

MEZŐSI ANDRÁS–RÁCZ VIKTOR

A klímasemlegesség ára

Az üvegházhatású gázok csökkentésének költségbecslése
HU-TIMES modellel

A 2021-ben elfogadott Nemzeti Tiszta Fejlődési Stratégia (NTFS) kimondja, hogy Magyarországnak 2050-ig fokozatosan klímasemleges országgá kell válnia. Cikkünkben az e stratégia háttérszámításához használt HU-TIMES modellel elhárításiköltség-becslést végzünk. Parciális egyensúlyi modell használatával megállapítható, hogy az alapforgatókönyvhöz képest, amikor nincsenek emissziós korlátok – azaz a 2020. évi, szén-dioxid-egyenértékben kifejezett 46 millió tonna kibocsátáshoz képest –, 2050-re az üvegházhatású gázok kibocsátása 29,5 millió tonnára csökken. Számításaink szerint a jelenleg elérhető technológiai információk alapján a kitűzött céldátumra maximum 2 millió tonna szén-dioxid-egyenértékre csökkenthető a hazai energiaszektor kibocsátása. Ennek költségtöbblete 22 ezer milliárd forintot tesz ki a következő három évtizedben. Továbbá megvizsgáljuk, hogy az üvegházhatású gázok különböző mértékű csökkentése 2050-re mekkora többletköltséget jelent, és ezek a költségek mely szektorokban jelennek meg. Ehhez meghatározzuk a hazai energiaszektor üvegházhatásúgáz-elhárítási költséggörbéjét. *Journal of Economic Literature* (JEL) kód: O21, Q47, D60, C61.

Bevezetés

A párizsi klímaegyezményt 2015 végén fogadták el (UN [2015]), amelyben az aláíró országok vállalták, hogy 2 Celsius-fok alatt tartják a globális átlaghőmérséklet-emelkedést, és erőfeszítéseket tesznek annak érdekében, hogy ez a növekedési érték 1,5 Celsius-fok alatt maradjon az iparosítás előtti átlagos hőmérséklethez viszonyítva. A 2016 végén életbe lépő, jogilag kötelező érvényű dokumentum felszólítja az országokat, hogy 2020-ig készítsék el a hosszú távú stratégiájukat, amelyben vázolják, hogy milyen módon kívánják csökkenteni az üvegházhatású gázok kibocsátását. Az Európai Unió ennek a vállalásnak eleget téve 2020 márciusában az ENSZ éghajlatváltozási keretegyezménynek (*United*

Mezősi András, Budapesti Corvinus Egyetem Regionális Energiagazdasági Kutatóközpont (e-mail: andras.mezosi@uni-corvinus.hu).

RÁCZ Viktor, Budapesti Corvinus Egyetem Regionális Energiagazdasági Kutatóközpont (e-mail: viktor.racz@uni-corvinus.hu).

A kézirat első változata 2022. július 6-án érkezett szerkesztőségünkbe.

DOI: <https://doi.org/10.18414/KSZ.2023.1.55>

Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) hivatalosan jelezte, hogy az Európai Unió vállalja, hogy 2050-re klímasemlegessé válik (*UNFCCC* [2020]). Az energiaunió és az éghajlat-politika irányításáról szóló, 2018 végén elfogadott EU-rendelet értelmében (*EU* [2018]) a tagállamoknak ki kell dolgozniuk egy legalább 30 évre szóló hosszú távú stratégiát, amelyben vázolják, hogy milyen üvegházhatásúgáz-pályát képzelnek el a következő évtizedekre vonatkozóan. Az energiaunió és az éghajlat-politika irányításáról szóló rendelet alapján a tagállamoknak 2020. január 1-ig kellett elkészíteniük a stratégiákat, amelyeket tízévente kötelező megújítani, és ha szükséges, akkor ötévente felül kell vizsgálni. Az Európai Bizottság összesítése alapján a hosszú távú stratégiát 2022 márciusáig 22 ország adta le, közöttük Magyarország is (*EC* [é. n.]).

A Nemzeti Tiszta Fejlődési Stratégia kimondja, hogy Magyarország 2050-ig fokozatosan klímasemleges országgá válhat anélkül, hogy az átmenet a gazdasági növekedést és a társadalmi jólétet veszélyeztetné (*NTFS* [2021]). Az *NTFS* [2021] a Magyarországra implementált *TIMES* (*HU-TIMES*) modell segítségével számszerűsítette, hogy mekkora többletköltséget jelent ezen ambiciózus klímacél elérése. A számítások alapján az energiaszektorban 22 ezer milliárd forint pótlólagos beruházásra van szükség a klímacélok eléréséhez.

A *TIMES* (*The Integrated MARKAL-EFOM System*) modell egy nemzetközileg használt és elfogadott, energiapiacot szimuláló modell, amelyet a Nemzetközi Energiaügynökség fejlesztett a több évtizedes múltra tekintő *MARKAL* modellből (*Loulou és szerzőtársai* [2021]). E modell egy keretrendszert határoz meg, ennek adaptálása a *HU-TIMES* modell, amelyet a teljes magyar energiaszektorra fejlesztettünk tovább, és megjelennek benne a hazai villany- és távhőtermelői létesítmények technológiai és költségoldali tulajdonságai, valamint a vizsgált végfelhasználói szektorokban jelentkező technológiai és keresletoldali jellemzők.

Tanulmányunkban a *HU-TIMES* modell segítségével vizsgáljuk, hogy mekkora többletköltséget jelent az üvegházhatású gázok különböző mértékű csökkentése 2050-re, és ezek a költségek mely szektorokban jelennek meg. Ehhez meghatározzuk a hazai energiaszektor üvegházhatásúgáz-elhárítási költséggörbéjét. A szakirodalmi áttekintést követően – ahol részletes ismertetjük a *HU-TIMES* modellt, valamint a nemzetközileg elfogadott és használt, energiapiacot szimuláló modelleket – bemutatjuk, hogy különböző forgatókönyvek mellett milyen hatásokkal találkozunk. Kiemelt figyelmet fordítunk a többletköltségek alakulására az egyes végfelhasználási szektorokban, továbbá szintén szektorális bontásban mutatjuk be, hogyan alakult az üvegházhatású gázok kibocsátása. Emellett érzékenységvizsgálattal elemezzük a jövőbeli földgázárak és GDP-pályák esetleges változásainak hatását az elhárítási költségekre. Végül összegezzük főbb megállapításainkat, és javaslatot teszünk a további kutatási irányokra.

Energiapiaci modellek – szakirodalmi áttekintés

Számos energiapiaci modell létezik, amelyeket különböző módon csoportosíthatunk. A leggyakoribb szétválasztás a „felülről építkező” (*top-down*), illetve az „alulról építkező” (*bottom-up*) modellek megkülönböztetése. *Swan–Ugursal* [2009]

is ezen fő csoportosítási ismérvet használja a különböző, háztartásiépület-szektor energiafelhasználását vizsgáló modellek csoportosítására. A felülről építkező modelleket további két részre bontja: ökonometriai, illetve technológiai modellekre. A kettő közötti megkülönböztetés alapja, hogy míg az ökonometriai modellek a jövedelmek és az árak alakulását, addig az utóbbiak a háztartási szektor aggregált épületállományát modellezik.

Fleiter és szerzőtársai [2011] három részre osztja az alulról építkező modelleket: szimulációs, optimalizációs és elszámolómodellekre, ezt a felosztást egészíti ki *Mundaca és szerzőtársai* [2010] egy úgynevezett „hibrid” modell kategóriával. A négy modellfajta közül módszertanilag az elszámolómodellek a legegyszerűbbek, mivel változóik jellemzően előre definiáltak (exogének), és az egyes változók között determinisztikus a kapcsolat. A szimulációs modellek ezeknek a továbbfejlesztett változatai. Ezek már alkalmazzák a mikroökonómiai összefüggéseket, de nincs bennük költségoptimalizáció. Az optimalizációs modellek jellemzően költségoptimalizációt végeznek. Az 1. táblázat összefoglalóan mutatja a két idézett szakirodalmi forrás alapján az általuk vizsgált modellek besorolását.

1. táblázat

Néhány alulról építkező (*bottom-up*) modell besorolása

Modell neve	A modell típusa	Fejlesztő	Technológiák cseréje
CIMS	szimulációs	Kanada – Simon Fraser University és M. K. Jaccard Associates	A technológia elterjedése függ a jelenlegi technológia élettartamától és a korától
LEAP	elszámoló	Egyesült Államok – Stockholm Environment Institute, U. S. Center	Exogén technológiai fejlődés
MAED	elszámoló	Franciaország és Ausztria – University of Grenoble, International Atomic Energy Agency	Exogén technológiai fejlődés
MARKAL/ TIMES	optimalizációs	EU/Egyesült Államok – Energy Technology Systems Analysis Programme, International Energy Agency	A technológia elterjedése függ a jelenlegi technológia élettartamától és a korától
MESSAGE	optimalizációs	Ausztria – International Institute for Applied Systems Analysis	A technológia elterjedése függ a jelenlegi technológia élettartamától és a korától
MURE	elszámoló	EU – SAVE project	Exogén technológiai fejlődés
PRIMES	optimalizációs	Görögország – National Technical University of Athens	A technológia elterjedése függ a jelenlegi technológia élettartamától és a korától

Forrás: Mundaca és szerzőtársai [2010] és *Fleiter és szerzőtársai* [2011] alapján saját szerkesztés.

Prina és szerzőtársai [2020] az alulról építkező energiapiaci modellek esetében másféle csoportosítást vázol fel: vannak az úgynevezett rövid távú vagy statikus modellek, illetve a hosszú távú modellek. Ez utóbbiak esetében további két modell-családot különböztet meg: a tökéletesen előre látó modellek, illetve az úgynevezett rekurzív modellek. Ez utóbbiak jellemzője, hogy a modellezett időszakot több részre bontják fel, és az egyes időszakok eredményei és optimalizációi függenek az előző időszak eredményeitől. A hosszú távú, alulról építkező modellek főbb tulajdonságait a *Függelék F1. táblázata* tartalmazza.

A TIMES modellstruktúrát széles körben alkalmazzák nemzetközi kutatóintézetek, legfőképpen nemzeti energiarendszerek, valamint az azokat érintő energia- és klímapolitikai javaslatok tanulmányozására. Emellett ez a módszertan alkalmas lokális vizsgálatokra (például egy adott szektor mélyebb tanulmányozására), valamint egészen nagy földrajzi kiterjedtségű, nemzetközi rendszerek elemzésére is. Továbbá az elérhető TIMES modelleket osztályozni lehet determinisztikus és sztochasztikus megközelítés alapján, valamint aszerint, hogy az adott eszköz parciális vagy általános egyensúlyi állapotot feltételez. A jelenleg elérhető TIMES modellek listáját, valamint azok főbb jellemzőit a *2. táblázat* tartalmazza.

