelés maga is a predikció egyik meghatározó tényezője. Ezt jól szemlélteti Ghiasi és mtsai.-nak (2022) lengyelországi holstein-fríz teheneken végzett vizsgálata, amely rendkívül szoros ($r_g \approx 0,85-0,98$) fenotípusos összefüggést mutatott ki a tejhozam és az abból számított CH₄-kibocsátás között. Az ilyen extrém magas korrelációk azonban sokkal inkább a becslési modell sajátosságaira utalnak, mintsem a tényleges biológiai összefüggésekre.

Mint Kandel és mtsai.-nak (2017) kutatása kapcsán már említettük, a MIR-alapú becslési eljárások esetében is előfordulhatnak torzító hatások, különösen akkor, ha egyes tényezők (például a tejszírosszetétel) aránytalanul nagy súlyt kapnak a predikció során. Mivel az ilyen előrejelzések nagymértékben függenek az alkalmazott modell paraméterezésétől, az eredmények értékelésekor elengedhetetlen a közvetlen mérésekkel történő validálás, hogy minimalizáljuk az esetleges módszertani torzításokat.

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

