

A genetikai kapacitás és táplálóanyag-ellátás néhány összefüggése növendék- és hízó sertésekben – irodalmi áttekintés

Relationships between genetic potential and nutrient supply in growing and finishing pigs – literature review

FŐGLEIN Flóra   – TOSSENBERGER János 

ÖSSZEFOGLALÁS

A sertés tenyésztésben a genetikai potenciál hatékony kihasználása szorosan összefügg a táplálóanyag-ellátás, különösen a fehérje- és esszenciális aminosav-ellátás optimalizálásával. A modern genotípusok gyorsabb növekedésre, jobb takarmányhasznosításra és nagyobb soványhús-arány elérésére képesek, azonban fenotípusos teljesítményük nagymértékben függ az etetett takarmány összetételétől. Jelen áttekintés bemutatja a genetikai kapacitás és a fehérjeellátás közötti főbb kölcsönhatásokat, kiemelve a genotípus-specifikus takarmányozás jelentőségét a növendék- és hízó sertések esetében. Az esszenciális aminosavak – különösen a lizin, metionin, treonin és triptofán – megfelelő aránya kulcsfontosságú a fehérje-beépülés és az izomnövekedés optimalizálásában. Mind a fehérjehiány, mind a túlzott fehérjebevitel kedvezőtlen hatással van a növekedésre, az anyagcserére és a környezeti fenntarthatóságra. A precíziós és fázisos takarmányozás lehetővé teszi a tápanyagellátás pontosabb illesztését az állatok tényleges igényeihez, javítva a takarmányhasznosítást és csökkentve a nitrogénkibocsátást. A genetikai különbségek figyelembevétele elengedhetetlen a hatékony és fenntartható termelési rendszerek kialakításához.

Kulcsszavak: genetikai potenciál, genotípus x takarmány interakció, fenntartható sertés tenyésztés, fehérjehasznosítás, takarmányhasznosítás, precíziós takarmányozás

SUMMARY

The efficient utilization of genetic potential in pig production is closely related to the optimization of nutrient supply, particularly protein and essential amino acids. Modern genotypes exhibit faster growth, improved feed efficiency, and a higher lean meat proportion; however, their phenotypic performance largely depends on diet composition. This review presents the interactions between genetics and protein nutrition, highlighting the importance of genotype-specific feeding strategies in growing and finishing pigs. The appropriate balance of essential amino acids—especially lysine, methionine, threonine, and tryptophan—is crucial for optimisation protein deposition and muscle growth. Both protein deficiency and excessive protein intake have negative effects on growth performance, metabolism, and environmental sustainability. Precision feeding/nutrition and phase feeding allow a more accurate alignment of nutrient supply with animal requirements, improving feed efficiency and reducing nitrogen excretion. Considering genetic differences is essential for the development of efficient and sustainable production systems.

Keywords: genetic potential, genotype × diet interaction, sustainable pig production, protein utilization, feed efficiency, precision feeding

1. Bevezetés

A sertésitenyésztes egyik alapvető célja a genetikai potenciál optimális kihasználása a növekedési ütem, a takarmányhasznosítás és a húsminőség optimalizálása érdekében (van Milgen és Dourmad, 2015). A modern genotípusok célzott szelekciójának eredményeként a sertések gyorsabban növekednek, nagyobb soványhús-arányt érnek el, és hatékonyabban hasznosítják a takarmányt (Son és mtsai., 2019). A genetikai potenciál fenotípusos kifejeződése azonban nagymértékben függ a táplálóanyag-ellátástól, különösen a fehérjetartalom és az esszenciális aminosavak megfelelő arányától (de Almeida és mtsai., 2024). Az optimális fehérjetartalom és összetétel nemcsak a testtömeg növekedését befolyásolja, hanem közvetlen hatással van a soványhús-arányra és a takarmányértékesítésre is (Pieper és mtsai., 2016). A genetikai kapacitás és a takarmány közötti interakciók kulcsfontosságúak a fenotípusos teljesítmény szempontjából. A nagy genetikai potenciállal rendelkező sertések esetében a fehérjehiányos takarmány korlátozhatja a növekedési ütemet és rontja a takarmányhasznosítást, míg a hagyományos genotípusok nagyobb tűrőképességgel rendelkezhetnek a tápanyag-ingadozásokkal szemben (de Almeida és mtsai., 2024). Jelen dolgozat célja áttekinteni a sertések genetikai kapacitása és táplálóanyag ellátása közötti fontosabb kölcsönhatásokat, továbbá azok összefüggéseit a fenntarthatósági és gazdasági szempontokra.

2. Genetikai kapacitás és a teljesítmény néhány összefüggése

A sertésitenyésztes egyik legfontosabb célja a genetikai potenciál maximális kihasználása a növekedési ütem, a takarmányhasznosítás és a húsminőség optimalizálása érdekében. A modern genetikai szelekció lehetővé teszi a gyors növekedés, a magas soványhús-arány és a hatékony takarmányhasznosítás elérését, ugyanakkor a fenotípusos teljesítmény nagymértékben függ a takarmány táplálóanyagtartalmától, különösen a fehérje- és aminosav-összetételtől (van Milgen és Dourmad, 2015). A genetikai paraméterek, mint a heritabilitás és a genetikai korrelációk, alapvető szerepet játszanak a tenyésztési célok meghatározásában. Nguyen és Cameron (2005) vizsgálata szerint a napi súlygyarapodás örökölhetősége 0,19, míg a soványhús-arány heritabilitása 0,40, ami lehetővé tette a hatékony szelekciót a növekedés- és a húsminőség tekintetében. Emellett a genetikai összefüggések azt is lehetővé teszik, hogy bizonyos tulajdonságokra történő szelekció pozitív hatással legyen más, fenotípusosan fontos jellemzőkre is, például a takarmányértékesítésre és a vágott test paraméterek közötti kapcsolat révén (Godinho és mtsai., 2018). A fontosabb teljesítményparaméterek heritabilitása (h^2) és genetikai korrelációja az 1. táblázatban látható.

