

A természeti erőforrások egyenlőtlen regionális eloszlása. Fókuszban az EU villamosenergia-termelési lehetőségei és korlátai

*Inequalities in the regional distribution of natural resources.
Focus on EU's electricity generation potentials and barriers*

Herczeg Balázs¹ – Pintér Éva²

Abstract: The regional distribution and accessibility of natural resources has a significant impact on the geopolitical landscape of a country, particularly regarding energy resources, as access to these is strategically important and affects countries' energy security. Accordingly, securing and managing resources sustainably is an urgent challenge for the international community. Meanwhile, the development of new technologies and renewable energy solutions is redefining classical geopolitical paradigms, as they are less dependent on geographical constraints and contribute to environmental protection. Our study aims to provide an overview of the EU's electricity generation potential, opportunities, and constraints in terms of natural resources and their geographical characteristics. We have analyzed the geographical distribution of all fossil and nuclear fuel sources, the potential of renewable energy sources in the EU, and compared the capacity factors and electricity generation efficiencies of different power generation technologies. We conclude that the EU does not have significant fossil and nuclear fuel reserves and therefore relies on imports. At the same time, the potential for renewable energy sources varies across EU regions, thus their development requires an integrated approach to increase security and economic viability of energy supply. Hydropower stands out due to its high energy conversion efficiency, while nuclear energy has a high energy intensity and capacity factor, which make them the most optimal electricity technologies. In addition, flexible natural gas-fired power plants are still needed as a bridging resource for the transition to renewables.

Keywords: *natural resources, renewable energy, mineral reserves, electricity generation*

JEL Codes: *N54, O13, P28, Q34*

¹ HERCZEG Balázs, PhD hallgató, levelező szerző [PhD student, corresponding author], Pécsi Tudományegyetem, Földtudományok Doktori Iskola [University of Pecs, Doctoral School of Earth Sciences] (hebuabk.pte@tr.pte.hu; <https://orcid.org/0009-0003-1103-3860>)

² Dr. PINTÉR Éva, egyetemi docens [Associate Professor], Budapesti Corvinus Egyetem, Vállalkozás és Innováció Intézet [Corvinus University of Budapest, Institute of Entrepreneurship] (eva.pinter@uni-corvinus.hu; <https://orcid.org/0000-0003-0149-8421>)

Absztrakt: A természeti erőforrások regionális eloszlása és hozzáférhetősége jelentős hatással van egy adott ország geopolitikai helyzetére, kiváltképp az energiaforrások tekintetében, hiszen az ezekhez való hozzáférés stratégiai fontosságú és befolyásolja az országok energiabiztonságát. Ennek megfelelően az erőforrások biztosítása és fenntartható kezelése fontos kihívások elé állítja a nemzetközi közösséget. Mindeközben az új technológiák és a megújuló energiaforrásokon alapuló megoldások fejlődése újraértelmezi a klasszikus geopolitikai paradigmákat, mivel ezek kevésbé függenek a földrajzi korlátoktól és hozzájárulnak a környezetvédelemhez. Tanulmányunk célja az EU villamosenergia-termelési adottságainak, lehetőségeinek és korlátainak áttekintése természeti erőforrások tekintetében. Elemzésünk során megvizsgáltuk valamennyi fosszilis és nukleáris tüzelőanyagforrás földrajzi eloszlását, az EU megújuló energiaforrásainak potenciálját, valamint összehasonlítottuk az egyes energiatermelő technológiák kapacitásfaktorait és elektromos áramtermelő hatékonyságait. Arra a következtetésre jutottunk, hogy az EU jelentős fosszilis és nukleáris tüzelőanyag-tartalékokkal nem rendelkezik, így ezek importjára szorul. Ugyanakkor megújuló energiaforrások kiaknázása terén az EU különböző régiói eltérő potenciállal bírnak, így ezek fejlesztése integrált megközelítést igényel az energiaellátás biztonságának és gazdaságosságának növelése érdekében. A vízenergia kiemelkedik magas energiaátalakítási hatásfoka miatt, míg az atomenergia nagy energiaintenzitással és kapacitásfaktoralal rendelkezik, ami a leoptimalisabb villamosenergetikai technológiákká teszik őket. Emellett a rugalmasan kezelhető földgáztüzelésű erőművekre is jelenleg még szükség van, ezek mintegy áthidaló erőforrásként szolgálnak a megújuló energiákra történő átállás tekintetében.

Kulcsszavak: *természeti erőforrások, megújuló energia, ásványvagyron tartalékok, villamosenergia-termelés*

JEL-kódok: *N54, O13, P28, Q34*

Bevezetés

A természeti erőforrások rendelkezésre állása és eloszlása alapvetően befolyásolja a nemzetek geopolitikai és stratégiai döntéseit, mivel az országok földrajzi elhelyezkedése – amely meghatározza az erőforrásokhoz való hozzáférésüket – gyakran előnyöket és kihívásokat is jelent a globális szinten való pozicionálásuk szempontjából. Ez az eloszlás egyenlőtlen, ami bizonyos régiókat gazdaggá tesz, míg másokat erőforrás-szegénné. Ez a különbség pedig geopolitikai feszültségeket és konfliktusokat ered-

ményezhet az erőforrásokban gazdag és szegény területek között, ugyanakkor egyben lehetőséget is kínál az együttműködésre (Sarpong, 2021; Yergin, 2011).

Ma már tehát széles körben elfogadott, hogy a természeti erőforrások biztosítása egy adott nemzet geopolitikájának kulcsfontosságú eleme, geostratégiai érdeke. A kőolaj, földgáz és az egyéb ásványi nyersanyagok biztosításáért folytatott küzdelem a történelem egyik mozgatórugójaként szolgált, befolyásolva a nemzetközi politikát, nagyhatalmi rivalizálást és a globális versenyt. Az elmúlt évszázad során az energiapolitika geostratégiai jelentősége tovább erősödött az energiapiacok feletti ellenőrzéssel, az energiaforrások stratégiai felhasználásával és a megújuló energiarendszerek terjedésével, melyek összességében meghatározták a nemzetközi kapcsolatok alakulását is, rávilágítva ezzel az energiaforrások és az energiapolitikák hatalmi viszonyrendszerben betöltött fontosságára (Sarpong, 2021; Szilágyi, 2018).

