

Magyarország energiafelhasználásának etanol ekvivalens alapú elemzése

Dr. Cséfalvay Edit, PhD

okl. környezetmérnök, csefalvay@mail.bme.hu

Kovács Emese

okl. környezetmérnök

Dr. Mika László Tamás, PhD

okl. vegyészmérnök

Összefoglaló

Magyarország energiafelhasználásának környezeti fenntarthatósági vizsgálatát az *etanol ekvivalens* mint új környezeti fenntarthatósági mutató alapján végeztük el. Az etanol ekvivalens megadja azt a szükséges etanol mennyiséget, amely fedezi egy adott nyersanyagforrásból kinyerhető energiát, illetve azt az etanol mennyiséget, amely egy adott szén-alapú vegyület termelését fedezi moláris ekvivalencia alapján. A hazai kukorica alapú etanol előállítás hatékonyságát figyelembe véve definiálható egy tényleges etanol ekvivalens, amely tartalmazza az egységnyi bioetanol előállításra fordított energia mennyiségét bioetanolban kifejezve. A tényleges etanol ekvivalens használatával megállapítható a szükséges kukorica mennyisége és a termesztéshez szükséges földterület nagysága, vagyis egy földterület ekvivalens. A számítások Magyarország 2008-2015 közötti energiafelhasználását tartalmazzák, amelyekből a fogyasztási trendek alapján elvégezhető a terület alapú összehasonlítás a megvalósíthatóság demonstrálására.

A vizsgálat során világos kép kapható Magyarország energiaigényének fenntarthatóságáról, illetve arról, hogy amennyiben a fosszilis energia felhasználást kukoricakeményítő alapon előállított etanolból szeretnénk fedezni, akkor mekkora terület fedne le. Etanol ekvivalens alkalmazásával köznapi nyelven is értelmezhető egy ország energiafelhasználásának mértéke.

Abstract

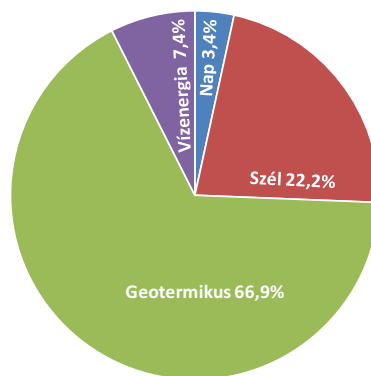
Environmental sustainability study on Hungary's energy consumptions was performed by the use of recently introduced sustainability index, ethanol equivalent, which was defined as the mass of ethanol (expressed in kilogram, tons or million tons) needed to deliver the equivalent amount of energy from a given feedstock or produce the equivalent amount of mass of a carbon-based chemical using thermodynamic equivalency.

Taking into consideration the efficiency of the first-generation bio-ethanol production from corn, a real ethanol equivalent can be calculated, that includes the energy expressed in ethanol required for the production itself. By using the real ethanol equivalent, land requirements of the ethanol production can be assessed as well as providing a land equivalent. Calculations include Hungary's energy consumption between 2008-2015, show the trends, and finally results are expressed in land equivalents.

It was clearly demonstrated that the replacement of fossil resources by ethanol (even if both first and second generation ethanol would be used) is not sustainable during the period studied, because more land would be required to grow the corn than the current agricultural land. The application of ethanol equivalent provides an understandable sustainability assessment factor for a wide audience.

Magyarország energiafogyasztása

Magyarország 2015. évi energiafogyasztásának összetétele az alábbiak szerint alakult: 80,04%-a fosszilis, 16,66% nukleáris, valamint 3,30% megújuló forrásból származott [1]. Köztudott globális probléma a fosszilis alapú energiatermeléssel kapcsolatban az üvegházhatású gázok emissziója, illetve a rohamosan fogyatkozó és előrejelzések szerint bizonytalan idő múlva kimerülő kőolaj és földgáz készletek mennyiségének kérdése. Az energiafelhasználás fenntarthatóságának növelését az Európai Unió elsősorban a megújuló energiaforrások kiaknázásával célozza meg, amely források felhasználhatósága erősen függ a geográfiai, geológiai, illetve klimatológiai adottságoktól. Magyarország megújuló energiaforrásainak megoszlását tekintve legnagyobb potenciált a geotermikus- és a biomassza alapú energiatermelés jelenti. Amint azt az 1. ábra mutatja a vízenergia és napenergia hasznosítás mindössze 10%-ot tett ki, azonban a szélenergia már ennek a dupláját biztosította [1].



1. ábra Magyarország megújuló energiaforrásainak megoszlása 2015-ben [1].