2. táblázat

Az elérhető TIMES modellek listája és főbb jellemzőik

A modell neve	Forrás	Földrajzi kiterjedtség	Földrajzi lefedettség	Modell-fejlesztő	Megjegyzés
ETSAP-TIAM	<i>ETSAP-TIAM</i> [2022]	Globális	15 nagy régió világszerte	IEA, US-EIA	Az első globális TIMES modell, amelyet annak fejlesztői alkottak meg
ETP TIMES	<i>ETP TIMES</i> [2022]	Globális	28 nagy régió világszerte	IEA, Energy Technology Policy Division	Technológiai adatokkal részletgazdagon felszerelt modell, amelyet a Nemzetközi Energiaügynökség (IEA) használ a kutatásaihoz
SAGE	<i>Loulou és szerzőtársai</i> [2004]	Globális	16 nagy régió világszerte	Energy Information Agency (US-DOE)	Globális energiapiacok modellezésére hivatott
EFDA-TIMES (ETM)	<i>EFDA-TIMES</i> [2022]	Globális	17 nagy régió világszerte	CIEMAT (EUROfusion/SES projects)	Elsődlegesen a fúziós erőművek jövőbeli szerepének vizsgálatára alkalmazták. A modell bővítésének köszönhetően a teljes energiarendszert képes modellezni 2100-ig

A 2. táblázat folytatása

A modell neve	Forrás	Földrajzi kiterjedtség	Földrajzi lefedettség	Modell-fejlesztő	Megjegyzés
JRC-EU-TIMES	<i>Simoes és szerzőtársai</i> [2013]	Regionális	28 európai ország	EC-DGR	Regionális modell, az Európai Unió energia- és klímapolitikai javaslatainak vizsgálatára alkalmas, figyelembe veszi a vizsgált országok teljes energiarendszerét
TIMES_EE/EG	<i>Voss és szerzőtársai</i> [2006]	Regionális	25 európai ország	IER-University, Stuttgart	25 európai ország villamosenergia-, távhő- és gázpiacainak vizsgálatára alkalmas
TIMES-Sweden	<i>LTU</i> [2020]	Nemzeti	Svédország	Lulea University of Technology	Nemzeti TIMES modellek, eltérő földrajzi részletezettséggel,
Irish TIMES	<i>Deane és szerzőtársai</i> [2017]		Írország	University College Cork	a teljes energiarendszert modellezendő, főként az egyes nemzetek hosszú távú energia- és klímastratégiájának háttérszámításához alkalmazandó
EPAUR9r_US	<i>EPA</i> [2021]		Egyesült Államok	US EPA	
TIMES_UK	<i>UCL</i> [2022]		Egyesült Királyság	UCL Energy Institute	
TIMES_PT	<i>NOVA</i> [2022]		Portugália	University of Lisbon	
TIMES_Norway	<i>Lind</i> [2018]		Norvégia	Institute for Energy Technology	
TIMES_Spain	<i>Labriet és szerzőtársai</i> [2010]		Spanyolország	CIEMAT	
TIMES_GR	<i>CRES</i> [2022]		Görögország	CRES	
HU-TIMES-DH	<i>Kerekes és szerzőtársai</i> [2020]	Lokális/ szektorális	Magyarország távhőszektora	REKK	Hazai távhőszektor elemzéséhez használt modell az egyes távhőkörzetek szeparált tanulmányozására

Forrás: saját szerkesztés.

A HU-TIMES modell bemutatása

A HU-TIMES modell egy, a REKK által a teljes magyar energiaszektorra továbbfejlesztett TIMES modell, amelyben megjelennek a hazai villamosenergia- és távhőtermelői létesítmények technológiai és költségoldali tulajdonságai, valamint a vizsgált végfelhasználói szektorokban jelentkező technológiai és keresletoldali jellemzők. Többek között a HU-TIMES modell eredményei alkották a Nemzeti Energia- és Klímaterv (NEKT [2020]) és a Nemzeti Tiszta Fejlődési Stratégia (NTFS [2021]) háttérszámításait.

A modell felépítése

A HU-TIMES egy olyan optimalizációs modell, amely esetében a cél a legkisebb költségek mellett kielégíteni az előre meghatározott keresleteket, figyelembe véve az előre definiált korlátokat.

Loulou és szerzőtársai [2021] alapján a Magyarországra implementált HU-TIMES modell stilizált felépítése az alábbi három egyenlettel írható le:

$$\min c \times X, \quad (1)$$

s. t.:

$$\sum_k ACT_{k,i} \geq D_i \quad \forall i = 1, \dots, I; \quad t = 1, \dots, T, \quad (2)$$

$$B \times X \geq b, \quad (3)$$

ahol az (1) egyenlet a modell célfüggvényét mutatja be, teljesen rugalmatlan keresleti függvényt feltételezve. Az egyenletben az X a modell változóit tartalmazó mátrixot, a c pedig a változókhoz tartozó költségparamétereket tartalmazó vektort jelölik. A modell főbb változói közé az átalakítási ágazathoz tartozó, valamint a végfelhasználói keresletet kielégítő technológiák termelési és kapacitási jellemzői sorolhatók.

Az (1) célfüggvény értékét a modell minimalizálja a (2) és a (3) egyenletekkel stilizált korlátok szimultán kielégítésével. A (2) egyenlet azt jelöli, hogy az előre meghatározott exogén, teljesen rugalmatlan keresletet (D_i) minden keresleti szegmens (i) esetében és minden időpontban (t) ki kell elégíteni, az adott keresleti szegmenshez tartozó összes technológia (k) teljesítményét ($ACT_{k,i}$) figyelembe véve. Itt fontos hangsúlyozni, hogy az átalakítási szektorhoz tartozó keresletet – például a másodlagos energiahordozók (villamos energia, távhő, hidrogén) – a modell endogén módon (azaz nem a modellező által előre meghatározott módon) kalkulálja.

A (3) egyenlet a keresleti-kínálati egyenlegen túli összes egyéb korlátot tartalmazza: idesorolhatók például az egy adott átalakítási szektorban megtalálható vagy a végfelhasználást kielégítő technológia – minimum és maximum – kapacitáskorlátai, az import-export esetében a határkeresztezők kapacitásai, a fel- és leszállást meghatározó technológiai jellemzők. Továbbá ez a stilizált egyenlet jelöli az egyes

technológiák hatékonysági jellemzőit, az egy technológiához köthető input- és output-termékek összetételének arányát vagy a lentebb részletezett alternatív forgatókönyvekben szereplő üvegházhatású gázok maximális kibocsátásának korlátját akár egy technológia, egy keresleti szegmens vagy a teljes energiaszektor esetében.

A HU-TIMES lefedi a teljes magyarországi energiaszekort. A 3. táblázat mutatja, hogy az egyes szektorokban és alszektorokban milyen keresleteket határoztunk meg, amelyeket ki kell elégíteni a jelenlegi, illetve az új technológiákkal.

3. táblázat

A HU-TIMES modell keresletei az egyes alszektorokban

Szektor/Alszektor	Kereslet	Keresletek száma	Mértékegység	Jövőbeli keresletet meghatározó tényező
KÖZLEKEDÉS				
Hosszú távú teherszállítás	szállított személyek	1	utaskilométer	GDP, népességszám, olajár
Rövid távú személyszállítás	szállított személyek	1	utaskilométer	GDP, népességszám, olajár
Hosszú távú személyszállítás	szállított áru	1	tonna-kilométer	GDP, népességszám, olajár
Rövid távú teherszállítás	szállított áru	1	tonna-kilométer	GDP, népességszám, olajár
Csővezetéki szállítás	szállított áru	1	tonna-kilométer	GDP, népességszám, olajár
Belföldi vízi közlekedés	szállított áru	1	tonna-kilométer	GDP, népességszám, olajár
HÁZTARTÁS				
Épületek energiafelhasználása	hasznosenergia-felhasználás	23	petajoule	GDP, lakosságszám
Hűtőgépek	energiafelhasználás	1	petajoule	lakosságszám
Fagyasztók	energiafelhasználás	1	petajoule	lakosságszám
Mosógépek	energiafelhasználás	1	petajoule	lakosságszám
Világítás	világítás	1	lumen	lakosságszám
Főzés	energiafelhasználás	1	petajoule	lakosságszám
Egyéb elektromos készülékek	energiafelhasználás	1	petajoule	lakosságszám
MEZŐGAZDASÁG	energiafelhasználás	1	petajoule	GDP, népességszám, olajár
SZOLGÁLTATÁSI SEKTOR				
Épületek energiafelhasználása	hasznosenergia-felhasználás	41	petajoule	GDP
Egyéb energiafelhasználás	energiafelhasználás	1	petajoule	GDP

A 3. táblázat folytatása

Szektor/Alszektor	Kereslet	Keresletek száma	Mértékegység	Jövőbeli kereslet meghatározó tényező
ÁTALAKÍTÁSI SEKTOR				
Koksztermelés, egyéb átalakítás	energiafelhasználás	5	petajoule	GDP, népességszám, olajár
IPAR				
Vas- és acélipar	energiafelhasználás	3	petajoule	GDP, népességszám, olajár
Vegyipar	energiafelhasználás	4	petajoule	GDP, népességszám, olajár
Cement és mész	energiafelhasználás	2	petajoule	GDP, népességszám, olajár
Üveg- és kerámiaipar	előállított üveg és kerámia mennyisége	9	millió tonna, petajoule	GDP, népességszám, olajár
Színesfémipar	energiafelhasználás	1	petajoule	GDP, népességszám, olajár
Gép- és járműgyártás	energiafelhasználás	2	petajoule	GDP, népességszám, olajár
Bányászat	energiafelhasználás	1	petajoule	GDP, népességszám, olajár
Papíripar	előállított papír mennyisége	3	millió tonna	GDP, népességszám, olajár
Faipar	energiafelhasználás	1	petajoule	GDP, népességszám, olajár
Építőipar	energiafelhasználás	1	petajoule	GDP, népességszám, olajár
Textilipar	energiafelhasználás	1	petajoule	GDP, népességszám, olajár
Egyéb ipar	energiafelhasználás	1	petajoule	GDP, népességszám, olajár