E komplex témakör megfelelő kontextusba helyezése multidiszciplináris megközelítést követel, melynek a középpontjában a geopolitika, azon belül is a geoenergetika, avagy az erőforrások geopolitikája áll, mely kifejezetten a természeti erőforrásokkal, az energiaforrásokkal és az energiapolitikával foglalkozik. Ez magában foglalja az energiaforrások elérhetőségének és hatékony eloszlásának, az energiaellátási útvonalak biztonságának, az energiaforrások feletti ellenőrzésért folytatott versengésnek és a megújuló energiaforrások kiaknázásából eredő geopolitikai hatásoknak a vizsgálatát is (Vidakis et al., 2017).

A fentiek mentén ebben a tanulmányban a célunk, hogy áttekintsük az EU villamosenergia-termelési adottságait, lehetőségeit és korlátait természeti erőforrások tekintetében. E célból kvantitatív kutatást végeztünk különféle statisztikai adatbázisok és kiadványok alapján, az elemzési eredményeket pedig javarészt topográfiai tartalmak ábrázolásával szemléltetjük. Foglalkozunk a fosszilis és nukleáris tüzelőanyagforrások mint ásványvagyon tartalékok globális és regionális földrajzi eloszlásával, valamint a megújuló energiaforrásokban rejlő területi potenciálokkal. Továbbá kitérünk arra is, hogy milyen különbségek vannak az ezen energiaforrásokra és -hordozókra építő villamosenergia-termelő egységek kapacitásfaktorai, hatékonyságai, valamint az ezen egységek által kinyerhető energiamennyiségek és a befektetett energiamennyiségek között. Végezetül konkludálunk az EU geoenergiájára vonatkozólag az energiakereskedelmi lehetőségek figyelmen kívül hagyásával. Mindenekelőtt azonban

fontosnak tartjuk bemutatni az uniós energiaszükségletek trendjeit, összehasonlítva a globális folyamatokkal, amelyek még jobban alátámasztják a természeti erőforrások iránti növekvő igényeket.

A kutatási kérdéseink a következők voltak:

1. Milyen tartalékokkal rendelkezik az EU jelenleg a főbb ásványvagyonokat illetően?
2. Milyen potenciálokkal bír az EU a megújuló energiaforrások terén?
3. Villamosenergia-termelés szempontjából mely energiaforrások és -hordozók számítanak a legoptimálisabbnak?

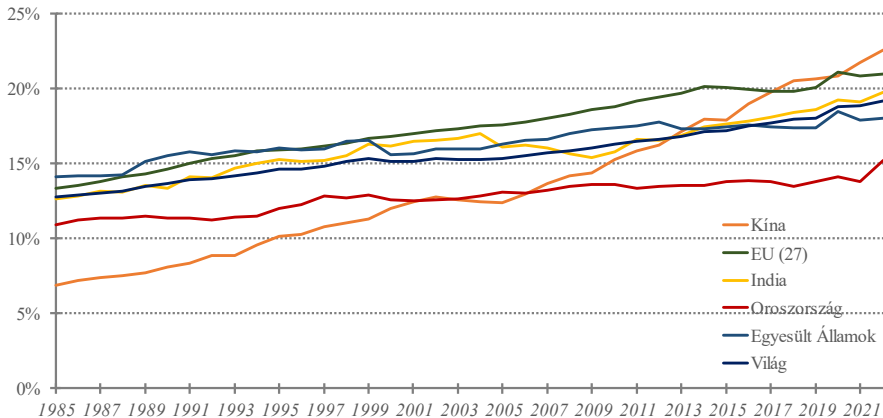
A globális és regionális energiaszükségletek növekedése

Az emberiség létszáma rohamosan növekedett az elmúlt évszázadban köszönhetően számos tényező együttes hatásának. Az egészségügyi ellátások jelentős fejlődése, a különféle betegségek elleni vakcinák széleskörű alkalmazása, a higiéniai viszonyok javulása, valamint az ételmiszer-ellátás fokozódó biztonsága mind szerepet játszottak ebben a folyamatban. Emellett az iparosodás és az urbanizáció szintén hozzájárultak az általános jólét növekedéséhez.

Ebben a folyamatban a természeti erőforrások, mint például a víz, a föld és az ásványkincsek létfontosságú szerepet játszottak a társadalmi és gazdasági tevékenységek fenntartásában és bővítésében. A különböző energiaforrások, úgymint a fosszilis tüzelőanyagok (előbb szén, azután olaj, majd földgáz), a megújuló energiaforrások (főleg a vízenergia), továbbá a nukleáris fűtőanyagok hasznosítása elengedhetetlen volt az iparosodás és globális kereskedelem, a mezőgazdasági termelés növelése, valamint a modern közlekedési és kommunikációs rendszerek kialakítása szempontjából. Hiszen energia biztosítja a gyárak működését, a közlekedési eszközök üzemeltetését és az otthonok fűtését, hűtését és világítását is. Az energiatermelés növekedése lehetővé tette az új technológiák és infrastruktúrák kiépítését, amelyek mind hozzájárultak a társadalmi és gazdasági fejlődéshez (Smil, 2018). Ennek a természetes népességnövekedésnek és az energiatermelési lehetőségek bővülésének a következménye lett az energiaszükségleteink, azon belül is a villamosenergia-igényünk nagyfokú növekedése.