Magyarország a Kárpát-medencében, geodinamikailag egy extenziós medencében helyezkedik el, amelynek következménye az elvékonyodott litoszféra. Ez a geológiai adottság nagyobb geotermikus gradienst okoz a területen, amely lehetővé teszi a geotermikus energia hasznosítását. Emellett az elmúlt évtizedben a biomassza alapú energiatermelés részaránya szignifikánsan nőtt, amely elsősorban Magyarország mezőgazdasági berendezkedésének köszönhető, de jelentős részarányt jelentenek az élelmiszeripari és mezőgazdasági melléktermékek, anyagában már nem hasznosítható kommunális és ipari szerves anyag tartalmú hulladékok, és a szennyvíztisztító technológiák biomassza forrásai. A *Nemzeti Energiastratégia 2030* [2] szerint a primer energiafogyasztás megújuló részaránya a mai 7%-ról 2020-ig 14,65%-ra, 2030-ig kb. 20%-ra emelkedik majd Magyarországon. A nemzeti energiafüggetlenség elérésének ötödik sarokpontja a rugalmas váltás az élelmiszertermelés és energianövények termesztése között olyan területeken valósuljon meg, amelyekeken már hatékonyan élelmiszer alapanyag nem termesztendő. Továbbá az ipari és a mezőgazdasági energiastruktúra átalakításának céljai közé tartozik az üvegházhatású gázok emissziójának csökkentése. Ennek megvalósításában fontos szerepet játszik, a biomassza ipari nyersanyagként történő felhasználása a gyógyszer- és finomvegyipari eljárásokban megfelelő biotechnológia alkalmazásával.

A British Petroleum (BP) évente megjelenő energiaelemzése millió tonna olaj ekvivalensben (mtoe) tárja elénk az évenkénti országokra lebontott aktuális adatokat. Amennyiben fenntarthatóságról beszélünk, a mtoe mérőszámként való alkalmazása szélesebb körben problémás lehet, hiszen a hétköznapi emberek számára nehezen értelmezhető ez a mértékegység. Ha egy háztartás, egy város, egy nemzet, vagy akár egy ipari termelő egység

energiafogyasztásának környezeti fenntarthatóságát szeretnénk vizsgálni és közérthetően bemutatni, a nemrégiben bevezetett etanol ekvivalens egy sokkal megfoghatóbb eszközként szolgálhat ebben a feladatban. Az etanol ekvivalens megadja azt a szükséges etanol mennyiséget, amely fedezi egy adott nyersanyagforrásból kinyerhető energiát, illetve vegyi anyagokra vonatkozóan annak az etanolnak a mennyiségét, amely egy adott szén-alapú vegyület bioetanol alapú termelését moláris ekvivalencia alapján képes fedezni [3]. Amennyiben feltételezzük, hogy adott fosszilis energia fedezéséhez szükséges etanol mennyiséget kukorica keményítő alapú bioetanol gyártással fedezzük, akkor az energiafogyasztást kifejezhetjük a szükséges termőterület nagyságával, ami hétköznapi értelemben látványosabb, ezáltal közérthetőbb információt szolgáltat.

Definiálható egy tényleges etanol ekvivalens, amely tartalmazza a bioetanol előállításához szükséges befektetett energia mennyiségét is, azaz a technológia hatékonyságát (Energy Return on Ethanol = EROE). Az EROE megmutatja, hogy egy egység energiabefektetéssel (amit egy fenntartható világban szintén bioetanolból fedezünk) a 2008-as referencia évre vonatkozó ipari méretű etanol előállítási technológiát alapul véve 2,3 egység bioetanol állítható elő [4]. A tényleges etanol ekvivalens (EE_{2,3}) használatával megállapítható a szükséges kukorica mennyisége és a termesztéshez szükséges földterület nagysága. Az etanol előállításának energiahatékonysága növelhető, ha a kukoricaszárát energetikailag hasznosítjuk, vagy a kukorica termesztéshez, aratáshoz fosszilis energia befektetés helyett, más megújuló energiaforrást alkalmazunk. Számítások szerint a hatékonyság növelésével az EROE 4,1 vagy akár az 5,7-es értéket is elérheti [5]. A Renewable Fuels Association 2016-os kiadványa szerint az elméleti értékeket a valóság megközelítette, és EROE = 4 etanol előállítási hatékonysággal számolhatunk [6]. Magyarországi kukorica alapon történő etanol előállítás hatékonyságát és hozamát vizsgálva a különböző források nagyságrendileg hasonló értékeket közölnek. Ezeket az 1. táblázatban foglaltuk össze. Némely forrás liter etanol/tonna kukorica mértékegységben számol, mások pedig a hektáronkénti etanol hozamokat adják meg. Ezek összehasonlításához azonban szükséges a hektáronként betakarított kukorica termés mennyiségének ismerete is. 2008–2015 közötti kukorica terméshozamok átlagát a Központi Statisztikai Hivatal [7] által közölt értékek alapján számoltuk, amelynek értéke 6,237 t/ha-nak adódott.

1. táblázat Kukorica alapú etanol termelés hozamai (a dőlttel jelölt adatok az eredeti publikációkból vett értékek).