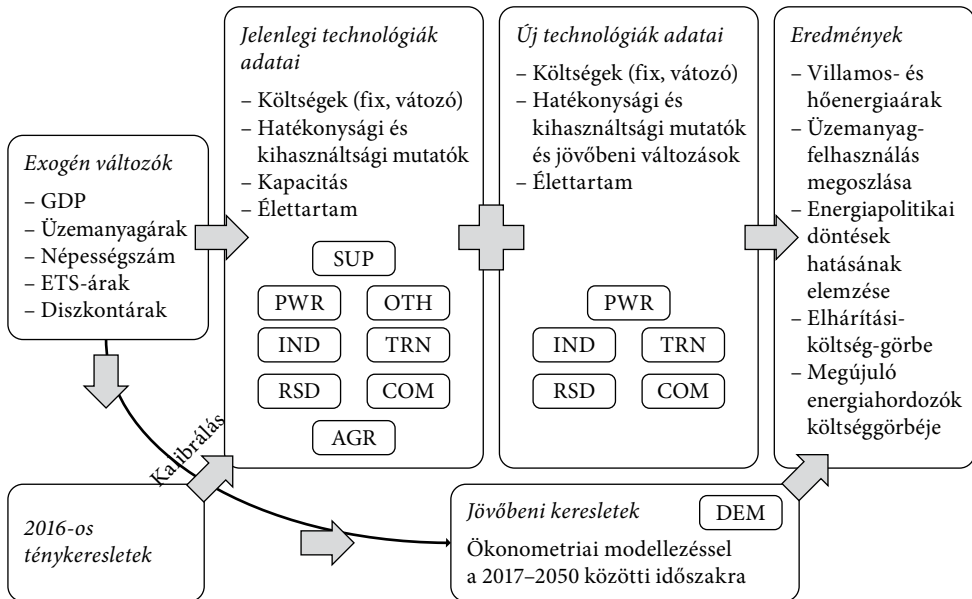
Forrás: saját szerkesztés.

A ténykeresletek a modell kezdő évére – 2016-ra – lettek definiálva, döntő többségében az energiamérlegből kiindulva, illetve azon tényezők esetében, ahol nem energiamértékegységben határoztuk meg a keresletet, más, hivatalos statisztikai adatközlésre támaszkodtunk. A HU-TIMES modell hosszú távú modell, akár 2050-ig is képes a hazai energiaszektort modellezni, ezért szükséges az egyes keresleti tényezők értékeit hosszabb távon is előre jelezni, amelyeket ökonometriai modellezéssel határoztunk meg (1. ábra). Azt, hogy mely tényezők játszottak szerepet a jövőbeli tényezők keresletének becsléséhez, a 3. táblázat utolsó oszlopa mutatja.

A HU-TIMES modell is számos olyan exogén inputváltozót használ, amelyek jelentősen képesek befolyásolni az eredményeket. Ezen inputadatok a hazai

1. ábra

A HU-TIMES modell struktúrája



ETS: Az Európai Emissziókereskedelmi Rendszerben kialakuló kvótaárak, SUP: primer energiahordozók kínálata, PWR: villany- és távhőszektor, AGR: mezőgazdaság, IND: ipar, RSD: háztartási szektor, COM: terciér szektor, TRN: közlekedés, OTH: „egyéb” szektorok, DEM: az egyes szektorok kereslete.

Forrás: saját szerkesztés.

energiaszektor működését jelentősen befolyásoló makrotényezők: a GDP-változás, a népességszám alakulása, az üzemanyag- és szén-dioxid-kvótaárak (ETS-árak) változása, valamint a diszkontráta.

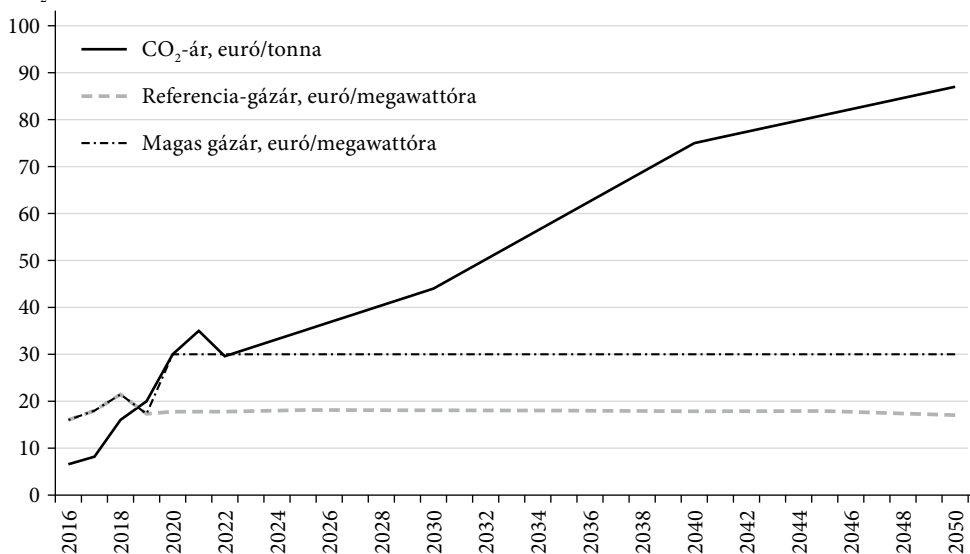
A nagykereskedelmi földgáz árát a referenciaesetben – összhangban az *NTFS* [2021]-gyel – 2020–2050-es időtávon 19 euró/megawattórás áron határoztuk meg. Az elemzésünk során érzékenységvizsgálatot végeztünk a földgáz árára vonatkozóan, amikor ezen érték hosszú távon 30 euró/megawattórás szinten alakul. Ezek mindegyikét 2016-os reáláron kell érteni. A szén-dioxid-kvóta árfolyamának előrejelzése során szintén az *NTFS* [2021]-ben szereplő értékeket használtuk. Látható, hogy ez az érték folyamatosan növekszik, 2050-re megközelíti a 90 euró/tonnás árszintet (2. ábra).

További lényeges exogén inputparaméter a GDP, illetve a magyarországi lakosságszám alakulása. Mivel a GDP igen jelentős hatást gyakorol a végfelhasználói keresletek alakulására, ezért ezen paraméterre a legérzékenyebb a HU-TIMES modell. A referenciapálya mellett ezért két érzékenységvizsgálatot is végeztünk: egy alacsony és egy magas GDP-pálya mellett is megvizsgáltuk, hogy milyen hatást gyakorol a GDP a végső eredményekre. Ezen pályák mellett azt feltételeztük, hogy a reál-GDP évente $\pm 0,5$ százalékponttal változik a referenciapályához viszonyítva. Ahogyan a 3. ábra is mutatja, ez 2050-re jelentős különbségeket jelenthet. Míg a referenciapálya esetében

2. ábra

A földgáz nagykereskedelmi ára (euró/megawattóra) és a CO₂-kvóta áralakulása (euró/tonna)

Földgáz nagykereskedelmi ára,
euró/megawattóra, illetve
CO₂ kvóta ára, euró/tonna



Forrás: NTFS [2021].

2,2-szeresére nő a reál-GDP 2016-hoz viszonyítva, addig ez az érték a pesszimista esetben 1,8-szeresére, míg az optimista esetben 2,5-szeresére.

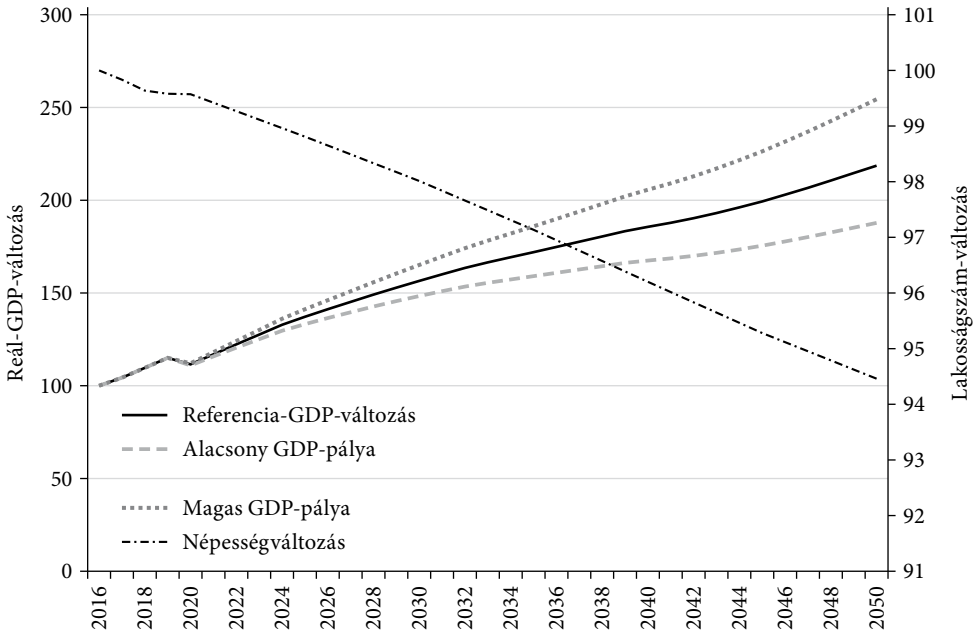
A lakosságszám alakulása szintén meghatározó a végfelhasználói keresletek alakulására. Egyrészt szerepet játszik az épületek teljes szükséges alapterülete – így az épületszektor – energiafelhasználásának keresletére, másrészt pedig a közlekedési szektor keresletére is hat. A számítások során egy csökkenő lakosságszámmal 2050-re 9,27 milliós hazai lakosságszámmal kalkulálunk.

A definiált keresletek a jelenlegi vagy a jövőbeli új technológiákkal elégíthetők ki. A HU-TIMES modell tartalmazza a jelenlegi technológiák adatait mind a nyolc vizsgált szektor esetében: primer energiahordozók kínálata (SUP), villamosenergia- és távhőszektor (PWR), mezőgazdaság (AGR), ipar (IND), háztartási (RSD) és terciér szektor (COM), közlekedés (TRN) és „egyéb” szektorok (OTH). Ilyen technológiai adatok például a kapacitás, a kihasználtság, az élettartam és a működéshez szükséges költségek. Az új (jövőben elérhető) technológiák adatai magukban foglalják a beruházási, működtetési és fenntartási költségeket, valamint a technológiai adatokat – például várható élettartam, hatékonysági és általános kihasználtsági jellemzők –, továbbá ezek jövőbeni várható alakulását.

A magyar TIMES modell alkalmas az energiaszektort mind termelési (technológiai), mind költségoldalról (közgazdaságtanilag) elemezni. Továbbá az üvegházhatású gázok (ÜHG) energiaszektor általi kibocsátása eredményként is kinyerhető, valamint a modell működése szempontjából korlátként is használható.