1. táblázat. Genetikai paraméterek összefüggései sertéseknél

Tulajdonság	Heritabilitás (h^2)	Genetikai korrelációk
Napi súlygyarapodás	0,19	+0,35 a soványhús aránnyal
Soványhús arány	0,40	+0,35 a napi súlygyarapodással +0,25 a takarmányértékesítéssel
Takarmányértékesítés	0,20-0,30	+0,25 a soványhús aránnyal +0,10-0,15 az ADG-vel

Forrás: Godinho és mtsai. (2018)

A genetika és a takarmányozás kölcsönhatása kiemelt jelentőségű a fenotípusos teljesítmény szempontjából. *Godinho és mtsai. (2018)* kísérleteik során kimutatták, hogy a takarmányok kémiai összetétele, például a nagy rosttartalom vagy nagy fehérjetartalom, eltérő hatással vannak az azonos genotípusú sertések zsírdepozíciójára, energiahasznosítására és takarmányhasznosításra. Ez azt jelzi, hogy a genetikai szelekció eredményei csak akkor realizálódnak optimálisan, ha a takarmány összetétele és tápláléértéke a genotípus igényeihez igazodik. Az emésztés/emészthetőség hatékonyságának genetikai meghatározottsága szintén fontos tényező. *Déru és mtsai. (2021)* vizsgálataik során megállapították, hogy az emészthetőségi együttthatók örökölhetősége mérsékelt-közepes mértékű volt. Emellett az emészthetőségi mutatók közepes–erős negatív genetikai korrelációt mutattak ki a napi takarmányfelvétel-, és gyenge–közepes negatív korrelációt a takarmányértékesítés vonatkozásában. Ez azt mutatja, hogy nemcsak a genetikai háttér, hanem a takarmány emészthetősége is kulcsfontosságú a fenotípusos potenciál kihasználásában, és a takarmány táplálóanyagtartalmának célirányos optimalizálása nélkül a szelektált genotípusok nem érik el teljesítményük csúcsát. Az új irányok között kiemelt szerepe van a fehérje-hasznosulásra történő genetikai szelekciónak. Újabb kutatások szerint (*Ewaoluwabemiga és mtsai., 2023*) lehetséges olyan vonalak tenyésztése, amelyek kevesebb fehérjével is nagyobb izomnövekedést érnek el, így csökkentve a nitrogén-kibocsátást és növelve a takarmány táplálóanyagainak hasznosulását, miközben a húsmínőség nem romlik. Ez különösen fontos a fenntartható sertésenyésztés/tartás szempontjából, mivel a környezeti terhelés csökkentése és a költséghatékony termelés alapvető követelménynek tekintendő. Fontos azonban kiemelni, hogy a genetikai kapacitás és a takarmány összetételének optimalizálása integrált megközelítést igényel. A fenotípusos teljesítmény csak akkor realizálódik, ha a genotípus és a takarmány között összhang

van, tekintettel arra, hogy a szelektált populáció és a termelő/vizsgált populáció környezeti feltételei gyakran eltérnek. Emiatt a takarmány-genetika interakciók figyelembevétele nélkül a szelekció eredményei részlegesen vagy teljesen elveszhetnek (Godinho és mtsai., 2018). Összefoglalva megállapítható, hogy a genetikai szelekció a sertésitenyésztésben jelentős előrelépést hozott a növekedés, testösszetétel és takarmány értékesítés javításának tekintetében, azonban a fenotípusos teljesítmény csak a takarmány és a genotípus megfelelő integrációja révén érhető el. A genotípus x takarmányozás kölcsönhatások, az emészthetőség genetikai komponensei, valamint a fehérjeértékesítés javítására történő szelekció mind azt mutatják, hogy a jövő tenyésztési koncepciójának integrálnak kell lennie, annak a fenntarthatóságot, takarmányozáshatékonyágának további javítását kell szolgálnia húsminőség egyidejű javítása mellett.

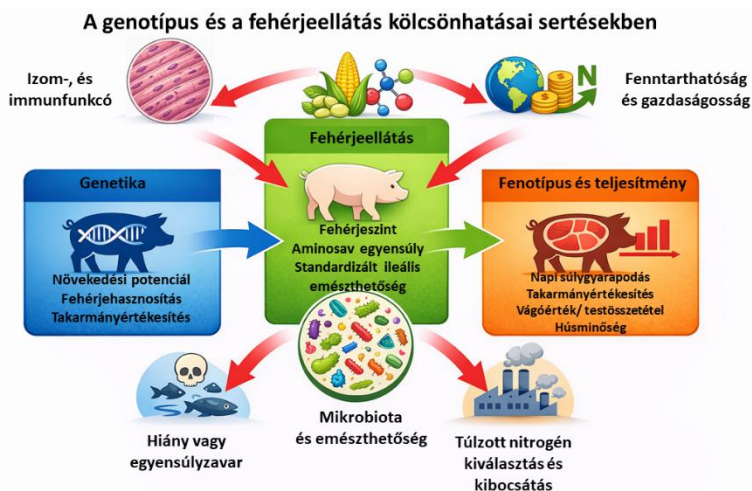
3. Fehérjeforrások és aminosavak

A sertésitenyésztésben a fehérjeforrások biztosítják a növekedéshez és létfenntartáshoz szükséges aminosavakat, amelyek az izomfehérje-szintézis és a teljesítmény egyik legfontosabb korlátozó tényezői (Wang és mtsai., 2018). A fehérjeellátás gazdasági jelentősége kiemelkedő, mivel a takarmányköltségen belül a fehérjehordozók adják a legmagasabb költséghányadot, miközben a fehérjeellátás optimalizálása döntően befolyásolja a növendék és hízó sertések testtömeg-gyapadását, takarmányértékesítését és a végtermék minőségét (Woyengo és mtsai., 2014). A hazai takarmányfehérje források alapjait évtizedek óta a szója (*Glycine max*) szolgáltatja. A monogasztrikus állatok számára a legelterjedtebb növényi fehérjeforrás, és a világ legnépszerűbb hüvelyes olajmag kultúrája (FAO, 2013). A szójabab átlagosan 40–41% fehérjét tartalmaz a szárazanyagtartalomra vonatkoztatva. A szójabab hasonló mennyiségű szénhidrátot is tartalmaz, de a takarmányokban a szénhidrátok táplálkozásélettani és antinutritív hatásait gyakran figyelmen kívül hagyják (Irish és Balnave, 1993). A fehérjeforrások értékelése során a nyersfehérje-tartalom mellett kiemelt szerepe van az esszenciális aminosav arányának és azok standardizált ileális emészthetőségének (SID). Stein és mtsai. (2007) szerint a SID-értékek pontos ismerete lehetővé teszi a takarmányozással foglalkozó szakemberek számára, hogy minimalizálják a fehérje-felesleget és optimalizálják a testfehérje-szintézisét. Szükséges azonban megjegyezni, hogy a hüvelyes magvak és egyes olajosmag-darák esetében az antinutritív komponensek (pl. fitát, proteáz-gátlók) jelentősen csökkenthetik az emészthetőséget. A növekedésben limitáló esszenciális aminosavak elsősorban a lizin, metionin, treonin és triptofán megfelelő aránya elengedhetetlen az izomnövekedéshez és a fehérje depozíció maximalizálásához. Hiányuk a növekedés gátlásához, a fajlagos takarmányértékesítés romlásához és a nitrogénkiválasztás növekedéséhez vezet. A kiegyensúlyozott aminosav-ellátás és a megfelelő fehérjeforrások kiválasztása szoros