Generáció	Alapanyag	Etanol hozam [l/t kukorica]	Etanol hozam [t/t kukorica]	Etanol hozam [l/ha]	Ref.
Első	Kukoricamag	425	0,335	2651	[8]
Első	Kukoricamag	477	0,376	2975	[9]
Első	Kukoricamag	450	0,355	2807	[10]
Első ^a	Kukoricamag	561	0,442	3500	[11][12]*
Másod ^a	Kukoricaszár	88	0,069	650	[11]
Első^a+másod^a	Mag+szár	649	0,511	4150	

* USA hibrid kukoricafajta esetén is érvényes

A másodgenerációs, azaz lignocellulóz alapú etanol termeléshez a kukorica növény szárát használják fel. Figyelembe véve, hogy a kukoricatermés a növény 45,9 tömeg%-át teszi ki [13], a növény szára és termése együttesen 13,59 tonnát jelent hektáronként, azaz a kukoricaszár mennyisége 7,351 t/ha értékkel számolható.

Magyarország fosszilis energia felhasználásának etanol ekvivalens számítása

A számítás bemenő adatait a *BP 2016* évben kiadott jelentése [1] szolgáltatja, ami alapján a 2015. évre vonatkozóan összegeztük a fosszilis alapú energiafelhasználást (kőolaj, földgáz, szén) mtoe-ben, majd az összesített adatot átváltottuk Joule-ra a következőképpen:

$$7,0 \text{ mtoe kőolaj} + 8,0 \text{ mtoe földgáz} + 2,2 \text{ mtoe szén} = 17,2 \text{ mtoe} \quad (1)$$

$$1 \text{ mtoe} = 42 \times 10^{-3} \text{ exajoule (EJ)} [1] \quad (2)$$

$$17,2 \text{ mtoe} \times 42 \times 10^{-3} \text{ EJ} = 0,723 \text{ EJ} \quad (3)$$

$$0,723 \text{ EJ} \times 10^{18} \frac{\text{J}}{\text{EJ}} = 0,723 \times 10^{18} \text{ J} \quad (4)$$

A számítás a fosszilis energiafelhasználás kiváltásához szükséges etanol mennyiség meghatározásával folytatódik, amelyhez 1 hordó etanol energiája *Energy Information Administration, EIA* [14] adatai alapján adható meg:

$$1 \text{ hordó etanol} = 3,56 \text{ millió BTU} \quad (5)$$

$$1 \text{ BTU} = 1055 \text{ J} \quad (6)$$

$$1 \text{ hordó etanol} = 3,56 \times 10^6 \text{ BTU} \times 1055 \frac{\text{J}}{\text{BTU}} = 3,756 \times 10^9 \text{ J} \quad (7)$$

$$0,723 \times 10^{18} \text{ J} \div 3,756 \times 10^9 \frac{\text{J}}{\text{hordó}} = 192 \text{ millió hordó etanol} \quad (8)$$

$$1 \text{ hordó} = 159 \text{ l} \quad (9)$$

$$1,92 \times 10^8 \text{ hordó} \times 159 \frac{\text{l}}{\text{hordó}} = 30,6 \times 10^9 \text{ l etanol} \quad (10)$$

$$30,6 \times 10^9 \text{ l} \div 1000 \frac{\text{l}}{\text{m}^3} = 30,6 \times 10^6 \text{ m}^3 \quad (11)$$

Az etanol sűrűsége J. G. Speight [15] nyomán:

$$\rho_{\text{etanol}} = 789 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (12)$$

$$30,6 \times 10^6 \text{ m}^3 \times 789 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 24,1 \times 10^9 \text{ kg etanol} \quad (13)$$

$$24,1 \times 10^9 \text{ kg} \div 1000 \frac{\text{kg}}{\text{t}} = 24,1 \times 10^6 \text{ t etanol} \quad (14)$$

A fosszilis energia kiváltásához szükséges kukoricamennyiség és termőterület elsődgenerációs etanol termelés esetén

A kukoricamag és termőterület meghatározásakor az 1. táblázat zülddel kiemelt értékeit használtuk fel. 24,1 millió tonna etanol előállításához szükséges kukoricatermés mennyiség 0,442 t etanol/t kukorica [11-12] hozamot figyelembe véve, amennyiben a kukoricaszár nem kerül felhasználásra:

$$24,1 \times 10^6 \text{ t etanol} \div 0,442 \frac{\text{t etanol}}{\text{t kukoricamag}} \quad (15)$$

$$= 54,5 \times 10^6 \text{ t kukoricamag}$$

Kizárólag elsőgenerációs etanol termelést feltételezve, a szükséges termőterület nagysága a (16) egyenlet alapján számolható:

$$30,6 \times 10^9 \text{ l etanol} \div 3500 \frac{\text{l etanol}}{\text{ha}} = 8,7 \times 10^6 \text{ ha termőterület}, \quad (16)$$

azaz 8,7 millió hektár.