3. ábra

A reál-GDP és a lakosságszám változása (2016 = 100 százalék)



Forrás: NTFS [2021].

A HU-TIMES modell korlátozza, hogy eredményei parciális egyensúlyi állapotot tükröznek, mivel több, jelentős változót (mint például a GDP változását, a népességszámot) exogén módon kezel, vagyis a modell számára ezeket külső adottságként definiáljuk.

Idődimenzió

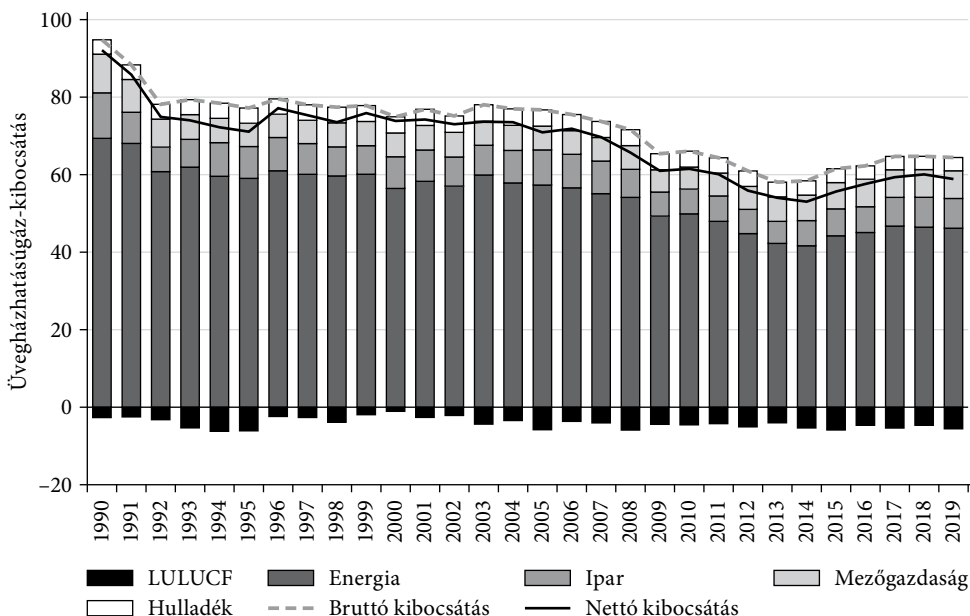
A TIMES-modellezés során lehetőség van arra, hogy a különböző szektorokat éven belül több szeletre (*time slice*) bontsuk. Ennek a villamosenergia- és távhőszektor esetében nagy jelentősége van, hiszen mind a keresleti oldal, mind pedig a kínálati oldal jelentősen eltérhet az egyes órákban. A HU-TIMES modellben összesen 96 szeletet határoztunk meg: megkülönböztettük a hétvégét és a hétköznapokat (2 különböző csoport), az egyes hónapokat (12 különböző csoport), illetve napon belül négy időszakot. A hónapok megkülönböztetése a hőfogyasztás miatt indokolt, mivel például a lakosság esetében a távhőfogyasztás nagyságrenddel nagyobb télen, mint nyáron. A hétvége–hétköznap megkülönböztetése elsősorban a villamosenergia-szektor keresleti oldala miatt szükséges, mivel az áramfogyasztás lényegesen nagyobb hétköznapokon, mint a hétvégi órákban. A napon belüli megkülönböztetés mind a keresleti, mind pedig a kínálati oldalról indokolt. Egyrészt napon belül jelentősen változik a villamosenergia-fogyasztás, másrészt pedig az egyes, elsősorban időjárásfüggő, azon belül is a naperőművi termelés jelentős változást mutat.

Modellezési eredmények

Kutatásunk fő kérdése, hogy a Magyarország által felállított 2050-es klímasemlegességi célkitűzés elérése milyen költségekkel jár. A HU-TIMES modell lehetőséget teremt arra, hogy ezt a kérdést az energiaszektorra vonatkozóan megvizsgáljuk. Az energiaszektor a teljes nettó üvegházhatásúgáz-kibocsátás 78,5 százalékát tette ki 2019-ben. Az energiaszektor részesedése az elmúlt közel három évtizedben viszonylag stabilan 75–85 százalék között mozgott (4. ábra).

4. ábra

Az üvegházhatásúgáz-kibocsátás alakulása Magyarországon az egyes szektorokban, 1990–2019 (millió tonna CO_{2eq})



LULUCF: földhasználat, földhasználat-megváltoztatás és erdőgazdálkodás.

Forrás: UNFCCC [2021].

Elhárítási görbe

Kutatási kérdésünkre az úgynevezett elhárítási görbe tud választ adni, amely bemutatja, hogy adott üvegházhatásúgáz-emissziós cél milyen költségek mellett érhető el. Az üvegházhatásúgáz-elhárítási görbe használata elterjedt a szakirodalomban is, módszertana kiforrott. *Misonel és szerzőtársai* [2022] részletesen bemutatja azt a szakirodalmat, amely hasonló típusú modellek használatával határozza meg az elhárítási görbéket. Ezen megközelítések jellemzői, hogy minden esetben vizsgálják, hogy adott üvegházhatásúgáz-elhárítás milyen legalacsonyabb költségek mellett valósul meg, melyek azok a legolcsóbb technológiák, szegmensek, ahol az adott elhárítás megvalósul.

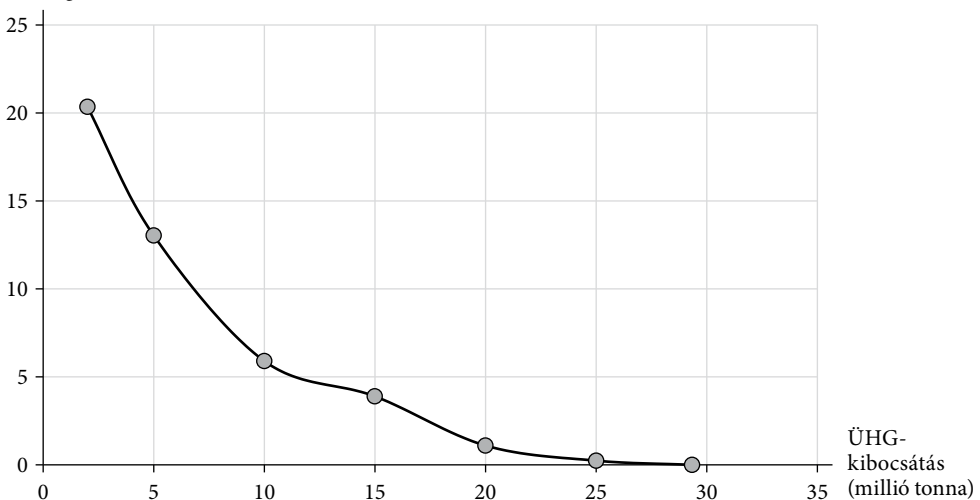
A modellezés során 2050-re vonatkozóan különböző maximális üvegházhatású-gázki-bocsátási (ÜHG) korlátokat határoztunk meg a HU-TIMES modellben, miközben minden más paramétert változatlanul hagytunk az egyes forgatókönyvek között. Az ezen alternatív forgatókönyvek esetében kapott eredményeket hasonlítjuk össze az alapforgatókönyvben kapott értékekkel. Ez egy olyan forgatókönyv, amikor semmiféle ÜHG-korlátot nem határozunk meg, azaz lényegében a szokásosnak megfelelő (*business-as-usual*) forgatókönyv valósul meg. A modellezési számításaink szerint egy ilyen forgatókönyv esetében 2050-re az energiaszektor ÜHG-emissziója 29,5 millió tonnára csökken a mai 46 millió tonnás szintről. A csökkenés az alapforgatókönyvben sok tényező együttes eredőjeként áll elő. Egyrészt a GDP növekedése növeli a végső keresletet, legyen szó az ipari termelésről vagy a mobilizációs igényről, ugyanakkor a népesség csökkenése, illetve az új technológiák elterjedése – amelyek lényegesen kisebb fajlagos emisszióval rendelkeznek – pedig jelentősen csökkenti az ÜHG-emissziót. E hatások eredményeképpen figyelhetjük meg ezt a kisebb – évente átlagosan 1,5 százalékos – ÜHG-csökkenést.

Az alapforgatókönyv után megvizsgáltuk, hogyan alakul az egyes szektorok energiafelhasználása és ÜHG-kibocsátása, ha 2050-re vonatkozóan különböző ÜHG-korlátokat határozunk meg. Mivel ezek szigorúbb korlátot állítanak a modellnek, ezért természetesen növekednek a költségek is. Az egyes alternatív forgatókönyvekben az ÜHG-elhárítás kezdetben relatíve alacsony költségek mellett megvalósítható, ahogyan azt az 5. ábra is szemlélteti.

5. ábra

Az ÜHG-kibocsátás 2050-ben és annak többletköltsége az alap- (ÜHG-korlát nélküli) forgatókönyvhöz viszonyítva

Költségtöbblet (milliárd euró)



A többletköltségek meghatározásakor figyelembe vettük az összes felmerülő költséget, majd ezeket 5 százalékos reáldiszkontarával diszkontáltuk 2016-os értékre. A modellezés során a következő költségkategóriákat különböztettük meg:

- beruházási költség,
- fix költségek,
- változó költségek,
- energiaköltség,
- egyéb költségek, amelyek közé tartozik a CO₂-kvóta-költség vagy a megújuló támogatásnak a költsége.

E költségeket összeadva és diszkontálva kapjuk meg, hogy mekkora a teljes rendszer-költség, amely mellett az előre definiált keresletek a legkisebb költségek mellett kielégíthetők. Tehát a modellezés optimalizációjának a célfüggvénye, hogy a megadott korlátok mellett e rendszerköltséget minimalizálja.

A többletköltséget az alapforgatókönyvhöz viszonyítjuk, azaz amikor nem határoztunk meg ÜHG-korlátot. Látható, hogy a kezdeti elhárítás relatíve alacsony költségek mellett érhető el: a 20 millió tonnára való csökkentés többletköltsége 1 milliárd euró, azaz évente mintegy 10-15 milliárd forint extraköltség keletkezik. A görbe exponenciális jelleget ölt, ezért jelentősen növelve a kitűzött cél szintjét, annak költsége, hogy az energiaszektorban 5 millió tonnára csökkentjük az ÜHG-kibocsátást, már 13 milliárd euróra rúg, azaz évente megközelítően 150 milliárd forintos többletköltséget okoz, költségoptimális megoldást feltételezve. A fajlagos elhárítási költségek alakulása is jól mutatja ezt az exponenciális jelleget: míg 25–29 millió tonna között az elhárítás fajlagos költsége tonnánként 55 euró, addig a 10–15 millió tonnás sávban az elhárítás költsége már ennek nyolcszorosa, tonnánként 401 euró, ami rendkívül gyorsan tonnánként közel 2500 euróra növekszik a 2–5 milliós sávban.

