

DEA-ALAPÚ RANGSOROLÁS AZ EURÓPAI UNIÓS TAGÁLLAMOK ENERGETIKAI STRUKTÚRÁINAK ÉRTÉKELÉSÉRE¹

ERŐSS VIKTÓRIA – BÁNHIDI ZOLTÁN – DOBOS IMRE

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, GTK

Környezetgazdaságtan és Fenntartható Fejlődés Tanszék –

Közgazdaságtan Tanszék

A tanulmány az Európai Unió 27 országának 2022. évi energiatermelési és felhasználási adatainak, valamint a GDP mutatójának felhasználásával rangsort állít fel az egyes országok energiasztruktúrájára vonatkozóan. A rangsorolás a DEA (Data Envelopment Analysis) módszertan alapján, ezen belül a Tiered Data Envelopment Analysis (lépcsőzetes burkológörbe-elemzés, TDEA) alkalmazásával, a közös súlyok módszerének három különböző modelljével és a lépcsőzetes Pareto-hatékonysági megközelítéssel történik. Az eredmények alapján, bár a súlyvektorok jelentős eltérést mutatnak az egyes modellek esetében, az országgrangsorok között számos hasonlóság mutatkozik: az élmezőnyben és az utolsó pozíciókban többnyire ugyanazok az országok azonosíthatók. Az eredmények támpontot jelentenek az adott nemzetgazdaság működésének hatékonyabbá tételét, továbbá az EU-s környezeti- és klímacélok elérését, az egyes tagországok közös teljesítményhez történő kiegyensúlyozottabb hozzájárulását illetően.

Kulcsszavak: energetikai struktúra, megújuló energia, EU27, rangsorolás, DEA

Bevezetés

Az Európai Közösség működésében számos mérföldkövet jelentő változást eredményező Egységes Európai Okmány aláírása óta az Európai Unió tagországai egységesen lépnek fel és tesznek vállalásokat a klímaváltozás elleni globális küzdelemben (EP, 2024). Kína és az Egyesült Államok után a harmadik legnagyobb széndioxid-kibocsátó EU mind az éghajlatváltozásban markáns szerepet betöltő üvegházhatásúgáz-kibocsátás (továbbiakban ÜHG-kibocsátás), mind a fenntartható fejlődés céljait szolgáló törekvések (energiaátmenet, energiahatékonyság) terén ambiciózus célkitűzésekkel igyekszik hozzájárulni a globális célok eléréséhez (EB, 2024).

Bár az EEA szakértői szerint uniós szinten egyértelműen látható az elmozdulás a fenntartható fejlődést szolgáló megoldások irányába (EEA, 2021), az egységes fellépés és célkitűzések ellenére a tagországok különféle vállalási

¹Beérkezett 2025. augusztus 21. DOI: <https://doi.org/10.15170/SZIGMA.56.1298>. E-mail: eross.viktoria@gtk.bme.hu, banhidi.zoltan@gtk.bme.hu.

célokhoz kapcsolódó mutatóinak teljesítménye között néhány esetben jelentős eltérés tapasztalható.

Az unión belül Németország a legnagyobb ÜHG-kibocsátó (az EU ÜHG-kibocsátásának 21,8%-a származott 2022-ben innen), emellett pedig öt ország (Németország, Franciaország, Olaszország, Lengyelország és Spanyolország) adja az EU teljes emissziójának 65,2%-át. Ugyanakkor ha számításba vesszük ezen országok méretét, például a népességszám vonatkozásában, a sorrend jelentősen változik: a legnagyobb kibocsátó Németország a középmezőnyhöz, Franciaország, Olaszország és Spanyolország pedig az élmezőnyhöz csatlakozik, miközben a 26., legkisebb abszolút kibocsátó Luxemburg a népességszámra vetített ÜHG-kibocsátás tekintetében a skála túlsó végére kerül legnagyobb fajlagos kibocsátóként (Eurostat, 2024c,d).

Ezek az eltérések nem csak az ÜHG-kibocsátás terén érhetőek tetten. Míg a megújuló energiaforrások alkalmazásának részaránya a Skandináv országok EU-hoz csatlakozott tagjainál (Svédország, Finnország, Dánia) átlagosan az 52%-ot közelítette 2022-ben, addig a V4 országok átlaga kevéssel 17% alatti értékével ennek harmadát sem érte el (EP, 2024). E kiragadott eltérésen túl összességében megállapítható, hogy a fosszilis tüzelőanyagokról megújuló energiaforrások alkalmazására történő áttérés dinamikája sokkal lendületesebb képet mutat Európa nyugati és északi országaiban, mint a középső, illetve keleti/déli régiókban. Ez nagyrészt összhangban áll az egy főre eső GDP alakulásával – mely szintén a nyugati és északi országokban mutat magasabb értéket a többi régióhoz képest (Eurostat, 2024b) –, melynek környezeti beruházás-indukáló hatása napjainkra tényekkel igazolt (Bhattacharya et al., 2016, IRENA, 2024), egyúttal kapcsolódik Kiss és szerzőtársai (2024) azon meglátásához is, miszerint a klímaváltozáshoz, környezeti veszélyeztetettséghez kapcsolódó fenyegetettségérzés nyugatról kelet felé gyengül Európában, és a posztszocialista államokban a legalacsonyabb (Kiss et al, 2024).

Az esetenként jelentősebb regionális teljesítménybeli eltérések ellenére a közös célkitűzések és közös irányadó politikák szükségszerűen azonos irányba kényszerítik a tagországok viselkedését és hozzáállását a fenntartható fejlődést és a klímaválság kérdéskörét illetően. Ezt jól alátámasztja Eröss és szerzőtársainak (2025) tanulmánya is, mely részben környezeti/energia adatok, részben gazdasági teljesítményhez kapcsolódó változók vizsgálatán keresztül klaszteranalízissel igazolja a tagországok közötti hasonlóságot, illetve a homogenitás növekedését 2012-ről 2022-re (Eröss et al., 2025).

Szem előtt tartva ugyanakkor a globális éghajlati és környezeti törekvések egyre ambiciózusabb elvárásait – melyeket az ENSZ 29. klímaváltozási konferenciája (COP29) is kifejezetten szorgalmaz (COP29, 2024) –, fontossá válhat annak feltérképezése, hogy a hasonló struktúrákon belül melyek azok, amelyek jobbak a többinél, és miben áll ezek jobb megítélése. E kérdések megválaszolása támpontot adhat az uniós energiapolitikák tervezéséhez, és segíthet azonosítani azokat az országokat, amelyek nagyobb figyelmet igényelnek az energiaátmenet megvalósításában. Egyúttal a „jó gyakorlat” azonosítása további segítséget jelenthet más tagállamok számára, energiastruktúráik jobb alakítása terén.

Mindezek alapján a jelen tanulmány célkitűzése az Európai Unió 27 országának rangsorolása azok energetikai struktúrájának elemzése útján, a legjobb gyakorlatok és a leginkább fejlesztendő területek azonosítása, továbbá az egyes tagországok között mutatkozó közvetlen kapcsolatok feltérképezése céljából.

Elsőként a kapcsolódó szakirodalmi háttér bemutatására kerül sor az alkalmazott módszertan és annak érintett kutatási területen való alkalmazását illetően, majd az eredmények ismertetése (TDEA, DEA/CWA modellek, Pareto-optimalitás) történik, végül pedig összegzésre kerülnek a vizsgálatok alapján tehető megállapítások.

1 Szakirodalom

Ha egy társadalmi-gazdasági tevékenység hatékonyságát egyetlen input és egyetlen output határozza meg, az eredmény meghatározható az output és input hányadosaként. Több input vagy output esetében azonban mind az outputok, mind az inputok esetében azok súlyozott összege használható fel az eredmény meghatározásához. Miközben a súlyok meghatározása nem magától értetődő, a végeredményben kiemelt szerepet játszik ez a módszertani tényező. Az ezen értelmezés szerint megközelíthető DEA (Data Envelopment Analysis) elemzés lényege, hogy a rendelkezésre álló adatokból kiindulva lineáris programozási technikával előállítja a hatékony pontok többdimenziós felületét, majd egy adott pont hatékonysági mutatóját e felülethez viszonyítja és határozza meg (Temesi és Varró, 2017).