Szükséges kukoricamennyiség és termőterület első- és másodgenerációs etanol együttes előállítása esetén

Abban az esetben, ha ugyanarról a területről származó kukoricaszár is feldolgozásra kerül a 3500 liter etanolon felül további 650 liter etanol nyerhető, amely összesen 4150 liter (4,15 m³) etanolt eredményez hektáronként (Lásd 1. táblázat utolsó sora), amely 3,27 tonna etanol/hektár produktivitásnak felel meg.

$$4,15 \frac{\text{m}^3 \text{ etanol}}{\text{ha}} \times 789 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 3274,35 \frac{\text{kg etanol}}{\text{ha}} \quad (17)$$

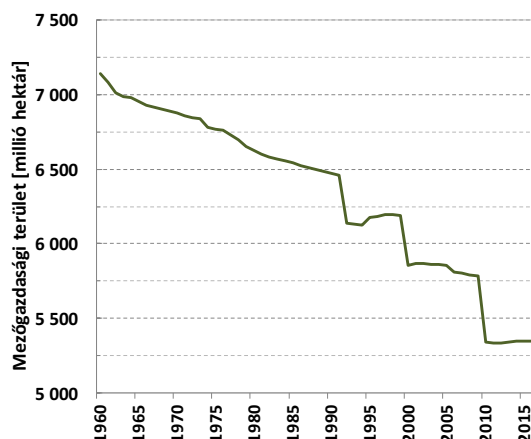
$$3274,35 \frac{\text{kg etanol}}{\text{ha}} \div 1000 \frac{\text{kg}}{\text{t}} = 3,27 \frac{\text{t etanol}}{\text{ha}} \quad (18)$$

Tehát, ha az etanol előállításához a kukoricaszárát is felhasználjuk, a szükséges termőterület nagysága:

$$30,6 \times 10^9 \text{ l etanol} \div 4150 \frac{\text{l etanol}}{\text{ha}} = 7,4 \times 10^6 \text{ ha termőterület} \quad (19)$$

azaz 7,4 millió hektárra csökken.

A kukoricaszár felhasználásával és első- és másodgenerációs etanol együttes előállításával megspórolható 1,3 millió ha termőterület, azonban Magyarország mezőgazdasági művelésbe bevont területe az 1960-as évektől kezdve folyamatos csökkenést mutat és 2010-től vizsgálva egy közel állandó, 5,35 millió hektáros értéket képvisel (2. ábra). Egyértelműen látható, hogy az etanol ekvivalenshez tartozó 8,7, valamint kedvezőbb esetben 7,4 millió hektáros területigény másfélszerese az aktuális értéknek [7], ami alapján egyértelműen kijelenthető, hogy Magyarország 2015. évi fosszilis energiaigénye etanol alapon nem fedezhető.



2. ábra Magyarország mezőgazdasági területének változása 1960-2016 között. [7]

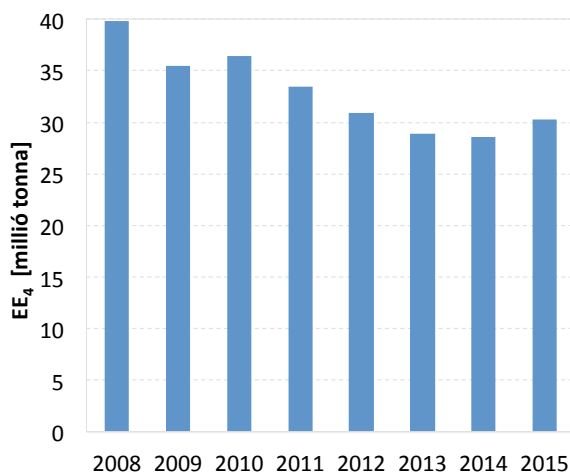
Tényleges etanol ekvivalens számítása

A tényleges etanol ekvivalens (aktuálisan EE_4) kiszámítására azért van szükség, hogy egy környezetileg fenntarthatónak definiált világban az etanol előállításához szükséges energiát is etanoból tudjuk fedezni. A tényleges etanol ekvivalens 2016-ban publikált előállítási hatékonysága $ERoE = 4$, azaz egy egység bioetanol befektetésével négy egység bioetanol nyerhető [6].

$$24,1 \text{ millió } t \text{ etanol} \times \frac{1}{4} = 6,0 \text{ millió } t \text{ etanol input} \quad (20)$$

$$6,0 \text{ millió } t \text{ etanol input} + 24,1 \text{ millió } t \text{ output etanol} = 30,1 \text{ millió } t \text{ összes etanol} \quad (21)$$

Magyarország fosszilis energia kiváltásához szükséges tényleges etanol ekvivalens mennyiségek alakulását a 3. ábra mutatja be. Annak ellenére, hogy a megtermelt etanol mennyisége az elmúlt években folyamatosan növekedett és 2016-ban elérte 0,487 millió tonnát, ez csak töredéke része a fosszilis energia kiváltásához elegendő etanol mennyiségének még akkor is, ha a hatékonynak mondott $ERoE = 4$ -es technológiával számolunk.