Ez az exponenciális költségnövekedés más elemzésekben is megfigyelhető. *Kesicki* [2013] MARKAL (a TIMES modell elődje) alapú modellezéssel vizsgálta, hogy az Egyesült Királyságban hogyan alakul a 2030-ra vonatkozó elhárítási költséggörbe. Számításai szerint az alappályához képest (ha nincs ÜHG-korlát) a kezdeti 10–15 százalékos kibocsátáscsökkentést tonnánként 20 font/CO_{2eq} fajlagos elhárítási költséggel lehet elérni, amely költség tonnánként 100 font/CO_{2eq}-re növekszik 50 százalékos elhárítás mellett, és az általa vizsgált legmagasabb elhárítás esetén (~60 százalékos elhárítás) már tonnánként 300 font/CO_{2eq}-re emelkedik.

Megvizsgáltuk továbbá, hogy 2050-re mekkora az energiaszektorban az ÜHG-kibocsátás elérhető legnagyobb csökkentése. Számításaink szerint 2 millió tonna CO_{2eq}-re való csökkentés még elérhető úgy, hogy minden előre definiált keresletet ki lehessen elégíteni. Ugyanakkor a hazai energiaszektorban a nettó nulla ÜHG-kibocsátás nem lehetséges a következő okok együttes megléte miatt. Egyrészt, egyes keresleti szegmensek esetében – elsősorban az ipari szektorban – karbonmentes helyettesítő technológia jelenleg még nem elérhető. Másrészt, az energiaszektorban lehetőség van „nettó” szén-dioxid-elnyelésre is, ha az úgynevezett biomassa-alapú karbonmegkötést választjuk. Jelenleg az elsődleges szilárd biomasszára mint megújuló energiaforrásra kell tekinteni,¹ így a biomassa-égetéssel előállított villamos- vagy hőenergia-termelés során keletkező szén-dioxid megkötése negatív emisszió

¹ Tehát a jelenlegi elszámolás alapján a biomassa égetése nem jár szén-dioxid-kibocsátással.

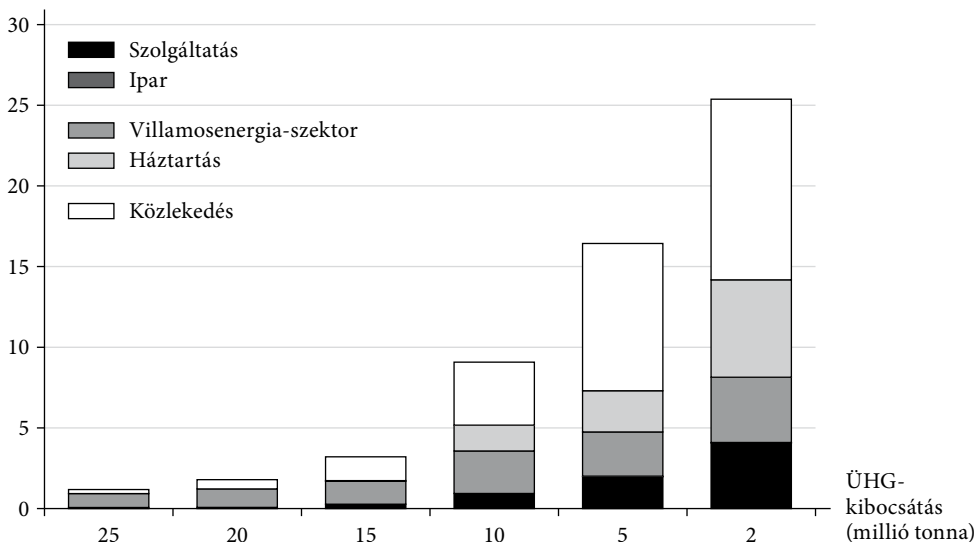
köszönhetően a megtakarított tüzelőanyag és változó költség, továbbá a csökkenő ÜHG-kibocsátásból eredő szén-dioxid-kvótaköltség is (6. ábra).

A beruházási költségek szektorális vizsgálata kevésbé intuitív eredményeket ad. A legalacsonyabb fajlagos beruházási elhárítási költségek – kevésbé szigorú ÜHG-kibocsátási korlátok mellett – a villamosenergia-szektorban adódnak, amit mutat a beruházási költségek összpontosulása is ezen szektorra. Továbbá, ha 15 millió tonna $\text{CO}_{2\text{eq}}$ alatt határozzuk meg a 2050-es maximális kibocsátási célt, a legnagyobb beruházási költségeket a közlekedési szektorban tapasztalhatjuk. Az 5 millió tonna $\text{CO}_{2\text{eq}}$ maximális ÜHG-kibocsátási korlát mellett a teljes beruházási költség közel fele, 44 százaléka a közlekedésre összpontosul. Ezt követi a háztartási szektor, amely a beruházási költségek 23,8 százalékát vonzza, míg a villamosenergia-szektor és a szolgáltatási szektor adja a fennmaradó költségek 16-16 százalékát. Az iparban azért nem látható jelentős beruházási költség, mert e szektorban az energiafelhasználás jelentős részét nem technológiákra lebontott módon (*bottom-up*) modelleztük, hanem aggregáltan (*top-down*) elemeztük. Az iparban megjelenő elhárítási költségeket az egyéb költségek változása mutatja (7. ábra).

7. ábra

A beruházási költségek szektorális megoszlása

Költségtöbbslet (milliárd euró)



Az üvegházhatású gázok kibocsátása

Az ÜHG-emisszió szektorális megoszlása igen érdekesen alakul a különböző 2050-es ÜHG-korlátok mellett. Elsőre azt gondolnánk, hogy a teljes hazai energiaszektorra allokkált ÜHG-emissziós korlát alkalmazásával szigorúan monoton módon csökken minden szektorban a kibocsátás. Erre példaként szolgál az ÜHG-kibocsátásnak

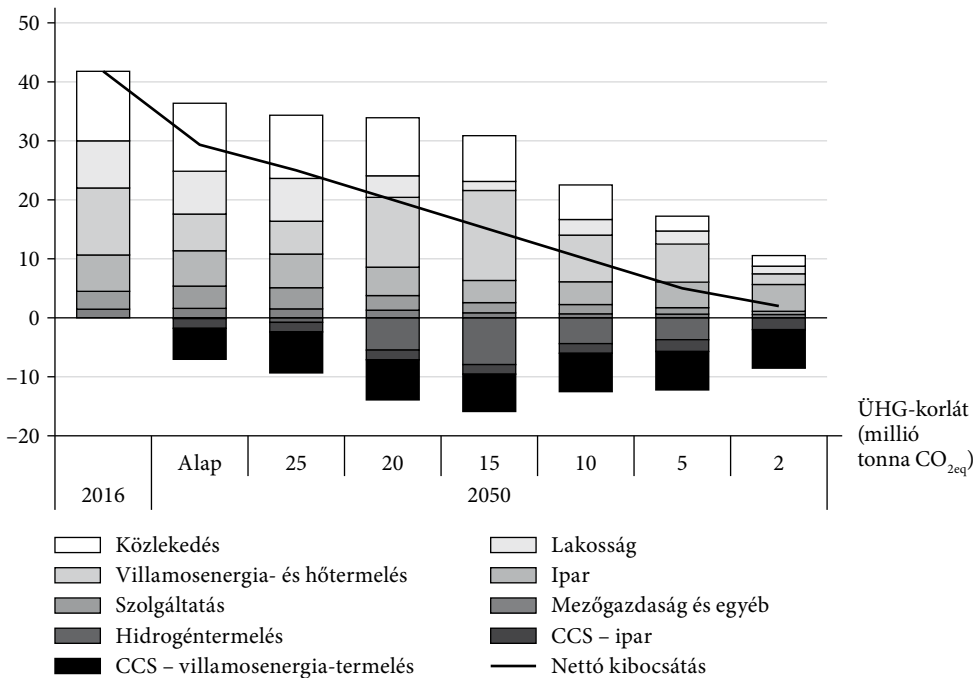
a mezőgazdaságban, a szolgáltatási szektorban, illetve a közlekedési szektorban adódó, közel lineáris csökkentése.

Ezzel szemben a modellezési eredmények alapján vannak olyan szektorok, amelyek esetében a szigorodó ÜHG-emissziós korlát mellett először növekszik, majd ismét csökken a kibocsátás. A villamosenergia- és távhőtermelés szektorban 25 millió tonna $\text{CO}_{2\text{eq}}$ modellezési korlát esetében 5,5 millió tonna kibocsátás adódik, majd 15 millió teljes ÜHG-korlát mellett ezen szektor kibocsátása 15 millió tonna $\text{CO}_{2\text{eq}}$ felé növekszik (8. ábra).

8. ábra

Az ÜHG-kibocsátás megoszlása különböző ÜHG-korlátok mellett, a 2016. évi tény, a 2050. évi becslét (millió tonna $\text{CO}_{2\text{eq}}$)

ÜHG-kibocsátás (millió tonna)



CCS: szén-dioxid-leválasztás és -tárolás (*Carbon Capture and Storage*).

Ez a trend két tényezőnek köszönhető: egyrészt nagyon megnövekszik a hidrogéntermelés, másrészt az ÜHG-csökkentés részben elektrifikációval valósul meg. Az így megnövekedett villamosenergia-keresletet részben fosszilis vagy szénmegkötéssel kombinált fosszilis erőművek állítják elő. Ha e szektor „nettó” kibocsátását vesszük alapul – vagyis hozzászámítjuk a hidrogéntermelés, illetve a villamosenergia-termelés során megkötött szén-dioxidot is –, még akkor is a legnagyobb kibocsátás 15 millió tonna környékén adódik. 15 millió tonnás ÜHG-cél esetében a villamosenergia-termelés szénmegkötése nem változik szignifikáns mértékben, addig a hidrogéntermelésből származó megkötés lecsökken. Ez annak köszönhető, hogy a két

hidrogén² előállításánál az ÜHG-mérleg negatív, azaz valamekkora károsanyag-kibocsátással jár, ezért az egyre szigorodó korlátok miatt ezt a technológiát nem használják, helyette zöld hidrogéntermelésre kerül sor. Bár a fentebb részletezett – nemlineáris – kibocsátáscsökkentési pálya az adott szektor esetében nem tűnik intuitívnak, a részben fosszilis primer energiahordozókból előállított szekunder energiahordozók (villamos energia és hidrogén) hatékonyan és jelentős mértékben váltanak ki primer fosszilis energiahordozót.