A DEA, vagy adatburok-elemzés egy objektív módszer az azonos többszörös bemenettel és/vagy kimenettel jellemezhető döntéshozó egységek (DMU – Decision Making Unit) hatékonyságának összehasonlítására, melyet elsőként (CCR-modell) 1978-ban Charnes, Cooper és Rhodes fejlesztettek ki. A DEA eljárás nagyjelentőségű jellemzője, hogy lehetőséget biztosít különböző mértékegységben rendelkezésre álló mutatók összehasonlítására (Koltai, 2023). A hagyományos DEA módszertan két csoportra – hatékony és nem hatékony csoportra – osztja a DMU-kat (ezek a jelen tanulmány esetében az Európai Unió országai), miközben a gyakorlatban legtöbbször teljes körű rangsorolásra lenne szükség, továbbá a hatékony DMU-k esetében nem biztosít lehetőséget sorrend felállítására (Khodabakhshi és Aryavash, 2012). A Barr és munkatársai (2000) által kidolgozott, szekvenciális algoritmuson alapuló onion peeling a hatékony (azonos DEA-hatékonysággal rendelkező) DMU-kat hagymahéjként (onion peel) különíti el a többi DMU-tól. Az első „leválasztást” követően a fennmaradó egységekre újból meghatározza, majd leválasztja a hatékony elemeket – ismételve a vizsgálatot addig, amíg végül „meghámozza a hagymát” (Bánhidi és Dobos, 2023a). A módszer a tanulmány során annak angol megnevezéséből (Tiered Data Envelopment Analysis) kialakított rövidítéssel (TDEA) kerül említésre.

A DEA-alapú modellnek napjainkig több továbbfejlesztett, kiterjesztett változata ismert, ezek egyik típusa a közös súlyok módszere (CWA – Com-

mon Weights Analysis), melynek első használata (Maximin DEA modell) Podinovski és Athanassopulos nevéhez fűződik (Podinovski és Athanassopulos, 1998). Az eljárás során meghatározásra kerül az a DMU, amely adott vektorsúly alapján a legkisebb hatékonysági értékkel rendelkezik, majd az a súlyvektor kerül kiválasztásra, amely ezt a legkisebb értéket a lehető legnagyobbra növeli. Más modellek távolságfüggvények (pl. Euklideszi, vagy Csebisev-távolságfüggvény) alkalmazásával biztosítják az objektív súlyozást a kompromisszum-programozás által elért optimalizációs technika mellett (Bánhidi és Dobos, 2021).

A DEA-alapú hatékonyságvizsgálat eredményeként – a konkrét és számszerű eredményeken túlmutatóan – a vizsgált folyamatok megismerésének és főként javításának lehetősége mutatkozik. Fontos azonban hangsúlyozni az eredmények értékeléséhez kapcsolódóan, hogy a DEA-módszerrel előállított rangsorokban különféle pozíciót birtokló DMU-k csak egymáshoz képest tekinthetők hatékonynak, vagy nem hatékonynak (Koltai, 2023).

A DEA-alapú modellek mellett más döntésméleti megközelítések is támogatják a hatékony, optimális megoldások megtalálását. A többkritériumú döntésméletek egyik optimalizálási módszere a Pareto-optimális (vagy más néven nem dominált) megoldások meghatározása, melyek abban az értelemben optimálisak, hogy a tervezési térben egyetlen más megoldás sem jobb náluk, vagy nem dominálja őket, ha minden vizsgált célt figyelembe veszünk (Xin, 2011). A lépcsőzetes Pareto-rangsorolás tehát a domináns objektumok (jelen esetben országok) szekvenciális kiszűrését biztosítja, melynek eredményei Hasse-diagram segítségével jól vizualizálhatóak.

A DEA modellek rangsorolási célú alkalmazását illetően számos területen születtek publikációk, különösen az elmúlt években. Egyetemek rangsorolásával (Matulová, 2023), országok digitális fejlettség összehasonlításával (Bánhidi és Dobos, 2023b) éppúgy találkozhatunk a tudományos publicisztikai térben, mint az EU mezőgazdasági ágazatainak rangsorolásával (Kyrgiakos et al., 2021), vagy az EU országainak körforgásos gazdasági teljesítmény alapján történő sorba rendezésével (Giannakitsidou et al., 2020).

Mardani és munkatársai (2017) átfogó elemzést nyújtanak a DEA-modellek környezeti, energetikai téren történő alkalmazásáról készült tanulmányokat illetően, megállapítva, hogy a DEA kifejezetten alkalmas értékelő eszköznek bizonyul e témakörök kérdéseinek elemzéséhez, és a jövőbeli javítási lehetőségek feltárásához. Ezen túlmenően a miből megállapítható, hogy az eddigi, Európai Unió tagországaival foglalkozó DEA elemzések többnyire csak valamely környezeti, energetikai tématerülethez kapcsolódva vizsgáldnak – például ÜHG-kibocsátás vizsgálata (Salazar-Ordóñez et al., 2013), az energiamix összetételére irányuló elemzés (Bampatsou et al., 2013), egyes iparágak energiafelhasználása (Morfeldt és Silveria, 2014; Vlontoz et al., 2014), energiahatékonysági rangsorolások (Makridou et al., 2015) –, azonban összetett, több területet felölelő átfogó elemzések kevésbé jellemzőek (Mardani et al., 2017).

Robaina-Alves és munkatársai (2015) az elsők között készítették el ezredünk első évtizedének adatai alapján immáron komplexebb indikátorokra

– köztük GDP és az ÜHG-kibocsátásra – épülő tanulmányukat DEA modell alkalmazásával, csakúgy, mint Madaleno és munkatársai (2016), ahol előbbieket mellett a megújuló energiaforrások használatának szempontja is megjelenik.

A Pareto-hatékonyságon alapuló többkritériumú döntéshozatali megközelítés alkalmazása szintén nagy gyakorisággal megtalálható a tudományos szakirodalmak között, s ezen belül a környezetgazdaságtant, fenntartható fejlődést érintő témákban is feltűnik, főként különféle kialakítás előtt álló rendszerek megoldásainak optimalizálása céljával (Lazzaletto és Toffolo, 2004; Slavounos et al., 2008; Feijoo és Das, 2014; Wong et al., 2022).

Végül, de nem utolsósorban megemlítendő, hogy fellelhető olyan kutatás is, melynek módszere a jelen tanulmányban alkalmazottól eltérő, korrelációelemzésen alapuló módszert használ, azonban a jelen tanulmányhoz hasonló adatkörrel dolgozva (energiatermelés és felhasználás mutatói, megújuló energiafelhasználás részaránya, ÜHG-kibocsátás, népesség- és GDP alakulása) az eredmények tekintetében nagymértékű hasonlóságot mutat a jelen kutatás konklúzióival: a legjobb pozíciót birtokló országok között Svédország, Lettország, Dánia, Ausztria, Finnország, Írország és Litvánia, míg a leggyengébbek között Bulgária, Magyarország, Lengyelország, Csehország és Franciaország található (Pakere et al., 2021).

A jelen tanulmány a kiválasztott vizsgálati módszerek és az elemzéshez használt adatkészlet vonatkozásában egyaránt újdonságot jelent, de ennél is kiemelkedőbb jelentőséggel bír az adatok aktuális voltát illetően – friss képet adva az EU27 országainak energetikai struktúráiról, rámutatva a hatékonyságjavítást segítő jó gyakorlatokra, valamint a fejlődési lehetőségekre egyaránt. A vizsgált terület és annak eredményei kiemelt jelentőségűek mind a közösség klímavállalásai, mind pedig az egyes nemzetek klíma- és energia-politikai törekvései szempontjából.

2 Anyag és módszer

A tanulmány keretében ötféle módszer (TDEA, Pareto-hatékonyság szerinti, és háromféle DEA-CWA-alapú (Maximin, Euklideszi és Csebisev-távolság-függvény szerinti)) alkalmazásával az Európai Unió 27 országa energetikai struktúrájának rangsorolására kerül sor releváns mutatók vizsgálatával. A felhasznált adatállomány a tanulmány készítésének időszakában elérhető legfrissebb, 2022. évi adatokat tartalmazza.

A rugalmas súlyozáson alapuló TDEA-modell optimalizálás révén meghatározza az egyes DMU-k számára legkedvezőbb súlyokat a hatékonyság maximalizálása érdekében, ami biztosítja az elemzés objektivitását. Elsőként meg kell határozni az összes ország közül a DEA-hatékony országokat, majd azokat eltávolítani a listából, és megvizsgálni a fennmaradó DEA-hatékony országok csoportját. Ezeket a lépéseket addig kell végrehajtani, amíg az országok csoportja üres nem lesz.

Ugyanez a kiszűrő algoritmus alkalmazható a „Pareto-optimális” országok lépésről lépésre történő azonosítására – összhangban Bánhidi és Dobos (2023a)

tanulmányában részletesen bemutatott módszertannal. Ehhez először meg kell határozni az összes ország közül a Pareto-optimális (nem dominált) országokat, majd azok eltávolítása után megvizsgálni a fennmaradó Pareto-optimális országok csoportját – egészen addig ismételve ezeket a lépéseket, mígnem az országok csoportja végül üres lesz.