3. ábra Magyarország fosszilis energia kiváltásához szükséges tényleges etanol ekvivalens (EE_4) mennyiségének alakulása 2008-2015 között.

Első- és másod generációs etanol megoszlása EE₄ alapján

Az első-, és másodgenerációs etanol produktivitások, illetve Magyarország átlagos terméshozama alapján kiszámítható az első és másodgenerációs etanol mennyiségek aránya. A számítás során figyelembe kell venni, hogy a termés a növény egészéhez viszonyítva, annak 45,9 tömegszázalékát teszi ki [13].

$$\text{teljes növény} = 6,237 \frac{t}{ha} \div 0,459 = 13,59 \text{ t/ha} \quad (22)$$

$$\text{kukorica szár} = 13,59 \frac{t}{ha} - 6,237 \frac{t}{ha} = 7,351 \text{ t/ha} \quad (23)$$

$$\text{összes etanol} = 4150 \text{ l/ha} \quad (24)$$

$$3500 \text{ liter} \div 4150 \text{ liter} = 0,843 = 84,3\% \quad (25)$$

$$650 \text{ liter} \div 4150 \text{ liter} = 0,157 = 15,7\% \quad (26)$$

Vagyis a kukorica magból előállított etanol az összes hektáronkénti etanol termelés 84,3%-át jelenti, a maradék 15,7% pedig másodgenerációs etanolból származik.

Az arányok megállapítása után a szükséges az elsőgenerációs etanol fedezéséhez szükséges termés területigénye az EE₄-hez (30,1 millió tonna tényleges etanol mennyiséghez) a következők szerint számítható:

$$30,1 \text{ millió tonna etanol} \times 0,843 = 25,37 \text{ millió tonna etanol} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} 25,37 \text{ millió tonna etanol} \div 0,789 \text{ t/m}^3 \\ = 32,16 \text{ millió m}^3 \text{ etanol} \end{aligned} \quad (28)$$

$$32,16 \text{ millió m}^3 \text{ etanol} \div 3,5 \text{ m}^3/\text{ha} = 9,19 \text{ millió ha} \quad (29)$$

A másodgenerációs etanol előállításához szükséges kukoricaszár területigénye:

$$30,1 \text{ millió tonna etanol} \times 0,157 = 4,73 \text{ millió tonna etanol} \quad (30)$$

$$4,73 \text{ millió tonna etanol} \div 0,789 \text{ t/m}^3 = 5,99 \text{ millió m}^3 \text{ etanol} \quad (31)$$

$$5,99 \text{ millió m}^3 \text{ etanol} \div 0,65 \text{ m}^3/\text{ha} = 9,21 \text{ millió ha} \quad (32)$$

Az első- és másod generációs etanol területigény-számításából azonos eredményt vártunk; a számítás hibája $9,21 \text{ millió ha} - 9,19 \text{ millió ha} = 0,02 \text{ millió ha}$.

Tényleges etanol ekvivalens előállításához szükséges kukoricamennyiség

A megvalósíthatóság tekintetében fontos kérdés, hogy mekkora mennyiségű kukoricát szükséges megtermelni a tényleges etanol mennyiség előállításához, illetve ezt a mennyiségű kukoricát mekkora földterületen lehet termesztani. A kérdés megválaszolásához számos paraméter figyelembe vétele szükséges. Az értéket a geográfiai adottságokon kívül befolyásolja pl. a termesztett kukorica génösszetétele (hibridek), a műtrágya rendelkezésre állása, annak tápanyagtartalma és aránya, a betakarítás időpontja, az etanol előállításához

alkalmazott technológia, stb. Ezen túl további fontos tényező, hogy első-, vagy másodgenerációs biomassza kerül feldolgozásra, azaz a bioetanol esetében csak a kukoricatermés, vagy a kukorica szára is feldolgozásra kerül-e, illetve mindkettőt fermentálják egy adott ültetvényről. Utóbbi esetet feltételezve a kukoricaszár felhasználása nem jelent további termőterület többletet, sőt ezáltal csökken a szükséges terület nagysága.

Ahhoz, hogy szemléletes legyen a kukoricaszár feldolgozásba vonásának jelentősége, a 2. táblázatban foglaltuk össze a szükséges kukoricamag mennyiségét a következő két esetben:

- **1. eset:** elsőgenerációs etanol termelés, amelyben csak kukoricamag kerül felhasználásra (keményítő alapú etanol termelés);
- **2. eset:** első- és másodgenerációs etanol termelés, amelyben a kukoricamag és a kukoricaszár egyaránt felhasználásra kerül (keményítő és cellulóz alapú etanol termelés).