összefüggésben áll a takarmányértékesítéssel. Már korábbi kutatások is kimutatták, hogy az esszenciális aminosavak megfelelő aránya lehetővé teszi a nyersfehérjetartalom csökkentését anélkül, hogy a növekedési teljesítmény romlana (Freeden és mtsai., 1989). Ezzel egyidejűleg javul a nitrogén-beépülés hatékonysága és csökken a környezeti terhelés (Esteves és mtsai., 2021). A sertés-takarmányozásban a szójadara, napraforgódara és hüvelyesek SID-értékei alapján történő receptúra formulázás bizonyítottan javítja a testtömeg-gyarapodást és javítja a takarmányértékesítést (Son és mtsai., 2019). A hőkezelt melléktermékek (pl. szesz- vagy bioetanol-ipari gabonamelléktermék) aminosav-emészthetőségének ismerete szintén kritikus a hatékony takarmányozás szempontjából (Almeida et al., 2013). A fehérjeellátás és hasznosítás optimalizálása ezért nem csupán takarmányozási kérdés, hanem a genetikai potenciálhoz igazodó, összetett állattenyésztési feladat. A különböző genotípusok eltérő fehérjeemésztési képességgel és fehérjeigénnyel rendelkeznek, ami szükségessé teszi a genotípus-specifikus receptúrák alkalmazását (Stein, 2016, Tenke és mtsai., 2023). A nagy növekedési erélyű, modern sertésvonalak számára általában nagyobb lizin szint és pontosan beállított ideális aminosav-arány szükséges, míg a kevésbé intenzív genotípusok jobban tolerálják az alacsonyabb fehérjetartalmat is (Wang és mtsai., 2018). Összességében a fehérjetakarmányok szerepe stratégiai jelentőségű a sertésenyésztésben: meghatározzák a termelési mutatókat, költséghatékonyságot és a környezeti fenntarthatóságot, miközben szoros összefüggésben állnak a genetikai adottságokkal és a modern tenyésztési programok eredményeivel (Cui és mtsai., 2022).

4. Genetika × takarmány interakciók

A sertésenyésztés modern célkitűzései közé tartozik a fenntartható, gazdaságos és környezetbarát takarmányozás, amely optimalizálja a testtömeg-gyarapodást, a fehérje-beépülést és a húsminőséget. Az 1. ábra áttekintően szemlélteti, hogyan hat a genetikai potenciál és a takarmányfehérje/aminosav ellátás kölcsönhatása a sertések fenotípusos teljesítményére, a takarmányhasznosításra és a fenntarthatósági tényezőkre.



1. ábra. A genotípus és a fehérjeellátás kölcsönhatásai sertésekben
(a feldolgozott szakirodalmak alapján)

Az elmúlt évtizedek kutatásai egyértelműen rámutattak arra, hogy a genetikai potenciál és a takarmány minősége, illetve összetétele nem független tényezők, hanem komplex kölcsönhatásban hatnak a fenotípusos teljesítményre. Ez a kölcsönhatás számos paramétert érint, többek között a növekedési ütemet, a takarmányhasznosítást a fehérje- és energia beépülést, valamint a zsírlerakódást és a húsminőséget. A nagy genetikai potenciállal rendelkező sertések nagy fehérjetartalmú, optimális aminosav-profilú takarmányt igényelnek. *Stein és mtsai.* (2007) valamint *Son és mtsai.* (2019) egyaránt kimutatták, hogy az esszenciális aminosavak különösen a lizin, metionin, treonin és triptofán kritikusak a testfehérje-szintézishez és az izomnövekedéshez. Amennyiben a takarmány nem biztosít elegendő mennyiséget vagy arányt ezen aminosavakból, csökken az izomtömeg gyarapodása, növekszik a zsírlerakódás, és romlik a takarmányhasznosítás (*Almeida és mtsai.*, 2013). A különböző genetikai vonalak ezen paraméterekre eltérő érzékenységet mutathatnak, ami kiemeli a genetika és a takarmány interakció jelentőségét. *Godinho és mtsai.* (2018) tanulmányukban kimutatták, hogy a különböző genotípusú sertések eltérően reagálnak az eltérő takarmányösszetételre, különösen a zsírdepozíció, tovább az energia és takarmányfelhasználás tekintetében. Eredményeik szerint a fenotípusos takarmányértékesítés és a növekedési jellemzők nem teljesen függetlenek a genetikai háttértől, hanem a takarmány típusa közvetlenül módosítja a genetikai potenciál fenotípusos kifejeződését. A fehérje értékesítés, illetve a fehérje-beépülés hatékonysága, genetikai paraméterekkel jól meghatározható tulajdonság. *Ewaoluwaogbemiga és mtsai.* (2023) munkájukban bemutatták, hogy a fehérjehasználtság hatékonysága jól öröklhető, de azt nagymértékben