A lakosság esetében szintén érdekes tendenciát láthatunk. Míg kezdetben – az ÜHG-emissziós korlát erősödésével – csökken a háztartási szektor ÜHG-kibocsátása, utána viszont kisebb emelkedésnek indul, majd ismét lecsökken – nagyon szigorú (2 millió tonnás) ÜHG-emissziós korlát esetében szinte nullára. Ennek oka, hogy míg kezdetben a szilárd biomassza jelentős felhasználását tapasztaltuk a lakossági szektorban, addig a 10 millió tonnás CO_{2eq}-korlát felett ez az érték szignifikánsan lecsökken, aminek oka a szilárd biomassza korábban bemutatott korlátossága. Ezért ha szűkül az ÜHG-kibocsátási korlát, akkor azon szektorok esetében, ahol könnyen és relatíve alacsony fajlagos elhárítási költség mellett, de alacsony szén-dioxid-intenzitás mellett lehet szilárd biomassza-alapú tüzelőanyagot helyettesíteni, ott megtörténik a váltás. Ennek köszönhetően a szűkös szilárd biomasszát a biomassza-alapú, szén-dioxidot leválasztó, hasznosító és tároló (*Carbon Capture, Utilization, and Storage, CCUS*) technológiával lehet hasznosítani. Így lehetőség van a „megújuló” alapú villamosenergia- és hőtermelés mellett az elvi „nettó” szénmegtartásra is. És mivel a helyettesítés kezdetben magasabb ÜHG-intenzitás mellett valósul meg, ezért növekedhet kezdetben az ÜHG-emissziója az átalakítási és a lakossági szektoroknak kisebb ÜHG-kibocsátási korlát mellett.

Az ipar esetében a vizsgált ÜHG-korlátok mellett igen kis skálán mozog az ipari ÜHG-emisszió, és még nagyon alacsony korlát mellett is nagyon jelentős az ipari szektor ÜHG-kibocsátása. Ez abból következik, hogy e szegmens esetében nagyon erős technológiai korlátok léteznek, amelyek nehezítik a fosszilis tüzelőanyagok helyettesítését más, dekarbonizált tüzelőanyagokkal (8. ábra).

Az energiafelhasználás alakulása

A teljes energiafelhasználás a 15–29 millió tonna CO_{2eq} közötti maximális emissziós értékek mellett nem változik szignifikánsan, ami azt jelenti, hogy e tartományban a kibocsátás csökkentése nem az energiahatékonysági intézkedések révén, hanem tüzelőanyag-váltással valósul meg. 15 millió tonnás ÜHG-csökkenés alatt viszont szignifikánsan csökken az energiafelhasználás, elsősorban a közlekedési, a háztartási és a szolgáltatási szektorban (9. ábra). Ezen szektorokban a lehetséges energiamegtakarítás 2050-re mintegy 50 százalékos, azaz ennyivel csökkenthető az energiafelhasználás az alapforgatókönyvhöz képest. Ez egyben azt is jelenti, hogy az

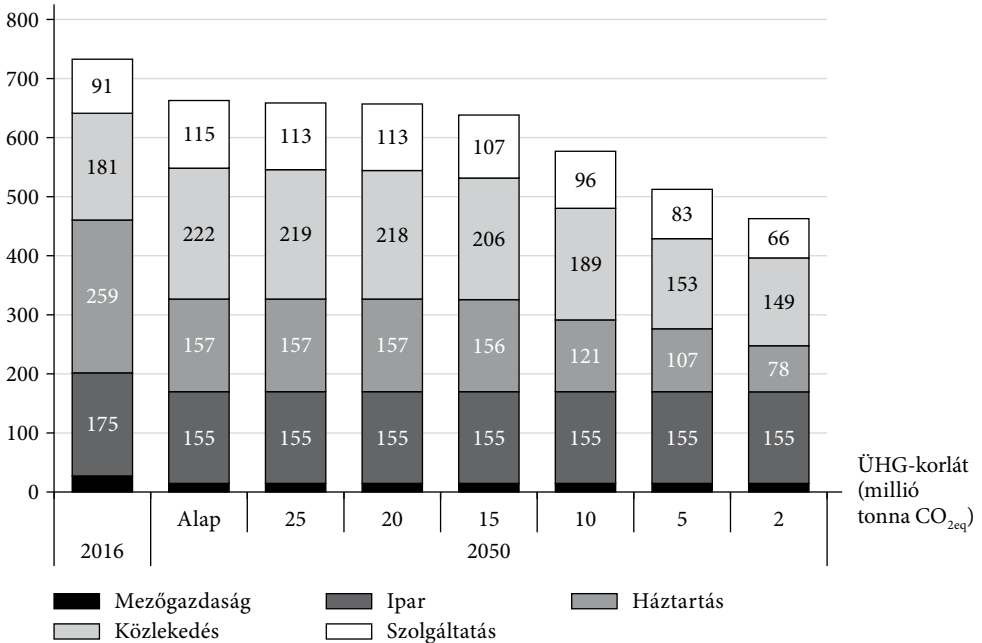
² A kék hidrogéntekológia esetében földgázból állítjuk elő a hidrogént, és a folyamat során a keletkező szén-dioxid egy része megkötésre kerül.

alapforgatókönyvben már megvalósuló energiahatékonysági beruházásokon túl a további energiamegtakarításból eredő ÜHG-emisszió-csökkenés költségesebb, mint a tüzelőanyag-váltás.

9. ábra

A 2016. évi tény, illetve a 2050. évi végső energiafelhasználás szektorális összetétele különböző ÜHG-korlátok mellett (petajoule)

Energiafelhasználás (petajoule)



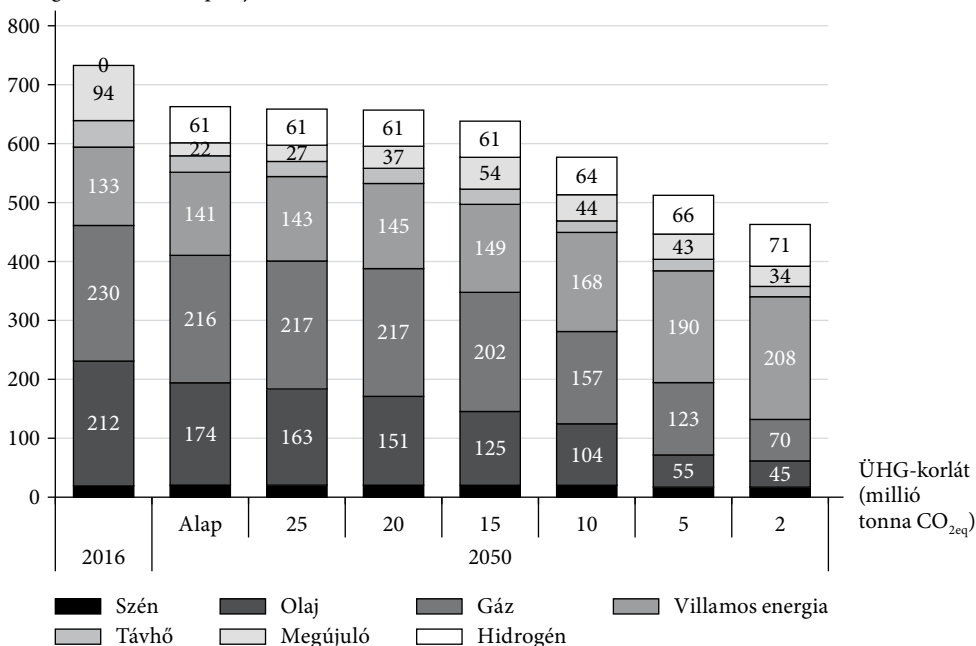
A maximális ÜHG-kibocsátási korlát szűkítésével a tüzelőanyag-összetételben jelentkező változások lineáris és letisztult trendek szerint adódnak. Egyrészt, az alapforgatókönyvhöz képest nagyon jelentősen csökken a földgáz- és olajfelhasználás, a 2 millió tonnás ÜHG-kibocsátási korlát esetében mintegy harmadára. Másrészt, jelentősen növekszik a villamos energia szerepe a végső energiaellátásban, elsősorban az elektromos autók és a hőszivattyúk terjedése következtében. A megújuló energiahordozók – vagyis a primer szilárd biomassa – felhasználása a 15–29 millió tonna CO_{2eq} maximális kibocsátási korlátok között növekszik a végfelhasználói szegmenseken belül, majd a szűkösebb maximális ÜHG-kibocsátási korlát mellett pedig csökkenni kezd. Ez az elsőre meglepő eredmény abból következik, hogy a korlátozottan rendelkezésre álló szilárd biomasszát szűk ÜHG-kibocsátási korlát esetében nem a végfelhasználói szegmensek használják fel, hanem a villamosenergia-termelés során – a biomassza-alapú szén-dioxid-leválasztással, -hasznosítással és -tárolással (CCUS) kombinálva – lehetőség van a szén megkötésére is (10. ábra).

Ahogy láthattuk az előzőekben, a villamosenergia-felhasználás a maximális ÜHG-kibocsátási korlát szigorodásával arányosan növekszik. A végfelhasználói

10. ábra

A 2016. évi tény, illetve a 2050. évi végső energiafelhasználás tüzelőanyag-összetétele különböző ÜHG-korlátok mellett (petajoule)

Energiafelhasználás (petajoule)



szegmensekben (lakosság, közlekedés, mezőgazdaság, ipar és szolgáltatási szektor) jelentősen emelkedik az áramfelhasználás: 2016-ban e szektorok villamosenergia-felhasználása 38 terawattórát tett ki, amely az alapesetben 41 terawattórára növekszik 2050-re, míg a 2 millió tonnás CO_{2eq} maximális ÜHG-kibocsátási korlát mellett 53 terawattórára. Ráadásul ezen értékekhez hozzájön az elektrolízis során előállított hidrogén villamosenergia-igénye, ami a villamos energia akár 36 terawattóra többletfogyasztását is generálhatja 2050-ben a legszűkebb vizsgált maximális ÜHG-kibocsátási korlát mellett. Így összesen közel 90 terawattóra villamosenergia-fogyasztást kell kielégíteni hazai, illetve importforrásból. A modellezés során azt feltételeztük, hogy hosszú távon az atomenergia termelése a forgatókönyvek között nem változik. A szén- és gáztüzelésű erőműveket teljesen kivezetik a villamosenergia-rendszerből, a két legmeghatározóbb elemmé a biomassza-alapú és a naperőművi termelés válik. A biomassza-alapú termelés ráadásul a modellezés alapján kiegészül szén-dioxid-megkötéssel is, így az ÜHG-mérlege végül negatívvá válik, azaz szén-dioxidot köt meg, miközben villamos energiát is termel. A biomassza-alapú villamosenergia-termelés 11 terawattórára növekszik a legszigorúbb maximális ÜHG-kibocsátási korlát mellett. A legnagyobb részt azonban a naperőművi termelés adja, amely akár 56 terawattórára is növekedhet. A modellezés azonban arra is rámutat, hogy ehhez jelentős mennyiségű villamosenergia-tárolói kapacitás szükséges.