Az 1. ábra szemlélteti a villamosenergia-termelés arányának folyamatos növekedését az elsődleges energiafogyasztásban. Míg az 1990-es évek elején világszinten 13,48% volt ez az arány, addigra ez 2022-re

19,17%-ra nőtt meg. Ennek a folyamatnak Kína az éllovasa, amely az elmúlt bő 30 évben majd megháromszorozta a villamosenergia-termelés arányát a teljes elsődleges energiafogyasztásban. Az EU esetében ez az arány egy kicsivel a világátlag fölött volt, 20,96%-on állt 2022-ben.

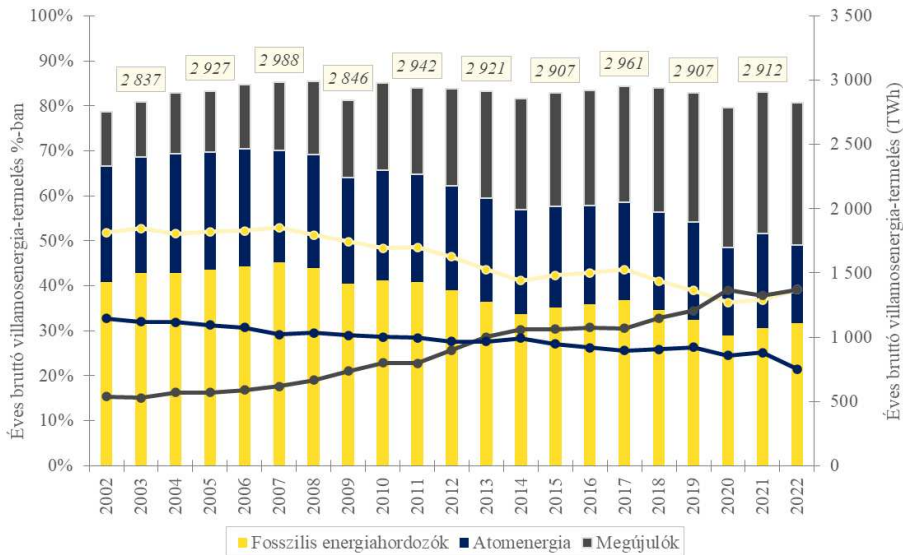


1. ábra: A teljes villamosenergia-termelés aránya a primer energiafogyasztásban 1985 és 2022 között

Forrás: EMBER (é. n.), Energy Institute (2023) és Ritchie et al. (2023) alapján saját készítésű ábra

Ez a növekedés egyértelműen az elektrifikáció jelenségének köszönhető. Maga az elektrifikáció az a folyamat, amely során a villamos energia egyre inkább az emberi tevékenységek, mint például a világítás, fűtés, közlekedés és ipari folyamatok központi energiaforrásává válik. Ez a történelmi folyamat mély és tartós változásokat hoz a társadalomban és a gazdaságban, fokozatosan átalakítja az energiafelhasználás módjait és hozzájárul a mai modern életforma kialakulásához. Tehát az ipari, kereskedelmi és lakossági szektorokban végbemenő elektrifikáció egyaránt hozzájárul a villamos energia iránti növekvő igényhez (Smil, 2018).

Ezt a növekvő villamosenergia-igényt pedig, ahogy a 2. ábra is szemlélteti, változó energiaforrás-szerkezet biztosította az elmúlt két évtizedben az EU-ban. A hosszú távú trend egyértelmű: a megújulókat tértől a csökkenő atomenergia és fosszilis energiahordozók felhasználása mellett, annak ellenére, hogy a COVID-19 és az energiaválság átmenetileg befolyásolta ezt a trendet.



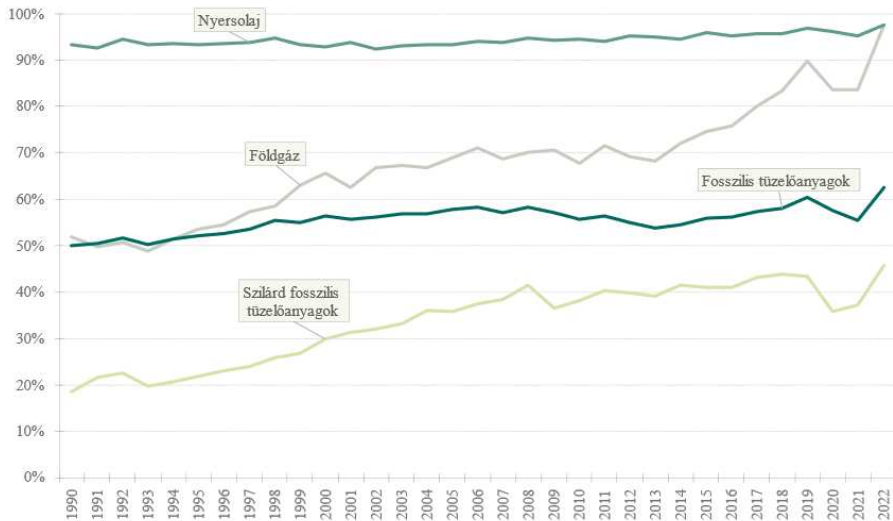
2. ábra Éves bruttó villamosenergia-termelés (TWh) és megoszlása energiaforrásonként (%) az EU-ban

Forrás: Eurostat (é. n.-a, é. n.-b) alapján saját készítésű ábra

Ez utóbbi jól látható a 3. ábrán is, mely az EU szektorfüggetlen energiafüggőségének arányát mutatja az elmúlt 30 évben. A 2020-as évek elején a fosszilis tüzelőanyagok importját illetően egyértelműen látszik a COVID-19 okozta energiaszükséglet visszaesés, illetve a hirtelen fennedülés következménye is. Az orosz-ukrán háború azonban új helyzetet teremtett, mivel a kialakult bizonytalan helyzetben kritikussá vált az alternatív források keresése, és a magasabb fokú készletezés. Ez összességében 2022-re visszaállította a fosszilis tüzelőanyagok iránti függőséget, míg a földgáz tekintetében jelentős növekedést eredményezett.