befolyásolja a takarmány összetétele. Alacsony fehérjetartalmú diétán a különböző genotípusok eltérően hasznosítják a felvett fehérjét, így a fenotípusos teljesítmény optimalizálása érdekében a diéta és a genetikai háttér egyaránt kritikus tényezőnek tekintendő (*Almeida és mtsai., 2013*). A genotípus x takarmány interakciót jól illusztrálja *Cameron és mtsai. (1999)* tanulmánya is. A kutatás során különböző szelekciós vonalakat és kontroll vonalakat etettek eltérő lizin:energia arányú, izoenergetikusan összeállított diétákkal. Az eredményeik azt mutatták, hogy a testösszetétel és a húsminőség bizonyos paraméterei – különösen a zsír-izom arány – érzékenyek a genotípus x takarmány kölcsönhatásra, míg a legtöbb növekedési jellemző stabil maradt a genotípus és a takarmány kombinációja ellenére. Ez azt jelzi, hogy a genetikai potenciál fenotípusos kifejeződését nem lehet izoláltan vizsgálni, mert az etetett takarmánykeverék paraméterei abban kritikus szerepet játszanak. Az utóbbi évek kutatásai rámutattak, hogy a takarmány összetétele és a genetikai háttér kölcsönhatása nem csupán a klasszikus fenotípusos jellemzőkben jelentkezik, hanem az emésztési hatékonyságot közvetítő mikrobiota összetételében is. *Déru és mtsai. (2021)* megállapították, hogy a bél-mikrobiota összetétele és aktivitásának profilja genetikailag meghatározott tényezők hatására eltérhetnek, és ezek a mikrobiota jellemzők szoros kapcsolatban állnak a takarmány emészthetőségével és a takarmányértékesítés hatékonyságával. Ez arra utal, hogy a genotípus-mikrobiota kölcsönhatások optimalizálása új dimenziót adhat a precíziós takarmányozási stratégiák tervezéséhez, mivel a mikrobiota mint közvetítő tényező befolyásolja a fehérje- és energia-beépülést, valamint a fenotípusos takarmányhasznosítást. Az aminosavak egymáshoz viszonyított aránya és mennyisége a diétában kritikus a magas genetikai potenciállal rendelkező sertések számára. *Schiavon és mtsai. (2019)* vizsgálataikban különböző genotípusú növendék sertések esetében a standardizált ileális emészthető esszenciális aminosav szintekkel formulázott diéták hatását vizsgálták. Az alacsonyabb esszenciális aminosav tartalmú diéta alacsonyabb nitrogén-ürítést eredményezett anélkül, hogy szignifikánsan befolyásolta volna a növekedést, a vágott test összetételét vagy a húsminőséget, és nem találtak jelentős genotípus × aminosav kölcsönhatást a vizsgált vonalak között. A fenti eredmények is alátámasztják a genotípus-specifikus takarmányozási stratégiák szükségességét. A precíziós takarmányozás és a fázisos fehérjeadagolás lehetővé teszi, hogy a különböző genetikai vonalak számára optimális aminosav- és fehérjeellátást biztosítsunk, minimalizálva a nitrogén-kibocsátást és maximalizálva a testfehérje-beépülést (*Andretta és mtsai., 2016*). *Tenke és mtsai. (2023)* tanulmánya is igazolja, hogy az ileális fehérje- és aminosav-emészthetőség is genotípus-specifikus, ami lehetőséget teremt célzott, fenotípusos, genetikai profilra alapozott takarmányozásra bevezetésére és alkalmazására. A jelenleg rendelkezésre álló szakirodalom egyértelműen alátámasztja, hogy a genetikai háttér és a takarmány kölcsönhatása kulcsfontosságú tényező a

sertések növekedése, takarmányhasznosítása, testösszetétele és húsmínősége szempontjából.

A genotípus $\times$ takarmány interakció hatása különösen a fehérje- és aminosav-felvétel, a zsírdepozíció, a takarmányértékesítés, valamint a mikrobiota összetétele tekintetében jelentős. A genotípus-specifikus, precíziós takarmányozás és a fázisos fehérjeadagolás alkalmazása lehetővé teszi, hogy a fenotípusos genetikai potenciált maximálisan kihasználjuk, miközben a környezeti terhelést minimalizáljuk. A témában rendelkezésre álló adatok ugyanakkor rávilágítanak arra is, hogy az interakció mértéke függ a vizsgált jellemzőktől, a diéta típusától és a genotípus genetikai hátterétől, ezért a gyakorlati alkalmazásnál ezen összefüggés figyelembevétele nélkülözhetetlen.

5. Takarmányfejlesztési stratégiák

A modern állattenyésztés legtöbb takarmányfejlesztési stratégiájának középpontjában a táplálóanyag-hasznosítás maximalizálása és a környezeti terhelés minimalizálása áll. Különösen a fehérje és esszenciális aminosavak optimális adagolása kulcsfontosságú, mivel ezek a táplálóanyagok jelentik a takarmányköltség egyik legnagyobb részét, és túladagolásuk jelentős nitrogén-ürítést és környezeti emissziót eredményezhet (*Andretta és mtsai., 2018*). A takarmányozási stratégiák közül a precíziós takarmányozás és a fázisos takarmányozás két egymást kiegészítő megközelítés, amelyek a fehérje- és aminosav-ellátást úgy optimalizálják, hogy az állatok tényleges biológiai igényeit jobban megközelítsék (*Remus és mtsai., 2020*). A precíziós takarmányozás olyan dinamikus takarmányozási stratégia, amelynél a táplálóanyag-ellátást napi szinten az egyedi vagy az egy kutyicában lévő állatok igényeihez igazítják (*Pomar és mtsai., 2021*). Ezt a megközelítést olyan automatizált etetőrendszerek és valós idejű adatfelvételezés révén valósítható meg, amelyek lehetővé teszik az egyes állatok takarmányfelvételének és növekedési teljesítményének folyamatos monitorozását (*Andretta és mtsai., 2016*). A precíziós takarmányozás célja, hogy minimalizálja a felesleges fehérje- és aminosav- és ásványi anyag bevitelt, és ennek megfelelően csökkentse a nitrogén- és foszfor-ürítést, miközben megtartja vagy javítja a növekedési teljesítményt és a takarmány-hasznosítás hatékonyságát (*Pomar és Remus, 2019*). Számos vizsgálat kimutatta, hogy a precíziós takarmányozás rendszerint mintegy 30 %-kal csökkentheti a nitrogén-kibocsátást a hagyományos, csoportos fázisos takarmányozással összehasonlítva, miközben nem rontja a súly-gyarapodást vagy a takarmány-hasznosítást. Kiemelendő az is, hogy ilyen rendszerekben az „egyéni” takarmányadag optimalizálásával a lizin bevitel akár 25–27 %-kal csökkenthető anélkül, hogy az befolyásolná a teljesítményt, ami nemcsak költségmegtakarítást, hanem környezeti előnyt is jelent (*Pomar és mtsai., 2021*). Ezek az eredmények azt mutatják, hogy a precíziós takarmányozás nem csupán egy elméleti modell, hanem