Érzékenységvizsgálat

A HU-TIMES matematikai optimalizációs modell – kínálatoldali – technológiai részletezettsége és mikroökonómiai vezéreltsége révén a hazai energiarendszert érintő átfogó energiapolitikai célok és döntések vizsgálatára amellet van lehetőség, hogy az egyes szektorokon belüli, valamint azok közötti hatásokat részletesen elemezhesük. A modell részletezettségéből adódóan ugyanakkor az inputparaméterek szignifikáns hatással lehetnek az eredményváltozókra és a célfüggvényértékre egyaránt. Ez a megfigyelés a HU-TIMES esetében – lévén parciális egyensúlyi modell – a makrogazdasági és környezeti paraméterek tekintetében még inkább jellemző.

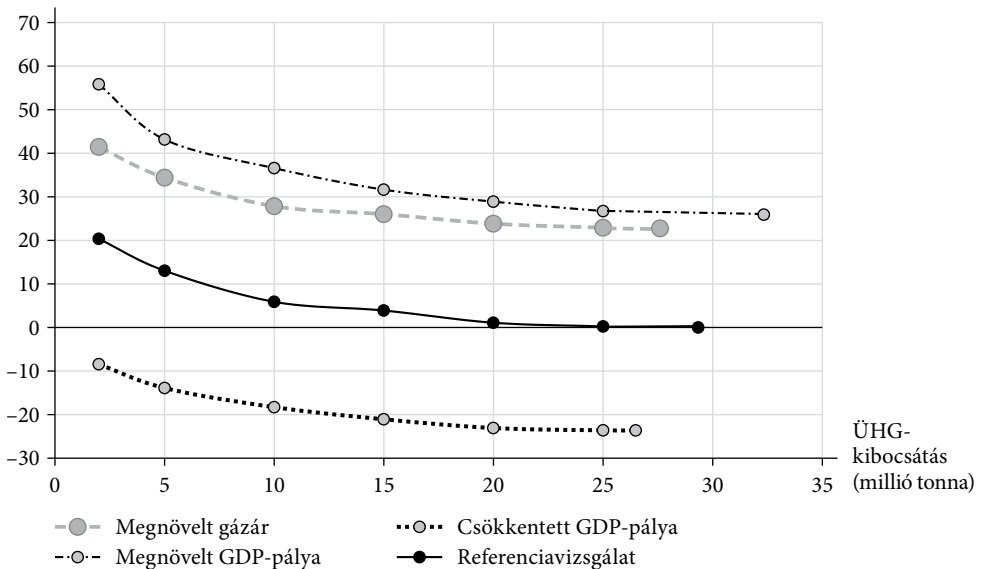
Az előbbieken részletezett referenciavizsgálat mellett három érzékenységvizsgálatot végeztünk: a referencia-forgatókönyvben alkalmazott 19 euró/megawattóra hosszú távú földgázár helyett 30 euró/megawattóra árat feltételeztünk (magnövelt földgázár vizsgálata, lásd 2. ábra). Emellett egy csökkentett és egy magnövelt GDP-pálya mellett is megvizsgáltuk az ÜHG-kibocsátás elhárítási költségét. Ezen pályák mellett azt feltételeztük, hogy a reál-GDP évente $\pm 0,5$ százalékponttal változik a referenciapályához (3. ábra) viszonyítva.

Az érzékenységvizsgálatok esetében kapott elhárítási költséggörbéket mint a fent részletezett referenciavizsgálat alapforgatókönyvéhez képest adódó addicionális költségeket mutatja be a 11. ábra. Az egyes vizsgálatok alapforgatókönyve esetében – a maximális ÜHG-kibocsátást nem korlátozandó – az energiarendszer teljes emissziója 2050-re eltér a referenciavizsgálat alapforgatókönyvében tapasztalt 29

11. ábra

Az ÜHG-kibocsátás 2050-ben és annak többletköltsége a különböző érzékenységvizsgálatok esetében, a referenciavizsgálat az ÜHG-korlát nélküli alapforgatókönyvhöz viszonyítva

Költségtöbblet (milliárd euró)



millió tonna CO_{2eq} értéktől. Az ÜHG-kibocsátás egyenesen arányos módon változik a megváltozott GDP-pályákkal, és fordítottan arányos módon a földgázár változásával. A GDP növekedése az összes végfelhasználói szektor esetében növeli a keresletet, ami – egyéb energiapolitikai ösztönzők híján – egy megnövekedett ÜHG-kibocsátásban mutatkozik meg (3. ábra). A növekvő fölgázárak ugyanakkor az energiahatékonysági intézkedések, valamint a megújulóenergia-alapú technológiák megtérülési idejére van pozitív hatással, ami együttesen hozzájárul az ÜHG-kibocsátás csökkentéséhez.

A referenciavizsgálathoz viszonyított – addicionális – elhárítási költségek jelentős mértékben nőhetnek vagy csökkenhetnek a makrogazdasági környezet megváltozásával. A megnövelt földgázár esetében az alapforgatókönyveket összehasonlítva további 20 milliárd euró többletköltség adódik, *ceteris paribus*, a fosszilis energia-hordozó árváltozásának következtében. Lévéen a referenciavizsgálat és a megnövelt földgázárak vizsgálatai esetében az elhárítási költséggörbék lefutása közel párhuzamos, így a 2 millió tonna CO_{2eq} maximális kibocsátási korlát mellett az elhárítási költségek megduplázódnak a másfélszeresére növelt földgázár mellett. Ezzel szemben a csökkentett GDP-pálya mellett az elhárítási költségek kisebb mértékben növekednek a maximális ÜHG-kibocsátási korlát szűkülése mellett, míg a megnövelt GDP-pálya mellett a növekvő keresletet csak további, magasabb fajlagos költségű – megújulóenergia-alapú és energiahatékony – technológiák bevonásával lehet elérni.

Összefoglalás és következtetések

A magyarországi Nemzeti Tiszta Fejlődési Stratégia (NTFS [2021]) kimondja, hogy hazánk 2050-re klímasemlegessé válhat, eleget téve a 2015-ben elfogadott párizsi klímaegyezményben tett vállalásainak.

Tanulmányunkban az NTFS háttérszámításához használt HU-TIMES modellel elhárításiköltség-bebecslést végeztünk a hazai energiaszektorra vonatkozóan 2050-re. A hibrid – alulról, illetve felülről építkező (*top-down* és *bottom-up*) – módszertant alkalmazó, parciális egyensúlyi modell használatával megállapítható, hogy a hazai energiaszektor kibocsátása – szemben az alapforgatókönyvben 2050-re becsült 29,5 millió tonna CO_{2eq} kibocsátási értékkel – a jelenleg elérhető technológiai információk alapján a kitűzött céldátumra maximum 2 millió tonna CO_{2eq}-re csökkenthető.

A vizsgálatunkban használt alap-/referencia-forgatókönyv esetében egy determinisztikus, a társadalmi költségek minimalizálását figyelembe vevő környezetet vettünk alapul. Már ebben az esetben is a kibocsátás jelentős visszaesését láthatjuk – a 2020-as 46 millió tonna CO_{2eq} kibocsátási tényérték 29,5 millió tonna CO_{2eq}-re csökken –, valamint az energiafelhasználás is szignifikánsan több mint 163 petajoule-lal csökken 2050-re a 2020-as 825 petajoule tényértékhez viszonyítva. E változások a tisztán piaci alapon megvalósuló energiahatékonysági intézkedéseknek köszönhetően és a fosszilis üzemanyagok megújuló energiaforrásokkal történő helyettesítéséből adódnak.

Az alapforgatókönyv mellett további hat alternatív forgatókönyvet vizsgáltunk, ahol az energiaszektor teljes ÜHG-kibocsátását korlátozzuk 2050-re, fokozatosan csökkenő emissziós értékek szerint. Az eredményekből látható, hogy a felmerülő elhárítási többletköltségek jelentősen változhatnak a vizsgált kibocsátási spektrumon 2050-re: míg a kibocsátás 5 és 10 millió tonna $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -kel történő csökkentése megvalósítható tonnánként 55 és 170 euró $\text{CO}_{2\text{eq}}$ fajlagos költségen, addig 15 és 20 millió tonna $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -kibocsátás visszafogásának elhárítási költsége már ennek többszöröse, tonnánként 400–500 euró. Ezen érték a továbbiakban szignifikánsabban, tonnánként 2500 euróra növekedik a 2–5 millió tonna $\text{CO}_{2\text{eq}}$ kibocsátási korlátok mellett.

A teljes energiaszektor ÜHG-kibocsátásának 5, 10 és 15 millió tonna szén-dioxid-egyenértékkel történő csökkentése főként a közlekedési szektorban a bioüzemanyagok bekeverésének növekedésével, valamint a villamosenergia- és hidrogéntermelésben növekvő megújulóenergia-felhasználással érhető el, ahol az addicionális költségek szignifikáns részét a növekvő naperőművi (PV) kapacitások beruházási költsége adja. A 2050-es ÜHG-kibocsátás 20 millió tonna $\text{CO}_{2\text{eq}}$ fölött történő csökkentése a következő eszközökkel érhető el: a további energiahatékonysági intézkedések a háztartási és szolgáltatói szektorokban hozzájárultak a földgázfelhasználás megtizedeléséhez, míg a közlekedési szektorban a kőolajfelhasználás mérséklését tüzelőanyag-váltással érik el. Az energiafelhasználás csökkentése mellett nagyfokú elektrifikáció is szükséges; a megnövekedett villamos energiát kizárólag megújuló energiát hasznosító – naperőművi és biomassza-alapú, szén-dioxidot leválasztó, hasznosító és tároló technológiákkal állítják elő. Ez utóbbiak jelenléte szignifikáns, lévén ezt a technológiát jelenleg „nettó szén-dioxid-elnyelő” berendezésként veszi figyelembe a modell. Az alapforgatókönyvhöz képest tovább emelkedik a hidrogéntermelés és -felhasználás, amely az ágazatok összekapcsolása (*sector-coupling*) révén teszi lehetővé a közlekedési és ipari szektorok további dekarbonizációját.