A DEA-modell lehetséges súlyainak vektorát az (1)–(3) egyenletek rendszere határozza meg. Az (1) egyenlőtlenség a DEA-hatékonyság $\mathbf{u} \cdot \mathbf{y}_j$ felső határát, azaz egyet mutat, míg a (2) egyenlőtlenség a súlyok nem negatív voltát határozza meg. A döntéshozó egységek száma p , az $\mathbf{y}_j$ vektor pedig a j -edik döntéshozó egység, ebben az esetben az ország értékei. A DEA modellek (1)–(3) alakja, amelyet minden lépésben meg kell oldani:

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{y}_j \leq 1; \quad j = 1, 2, \dots, p. \quad (1)$$

$$\mathbf{u} \geq 0. \quad (2)$$

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{y}_k \rightarrow \max; \quad k = 1, 2, \dots, p. \quad (3)$$

Az (1)–(3) problémák megoldása után minden lépésben kizárjuk a hatékony döntéshozó egységeket, amelyek esetünkben az országok. Ezután a következő lépésben újra megoldjuk a DEA-problémákat. A közös súlyok DEA-modellek lehetséges súlyainak vektora a (4)–(6) egyenletek rendszerével határozható meg. A hatékonyságok $\mathbf{u} \cdot \mathbf{y}_j$; ($j = 1, 2, \dots, p$).

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{y}_j \leq 1; \quad j = 1, 2, \dots, p. \quad (4)$$

$$\mathbf{u} \geq 0. \quad (5)$$

$$F_i(\mathbf{u}) \rightarrow \max; \quad i = 1, 2, 3. \quad (6)$$

A három DEA-modell objektív függvényei $F_i(\mathbf{u})$ a következők:

- Maximin modell: $F_1(\mathbf{u}) = \min_{1 \leq j \leq p} \mathbf{u} \cdot \mathbf{y}_j$,
- Euklideszi modell: $F_2(\mathbf{u}) = \sqrt{\sum_{j=1}^p (\mathbf{u} \cdot \mathbf{y}_j - 1)^2}$,
- Csebisev-modell: $F_3(\mathbf{u}) = \max_{1 \leq j \leq p} |\mathbf{u} \cdot \mathbf{y}_j - 1|$.

A rangsorolási szempontok meghatározásában elsődlegesen a bemutatott klímaváltozáshoz és fenntartható fejlődéshez kapcsolódó mutatók, ezen túl pedig a nemzeti energiapolitikák fókuszában álló energiafüggőség kapott hangsúlyt. A rangsorolási szempontokat, a hozzájuk kapcsolódó elvárást, mutatókat és felhasznált változókat az 1. táblázat szemlélteti.

Rangsorolási szempont	Mutató	Elvárás	Felhasznált fajlagos változók
Megújuló részarányának növekedése	Megújuló részaránya a primer energiafelhasználáson belül	minél magasabb	Primer energiatermelés (TJ/ezer fő) Megújuló energiatermelés (TJ/ezer fő)
ÜHG-kibocsátás csökkentése	1000 főre jutó ÜHG-kibocsátás	minél alacsonyabb	ÜHG-kibocsátás (kt/ezer fő)
Energetikai hatékonyság	Energiafelhasználás	minél alacsonyabb	Energiaszektor saját energiafelhasználása (TJ/ezer fő) Ipari szektor energiafelhasználása (TJ/ezer fő) Háztartási szektor fűtési célú energiafelhasználása (TJ/ezer fő)
Energiafüggőség csökkentése	Nettó energiaimport	minél alacsonyabb	Energiaimport (TJ/ezer fő) Energiaexport (TJ/ezer fő)
Gazdasági teljesítmény alakulása	GDP	minél magasabb	GDP (mEUR/ezer fő)

1. táblázat. A rangsorolás szempontrendszere. Forrás: saját szerkesztés.

Az Európai Unió klímapolitikájának legfőbb törekvései között a megújuló energiatermelési részarányának növelése, az energiahatékonyság fokozása, valamint az ÜHG-kibocsátás csökkentése áll. A kutatásba éppen ezért az ezen elvárások teljesítéséhez közvetlenül kapcsolódó azon mutatók bevonására került sor, melyek az Eurostat adatgyűjtésének köszönhetően egységes módszertan alapján állnak rendelkezésre az egyes tagállamok esetében, biztosítva ezzel az összehasonlíthatóságot. Az egyes vizsgálatba vont adatok kapcsolódása a klímapolitikai célkitűzésekhez:

- Megújuló energiatermelés részarányának növelése: megújuló energiatermelés mennyisége, megújuló energiatermelés aránya a primer energiatermeléshez képest.
- Energiahatékonyság fokozása: Primer energiatermelés mennyisége, ipari szektor energiafelhasználása, háztartások fűtési célú energiafogyasztása, energiaszektor saját energiafelhasználása.
- ÜHG-kibocsátás csökkentése: ÜHG-kibocsátás.

Az energiafüggőség csökkentése iránti törekvés az egyes kormányzati energiapolitikák fő célkitűzése, melynek érvényesítésére a vizsgálatban az energiaimport és energiaexport adatok bevonásával került sor.

A tagállami GDP termelés értékei a gazdasági folyamatok és az energiaigény szoros összekapcsolódása okán a gazdasági teljesítmény mérőszámaként

jelenik meg a kutatásban, illetve az ún. decoupling mint klímapolitikai cél elérésének szempontjaként biztosít vizsgálati alapot.

Az 1. táblázat szerinti szempontrendszer érvényesítéséhez vizsgálatba vont mutatók 2022. évi alapadatait a Függelék F1. táblázata, a rangsoroláshoz ezekből képzett, a rangsorolás alapját képező indikátorokat a Függelék F2. táblázata tartalmazza.

A DEA modellek orientációja alapvetően a bemenetek minimalizálására és a kimenetek maximalizálására törekszik, ami a jelen esetben – összhangban a vizsgált terület sajátosságaival – a megújuló energiatermelés és a megújuló energiatermelés részaránya, továbbá a GDP esetében a minél nagyobb értékének, míg a többi mutató (egyes energiafelhasználási adatok és az ÜHG-kibocsátás) minél alacsonyabb értékének preferálásával érhető el.

A kutatás során alkalmazott módszerek statisztikai, illetve matematikai részletei korábbi tanulmányokban (TDEA és Pareto-hatékonysági vizsgálat – Bánhidi és Dobos, 2023a, a DEA/CWA modell esetében Bánhidi és Dobos, 2021)) részletesen bemutatásra, levezetésre kerültek, amire való hivatkozással a jelen, az elemzés eredményeire és annak feldolgozására és értelmezésére fókuszáló tanulmány eltekint e részletek újbóli bemutatásától, ehelyett az alkalmazott módszerek részletes magyarázatait bemutató hivatkozott forrásokkal szolgál.

3 Eredmények

Az alábbiakban az elvégzett rangsorolási vizsgálatok – elsőként a TDEA, majd a Pareto-hatékonyság szerinti modell, majd a közös súlyok módszerét alkalmazó három DEA modell – eredményei kerülnek alfejezetenként különválasztva bemutatásra. Ezt megelőzően azonban a vizsgálatba vont adatok alapvető tulajdonságai kerülnek bemutatásra a rangsorolási vizsgálatok eredményeinek bevezetéseként, kontextusba helyezése érdekében.

Mint arról a bevezetésben is szó esett, a gazdasági teljesítmény erőteljes összefüggést mutat az energiafelhasználás (ezen keresztül az energiaigény és annak energiatermelésből vagy exportból történő kielégítése), illetve annak folyományaként realizálódó ÜHG-kibocsátás mennyiségével. Ezt az kapcsolatot ugyanakkor ellenmondás jellemzi: miközben a kormányzati gazdaságpolitikák fő prioritásaként tekintett gazdasági teljesítménynövekedés számos esetben (ezek között az energiafelhasználás és az ÜHG-kibocsátás vonatkozásában is) növeli a környezet terhelését (Guo et al., 2024), addig egyúttal nélkülözhetetlen pénzügyi háttérrel biztosít a környezetet kímélő technológiák kifejlesztéséhez és alkalmazásához, az igazságos energiaátmenet megvalósításához (McCauley et al., 2023). Emiatt a gazdaságpolitikai célkitűzések és a klímacélok egymástól elkülönült vizsgálata téves következtetéseket eredményezhet, miközben összekapcsolásukkal azonosíthatóak azok a szinergiák, melyek az egyes célok érvényre jutását egymással összhangban biztosíthatják. A célok közötti kettőség jól tetten érhető az EU tagállamai között is, ahol az egyes országok energiaszerkezete, kibocsátási szintje és gazdasági fejlettsége között

jelentős szóródás tapasztalható, mint azt a 2. táblázat is szemlélteti.