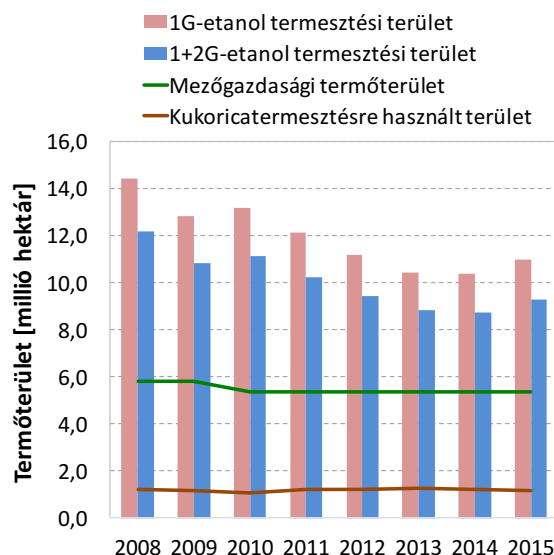
A 2. táblázatban megjelenített eredmények a teljes EE₄ tényleges etanol ekvivalensből számított kukoricamennyiségeket tartalmazzák.

2. táblázat Tényleges (EE₄) kukoricatermés (kukoricamag) mennyisége az 1. és 2. esetben

1. eset	Mértékegység	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Teljes kukoricatermés (EE ₄)	<i>millió tonna</i>	105,4	93,7	96,3	88,6	81,7	76,3	75,7	80,1
2. eset	Mértékegység	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Teljes kukoricatermés (EE ₄)	<i>millió tonna</i>	75,6	67,2	69,0	63,5	58,6	54,7	54,3	57,5

Tényleges etanol ekvivalens előállításához szükséges termőterület

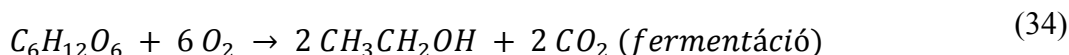
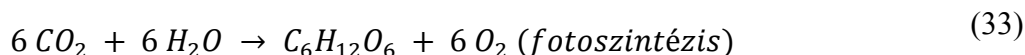
Ha Magyarország fosszilis energia kiváltásához szükséges termőterületét vizsgáljuk, akkor alapvetően két eset különböztethető meg: 1. esetben feltételezzük, hogy az etanol előállítása csak és kizárólag első generációs (1G) etanol gyártással valósítjuk meg; 2. esetben pedig első- és másodgenerációs etanol előállítással számolunk, amely a kukoricaszár lignocellulóz tartalmának felhasználását is magában foglalja. Az adott évekre vonatkozó adatokat Magyarország adott évhez tartozó mezőgazdasági termőterületével, illetve a kukorica termőterületével összehasonlítva láthatjuk, hogy a fosszilis energia etanollal történő kiváltása messze meghaladja a jelenleg használt mezőgazdasági területek nagyságát (4. ábra). Jelen adatokból arra következtethetünk, hogy a megújuló energiaforrások részarányának növelése mindenképpen indokolt.



4. ábra Magyarország fosszilis energia kiváltásához szükséges termőterület igény összehasonlítása a mezőgazdasági és kifejezetten kukorica termesztésre használt területek nagyságával 2008–2015 között.

Vízigény számítása

A környezeti fenntarthatósági vizsgálatoknál kulcskérdés, hogy mindezek megvalósításához mennyi édesvíz szükséges, és ennek fedezete rendelkezésre áll-e. Mivel a kukorica növény növekedése valójában biomassza szintézis, az ennek alapját képező fotoszintézis vízigényét kell megvizsgálnunk. Mivel a kukorica keményítő és a lignocellulóz építőkövét alkotó ($C_6H_{12}O_6$) szénhidrát egység biotechnológiai úton történő fermentációja során nyerjük az etanolt, a két lépést együttesen vizsgáljuk. A (33) és (34) egyenletekből látható, hogy 6 mol víz szükséges 2 mol etanol előállításához.



Mivel a reakciók sztöchiometrikusak, szükséges a tényleges etanol ekvivalens értékének kmolba történő átszámítása, majd a kapott érték hárommal történő felszorozása.

$$24,1 \text{ millió t etanol} \times 1000 \frac{kg}{t} \div 46 \frac{kg}{kmol} = 523,9 \text{ millió kmol etanol} \quad (35)$$

$$3 \times 523,9 \text{ millió kmol etanol} = 1571,7 \text{ millió kmol víz} \quad (36)$$

$$1,57 \times 10^9 \text{ kmol} \times 18 \frac{kg}{kmol} = 28,26 \times 10^9 \text{ kg víz} \quad (37)$$

$$28,26 \times 10^9 \text{ kg víz} = 28,26 \times 10^6 \text{ t víz} \quad (38)$$

$$28,26 \times 10^9 \text{ kg víz} \div 998 \frac{kg}{m^3} (20^\circ C - on) = 28,3 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ víz} \quad (39)$$

$$28,3 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ víz} = 0,0283 \text{ km}^3 \text{ víz} \quad (40)$$

3. táblázat A tényleges etanol ekvivalens (EE₄) kukorica mennyiségének fotoszintézishez szükséges vízmennyisége feltételezve, hogy a kukoricatermés mellett a kukoricaszár is felhasználásra kerül (2.eset).