Ez a négy fő intézkedés – az energiahatékonyság további növelése az épületek és a közlekedési szektorok esetében, megújulóenergia-alapú elektrifikáció, biomassza-alapú, szén-dioxidot leválasztó, hasznosító és tároló villamosenergia-termelés növelése és a hidrogénfelhasználás végfelhasználói szektorok közötti fokozása – többletköltségét leginkább a növekvő beruházási és fix üzemeltetési és fenntartási költségek magyarázzák, melyeket részben ellensúlyoznak a változó üzemeltetési, energia- és szén-dioxid-kvóta-költségek csökkenéséből származó hasznok.

Kutatásunk középpontjába a 2050. évi magyarországi energiaszektor dekarbonizációjának vizsgálatát állítottuk technológiai és költség szempontból. Az eredményeket jelentős mértékben befolyásolják a modell felépítéséből adódó korlátok: például a parciális egyensúly elérése, ahol a főbb exogén makroökonomiai változókra nincs a modell eredményeinek hatása, valamint a modell érzékenysége az egyes technológiai és költsétparaméterekre. Ezen korlátokat a jövőben a HU-TIMES modellnek egy általános egyensúlyi modellé történő alakításával és a paraméterek időről időre való frissítésével lehet csökkenteni.

Későbbi kutatásokban érdekes lehet megvizsgálni, hogy a jelen tanulmányban szereplő eredményeket milyen módon befolyásolja egy, az egész időszakra kiterjedő ÜHG-kibocsátási korlát bevezetése – szem előtt tartva a 2050. évi nulla ÜHG-emissziót. Ezáltal láthatóvá válnának azok az eltérések, amelyekkel Magyarországnak

szembesülnie kell, ha hozzá kíván járulni ahhoz, hogy a kibocsátását ne „csak” egy adott időpontban minimalizálja, hanem az oda vezető úton is a lehető legnagyobb mértékben csökkentse a kumulált emisszióját.

Hivatkozások

- CRES [2022]: TIMES_GR model. Centre for Renewable Energy Sources and Saving (CRES). http://www.cres.gr/kape/index_eng.htm.
- DEANE, P.–CHIODI, A.–GALLACHÓIR, B. [2017]: Irish TIMES Energy Systems Model Phase 2. Environmental Protection Agency, Report No. 199. <https://www.epa.ie/publications/research/climate-change/research-199.php>.
- EC [é. n.]: National long-term strategies. EU countries' long-term strategies to meet their Paris Agreement commitments and the energy union objectives. https://ec.europa.eu/info/energy-climate-change-environment/implementation-eu-countries/energy-and-climate-governance-and-reporting/national-long-term-strategies_en.
- EFDA-TIMES [2022]: Socio Economic Studies. ETM. The model of a Global Energy System. EUROfusion, <https://collaborators.euro-fusion.org/socio-economic-studies/>.
- EPA [2021]: EPAUS9rT. An Energy Systems Database for use with the TIMES Model. United States Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/air-research/epaus9rt-energy-systems-database-use-times-model>.
- ETP TIMES [2022]: Nordic Energy Tecnology Perspective. Introduction to ETP TIMES Model. IEA, <https://www.iea.org/reports/nordic-energy-technology-perspectives>.
- ETSAP-TIAM [2022]: Introduction to ETSAP-TIAM Model. IEA & US-EIA, Microsoft PowerPoint – TIAM description. https://iea-etsap.org/TIAM_f/TIAM%20description_slides.pdf.
- EU [2018]: Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2018/1999. rendelete (2018. december 11.) az energiaunió és az éghajlat-politika irányításáról. HL L328. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018R1999&from=HU>.
- FLEITER, T.–WORRELL, E.–EICHHAMMER, W. [2011]: Barriers to Energy Efficiency in Industrial Bottom-up Energy Demand Models. A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15. No. 6. 3099–3111. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.03.025>.
- KEREKES LAJOS–MEZŐSI ANDRÁS–DÉZSI BETTINA–KÁCSOR ENIKŐ–RÁCZ VIKTOR–SZAJKÓ GABRIELLA [2020]: Megújuló és kapcsolt távhőtermelés potenciálbecslése. REKK Regionális Energia- és Infrastruktúra-politikai Együttműködésért Alapítvány, Budapest, <https://rekk.hu/downloads/projects/REKK%20Tavho%20Potenci%20C3%A1lbecsl%20C3%A9s%202020.pdf>.
- KESICKI, F. [2013]: What are the key drivers of MAC curves? A partial-equilibrium modelling approach for the UK. Energy Policy, Vol. 58. 142–151. o. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.02.043>.
- LABRIET, M.–CABAL, H.–LECHON, Y.–GIANNAKIDIS, G.–KANUDIA, A. [2010]: The implementation of the EU renewable directive in Spain. Strategies and Challenges. Energy Policy, Vol. 38. No. 5. 2272–2281. o. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.12.015>.
- LIND, A. [2018]: Energy System Analysis. TIMES_Norway, Institute for Energy Technology, https://www.simula.no/sites/default/files/arne_lind_times_and_times-norway.pdf.
- LOULOU, R.–GOLDSTEIN, G.–NOBLE, K. [2004]: Documentation for the MARKAL Family of Models. Part III: System for Analysis of Global Energy markets (SAGE). Energy Technology Systems Analysis Programme, IEA-ETSAP, https://iea-etsap.org/MrklDoc-III_SAGE.pdf.

- LOULOU, R.–GOLDSTEIN, G.–KANUDIA, A.–LETTILA, A.–REMME, U. [2021]: Documentation for the TIMES Model. Energy Technology Systems Analysis Programme, IEA-ETSAP, https://iea-etsap.org/docs/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-I.pdf.
- LTU [2020]: TIMES-Sweden. Lulea University of Technology. <https://www.ltu.se/research/subjects/Energiteknik/Forskningsomraden/Energisystemanalys/TIMES-Sweden/TIMES-Sweden-1.183569?l=en>.
- MISCONEI, S.–PRINA, M. G.–HOBBIE, H.–MÖST, D.–SPARBER, W. [2022]: Model-based step-wise marginal CO₂ abatement cost curves to determine least-cost decarbonization pathways for sector-coupled energy systems. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 368. 133173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133173>.
- MUNDACA, L.–NEIJ, L.–WORRELL, E.–MCNEIL, M. [2010]: Evaluating Energy Efficiency Policies with Energy-Economy Models. *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 35. 305–344. o. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-052810-164840>.
- NEKT [2020]: Magyarország Nemzeti Energia- és Klímaterve. Innovációs és Technológiai Minisztérium, https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/hu_final_necp_main_hu.pdf.
- NOVA [2022]: TIMES-PT model. Nova School of Science and Technology, University of Lisbon. <https://sites.fct.unl.pt/times-pt/pages/models-and-tools#TIMESPT>.
- NTFS [2021]: Nemzeti Tiszta Fejlődési Stratégia, 2020–2050. Innovációs és Technológiai Minisztérium, <https://kormany.hu/publicapi/document-library/nemzeti-tiszta-fejlodesi-strategia/download>.
- PRINA, M. G.–MANZOLINI, G.–MOSER, D.–NASTASI, B.–SPARBER, W. [2020]: Classification and Challenges of Bottom-up Energy System Models. A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 129. 109917. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109917>.
- SIMÕES, S.–NIJS, W.–RUIZ, P.–SGOBBI, A.–RADU, D.–BOLAT, P.–THIEL, C.–PETEVES, S. [2013]: The JRC-EU-TIMES Model. Assessing the long-term role of the SET Plan Energy Technologies. JRC Scientific and Policy Reports, https://setis.ec.europa.eu/system/files/2021-01/jrc-eu-times-model_assessing_long_term_role.pdf.
- SWAN, L. G.–UGURSAL, V. I. [2009]: Modeling of End-use Energy Consumption in the Residential Sector. A Review of Modeling Techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13. No. 8. 1819–1835. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.033>.
- UCL [2022]: UK TIMES model. UCL Energy Institute Models. University College London, <https://www.ucl.ac.uk/energy-models/models/uk-times>.
- UN [2015]: Paris Agreement. United Nations, https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf.
- UNFCCC [2020]: Submission by Croatia and the European Commission on behalf of the European Union and its Member States. Croatian Presidency of the Council of the European Union, <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/HR-03-06-2020%20EU%20Submission%20on%20Long%20term%20strategy.pdf>.
- UNFCCC [2021]: Common Reporting Format (CRF) Table, Hungary. UN Climate Change, <https://unfccc.int/documents/273466>.
- VOSS, A.–BLES, M.–ELLERSDORFER, I. [2006]: EUSUSTEL – Electricity Alternatives in the EU: The Role of Nuclear. Institute for Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER) University of Stuttgart, https://iea-etsap.org/Applications/Final_Meeting_EUSUSTEL_VO%C3%9F.pdf.
- YUE, X.–DEANE, J.P.–O’GALLACHOIR, B.–ROGAN, F. [2020]: Identifying decarbonisation opportunities using marginal abatement cost curves and energy system scenario ensembles. *Applied Energy*, Vol. 276. 115456. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115456>.

Függelék

F1. táblázat

A hosszú távú, alulról építkező modellek főbb tulajdonságai

	Tökéletes előrelátás							Rekurzív modellek		
	LEAP	MARKAL/TIMES	OseMOSYS	TEMOA	MESSAGE	Balmorel	eMix	EPLANopTP	Mahbub et al.	LUT
LEFEDETT SZEKTOROK										
Specifikus szektor	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-	✓
Összes szektor	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	-
FÖLDRAJZI LEFEDETTSÉG										
Egy régió	✓	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-
Több régió	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-
IDŐBELI TAGOLTSÁG										
Alacsony	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-
Közepes	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
Magas	-	-	-	-	-	✓	-	✓	✓	✓
MÓDSZERTAN										
Szimulációs	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kiosztási optimalizáció	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓
Egyszerű beruházási optimalizáció	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓
Többcélú beruházási optimalizáció	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-

Az F1. táblázat folytatása

	Tökéletes előrelátás							Rekurzív modellek		
	LEAP	MARKAL/TIMES	OSeMOSYS	TEMOA	MESSAGE	Baltimore	eMix	EPLANopTP	Mahbub et al.	LUT
PROGRAMOZÁSI MÓDSZERTAN										
Lineáris	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	✓
Nemlineáris	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dinamikus	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vegyes egészértékű programozás	-	-	-	-	✓	✓	✓	-	-	-
Heurisztikus	✓	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-
Egyéb	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	-

Forrás: Prina és szerzőtársai [2020] alapján saját szerkesztés.