Összességében belátható, hogy ez a folyamatosan növekvő (villamos) energia igény kielégítése egyre nagyobb kihívást jelent az energiaellátási rendszereknek világszerte. A kapacitásbővítésnek, azaz az energiaellátási infrastruktúra minden elemének lépést kell tartania a növekvő szükségletekkel az ellátásbiztonság biztosítása céljából. Ez azonban csak az egyik része a feladatnak. Ugyanis az egész energiarendszer alapvető bázisát képező energetikai szempontú természeti erőforrások, tehát a primer energiaforrások és -hordozók elérhetősége kritikus jelentőségű minden ország számára.

Ezen ásványivagyon földtani bizonyossága, mennyisége, gazdaságos kitermelhetősége, a megújuló energiaforrásokkal együttvéve mindezek földrajzi koncentrációja és potenciálja az ellátásbiztonság lényegi részét képezi.



3. ábra Energiafüggőség aránya 1990-2022 között
 Forrás: Eurostat (é. n.-c) alapján saját készítésű ábra

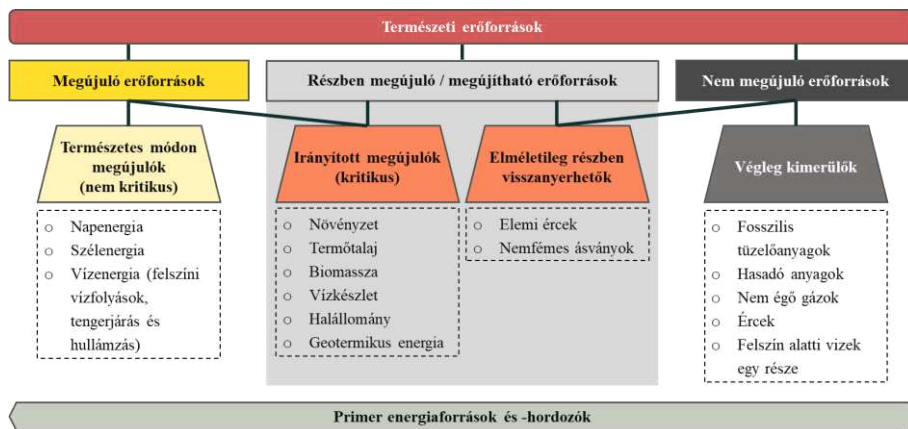
Földi javak változatos területi elhelyezkedései

A természeti erőforrások fogalmát tágran értelmezhetjük, de alapvetően olyan anyagok vagy jelenségekről van szó, amelyek természetes formában állnak rendelkezésre a Földön, és amelyeket az emberiség gazdasági, társadalmi vagy kulturális céljaira hasznosíthat, így felhasználhatóak az energiatermelésben és az ipari feldolgozásban. Ide tartoznak többek között a vízkészletek, a talaj, a fosszilis tüzelőanyagok, a Föld ásványkincsei, a növényzet, az állatvilág és az energiát biztosító természeti jelenségek, mint például a napfény és a szél (Bihari, 2012).

Ugyanakkor a természeti erőforrások teljes skáláját az emberiség még nem képes hasznosítani. Vannak olyan természeti erőforrások és jelenségek, amelyeket az emberi társadalom jelenleg nem, vagy csak korlátozott mértékben hasznosít. Ennek számos oka lehet, többek között a technoló-

giai korlátok, a gazdasági megfontolások vagy az etikai és környezetvédelmi megfontolások. Erre jó példa a mélytengeri áramlatok vagy a Földünket érő kozmikus sugárzások effektív hasznosítása.

Kerekes (2007) felhívja a figyelmet arra, hogy historikusan valamenyny természeti erőforrást szabad javaknak tekintették, mivel úgy gondolták, hogy ezek a természetben készen és korlátlanul állnak rendelkezésre állandó minőségben. Mindazonáltal ma már tudjuk, hogy ez nem igaz, és a természeti erőforrások egy része elfogyhat, de ez nagyban függ az adott erőforrás típusától és felhasználásának módjától. A természeti erőforrások kimerülése súlyos környezeti és gazdasági következményekkel járhat, éppen ezért a fenntartható fejlődés és gazdaság központi eleme a természeti erőforrások megőrzése (Molnár, 2021). Éppen ezért a fenntarthatóság szempontjából legalább kettő (Kerekes, 2007; Vajda, 2004), de inkább három (Bihari, 2012; Bora és Korompay, 2003; Molnár, 2021) típusra bonthatjuk a természeti erőforrásokat, amit a 4. ábra is szemléltet:



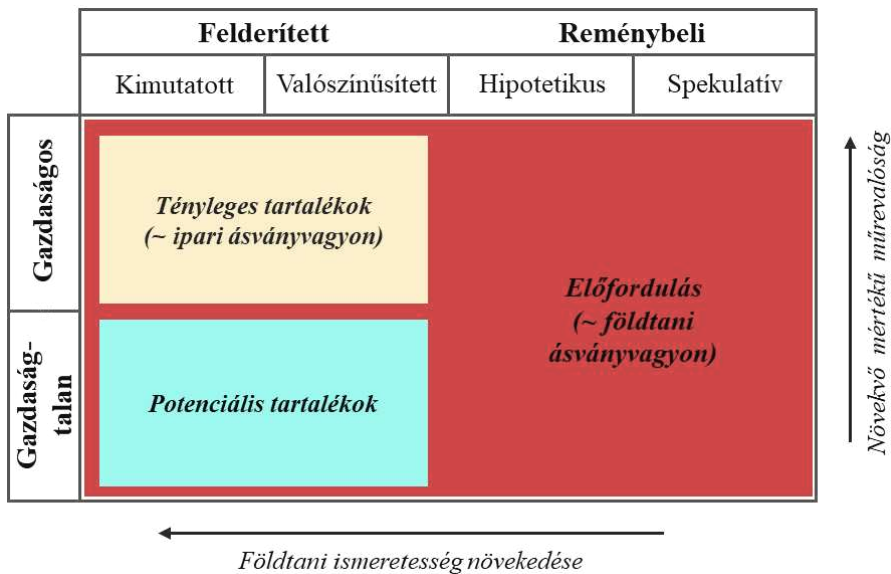
4. ábra: A természeti erőforrások fenntarthatóság szerinti megbontása