A 2. táblázat a vizsgált változók közötti szórás együttható (coefficient of variation) alakulását, illetve az egyes változók átlagos, minimum és maximum értékeit mutatja. A szórás együttható a legtöbb vizsgált tényező esetében erőteljes szóródást mutat, azaz az egyes értékek számtani átlagtól való eltérése jelentős (Ghauri és Gronhaug, 2016); míg a háztartási szektor fűtési célú energiafelhasználása és a GDP a 0,5 alatti relatív szóródás alapján kevésbé tekinthető heterogénnek, a nagyfokú szóródást mutató további mutatók közül az energiaexport és a megújuló energiatermelés területén mutatkoznak a legnagyobb különbségek az egyes tagországok között, amit az átlagtól jelentősen eltérő minimum és maximum értékek is alátámasztanak.

	Primer energia- termelés	Megújuló energia- termelés	Energia import	Energia export	Energia szektor e n e r g i a f e l h a s z n.	Ipari szektor	Háztartási szektor	ÜHG- kibo- csátás	GDP
Szórás együttható V_{2022}	0,67	0,82	0,60	1,18	0,53	0,61	0,43	0,67	0,40
Átlag	57,7	28,6	140,2	51,3	5,4	22,5	14,5	8,5	38,1
Minimum	3,9	3,9	36,8	0,8	0,1	6,0	2,0	1,2	13,3
Maximum	147,9	96,0	446,0	295,6	11,1	73,6	28,0	18,3	120,1

2. táblázat. A vizsgált változók szórás együtthatóinak, átlagának és minimum, maximum értékeinek vizsgálata. Forrás: saját szerkesztés

Mivel a közös uniós klímapolitika célok mindezek alapján több esetben is jelentős eltérést mutató kiinduló feltételekhez igazodnak, mely részben adottságokra, részben tudatos fejlesztési törekvésekre vezethető vissza, az alábbiakban végzett elemzés eredményei különösen fontos inputokkal szolgálhatnak a közös törekvések összehangolásában.

3.1 A TDEA analízis eredményei

A rugalmas súlyozásra épülő TDEA modell optimalizáció útján találja meg a legelőnyösebb súlyokat az egyes DMU-khoz a hatékonyság maximalizálása érdekében, ami biztosítja az elemzés objektivitását. Az optimalizációs folyamat eredményeként az alábbi hatékonysági szintek különíthetők el az EU tagországok között, a vizsgálat tárgyát képező szempontok alapján.

L é p c s ő					
1		2		3	
Bulgária	1,000	Ausztria	1,000	Belgium	1,000
Ciprus	1,000	Németország	1,000	Csehország	1,000
Dánia	1,000	Olaszország	1,000	Magyarország	1,000
Észtország	1,000	Hollandia	1,000	Lengyelország	1,000
Spanyolország	1,000			Szlovákia	1,000
Finnország	1,000				
Franciaország	1,000				
Görögország	1,000				
Horvátország	1,000				
Írország	1,000				
Litvánia	1,000				
Luxemburg	1,000				
Lettország	1,000				
Málta	1,000				
Portugália	1,000				
Románia	1,000				
Svédország	1,000				
Szlovénia	1,000				

Megjegyzés. A kalkuláció részletes eredményeit a Függelék F3. táblázata szemlélteti.

3. táblázat. A TDEA modell eredménye. Forrás: saját kalkuláció.

A 3. táblázat alapján megállapítható, hogy az EU vizsgált 27 országának energetikai struktúrája alapvetően 3 egymástól eltérő szintre bontható. Az országok döntő hányada (1. layer – 18 ország) hatékony működést mutat, így a vizsgált adataik alapján a jó példa megtestesítői, hiszen az azok közötti arány optimális. A 2. layer 4 országa (Ausztia, Németország, Olaszország és Hollandia) nem tartozik ehhez a körhöz, ugyanakkor struktúráik közelítik a legjobb hatékonyságot, azonban rendelkeznek néhány olyan jellemzővel, amelyek optimalizálásával a leghatékonyabb szintre léphetnének. A 3. layerhez 5 ország, Belgium és a V4 országok (Csehország, Lengyelország, Magyarország és Szlovákia) tartoznak – ezek az országok messzebb állnak a hatékony szinttől; a vizsgálatba vont szempontok alapján felállítható struktúra instabil. Ezen országok esetében szükséges azonosítani azokat a tényezőket, amelyek a gyenge hatékonyságot eredményezik, hiszen ezen tényezők javításával emelhetők a struktúrák magasabb szintre. Ezen országok esetében közös vonás a vizsgált alapadatok alapján a megújuló energiaforrások EU-s átlaghoz képest alacsony abszolút értéke és aránya.

3.2 Közös súlyok módszere szerinti DEA elemzés eredményei

Az alábbiakban a vizsgálatba vont országok energetikai struktúrájának hatékonyságának a minimális és maximális súlyok alapján értékelő Maximin, valamint az euklideszi távolság, illetve a legnagyobb eltérés (Csebisev-norma) minimalizálását érvényesítő DEA-modellek alapján meghatározott eredményei kerülnek bemutatásra.

Elsőként a vizsgált szempontok DEA közös súlyait tekintjük át a 4. táblázat alapján.

Súlyok	Megújuló energia- termelés	Megújuló energia- termelés részaránya	GDP	Energia export	Energia szektor e n e r g i a f e l h a s z n.	Ipari szektor	Háztartási szektor	ÜHG- kiboc- sátás
Maximin	3,684	70,440	2,463	0,000	0,426	8,704	7,886	6,397
Euklideszi	0,923	79,957	1,440	0,000	4,072	3,624	0,271	9,712
Csebisev	0,695	98,863	0,442	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

4. táblázat. A három modell szerinti súlyok megoszlása (%). Forrás: saját kalkuláció.

A 4. táblázat alapján megállapítható, hogy a három DEA-modell eltérő súlyokat rendel a vizsgált dimenziókhoz, ami egyúttal az eltérő rangsorolás eredője is.

Megállapítható, hogy a megújuló energiatermelés-részarány mindhárom modellben kiemelkedően érvényesül, miközben a nettó energiaexport valamennyi modellben nulla súlyt kap, így tehát ez a szempont nem érvényesül az eredményekben.

A súlyok eloszlása a Maximin modellben mondható a leginkább kiegyensúlyozottnak. A megújuló energia-termelés részarányának kiemelkedő súlya mellett az ipari szektor energia-felhasználása, a háztartások fűtési célú energia-fogyasztása és az ÜHG-kibocsátás jellemezhető közel azonos (6,3–8,7% közötti) súllyal, melyeket a megújuló energia-termelés és a GDP követ, míg az energiaszektor saját energiaszektora szempontja érvényesül a legkisebb mértékben. Az euklideszi modell esetében a megújuló energiatermelés részarány súlya a 80%-ot míg – második legfontosabb szempontként – az ÜHG-kibocsátása a 10%-ot közelíti. Ezek mellett leginkább a különböző célú energiaszektorkhoz kapcsolódó szempontok érvényesülnek a modellben.

A Csebisev-távolságfüggvényt alkalmazó módszer esetében a megújuló energiatermelés részaránya közel 99%-os, a maradékon a megújuló energia-termelés és a GDP osztozik, míg a többi szempont nulla súllyal szerepel.

Végeredményben megállapítható, hogy az energiaszektorkhoz kapcsolódó dimenzió vizsgálatára egyik modell sem fókuszál, ugyanakkor mindháromban kiemelt jelentőséget kapnak (igaz eltérő mértékben) a megújuló energiatermeléshez kapcsolódó mutatók.

Mivel a DEA modellek alkalmazásában az alkalmazott súlyok kiemelt jelentőséggel bírnak, az objektív módon választott közös súlyok pedig jelentős eltéréseket mutatnak, így a rangsorolás eredményei is ennek megfelelő különbségeket mutatnak (5. táblázat).

Amint az az 5. táblázat alapján is látható, a Maximin DEA eljárás eredményei azt mutatják, hogy négy ország (Dánia, Írország, Lettország, Portugália) esetében a vizsgált struktúra hatékonysága maximális (1,000), míg a legkevésbé hatékony struktúra öt ország jellemzője, melyek hatékonysága 0,4 alatti – ide tartozik Belgium és a V4 országok. Az EU27 tagállamainak többsége 0,4–0,8 közötti eredménnyel közepes hatékonysággal jellemezhető.