hatékony gyakorlati eszköz a takarmányozási hatékonyság és fenntarthatóság javítására (Andretta és mtsai., 2014). Gaillard és mtsai. (2021) áttekintő tanulmánya szerint a kocák viselkedése (etetés, itatás, mozgás, társas interakciók) és a környezeti tényezők (például hőmérséklet, páratartalom, zajszint, tartási körülmények) jelentősen befolyásolják a napi energia- és tápanyagigényeket, ez a megállapítás érvényes a növendék és hízósertésekre is. A fenti szerzők hangsúlyozzák, hogy a precíziós takarmányozási modellek pontosabbá tehetők, ha ezen viselkedési és környezeti adatok valós idejű gyűjtését és integrálását is figyelembe veszik, ami nemcsak a takarmányozás hatékonyságát növelheti, hanem az állatok jólétét és egészségét is javíthatja. A fázisos takarmányozás ezzel szemben egy hagyományosabb stratégiát jelent, amelynél a takarmányt több növekedési fázisra osztják és minden fázisban a fehérje- és energia-szinteket a várható növekedési igényeknek megfelelően állítják be. Ez a megközelítés lehetővé teszi, hogy a legkritikusabb növekedési szakaszokban optimális legyen az aminosav-ellátás, ami javíthatja a testösszetételt és a takarmányfelhasználást, miközben csökkenti a felesleges fehérje-bevitelből eredő nitrogén-ürítést. A fázisos takarmányozás akár 10–30 %-kal is csökkentheti a nitrogén-kibocsátást az adagok számától és a takarmányfehérje-szintek kiegyensúlyozottságától függően, különösen abban az esetben, ha a diéták esszenciális aminosavtartalma kiegyensúlyozott (Brossard és mtsai., 2009). Mindkét takarmányozási stratégia mögött a fehérje- és aminosav-profil precíz meghatározása áll. A modern receptúratervezés alapja, hogy a nyersfehérje-tartalom önmagában nem elegendő a takarmány minőségének megítéléséhez; sokkal fontosabb az emészthető esszenciális aminosavak arányának és mennyiségének optimalizálása az adott növekedési fázis vagy egyedi/genotípus specifikus igény szerint. Ez azt jelenti, hogy nem csupán a fehérje mennyiségét kell figyelembe venni, hanem azt is, hogy az milyen arányban tartalmazza az állat számára legfontosabb aminosavakat (például lizin, metionin, treonin), és azok emészthetősége milyen. A precíziós takarmányozás ilyen részletekre is kiterjed, így képes tovább csökkenteni a metabolikus veszteségeket és javítani a takarmányértékesítést, amely a takarmány felhasználásának hatékonyságát mutatja (Pomar és mtsai., 2021). A két stratégia kombinálása például fázisos takarmányozás alapokon nyugvó diéták precíziós „finomhangolással” további előnyöket hozhat. Ez lehetővé teszi, hogy az egyes növekedési fázisokban használt takarmányok összetétele optimalizált legyen a megcélzott állatcsoport igényével. Ennek eredményeként a takarmányköltség csökkenthető, a nitrogén- és foszfor-kibocsátás mérsékelhető, és javul a termelési hatékonysága nélkül, hogy bármelyik tényező jelentős kompromisszumot szenvedne (Pomar és Remus, 2019). Összességében a precíziós és fázisos takarmányozás egyaránt a modern takarmányfejlesztés alapvető eszköze, amelyek a fehérje- és aminosav-ellátás optimalizálására, a takarmányhasznosítható mutató javítására, a környezeti terhelés csökkentésére és a költséghatékonyság növelésére irányulnak. A legújabb tudományos vizsgálatok

(*Pomar és mtsai., 2021*) eredményei egybehangzóan azt mutatják, hogy ezek a stratégiai irányok különösen együtt alkalmazva jelentősen javíthatják a takarmányozási hatékonyságot és fenntarthatóságot.