Forrás: Bihari (2012), Bora és Korompay (2003) és Molnár (2021) alapján saját készítésű ábra

A fenti ábrán megfigyelhető, hogy a természeti erőforrások fenntarthatóság szerinti osztályozása összességében megfeleltethető a primer energiaforrások és -hordozók típusainak is, csupán más megközelítésből és az energiatermelésben betöltött szerepük szerint. A következőkben a két nagy csoport, az ásványi energiaforrások, valamint a megújuló erőforrások leggyakoribb elemei (szén, kőolaj, földgáz és urán, valamint a nap-, szél-, víz- és geotermikus energia) kerülnek vizsgálatra azok elérhetőségei szempontjából.

Az ásványi energiahordozók kitermelési lehetőségei

Az ásványianyagszó vagy mérlegszerű nyilvántartásának elemzéséhez érdemes tisztázni néhány releváns alapfogalmat. Az amerikai bányászati hivatal taxonómiája alapvetően három kategóriát különböztet meg: tényleges tartalékok (*current reserves*), potenciális tartalékok (*potential reserves*) és erőforrás-ellátottság (*resource endowment*). Ezek a gazdaságosság és a földtani bizonyosság ismeretében egy ún. McKelvey's box mátrix formájában is szemléltethetők (5. ábra). A legszélesebb halmazt az előfordulás (erőforrás-ellátottság) jelenti, amely a már felderített, illetve reménybeli erőforrások természetes előfordulását jelenti a földkéregben. Ez a földtani vagyon tehát egy geológiai fogalom, amely a természetes erőforrások felső határát jelöli meg. Ennél szűkebb kört jelentenek a tartalékok, amelyek bizonyítottan, illetve egy meghatározott hibahatáron belül jól becsülhetően fellelhetők a Földön (Mádai, 2011; Tietenberg és Lewis, 2012).



5. ábra: Az ásványvagyon klasszifikáció

Forrás: Mádai (2011) és Tietenberg és Lewis (2012) alapján saját szerkesztésű ábra

A potenciális tartalékok mennyisége relatív, inkább függvényszerűen írható le, mely mennyiségnek csak a kitermelés technológiai költsége szab határt (Bohn, 1992). Például olajmezők esetében újabb és drágább módszerek segítségével lehetséges nagyobb arányban olajat kitermelni, tehát

ez a vagyontömeg költség-haszon elemzés kérdése már, semmint a geológiai ismeretek függvénye. Ezzel szemben a tényleges tartalékok jelentik azt az ásványvagyon mennyiséget, amely adott költségek mellett jövedelmezően is kitermelhető. Szervezeti jelentésekben leginkább ezt szokás számszerűen bemutatni (Mádai, 2011; Tietenberg és Lewis, 2012).

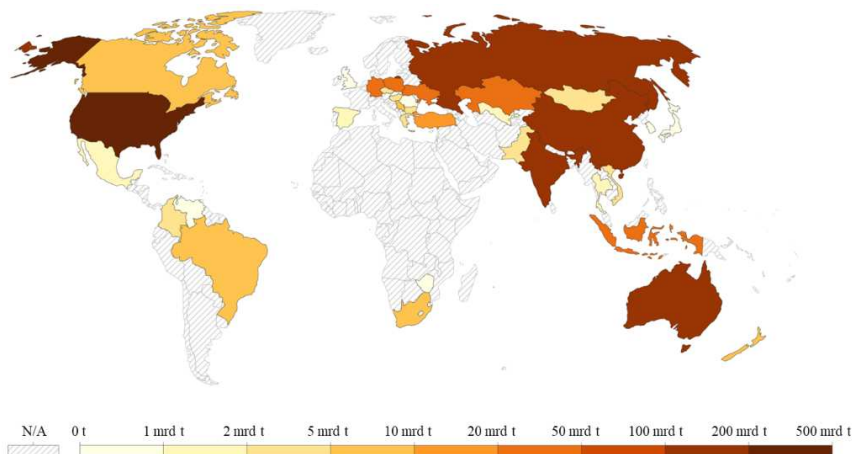
Ebből a kategorizálásból is látszik, hogy a rendelkezésre álló tartalékok mennyisége valójában relatív, hiszen attól függ, hogy adott időpillanatban mennyi tartalékot tekintünk gazdaságilag kitermelhetőnek és technológiailag hozzáférhetőnek. Az ásványi anyagok piaci árai jelentősen befolyásolják, hogy melyik erőforrásokat tekintjük gazdaságilag kitermelhető tartaléknak, míg az új bányászati, kitermelési és feldolgozási technológiák lehetővé teszik korábban elérhetetlen vagy gazdaságtalan erőforrások kiaknázását is. A reménybeli előfordulást erősíthetik az újabb geológiai felfedezések (pl. a globális felmelegedés miatt az eddig kevésbé feltárható Északi-sark potenciális lelőhelyet jelenthet kőolaj és földgáz tartalékok tekintetében) és pontosabb földtani modellezések, ugyanakkor a jogszabályok és környezetvédelmi előírások szigorításai korlátozhatják is a folyamatot.