Rangsor	Maximin		Euklidészi		Csebisev	
1.	Dánia	1,000	Dánia	1,000	Luxemburg	1,000
2.	Írország	1,000	Írország	1,000	Lettország	1,000
3.	Lettország	1,000	Lettország	1,000	Finnország	0,999
4.	Portugália	1,000	Portugália	1,000	Svédország	0,974
5.	Svédország	0,964	Svédország	1,000	Ausztria	0,922
6.	Málta	0,927	Litvánia	0,961	Portugália	0,825
7.	Észtország	0,913	Luxemburg	0,937	Litvánia	0,776
8.	Ciprus	0,852	Ciprus	0,849	Málta	0,770
9.	Spanyolo.	0,804	Horváto.	0,836	Ciprus	0,767
10.	Litvánia	0,789	Olaszo.	0,814	Írország	0,708
11.	Luxemburg	0,726	Ausztria	0,771	Dánia	0,685
12.	Ausztria	0,682	Franciao.	0,712	Olaszo.	0,673
13.	Görögo.	0,681	Észtország	0,708	Észtország	0,620
14.	Horváto.	0,674	Spanyolo.	0,699	Horváto.	0,596
15.	Olaszo.	0,659	Görögo.	0,674	Németo.	0,581
16.	Franciao.	0,606	Málta	0,665	Görögo.	0,568
17.	Hollandia	0,559	Németo.	0,606	Spanyolo.	0,529
18.	Finnország	0,559	Románia	0,548	Hollandia	0,492
19.	Németo.	0,546	Finnország	0,517	Szlovénia	0,374
20.	Románia	0,465	Szlovénia	0,490	Franciao.	0,364
21.	Szlovénia	0,452	Hollandia	0,484	Szlovákia	0,345
22.	Bulgária	0,450	Magyaro.	0,453	Magyaro.	0,332
23.	Belgium	0,372	Szlovákia	0,397	Csehország	0,323
24.	Szlovákia	0,367	Belgium	0,386	Lengyelo.	0,269
25.	Lengyelo.	0,654	Cseho.	0,316	Románia	0,268
26.	Csehország	0,354	Lengyelo.	0,314	Bulgária	0,260
27.	Magyaro.	0,354	Bulgária	0,312	Belgium	0,259

5. táblázat. A közös súlyú DEA elemzés eredményei. Forrás: saját kalkuláció

Az euklideszi DEA eredményeiben visszaköszön a megújuló energia részarányának magas prioritása és az ÜHG-kibocsátás minimalizálása iránti igény fontossága, így az eredmények jórészt a kevésbé fosszilis energiaforrásokra támaszkodó országoknak kedveznek. A modell a Maximin-módszer szerinti legjobb struktúrák körébe Svédországot is beemeli. A rangsor végéhez Belgiumhoz és a V4 országokhoz Bulgária csatlakozik, azonban ha az utolsó pozíciókat 0,4 alatti értéktől értelmezzük, megemlítendő, hogy Magyarország e modellben 0,453-as eredményével inkább a középmezőnybe sorolható. A modell szerint gyenge szintű hatékonyságot mutató országok esetében az alacsony, 0,3 érték alatti megújuló részarány alátámasztja az eredményeket.

Mivel a Csebisev DEA modell esetében szinte kizárólagos főszerepet kap a megújuló részarány (más tényezők súlya elhanyagolható), az eredmények itt mutatják a legnagyobb szóródást. A korábbi modellekből egyedül Lettország tartja meg maximális hatékonyságát, hozzá pedig az előző modellek szerinti középmezőny legjobbjai közül Luxemburg csatlakozik. Ez a modell mutatja a legtöbb alacsony hatékonyságú struktúrát: 9 ország sorolható a 0,4 szint alá. Ebből a leggyengébb, 0,3 alatti eredményeket Belgium, Bulgária, Románia és Lengyelország produkálja, míg 0,3–0,4 között Csehország, Szlovákia és Magyarország mellett Szlovénia és Franciaország található.

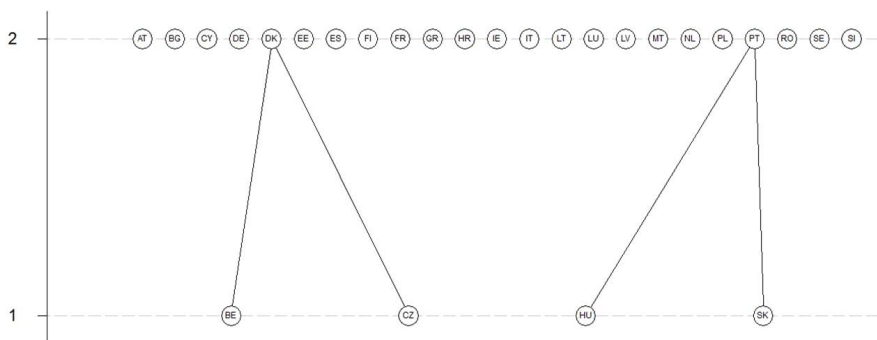
Fentiek alapján elmondható, hogy az alkalmazott modellek alapján a vizsgált struktúra Svédország, Lettország és Portugália esetében kiemelkedően hatékony, míg a rendre gyengén teljesítő országok között Belgium és a V4

országok nevezhetőek meg. Egyes országok (például Dánia, Írország vagy Luxemburg) eredményei módszertől függően jelentős eltérést mutatnak, ami arra utal, hogy ezeknek az országoknak a hatékonysága érzékeny a DEA modell által alkalmazott feltételezésekre.

A közepes eredményt produkáló országok között nevesíthető továbbá több olyan ország, melyek hatékonysága ugyan nem éri el az 1,0-et, azonban mindhárom modellben stabilan a maximumhoz közelítő értékeket produkálnak, ilyen például Ausztria, Litvánia, Ciprus, vagy Málta.

3.3 A Pareto-hatékonyság szerinti modell eredményei

Az 1. ábra a Pareto-hatékonyság szerinti modell eredményeit Hasse-diagramon szemlélteti.



1. ábra. Az országok közötti Pareto-hatékonyságok Hasse-diagramja. Forrás: saját kalkuláció DART-alkalmazással vizualizálva

Miközben a DEA modell szintjei hatékonysági pontszámok alapján állnak össze, a Hasse-diagram esetében ezek relációs rendszerbe rendeződnek. A diagram legfelső szintjén a leghatékonyabb, alsóbb szintjein a vizsgált struktúra vonatkozásában kevésbé jól teljesítő országok helyezkednek el. Az 1. ábra alapján az alsó, legkevésbé hatékony szinten Belgium, Csehország, Magyarország és Szlovákia áll, valamennyi további ország a hatékony felső szintre sorolódik. A Hasse-diagram közvetlen kapcsolatokat jelez egyes országok között, melyek az érintett országok hasonló struktúrájára, emellett pedig a kapcsolatban felsőbb szinten álló ország hatékonyabb struktúrájára utalnak. Ennek alapján tehát közvetlen összefüggés mutatható ki többek között Belgium és Dánia között, de Dánia magas hatékonysági szintje okán dominálja Belgiumot, azaz a vizsgált szempontok alapján jobb hatékonysággal működik. Ugyanez mondható el Csehország Dániával, valamint Magyarország és Szlovákia Portugáliával fennálló kapcsolatáról.

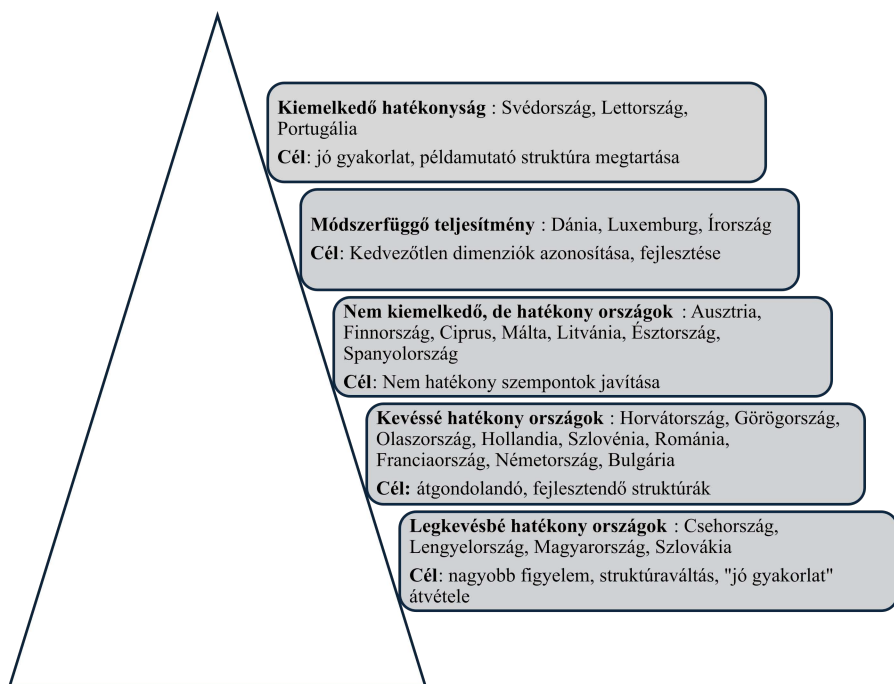
Ezeknek a kapcsolatoknak a jelentősége abban áll, hogy dominancia esetén a domináns ország példája egy jó gyakorlat mintájaként szolgálhat a dominált ország számára. A domináns és az általa dominált ország vizsgált adatainak összehasonlításával könnyebben felfedhetővé válnak azok a tényezők, amelyek

az egyenrangú (azonos hatékonyságú) kapcsolat helyett a dominancia kialakulásának okozói.