6. Emésztés-, emészthetőség és egyéb élettani hatások

A sertések fehérjeellátása alapvető hatással van az élettani állapotukra, mivel a fehérje az izomfejlődés, az immunválasz, a hormonális szabályozás és az anyagcsere szempontjából is kulcsfontosságú táplálóanyag. A fehérjehiány különösen kritikus, mivel a szervezet kénytelen a rendelkezésre álló aminosavakat a létfontosságú folyamatok prioritásának megfelelően felhasználni, ami gyakran a növekedés és a testösszetétel rovására megy (*Pomar és Remus, 2019*). Klinikai vizsgálatok kimutatták, hogy a fehérje- és aminosav-hiány lassabb testtömeg-gyarapodást, csökkent izomtömeget és gyengébb immunválaszt eredményez, ami növeli a fertőzések és metabolikus rendellenességek kockázatát (*Andretta és mtsai., 2016*). A túladagolt fehérje szintén kedvezőtlen hatású, mivel a szervezetnek a felesleges nitrogént ammóniává, majd karbamiddá kell alakítania. Ez a folyamat fokozott veseterhelést, metabolikus stresszt és nitrogénvesztést eredményez, ami nemcsak az állatok egészségét, hanem a környezetet is terheli. A túladagolt fehérje a többlet nitrogén ürítésből kifolyólag fokozhatja a környezet nitrogén-terhelését, a talajvíz eutrofizációját, ezáltal közvetlen környezeti hatást gyakorol a sertéstelepi gazdálkodás fenntarthatóságára (*Sobotka és Drazbo, 2025*). A genotípus-specifikus érzékenység szintén kulcsfontosságú a takarmányfehérje mennyiségének megítélésében. A gyors növekedésű, nagy genetikai potenciállal rendelkező fajták/hibridek általában sokkal érzékenyebbek a fehérjehiányra, ami lassabb növekedésben, alacsonyabb izomtömeg-gyarapodásban és gyengébb immunválaszban nyilvánul meg. Ezzel szemben az alacsonyabb növekedési potenciállal rendelkező fajták kevésbé érzékenyek az ingadozó fehérjeellátásra. Mindezek indokoltá teszik a takarmányadagok és aminosav-szintek genotípus-specifikus optimalizálását a különböző fázisokban (*Remus és mtsai., 2020*). *Brossard és mtsai. (2009)* modellalapú vizsgálata szerint a lizin tartalom és az etetési stratégia jelentősen befolyásolja a populáció teljesítményének variabilitását. A tanulmányuk rámutat, hogy a gyors növekedésű fajták érzékenyebbek a fehérjehiányra és arra is, hogy a fázisos vagy precíziós etetés alkalmazása csökkenti az állatok közötti teljesítménybeli eltéréseket, javítva ezzel a takarmányhasznosítás hatékonyságát és csökkentve a nitrogén-ürítést. Más vizsgálatok (*Andretta és mtsai., 2018*) azt is kimutatták, hogy a fehérjehiány és a túladagolt fehérje kombinált hatása fokozza a metabolikus stresszt és az oxidatív terhelést, ami hosszú távon vesefunkció-csökkenéshez, lipidanyagcsere-zavarokhoz és immunrendszeri elégtelenséghez vezethet. A hiányos fehérjeellátás különösen, ha az a lizin, metionin és treonin csökkenésével jár együtt, a fehérjeszintézis gátlásához és a

növekedési hatékonyság csökkenéséhez vezet (*Pomar és mtsai., 2021*). Összességében megállapítható, hogy a fehérjehiány és a túladagolt fehérje egyaránt jelentős élettani és egyéb például stresszfaktori következményekkel jár, amelyek a növekedést, az immunválaszt, a metabolikus stabilitást és a környezeti fenntarthatóságot egyaránt befolyásolják (*Sobotka és Drazbo, 2025*). A modern, precíziós és fázisos takarmányozási stratégiák lehetővé teszik, hogy az állatok táplálóanyag-ellátása optimálisan igazodjon a genetikai potenciálhoz és a növekedési fázishoz, ezáltal minimalizálva a metabolikus stresszt, javítva a teljesítményt és csökkentve a nitrogén- és foszforkibocsátást.

7. Fenntarthatósági és gazdasági aspektusok

A sertésitenyésztés gazdasági és környezeti fenntarthatósága szoros összefüggésben áll a táplálóanyag ellátás pontosságával és a genetikai potenciál kihasználásával. A takarmányozás költségei a termelési költségek legnagyobb részét teszik ki, ezért a genotípus-specifikus takarmányozás alkalmazása kritikus a költségek optimalizálása és a teljesítmény maximalizálása szempontjából (*Woyengo és mtsai., 2014*). A modern, precíziós takarmányozási rendszerek lehetővé teszik, hogy a különböző genetikai potenciállal rendelkező sertések számára az optimális fehérje- és aminosav-szintet könnyebben biztosítsuk, ezáltal javítva azok teljesítményét is, ugyanakkor a precíziós takarmányozás alkalmazása hozzájárul a nitrogén és foszfor kibocsátás mérsékléséhez is, ami hosszabb távon minimalizálja felesleges táplálóanyag ellátásból adódó többlet költségeket. (*Andretta és mtsai., 2014*). A fenntarthatósági szempontok szorosan összekapcsolódnak a gazdasági előnyökkel is. A precíziós takarmányozás alkalmazása a fentiekén túl hosszú távon fenntarthatóbb termelési rendszert eredményez. Életciklus-elemzések szerint a precíziós takarmányozás csökkenti az üvegházhatású gázok potenciális kibocsátását és egyéb környezeti terhelést, miközben megtartja a jobb táplálóanyag-hasznosítási hatékonyságot (*Llorens és mtsai., 2024*). A genotípus-specifikus megközelítés további gazdasági előnyt jelenthet, mivel lehetővé teszi a különböző növekedési potenciállal rendelkező sertések optimális táplálóanyag ellátását. A teljesítményhez igazított táplálóanyag ellátás optimalizálhatja a nagy növekedési potenciál kihasználását, míg az alacsonyabb növekedési képességgel rendelkező fajták ugyancsak a tényleges táplálóanyagigényhez igazított táplálóanyag ellátása csökkenti a költségeket és az emisszió mértékét is. (*Kebreab és mtsai., 2016*). A precíziós etetési technológiák alkalmazása digitális adatgyűjtéssel és automatikus adagolással lehetővé teszi az egyedi takarmányadagok „finomhangolását”, ami csökkenti a pazarlást és optimalizálja a termelési mutatókat. Ennek eredményeként nemcsak a termék előállítás ökonómiai hatékonysága javul, hanem a környezeti fenntarthatóság is nő, mivel felesleges nitrogén ürítés mértéke csökkenti a nitrogén-emissziót (*Llorens és mtsai., 2024*). Összességében a genotípus-

specifikus takarmányozás és a precíziós etetési rendszerek egyaránt hozzájárulnak a gazdasági és környezeti fenntarthatóság növeléséhez. Az optimális tápanyag-arányok beállítása a genetikai potenciál és a valós igények alapján maximalizálja a profitot, csökkenti a takarmányköltséget és mérsékli a környezeti terhelést, így a modern sertéstenyésztés egyik kulcsfontosságú eszköze.