Tehát az ásványi tartalékok mennyisége nem egy statikus szám, hanem dinamikus érték, amely a fent említett változók függvényében változik. Továbbá, szokás a rendelkezésre álló tartalékok alapján megbecsülni azt is, hogy egy adott, pl. fosszilis energiahordozóból hány évre elegendő ez a tartalék. Itt is fontosnak tartjuk kiemelni a számadat megfelelő kontextusában történő értelmezését. Ugyanis a felhasználás is egy adott időpontban, adott technológia, illetve termelési és fogyasztási mintázat mellett értelmezendő. Amennyiben az ellátási lánc bármely pontján növekszik az energiahatékonyság, vagy, ha megváltoznak fogyasztási-felhasználási szokásaink, így a kitermelés volumene, az nagyban befolyásolhatja a kimerülésig tartó időszak hosszát (Tietenberg & Lewis, 2012).

A következőkben arra keressük a választ, hogy a világ mely részein koncentrálódnak a kritikus energiahordozóink. Ez nagyban befolyásolta azt, hogy egy adott ország a történelme során milyen típusú tüzelőanyagra építette fel energiarendszerét. Természetesen ez nem kizárólagosság, hiszen az energiahordozók szállíthatósága miatt olyan területeken is épülhettek például szénerőművek, ahol nincs vagy nem jelentős a szénbányászat, de összességében gazdaságossági szempontból szénerőművek létesítése kifizetődő volt.

Ha már a szénkitermelésről van szó, a 6. ábra alapján látható, hogy a legnagyobb ismert széntartalékokkal rendelkező országok közé tartozik 2020. végén az Egyesült Államok (248,9 milliárd tonna), Oroszország

(162,2 milliárd tonna), Kína (143,2 milliárd tonna), Ausztrália (150,2 milliárd tonna) és India (111,1 milliárd tonna), míg az egész világban nagyjából 1.074,1 milliárd tonnára becsülik a felfedezett és gazdaságosan kitermelhető széntavagyont. Ehhez képest az EU-ban 78,6 milliárd tonna ez a becsült mennyiség, ahol az élmezőnyt Németország (35,9 milliárd tonna), Lengyelország (28,4 milliárd tonna) és jócskán lemaradva tőlük Csehország (3,6 milliárd tonna) jelenti. Magyarország mindössze 2,9 milliárd tonna széntartalékkal bírt 2020. év végén, illetve vannak olyan tagállamok, ahol nincs ismert, vagy nagyon csekély mennyiségben van gazdaságosan kitermelhető széntartalék (pl. Luxemburg, Málta, Ciprus, Franciaország, Olaszország). Ha az EU 2020-as széntermelését (3,79 exajoules) figyelembe vesszük, akkor nagyjából az akkori termelési ütem mellett a tartalék és termelés aránya (*reserves-to-production, R/P*) mintegy 266 évre elegendő tartalékkal rendelkeznének. Így a széntartalékok az EU-ban összességében hosszú távú energiaforrást jelenthetnek, de az EU energiapolitikája, így a dekarbonizációs törekvései miatt folyamatosan törekszik csökkenteni a szén alapú energiatermelést (BP, 2021). Ez meg is látszik abban, hogy az EU 2022-ben a világ széntermelésének mindössze 2,3%-árt volt felelős (Energy Institute, 2023). Ettől eltekintve, a szén olcsó és bőséges energiahordozóként jelentős gazdasági jelentőséggel bír sok országban.



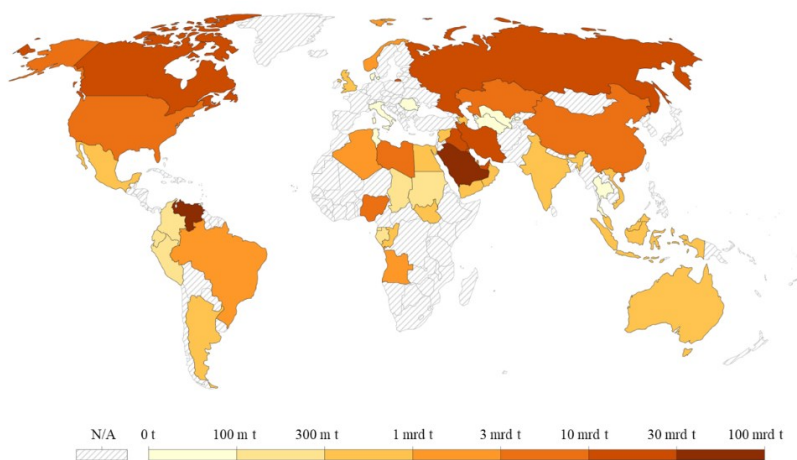
6. ábra: Széntartalékok a világban (2020. év végi állapot szerint)

Forrás: Energy Institute (2023) és Ritchie et al. (2023) alapján saját szerkesztésű ábra

Érdekesség ugyanakkor, hogy nem a fent említett legnagyobb tartalékokkal rendelkező országok mindegyike minősül egyben a legnagyobb

szénexportőrnek is. 2022-ben Ausztrália és Oroszország mellett Indonézia volt a legnagyobb globális exportőr, együttesen 71%-os arányt képviseltek. Ezzel szemben a legnagyobb importőr Kína volt, annak ellenére, hogy a TOP3-ban van a széntartalékokat tekintve. Továbbá szintén jelentős India, Japán és egyéb ázsiai országok importtevékenysége, melyek együttesen (Kínát is beleértve) több mint 65%-át tették ki a teljes szénimport mennyiségnek (Energy Institute, 2023).