3.4 A különböző eljárásokkal végzett eredmények összefoglalása

Az eddigiekben külön-külön elemeztük az egyes módszerek szerint végzett vizsgálatok eredményeit, a következőkben pedig a hasonlóságokat és eltéréseket egyaránt tartalmazó rangsorok alapján tehető megállapítások kerülnek összefoglalásra.

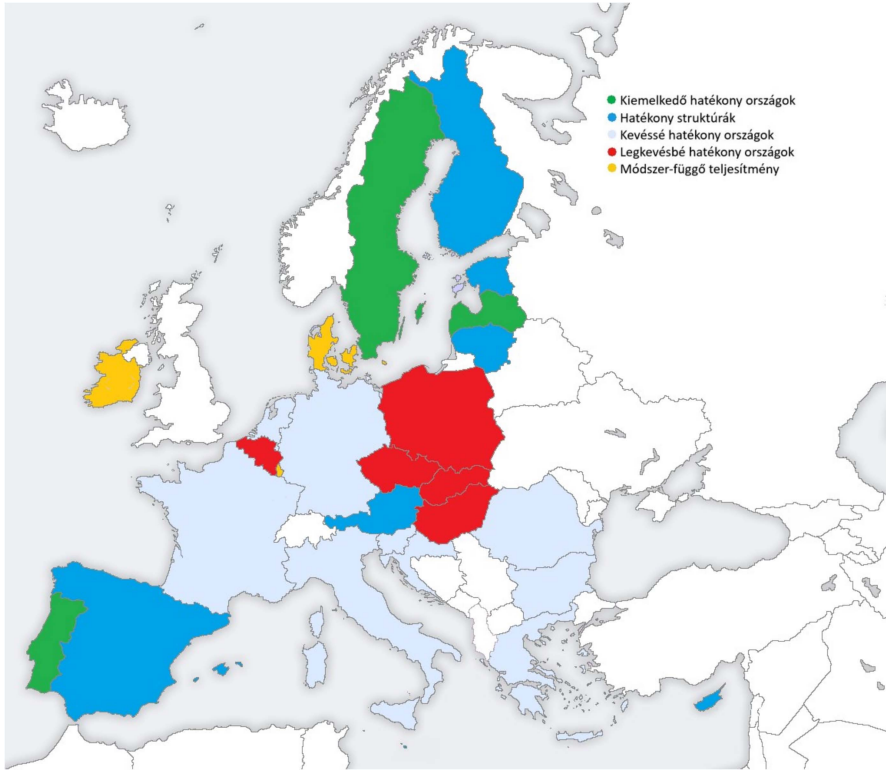
Mindezek alapján a végzett vizsgálat eredményei szerint az EU27 országai öt csoportba sorolhatóak:



2. ábra. A DEA-alapú rangsorolás eredményeinek csoportosítása. Forrás: saját szerkesztés.

A fenti eredmények térképes megjelenítése jelentős területi szóródást mutat a hatékonyságot illetően (3. ábra).

A bevezetésben idézett, nyugatról-keletre csökkenő teljesítmény kevésbé köszön vissza, ugyanakkor egyértelműen megállapítható az északi országok magasabb teljesítménye, valamint Közép-Európa átlag alatti hatékonysága a vizsgált energetikai struktúrák vonatkozásában. Látható továbbá, hogy a közösség legnagyobb országainak többsége (Németország, Franciaország, Olaszország) a kevésbé hatékony szintet hozza – e körből pozitív irányba lép ki Spanyolország eredménye, negatív irányba Lengyelországé.



3. ábra. A DEA-alapú rangsorolás eredményeinek térképes megjelenítése. *Forrás: saját szerkesztés.*

4 Összegzés, következtetések

A jelen tanulmány az EU27, köztük kiemelten a V4 országok energetikai struktúrájának vizsgálatára irányult, melyet öt különböző, de objektív súlyozást alkalmazó DEA modell segítségével hajtott végre.

Habár a súlyok között jelentős eltérések láthatóak, és ezzel összhangban természetesen az egyes rangsorok is különbözőségeket mutatnak, a hierarchia tetején és alján valamennyi modellben többnyire ugyanazon országok azonosíthatók. Ennek alapján azonosíthatók azok az országok (Svédország, Lettország és Portugália személyében), amelyek egyértelműen jó gyakorlatot folytatnak, hiszen valamennyi módszertan szerint maximális, vagy azt erősen közelítő hatékonyságot mutatnak. Fontos, hogy ezek az országok megőrizték kedvező struktúráikat (mint például magas megújuló részarány, legfeljebb átlagos, de jellemzően átlag alatti ÜHG-kibocsátás), és a jövőben is példaként járjanak elől.

Néhány ország (Belgium, V4 országok) rendre a legutolsó pozíciókat szerzi meg valamennyi modell szerint. A konzisztens kedvezőtlen eredmény kedvezőtlen struktúrát jelent, az alkalmazott modellek súlyozása alapján azon-

ban konkrétan jelzi a megújuló energiaforrások alkalmazásának alacsony abszolút mennyiségét és részarányát a teljes energiatermelésen belül, továbbá az uniós átlagot meghaladó energiafelhasználást. Az ide tartozó országok közvetlen kapcsolatot mutatnak más országok struktúráival, melyek a hasonlóságok mellett mégis jelentősen nagyobb hatékonyságot produkálnak, ami alapján célszerű lehet ezeknek a kapcsolatoknak a részletes elemzése a dominált tagállamok hatékonyságának javítása érdekében – elsődlegesen a megújuló energiatermelés részarányának növelése és az energiafelhasználás mérséklése terén, melyek együttesen az ÜHG-kibocsátás kedvezőbb alakulásához is hozzájárulhatnak.

Azon országok esetében, ahol az egyes DEA-modellek eltérő súlyozásai miatt tapasztalható jelentős rangsorbeli eltérés (itt olyan országokról van szó, amelyek egyes módszerek szerint magas szinten hatékonyak, más módszerek szerint azonban jelentősen gyengébben teljesítenek), célravezető lehet annak a dimenzióknak az azonosítása, amely az adott módszerben szereplő jelentős súlya miatt rontja a hatékonyságot és figyelmet kell fordítani e dimenzió teljesítményének javítására.

A középmezőnyben teljesítő országok két részre bonthatóak: a stabilan jó, többnyire az 1,0 hatékonyságot közelítő szinten teljesítő országokra, melyek energetikai struktúrája alapvetően jó, hatékonyságukat legfeljebb 1-2 dimenzió kevésbé kedvező teljesítménye választja el az élmezőnytől. A másik részbe a középmezőny alsó szekciója tartozik, melyek nem tartoznak a legrosszabb hatékonyságú országok közé, de távol állnak a hatékony működéstől. Ezeknél a tagállamoknál azonosítandóak és fejlesztendőek a gyenge teljesítményért felelős dimenziók, de felmerülhet a teljes struktúra átgondolásának szükségése is.

Mindezek alapján további kutatási irányt jelenthet a hatékony szinttől valamilyen okból kifolyólag elmaradó országok teljesítményének vizsgálata a fejlesztendő szempontok azonosítása és javítása érdekében, csakúgy, mint a Pareto-hatékonyság megközelítése szerinti domináns és dominált országok közötti kapcsolatok elemzése az alacsonyabb hatékonyságú struktúrák fejlesztése céljából.

Ezen túl, mivel a közös súlyozáson alapuló DEA-eljárások esetében az energiafüggőség mutatója nulla súllyal szerepel, így a kutatás ezen részében ennek a szempontnak az érvényesítése nem valósult meg, további kutatás céljaként jelenhet meg az okok feltárása, illetve olyan statisztikai módszerek azonosítása és alkalmazása, melyek valamennyi vizsgálatba vont szempontot figyelembe veszik a rangsorolás során.