	Mértékegység	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Szükséges vízmennyiség (EE)	m ³	37	33	34	31	29	27	27	28
Szükséges többlet	m ³	9	8	9	8	7	7	7	7
Teljes vízmennyiség (EE ₄)	m ³	46	41	43	39	36	34	34	35

Tehát a 2015-ös évre vonatkozóan 35 millió m³ víz lenne szükséges ahhoz, hogy a kukorica növény saját sejtanyagát felépítse (3. táblázat). Összehasonlításképp a Balaton átlagos vízmennyisége kb. 2 km³ [16], a Magyarországra jutó átlagos éves csapadékmennyiség 56,9 km³ [17], az évi megújuló vízmennyiség pedig 116,4 km³ [18]. Természetesen az a kijelentés, miszerint az éves csapadékmennyiség kielégíti a termesztett kukorica vízigényét és a víz nem limitáló tényező a kukoricatermesztésben csak abban az elméleti esetben igaz, ha nem vesszük figyelembe a csapadék éves, szezonális és területi eloszlását.

Betakarításkor szükséges víztartalom

A kukoricánövény felépítéséből kifolyólag további víztartalommal rendelkezik, amelynek kiszámításához először a növény tömegére van szükség. A mag, amelyet az első generációs etanol előállításra használunk irodalmi adatok szerint a növény 45,9 tömeg%-át teszi ki [13].

$$45,98 \times 10^6 \text{ t kukoricamag} \div 45,9 \% = 100,16 \times 10^6 \text{ t kukoricánövény} \quad (41)$$

A kukorica víztartalma elérheti a 72,6%-ot [19], így a becsült víz-száraz anyag tömegarány:

$$\text{víz} \div \text{száraz anyag} = 72,6 \% \div 27,4 \% = 2,65 \text{ növényenként} \quad (42)$$

$$100,16 \times 10^6 \text{ tonna kukoricánövény} \times 2,65 = 265 \times 10^6 \text{ tonna víz} \quad (43)$$

$$265 \times 10^6 \text{ tonna víz} = 265 \times 10^9 \text{ kg víz} \quad (44)$$

$$265 \times 10^9 \text{ kg víz} \div 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 265 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ víz} \quad (45)$$

$$265 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ víz} = 0,27 \text{ km}^3 \text{ víz} \quad (46)$$

A számított 0,27 km³ vizet a kukoricánövény nagyrészt az éves csapadékmennyiségből fedezi, de látható, hogy a növény betakarításkori víztartalma egy nagyságrenddel több vizet képvisel, mint a fotoszintézishez szükséges vízmennyiség. A keményítő feldolgozása és fermentációja során fellépő vízigényeket jelen számításban nem tárgyaljuk, ugyanis ezek jól a kiforrott technológiához tartoznak. Összességében azt mondhatjuk, hogy Magyarország kedvező megújuló vízellátottságának valamint az éves csapadékmennyiségnek köszönhetően, a víz nem limitáló tényező a bioetanol előállítás során.

Összefoglalás

Tanulmányunk rávilágított arra, hogy Magyarország teljes fosszilis energiaigényét etanolból fedezni teljességgel lehetetlen, hiszen ha csak elsőgenerációs etanoltermelést tekintünk 8,7 millió hektár termőterületre lenne szükség, amely habár kisebb, mint az ország területe, de mezőgazdasági termőterületnél 1,6-szer nagyobb. Amennyiben első- és másodgenerációs etanol előállítását egyaránt alkalmazunk, vagyis a kukoricaszárat alkotó lignocellulózt is felhasználjuk etanol előállításra, összességében kevesebb termőterületre van szükség, de ez még mindig jóval meghaladja a jelenleg összes mezőgazdasági termelésbe bevont területet. Amennyiben az etanol ekvivalens fedezéséhez szükséges édesvíz mennyiségét vesszük górcső alá, azt találjuk, hogy a Kárpát-medence kedvező geográfiai helyzete miatt kialakuló vízkészletek, valamint az éves csapadék mennyisége bőven fedezi a kukorica növény termesztéséhez (fotoszintézis+a növény víztartalma) szükséges össz vízmennyiséget. Tanulmányunkkal rámutattunk arra, hogy az etanol ekvivalens számítás alkalmas arra, hogy hétköznapi nyelvre lefordíthatóan értékelni tudjuk egy ország energiafogyasztását. Környezeti fenntarthatósági szempontból rámutattunk arra is, hogy habár a nemzeti összes fosszilis energiafogyasztás csökken, ennek teljes egésze nem váltható ki a biomassza alapon előállított etanol energiájával. Ezen következtetésünk is igazolja, hogy a biomassza más irányú felhasználást kell előtérbe helyezni (pl. kis volumenű vegyipari alapanyag gyártás esetén fosszilis energiahordozók kiváltására).