Összegzés

A sertéstenyésztésben a genetikai potenciál kihasználása és a takarmányozás optimalizálása egymástól elválaszthatatlan tényezők. A modern genotípusok gyorsabb növekedési eréllyel, jobb takarmányhasznosítással és magasabb soványhús-aránnyal rendelkeznek, azonban fenotípusos teljesítményük csak akkor realizálódik teljes mértékben, ha a fehérje- és aminosav-ellátás pontosan igazodik igényeikhez. A genetika és a takarmány közötti kölcsönhatás meghatározza a növekedési ütemet, a testösszetételt, a fehérje- és energia-beépülést, valamint a húsmi-nőséget. A felhasználásra kerülő fehérjetakarmányok stratégiai jelentőségűek, mivel az esszenciális aminosavak – különösen a lizin, metionin, treonin és triptofán – limitáló tényezői az izomfehérje-szintézisnek. A standardizált ileális emészt-he-tőség figyelembevételével formulázott takarmányok lehetővé teszik a nyersfe-hérje-szint csökkentését anélkül, hogy a teljesítmény romlana. Ez javítja a fehérje-hasznosulást, csökkenti a nitrogén-ürítést és mérsékli a környezeti terhelést. A különböző genotípusok eltérő fehérje- és aminosavigénnyel, valamint emésztési hatékonysággal rendelkeznek, ami indokolja a genotípus-specifikus receptúrák alkalmazását. A precíziós és fázisos takarmányozás a modern takarmányfejlesztés kulcseszközei. A precíziós takarmányozás egyedi szintű, dinamikus tápanyag-el-látást biztosít, amely jelentősen csökkenti a felesleges fehérjebevitelt és akár 25–30%-kal mérsékelheti a nitrogén-kibocsátást. A fázisos takarmányozás a növeke-dési szakaszokhoz igazított fehérje- és energiaszintekkel optimalizálja a teljesít-ményt. A két stratégia kombinációja tovább növeli a takarmányozás hatékonysá-gát, miközben minimalizálja az emissziót és a költségeket. Emésztés és egyéb élettaniszempontból mind a fehérjehiány, mind a túlادagolás kedvezőtlen. A hi-ány csökkent növekedés intenzitását, gyengébb immunválaszt és romló testöss-zetételt eredményez, míg a túlzott fehérjebevitel metabolikus terhelést, fokozott karbamidképződést és nagyobb környezeti nitrogénterhelést okoz. A gyors nö-vekedésű modern hibridek érzékenyebbek az aminosav-ellátás pontatlanságaira, ami tovább erősíti a precíziós megközelítés szükségességét. Fenntarthatósági és gazdasági oldalról a genotípus-specifikus takarmányozás javítja az átlagos napi súlygyarapodást, csökkenti a fajlagos takarmányfelhasználást, mérsékli a takar-mányköltséget és az üvegházhatású gázok kibocsátását. A takarmányozás pon-tosságának növelése nemcsak gazdasági előnyt jelent, hanem hozzájárul a kör-nyezetbarát, hosszú távon fenntartható sertéstartási rendszerek kialakításához is.

Összességében a genetika és a takarmányozás integrált, genotípus-specifikus megközelítése a modern sertésenyésztés alapja. A fehérje- és aminosav-ellátás optimalizálása egyszerre szolgálja a maximális termelési teljesítményt, az állategészségügyi stabilitást, a gazdasági hatékonyságot és a környezeti fenntarthatóságot.

6. Felhasznált irodalom

- Almeida, A. M. – Latorre, M. A. – Ripoll, G. – Verdú, M. – Alvarez-Rodriguez, J. (2024): Reducing dietary protein levels with amino acid supplementation in Duroc sire line finishing pigs: Growth performances, carcass and meat traits and nitrogen balance in males and females. *Animals*, 14(24), 3572. <https://doi.org/10.3390/ani14243572>
- Andretta, I. – Hauschild, L. – Kipper, M. – Pires, P. G. S. – Pomar, C. (2018): Environmental impacts of precision feeding programs applied in pig production. *Animal*, 12(10), 1990–1998. <https://doi.org/10.1017/S1751731117003159>
- Andretta, I. – Pomar, C. – Rivest, J. – Pomar, J. – Radünz, J. (2016): Precision feeding can significantly reduce lysine intake and nitrogen excretion without compromising the performance of growing pigs. *Animal*, 10(7), 1137–1147. <https://doi.org/10.1017/S1751731115003067>
- Andretta, I. – Pomar, C. – Rivest, J. – Pomar, J. – Radünz Neto, J. (2014): The impact of feeding growing–finishing pigs with daily tailored diets using precision feeding techniques on animal performance, nutrient utilization, and body and carcass composition. *J. Anim. Sci.*, 92(10), 3925–3936. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-7643>
- Brossard, L. – Dourmad, J.-Y. – Rivest, J. – van Milgen, J. (2009): Modelling the variation in performance of a population of growing pigs as affected by lysine supply and feeding strategy. *Animal*, 3(7), 1114–1123. <https://doi.org/10.1017/S1751731109004546>
- Cameron, N. D. – Penman, J. C. – Fiskén, A. C. – Nute, G. R. – Perry, A. M. – Wood, J. D. (1999): Genotype with nutrition interactions for carcass composition and meat quality in pig genotypes selected for components of efficient lean growth rate. *Anim. Sci.*, 69(1), 69–80. <https://doi.org/10.1017/S1357729800051109>
- Cui, C. – Yang, J. – Wu, Q. – Chen, J. – Yang, X. – Wang, L. – Jiang, Z. (2022): Low protein diet improves meat quality and modulates the composition of gut microbiota in finishing pigs. *Front. Vet. Sci.*, 9, 843957. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.843957>
- Déru, V. – Bouquet, A. – Labussière, E. – Ganiér, P. – Blanchet, B. – Carillier-Jacquín, C. – Gilbert, H. (2021): Genetics of digestive efficiency in growing pigs fed a conventional or a high-fibre diet. *J. Anim. Breed. Genet.*, 138(2), 246–258. <https://doi.org/10.1111/jbg.12506>
- Ewaoluwagbemiga, E. O. – Bee, G. – Kasper, C. (2023): Genetic analysis of protein efficiency and its association with performance and meat quality traits under a protein-restricted diet. *Genet. Sel. Evol.*, 55, Article 35. <https://doi.org/10.1186/s12711-023-00812-3>
- Esteves, L. A. C. – Monteiro, A. N. T. R. – Sitanaka, N. Y. – Oliveira, P. C. – Castilha, L. D. – Paula, V. R. C. – Pozza, P. C. (2021): The reduction of crude protein with the supplementation of amino acids in the diet reduces the environmental impact of growing pigs