Irodalom

1. Bampatsou, C., Papadopoulos, S., Zervas, E. (2013): Technical efficiency of economic systems of EU-15 countries based on energy consumption. *Energy Policy*, 55, 426–434. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.12.021
2. Bánhidi, Z., Dobos, I. (2021): A DEA módszertan alkalmazása rangsorolásra az EU-28 és Oroszország digitális fejlettségének példáján. *Sigma*, 52(4), 383–400

3. Bánhidi, Z., Dobos, I. (2023a): Országok digitális fejlettségének megállapítása lépcsőzetes DEA, lépcsőzetes Pareto-hatékonyság és klaszteranalízis felhasználásával, a 2020-as nemzetközi digitális gazdasági és társadalmi index adatai alapján. *Statisztikai Szemle*, 101(11), 978–998. DOI: 10.20311/stat2023.11.hu 0978
4. Bánhidi, Z., Dobos, I. (2023b): Országgrangsorolás a nemzetközi digitális gazdaság és társadalom index 2020-as adatai alapján, DEA- és TOPSIS-módszerrel. *Területi Statisztika*, 63(4), 515–532 DOI: 10.15196/TS630405
5. Barr, R. S., Durchholz, M. L., Seiford, L. (2000): Peeling the DEA onion: Layering and rank-ordering DMUs using tiered DEA. Southern Methodist University Technical Report 5, 1–24.
6. Bhattacharya, M., Paramati, S. R., Ozturk, I., & Bhattacharya, S. (2016): The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries. *Applied Energy*, 162, 733–741. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.104
7. COP29 (2024): Framework for Action. <https://cop29.az/en/presidency/framework-for-action>
8. Erőss, V., Dobos, I., Pálvölgyi, T. (2025): Energy and Economy – Structural Change or Transition? Cross-sectional analysis for EU Member States. *Regional Statistics*, „megjelenés alatt”
9. Európai Bizottság (2024): Irány az 55%! a javaslatok megvalósítása – Úton a klímaseglegesség felé.
10. Európai Parlament (2023): Üvegházhatású gázok kibocsátása az EU-ban (infografika).
11. Európai Parlament (2024): Az Egységes Európai Okmányig megtett út.
12. European Environment Agency, EEA (2021): Megújuló energia: a kulcs egy alacsony szén-dioxid-kibocsátású jövő felé. Publikálva: 2016.07.27, utolsó módosítás: 2021.05.11.
13. European Parliament (2024): Renewable energy: setting ambitious targets for Europe.
14. Eurostat (2024a): Disaggregated final energy consumption in households – quantities.
15. Eurostat (2024b): GDP and main components (output, expenditure and income).
16. Eurostat (2024c): Greenhouse gas emissions by source sector.
17. Eurostat (2024d): Population on 1 January by age and sex.
18. Eurostat (2024e): Simplified energy balances.
19. Feijoo, F., Das, T. K. (2014): Design of Pareto optimal CO₂ cap-and-trade policies for deregulated electricity networks. *Applied Energy*, 119, 371–383.
20. Giannakitsidou, O., Giannikus, I., Chondrou, A. (2020): Ranking European countries on the basis of their environmental and circular economy performance: A DEA application in MSW. *Waste Management*, 109, 181–191 DOI: 10.1016/j.wasman.2020.04.055
21. Granhaug, K., Ghauri, P. (2016): Kutatásmódszertan az üzleti tudományokban. Akadémiai Kiadó, ISBN: 9789630598590
22. Guo, L., Yang, M., Su, M., Li, H. (2024): Hidden environmental costs of economic ambitions: An empirical study of pollution emissions in the wake of growth targets. *Journal of Cleaner Production*, 450, 141925 DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141925

23. International Renewable Energy Agency, IRENA (2024): World Energy Transitions Outlook 2023 Volume 1. [online] [cit. 31.10.2024]
24. Khodabakhshi, M., Ayravash, K. (2012): Rangking all units in data envelopment analysis. *Applied Mathematics Letters*, 25(12), 2066–2070
25. Kiss, E., Mester, T., Balla, D. (2024): A klímaaggodalmak és a környezetbarát viselkedés kapcsolatának, jellemzőinek feltárása Debrecenben, 2020 *Területi Statisztika*, 64(4), 489–514. DOI: 10.15196/TS640404
26. Koltai, T. (2023): *Relatív hatékonyságvizsgálat (DEA)*. Akadémiai Kiadó, ISBN: 9789634548980
27. Kyrgiakos, L. S., Vlontzos, G., Pardalos, P. M. (2021): Ranking EU Agricultural Sectors under the Prism of Alternative Widths on Window DEA. *Energies*, 14(4), 1021 DOI: 10.3390/en14041021
28. Lazzaretto, A., Toffolo, A. (2004): Energy, economy and environment as objectives in multi-criterion optimization of thermal systems design. *Energy*, 29(8), 1139–1157 DOI: 10.1016/j.energy.2004.02.022
29. Madaleno, M., Moutinho, V., Robaina, M. (2016): Economic and Environmental Assessment: EU Cross-country Efficiency Ranking Analysis. *Energy Procedia*, 106, 134–154. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.12.111
30. Makridou G., Andriosopoulos K., Doumpos M., Zopounidis C. (2015): Measuring the efficiency of energy-intensive industries across European countries. *Energy Policy*, 88, 573–583 DOI: 10.1016/j.enpol.2015.06.042
31. Mardani, A., Zavadskas, E. K., Streimikiene, D., Jusoh, A., Khoshnoudi, M. (2017): A comprehensive review of data envelopment analysis (DEA) approach in energy efficiency. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1298–1322 DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.030
32. Matulová, M. (2023): Ranking of European Universities by DEA-Based Sustainability Indicator. *Journal on Efficiency and Responsibility in Education and Science*, 16(4) DOI: 10.7160/eroesk-2023.160403
33. McCauley, D., Pettigrew, K. A., Todd, I., Milchram, C. (2023): Leaders and laggards in the pursuit of an EU just transition. *Ecological Economics*, 205, 107699 DOI: 10.1016/j.ecolecon.2022.107699
34. Morfeldt J., Silveira S. (2014): Capturing energy efficiency in European iron and steel production-comparing specific energy consumption and Malmquist productivity index. *Energy Efficiency*, 7, 955–972. DOI:10.1007/s12053-014-9264-8
35. Pakere, I., Prodanuks, T., Kamenders, A., Veidenbergs, I., Holler, S., Villere, A., Blumberga, D. (2021): Ranking EU Climate and Energy Policies. *Environmental and Climate Technologies*, 25(1), 367–381. DOI: 10.2478/rtuct-2021-0027
36. Podinovski, V. V., Athanassopoulos, A. D. (1998): Assessing the relative efficiency of decision making units using DEA models with weight restrictions *Journal of the Operational Research Society*, 49(5), 500–508.
37. Robaina-Alves, M., Moutinho, V., Macedo, P. (2015): A new frontier approach to model the eco-efficiency in European countries. *Journal of Cleaner Production*. 103, 562–573. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.01.038
38. Salazar-Ordóñez, M., Pérez-Hernandez, P. P., Martín-Lozano, J. M. (2013): Sugar beet bioethanol production: an approach based on environmental agricultural outputs. *Energy Policy*, 55:662–668. DOI:10.1016/j.enpol.2012.12.063

39. Sclavounos, P., Tracy, C., Lee, S. (2008): Floating Offshore Wind Turbines: Responses in a Seastate Pareto Optimal Designs and Economic Assessment. *ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 31–41
40. Temesi, J., Varró, J. (2017): *Operációkutatás*. Akadémiai Kiadó, Budapest. ISBN: 9789630598699
41. Vlontzos G, Niavis S, Manos B. A. (2014): DEA approach for estimating the agricultural energy and environmental efficiency of EU countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 91–96. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.153
42. Wong, K. J., Ooi, J. K., Woon, K. S., Mong, G. R., Shadman, S., Ng, W. L. (2022): A country-level Pareto-optimal palm waste utilisation network for economic and environmental sustainability. *Energy*, 260, 125007. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125007
43. Xin, Q. (2011): *Diesel Engine System Design*. Woodhead Publishing Limited. ISBN: 978-1-84569-715-0

Függelék

Ország kód	Ország név	Primer energia-termelés (TJ)	Megújuló energia-termelés (TJ)	Energia-import (TJ)	Energia-export (TJ)
BE	Belgium	664 848	179 020	3 438 341	1 582 923
BG	Bulgária	550 871	117 255	538 978	233 912
CZ	Csehország	1 058 474	232 574	1 005 308	272 753
DK	Dánia	416 376	211 897	733 634	425 112
DE	Németország	4 074 315	2 066 790	9 758 105	1 613 969
EE	Észtország	196 451	80 249	113 452	100 137
IE	Írország	131 268	71 044	558 442	68 230
GR	Görögország	219 977	150 532	1 574 360	782 037
ES	Spanyolország	1 505 507	842 297	5 311 990	1 323 924
FR	Franciaország	4 513 388	1 188 439	6 104 142	1 300 328
HR	Horvátország	155 025	101 385	369 763	154 479
IT	Olaszország	1 453 232	1 095 951	6 374 437	1 385 132
CY	Ciprus	10 763	10 281	110 905	753
LV	Lettország	122 430	121 916	161 193	87 983
LT	Litvánia	85 725	76 693	596 201	375 226
LU	Luxemburg	13 633	11 897	153 420	7 083
HU	Magyarország	445 208	144 942	850 712	157 693
MT	Málta	2 038	2 038	127 560	1 504
NL	Hollandia	1 015 897	364 275	7 845 558	5 199 944
AT	Ausztria	508 030	434 666	1 184 383	173 533
PL	Lengyelország	2 484 953	563 092	2 692 013	669 822
PT	Portugália	282 315	276 169	909 200	214 227
RO	Románia	930 865	239 930	701 613	271 668
SI	Szlovénia	126 080	40 326	273 804	129 905
SK	Szlovákia	282 548	91 012	684 231	199 764
FI	Finnország	820 796	532 426	929 954	367 966
SE	Svédország	1 494 692	941 180	1 347 022	809 391