Áttérve a kőolajtartalékok vizsgálatához, a 7. ábrán láthatjuk, hogy az EU megint csak nem fog az élvonalba tartozni ezen energiahordozó természetes rendelkezésre állása tekintetében sem. 2020 végén a világ kőolajtartalékai (236,3 milliárd tonna / 1.732,4 milliárd hordó) nagyrészt a Közel-Keleten (113,2 milliárd tonna / 835,9 milliárd hordó) koncentráálódtak, különösen Szaúd-Arábiában, Iránban, Irakban, Kuvaitban és az Egyesült Arab Emírségekben. Ezek a tartalékok jelentős részét adják a globális tartalékoknak (48,3%). Továbbá olyan országokban is jelentős tartalékok találhatók, mint Venezuela (41,3 milliárd tonna / 303,8 milliárd hordó), Kanada (22,9 milliárd tonna / 168,1 milliárd hordó olajhomok formájában), Oroszország (14,7 milliárd tonna / 107,8 milliárd hordó) és Líbia (6,6 milliárd tonna / 48,4 milliárd hordó).



7. ábra: Kőolajtartalékok a világban (2020. év végi állapot szerint)

Forrás: Energy Institute (2023) és Ritchie et al. (2023) alapján saját szerkesztésű ábra

Az EU tartalékai mintegy 2,4 milliárd hordóra (330,7 millió tonnára) tehetőek 2020. év végén, amellyel mindössze 0,1%-át teszi ki a világ kőolajtartalékainak, és nagyjából 17 évre elegendő készletet jelentene az

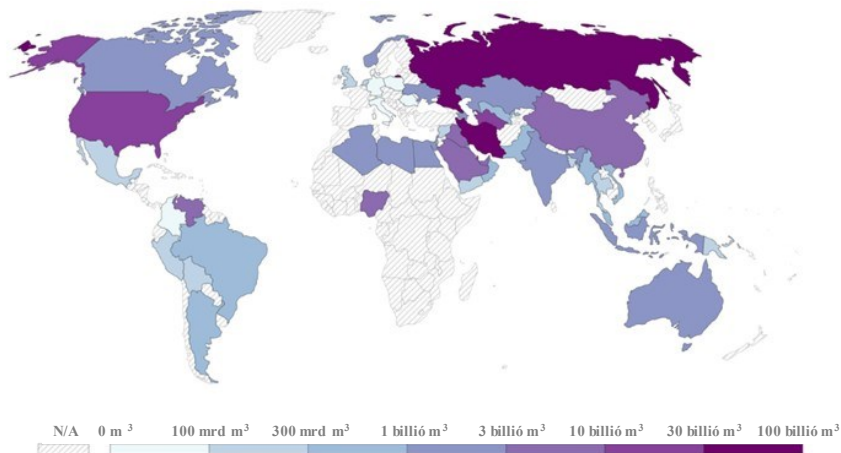
olajtermelés tekintetében, *ceteris paribus*. Ez az érték világviszonylatban mintegy 54 évre becsülhető átlagosan a 2020-as termelési és tényleges tartalékok függvényében. Egyébként Európában az Északi-tengeren vannak kőolaj lelőhelyek, így az Egyesült Királyság és Norvégia számára nyújt elsődleges forrást (BP, 2021; Energy Institute, 2023).

A nyersolajkereskedelmet tekintve, a legnagyobb exportőr 2022-ben a Közel Kelet (43%) és Oroszország volt (12,4%), míg legnagyobb importőrnek Kína (23,9%), Európa (23,5%) és az Egyesült Államok (14,7%) számítottak (Energy Institute, 2023). Európa jelentős kőolajimportja tehát a saját kőolajtartalékainak korlátozottságából fakad. A kontinens gazdasága, kiváltképp a közlekedési szektor nagy mértékben függ az olajtól, míg a kőolaj szerepe a villamosenergia-termelésben egyáltalán nem számottevő.

A harmadik fosszilis tüzelőanyagot, a földgázt vizsgálva megint csak hasonló következtetésekre fogunk tudni jutni (8. ábra). A világ gáztartalékai szintén jelentősek és földrajzilag eltérően oszlanak el, ugyanakkor mivel a kőolaj és a földgáz gyakran együtt fordul elő, így a földgáztartalékokban gazdag országok köre hasonló lesz a kőolajtartalékoknál listázott országokéval. Ennélfogva a legnagyobb tartalékokkal rendelkező országok (régiók) közé tartozik a Közel Kelet (75,8 billió m³) – azon belül is 75%-ban Irán és Katar –, Oroszország (37,4 billió m³), Türkmenisztán (13,6 billió m³), valamint az Egyesült Államok (12,6 billió m³), és amelyek együttesen domináns (74,1%) részét képezik a globális tartalékoknak 2020. év végén. Ehhez képest az EU mindössze 441,8 milliárd m³ tényleges tartalékkal rendelkezett 2020. év végén, amely alig kilenc évre adna elegendő fedezetet a gáztermeléshez, *ceteris paribus* (BP, 2021).

A földgáz esetében a kereskedelem két fő csatornán zajlik: régiókon átívelő csővezetékeken, valamint LNG terminálok között. Ez utóbbi 2022-ben a teljes régiók közötti kereskedelem mintegy 56%-át tette ki. Míg a hagyományos csatornákon Oroszország (29%) és Norvégia (23%), addig LNG szempontból a legnagyobb exportőrnek a Közel-Kelet, Ausztrália és az Egyesült Államok minősültek (együttesen 65%-át tették ki a teljes LNG exportkereskedelemnek). Importtevékenység tekintetében a szűkös tartalékok, valamint a történelmi infrastruktúrahálózat kiépítettsége miatt Európa, az Egyesült Államok és Kína voltak a legnagyobb importőrök (együttesen 68,4%), míg LNG-import esetében az ázsiai-csendes-óceáni térség (65%) és Európa (30%) voltak a legjelentősebb importőrök (Energy Institute, 2023). Ezek a tartalékok és kereskedelmi tevékenységek kulcsfontosságúak az energiaellátás szempontjából, különösen a fűtés, az ipari tevékenységek

és a villamosenergia-termelés szempontjából. Az európai gázellátás csővezetékeken alapuló része jelentős mértékben Oroszországból (pl. Északi Áramlat 1, Testvériség, Yamal-Europe, Török Áramlat) érkezett, kisebb részben pedig az északi-tengeri gázmezőkről (Europipe 1-2), Algériából (Medgaz, Maghreb-Europe gázvezeték) és Azerbajdzsánból (Trans Adriatic Pipeline). Ehhez képest a rugalmasabb LNG szállítás Európába főleg az Egyesült Államokból és Katarból érkezik. Mindezek pedig fontos geopolitikai és gazdasági következményekkel járnak együtt.