- production evaluated through life cycle assessment. *Sustainability*, 13(9), 4815. <https://doi.org/10.3390/su13094815>
- FAO (2013): *Climate-Smart Agriculture Sourcebook*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fredeen, H. T. – Sauer, W. C. (1989): Protein and amino acid nutrition of swine: Protein quality and dietary requirements. *J. Anim. Sci.*, 67(5), 1258–1278. <https://doi.org/10.2527/jas1989.6751258x>
- Gaillard, C. – Durand, M. – Largouët, C. – Dourmad, J.-Y. (2021): Effects of the environment and animal behavior on nutrient requirements for gestating sows: Future improvements in precision feeding. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 279, 115034. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115034>
- Godinho, R. M. – Bastiaansen, J. W. M. – Sevilano, C. A. – Silva, F. F. – Guimarães, S. E. F. – Bergsma, R. (2018): Genotype by feed interaction for feed efficiency and growth performance traits in pigs. *J. Anim. Sci.*, 96(10), 4125–4135. <https://doi.org/10.1093/jas/sky304>
- Irish, P. R. – Balnave, D. (1993): Nutritional and antinutritional factors of feed ingredients used in pig diets. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 40(1-2), 137–147. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(93\)90020-Y](https://doi.org/10.1016/0377-8401(93)90020-Y)
- Kebreab, E. – Liedke, A. J. – Caro, D. – Deimling, S. – Binder, M. – Finkbeiner, M. (2016): Environmental impact of using specialty feed ingredients in swine and poultry production: A life cycle assessment. *J. Anim. Sci.*, 94(6), 2664–2681. <https://doi.org/10.2527/jas.2015-9036>
- Llorens, B. – Pomar, C. – Goyette, B. – Rajagopal, R. – Andretta, I. – Latorre, M. A. – Remus, A. (2024): Precision feeding as a tool to reduce the environmental footprint of pig production systems: A life-cycle assessment. *J. Anim. Sci.*, 102, skae225. <https://doi.org/10.1093/jas/skae225>
- Nguyen, N. H. – McPhee, C. P. (2005): Genetic parameters and responses of performance and body composition traits in pigs selected for high and low growth rate on a fixed ration over a set time. *Genet. Sel. Evol.*, 37(3), 199–213. <https://doi.org/10.1186/1297-9686-37-3-199>
- Pieper, R. – Villodre Tudela, C. – Taciak, M. – Bindelle, J. – Pérez, J. F. – Zentek, J. (2016): Health relevance of intestinal protein fermentation in young pigs. *Anim. Health Res. Rev.*, 17(2), 137–147. <https://doi.org/10.1017/S1466252316000141>
- Pomar, C. – Andretta, I. – Remus, A. (2021): Feeding strategies to reduce nutrient losses and improve the sustainability of growing pigs. *Front. Vet. Sci.*, 8, 742220. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.742220>
- Pomar, C. – Remus, A. (2019): Precision pig feeding: A breakthrough toward sustainability. *Anim. Front.*, 9(2), 52–59. <https://doi.org/10.1093/af/vfz006>
- Remus, A. – Hauschild, L. – Létourneau-Montminy, M.-P. – Andretta, I. – Pomar, C. (2020): Feeding behavior of growing and finishing pigs fed different dietary threonine levels in a group-phase feeding and individual precision feeding system. *Transl. Anim. Sci.*, 4(4), txaa177. <https://doi.org/10.1093/tas/txaa177>
- Schiavon, S. – Dalla Bona, M. – Carcò, G. – Sturaro, E. – Gallo, L. (2019): Responses of pigs of different genotypes to a variation in the dietary indispensable amino acid content in

- terms of their growth, and carcass and meat quality traits. *Animals*, 9(8), 508. <https://doi.org/10.3390/ani9080508>
- Son, A. R. – Park, C. S. – Park, K. R. – Kim, B. G. (2019): Amino acid digestibility in plant protein sources fed to growing pigs. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.*, 32(11), 1745–1752. <https://doi.org/10.5713/ajas.19.0037>
- Tenke, J. – Vida, O. – Nagy, I. – Tossenberger, J. (2023): Classifying genetic lines in pork production by ileal crude protein and amino acid digestibility in growing pigs. *Animals*, 13(12), 1898. <https://doi.org/10.3390/ani13121898>
- van Milgen, J. – Dourmad, J.-Y. (2015): Concept and application of ideal protein for pigs. *J. Anim. Sci. Biotechnol.*, 6, 15. <https://doi.org/10.1186/s40104-015-0016-1>
- Wang, Y. – Zhou, J. – Wang, G. – Cai, S. – Zeng, X. – Qiao, S. (2018): Advances in low-protein diets for swine. *J. Anim. Sci. Biotechnol.*, 9, 60. <https://doi.org/10.1186/s40104-018-0276-7>
- Woyengo, T. A. – Beltranena, E. – Zijlstra, R. T. (2014): Controlling feed cost by including alternative ingredients into pig diets: a review. *J. Anim. Sci.*, 92(4), 1293–1305. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-7169>

Szerzők/Authors

Főglein, Flóra

<https://orcid.org/0009-0002-3456-4077>

Széchenyi István Egyetem, Albert Kázmér Mosonmagyaróvári Kar,

Állattudományi Tanszék

Széchenyi István University, Albert Kázmér Mosonmagyaróvár Faculty,

Department of Zoology

H-9200 Mosonmagyaróvár, Vár tér 2., e-mail: fogleinfo@gmail.com

Tossenberger, János

<https://orcid.org/0000-0001-9243-4866>

Széchenyi István Egyetem, Albert Kázmér Mosonmagyaróvári Kar,

Állattudományi Tanszék

Széchenyi István University, Albert Kázmér Mosonmagyaróvár Faculty,

Department of Zoology

H-9200 Mosonmagyaróvár, Vár tér 2., e-mail: tossenberger.janos@sze.hu

Érkezett/Recived: 2026. május 18.
Elfogadva/Accepted: 2026. június 2.



A cikkre a Creative Commons 4.0 standard licenc alábbi típusa vonatkozik: **CC-BY 4.0**
The article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International license: **CC-BY 4.0**