F1. táblázat. Az EU tagországainak 2022. évi adatai, vizsgálatunk alapadatai.
Forrás: saját szerkesztés az Eurostat (2024a-e) adatbázis alapján

Ország kód	Ország név	Energia szektor energia felhasznál. (TJ)	Ipari szektor (TJ)	Háztart. szektor (TJ)	ÜHG- kibocsátás (ezer t)	Népesség szám (ezer fő)	GDP folyóáron (mEUR)
BE	Belgium	90 887	401 119	217 667	108 464	11 618	554 214
BG	Bulgária	47 600	113 073	41 206	49 543	6 839	85 801
CZ	Csehország	80 500	276 913	210 343	121 878	10 517	276 266
DK	Dánia	38 973	99 147	96 700	43 862	5 873	380 618
DE	Németország	481 202	2 237 818	1 585 298	781 762	83 237	3 876 810
EE	Észtország	6 921	15 005	29 385	14 464	1 332	36 011
IE	Írország	8 799	89 534	66 316	67 633	5 060	506 282
GR	Görögország	66 608	107 414	102 577	76 852	10 460	206 620
ES	Spanyolország	339 547	751 387	235 990	261 869	47 433	1 346 377
FR	Franciaország	237 924	1 059 350	1 047 493	391 233	67 872	2 639 092
HR	Horvátország	17 970	47 247	64 621	21 391	3 862	68 370
IT	Olaszország	313 352	1 031 067	845 849	398 268	59 030	1 962 846
CY	Ciprus	975	10 497	5 566	9 273	905	27 777
LV	Lettország	3 448	37 932	29 968	15 513	1 876	38 386
LT	Litvánia	23 769	39 937	44 363	12 893	2 806	67 437
LU	Luxemburg	69	22 726	15 175	9 497	645	77 529
HU	Magyarország	40 245	180 386	175 240	53 529	9 689	168 550
MT	Málta	197	3 098	1 024	2 648	521	17 432
NL	Hollandia	195 506	513 287	217 389	168 060	17 591	958 549
AT	Ausztria	64 404	319 026	191 056	70 352	8 979	447 218
PL	Lengyelország	243 348	631 124	545 382	347 790	36 890	656 153
PT	Portugália	43 200	188 261	39 980	54 656	10 352	242 341
RO	Románia	77 901	240 312	203 233	63 526	19 042	284 174
SI	Szlovénia	4 028	49 441	26 871	15 507	2 107	57 038
SK	Szlovákia	42 073	132 636	78 839	29 958	5 435	109 762
FI	Finnország	52 486	408 277	155 193	51 785	5 548	267 687
SE	Svédország	80 628	466 820	166 051	5 857	10 452	561 785

F1. táblázat. Az EU tagországainak 2022. évi adatai, vizsgálatunk alapadatai (folyt.).
 Forrás: saját szerkesztés az Eurostat (2024a-e) adatbázis alapján

Ország	Megújuló energia- termelés (TJ/ ezer fő)	Megújuló energia- termelés részarány (%)	Energia nettó export (TJ/ ezer fő)	Energia szektor energiafelhaszn. (TJ/ezzer fő)	Ipari szektor	Háztart. szektor	ÜHG- kibocsátás (t/fő)	GDP folyó- áron (eEUR/ fő)
	→ max	→ max	→ max	→ min			→ min	→ max
Belgium	15,4	26,9	-159,7	7,8	34,5	18,7	11,5	49,9
Bulgária	18,1	21,3	-47,1	7,3	17,4	6,4	7,7	13,3
Ciprus	11,4	95,5	-121,8	1,1	11,6	6,2	11,3	32,5
Csehország	22,1	22,0	-69,7	7,7	26,3	20,0	11,6	27,3
Németország	24,8	50,7	-97,8	5,8	26,9	19,0	9,4	47,5
Dánia	36,1	50,9	-52,5	6,6	16,9	16,5	7,7	65,1
Észtország	60,3	40,8	-10,0	5,2	11,3	22,1	11,6	27,4
Spanyolország	17,7	55,9	-84,0	7,2	15,8	5,0	6,1	28,9
Finnország	96,0	64,9	-101,3	9,5	73,6	28,0	9,5	48,0
Franciaország	17,5	26,3	-70,7	3,5	15,6	15,4	5,8	39,1
Görögország	14,4	68,4	-75,7	6,4	10,3	9,8	8,0	19,9
Horvátország	26,2	65,4	-55,7	4,7	12,2	16,7	5,6	17,5
Magyarország	15,1	32,6	-72,1	4,2	18,8	18,2	5,6	17,6
Írország	13,8	54,1	-95,1	1,7	17,4	12,9	13,2	101,1
Olaszország	18,6	75,4	-84,5	5,3	17,5	14,3	6,8	33,8
Litvánia	27,3	89,5	-78,8	8,5	14,2	15,8	4,8	24,0
Luxemburg	18,4	87,3	-226,7	0,1	35,2	23,5	14,7	120,1
Lettország	65,0	99,6	-39,0	1,8	20,2	16,0	8,5	19,2
Málta	3,9	100,0	-242,3	0,4	6,0	2,0	18,3	35,1
Hollandia	20,7	35,9	-150,4	11,1	29,2	12,4	11,6	56,5
Ausztria	48,4	85,6	-112,6	7,2	35,5	21,3	7,8	49,9
Lengyelország	15,3	22,7	-54,8	6,6	17,1	14,8	9,5	17,9
Portugália	26,5	97,8	-66,7	4,1	18,1	3,8	5,5	23,4
Románia	12,6	25,8	-22,6	4,1	12,6	10,7	3,3	14,8
Svédország	90,0	63,0	-51,4	7,7	44,7	15,9	1,2	52,8
Szlovénia	19,1	32,0	-68,3	1,9	23,5	12,8	7,4	27,0
Szlovákia	16,7	32,2	-89,1	7,7	24,4	14,5	5,5	20,3

F2. táblázat. Az EU tagországainak 2022. évi, vizsgálatba vont adatai.
 Forrás: saját kalkuláció az Eurostat (2024a-e) adatbázis alapján

L é p c s ő					
1		2		3	
Bulgária	1,000				
Ciprus	1,000				
Dánia	1,000				
Észtország	1,000				
Spanyolország	1,000				
Finnország	1,000				
Franciaország	1,000				
Görögország	1,000				
Horvátország	1,000				
Írország	1,000				
Litvánia	1,000				
Luxemburg	1,000				
Lettország	1,000				
Málta	1,000				
Portugália	1,000				
Románia	1,000				
Svédország	1,000				
Szlovénia	1,000				
Olaszország	0,812	Ausztria	1,000		
Ausztria	0,698	Németország	1,000		
Lengyelország	0,612	Olaszország	1,000		
Magyarország	0,593	Hollandia	1,000		
Hollandia	0,559	Belgium	0,735	Belgium	1,000
Szlovákia	0,533	Csehország	0,708	Csehország	1,000
Németország	0,413	Lengyelország	0,617	Magyarország	1,000
Csehország	0,268	Magyarország	0,545	Lengyelország	1,000
Belgium	0,230	Szlovákia	0,505	Szlovákia	1,000

F3. táblázat. A TDEA modell részletes eredményei. Forrás: saját kalkuláció.

DEA-BASED RANKING TO ASSESS THE ENERGY STRUCTURES OF EU MEMBER STATES

The study ranks the energy structures of the 27 countries of the European Union based on their 2022 energy production and consumption data and GDP indicators. The ranking is based on the DEA (Data Envelopment Analysis) methodology, specifically Tiered Data Envelopment Analysis (TDEA), using three different models of the common weights method and the tiered Pareto efficiency approach. Although the results show significant differences in the weight vectors for each model, there are many similarities between the country rankings: the same countries can mostly be identified in the top and bottom positions. The results provide a basis for making the functioning of the national economy more efficient, achieving EU environmental and climate goals, and ensuring a more balanced contribution to the overall performance of each member state.