Amennyiben a fosszilis energiahordozók felhasznált mennyiségét szeretnénk csökkenteni, és eleget akarunk tenni a Nemzeti Energiastratégiában megfogalmazott cselekvési tervnek, a primer energiafelhasználásban célszerű növelni megújuló energiaforrások (pl. nap-, szél-, geotermikus- vagy vízenergia) és nukleáris energia részarányát.

Köszönetnyilvánítás

Dr. Cséfalvay Edit köszönetet mond a Magyar Tudományos Akadémiának a Bolyai János ösztöndíj és a Bolyai + (Új Nemzeti Kiválósági Program, ÚNKP-18-4-BME-192) ösztöndíj támogatásáért. A munka a BME VBK FIKP Biotechnológia Program támogatásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] BP Statistical Review of World Energy 2016 workbook, <https://www.bp.com/content/dam/bp/excel/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-workbook.xlsx>
- [2] Nemzeti Fejlesztési Minisztérium - Nemzeti Energia Stratégia 2030, **2012**, <http://2010-2014.kormany.hu/download/4/f8/70000/Nemzeti%20Energiastrat%C3%A9gia%202030%20eljes%20v%C3%A1ltozat.pdf>
- [3] Cséfalvay, E.; Akién, G.R.; Qi, L.; Horváth, I.T. Definition and application of ethanol equivalent: Sustainability performance metrics for biomass conversion to carbon-based fuels and chemical, *Catal. Today*, **239**, **2015**, 50-55.
- [4] H. Shapouri, P.W. Gallagher, W. Nefstead, R. Schwartz, S. Noe, R. Conway, in: Energy Balance for the Corn-Ethanol Industry, *USDA*, **2008**, Agricultural Economic Report Number 846 June 2010.
- [5] P.W. Gallagher, W.C. Yee, H.S. Baumes, in: 2015 Energy Balance for the Corn-Ethanol Industry, *USDA*, **2016**.

- [6] Renewable Fuels Association – RFA, Re-examining Corn Ethanol’s Energy Balance Ratio, **March 2016**, <http://www.ethanolrfa.org/wp-content/uploads/2016/03/Re-examining-Corn-Ethanol-Energy-Balance.pdf>
- [7] Központi Statisztikai Hivatal, KSH - A mezőgazdaság főbb adatai (1960–), http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_hosszu/h_omf001a.html
- [8] Bánszki L.; Rátonyi T.; Harsányi E. Bioetanol előállítás energetikai értékelése, *Agrártudományi Közlemények*, **2013/51.**, 77-80.
- [9] <http://www.chemicals-technology.com/projects/pannonia-bioethanol/>
- [10] <http://www.pannoniaethanol.com/products>
- [11] Balla Z. A biomassza alapú etanol előállítás fejlesztésének lehetőségei, a keményítő és cellulóz alapú bioetanol gyártás vonatkozásában, *Agrártudományi Közlemények*, **2013/51.**, 71-75.
- [12] Groode T. A.-Heywood J. B. (2008): Biomass to Ethanol: Potential Production and Environmental Impacts. February 2008. IFEE 2008-02 rP Massachusetts Institute of Technology. <http://lfee.mit.edu/publications/reports>
- [13] L. O. Pordesimo, W. C. Edens, and S. Sokhansanj, Distribution of aboveground biomass in corn stover, *Biomass and Bioenergy*, **26**, **2004**, 337-343.
- [14] U.S. Energy Information Administration, IEA, Approximate Heat Content of Petroleum Consumption and Fuel Ethanol, https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/sec13_3.pdf
- [15] J. G. Speight, Lange’s Handbook of Chemistry, 16th Edition, **2005**, New York: McGraw-Hill
- [16] Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóság – Balaton <http://www.kdtvizig.hu/hu/53ab9177-7e15-44eb-a7f3-c004010c2277>
- [17] Központi Statisztikai Hivatal, KSH - A meteorológiai megfigyelőállomások főbb adatai (1985–), http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_met002c.html
- [18] The World’s Water, Total Renewable Freshwater Supply, by Country (2013 Update), <http://worldwater.org/wp-content/uploads/2013/07/ww8-table1.pdf>
- [19] C. Igathinathane, Womac, A.R., Sokhansanj, S., Pordesimo, L.O. Mass and moisture distribution in aboveground of standing corn plants, *Trans. ASABE*, **49**, **2006**, 97-106