8. ábra: Földgáztartalékok a világban (2020. év végi állapot szerint)

Forrás: Energy Institute (2023) és Ritchie et al. (2023) alapján saját szerkesztésű ábra

Végezetül következnek a nukleáris fűtőanyagok, azon belül is az urán tartalékok bemutatása. Ahogy a 9. ábra szemlélteti, a világ legnagyobb ismert uránlelőhelyei Ausztráliában, Kazahsztánban és Kanadában találhatóak. Ezek az országok jelentős részét képezik a globális urántartalékoknak (51%) a 130 USD/kgU egységár alatt kitermelhető urán tekintetében. Az EU-ban korábban számos helyen volt uránbánya, ám ezek nagyrésze mára bezárásra került. Romániában és Csehországban továbbra is egy-egy helyen bányásszák az uránt, míg Finnországban, Svédországban, Spanyolországban, Portugáliában, Lengyelországban, Szlovákiában és Magyarországon is vannak (voltak) tervek, kezdeményezések a bányák újrainyitására. 2021-ben 11.975 tonna uránt importált az EU, amellyel a teljes világpiaci kereskedelem közel negyedét lefedte (Wallner & Stein, 2012; World Nuclear Association, 2024).



9. ábra: Urántartalékok³ a világban (2021. év végi állapot szerint)

Forrás: World Nuclear Association (2024)

A World Nuclear Association (2024) jelentése szerint 2020. végén a globális éves urántermelés a világ teljes reaktorfelhasználásának 79%-át fedezte. Ezen túl elegendő urántartalék áll rendelkezésre az atomenergia folyamatos használatához és a nukleáris kapacitás jelentős növeléséhez a villamosenergia-termelés és más felhasználási módok tekintetében a következő 130 évben, figyelembe véve a 2020. évi uránszükségletet. Az előrejelzések szerint középtávon, 2040-re a kelet-ázsiai régióban lesz a legnagyobb az éves uránszükséglet. Az elmúlt évtizedben az urániapi árak ugyan jelentősen csökkentek a 2011-es fukusimai katasztrófa következtében, amely negatív hatással volt a feltárási és bányafejlesztési projektekre is, de a világ nukleáris kapacitása a belátható jövőben várhatóan növekedni fog, köszönhetően a globális energiaigény növekedésének, valamint a tiszta energiára való átállás szándéka miatt (Nuclear Energy Agency és International Atomic Energy Agency, 2023).

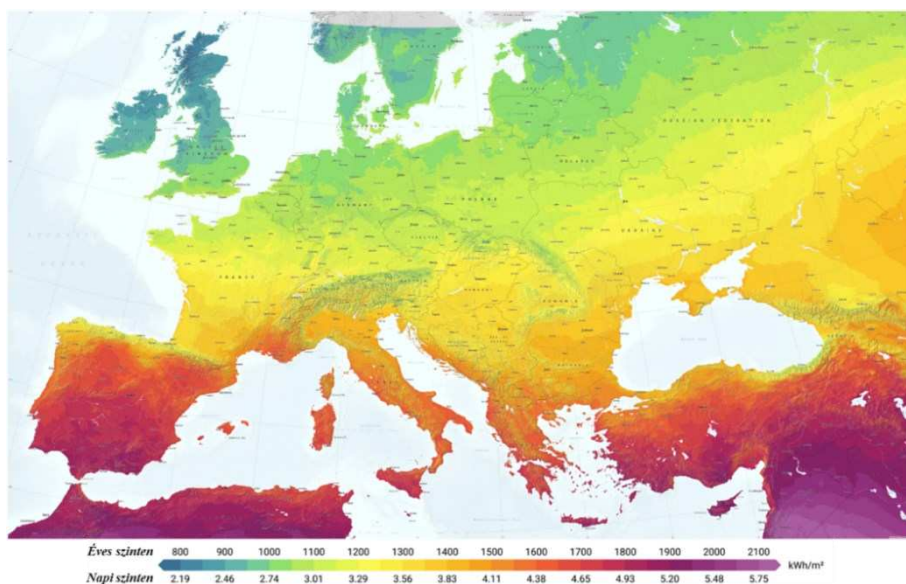
Megújuló energiaforrások és -hordozók területi sajátosságai

Az eddigiek alapján arra a következtetésre lehet jutni, hogy az EU energetikai felhasználhatóságú ásványvagyon regionális eloszlásának tekintetében egyáltalán nem bővelkedik számottevő lehetőségekkel és tartalékokkal. Mindazonáltal a megújuló energiaforrások és -hordozók terén ez

³ 130 USD/kgU egységár alatt kitermelhető urántartalékokra vonatkozólag.

a helyzet már egészen más képet mutat, hiszen, ha csak általánosságban arra gondolunk, hogy mindenhol süt a nap, fúj a szél, van növényzet és vízkészlet, és forró kőzetanyag található a földkéregben, akkor az érvek egyértelműen a megújuló mellett szólnak. Érdekes azonban egyesével is megnézni ezeket a tényleges megújuló energia potenciálokat az EU tekintetében, itt is a lehető legfrissebb adatokat alapul véve.

Első körben a napenergiában rejlő potenciálokat vizsgáljuk meg röviden. Az EU-ban a napenergia potenciálja országonként eltérő, függ a földrajzi helyzettől, az éghajlati viszonyoktól és a napsütéses órák számától. Ezáltal különböző országokban különböző mértékű az átlagosan elérhető teljesítménysűrűség (10. ábra). Dél-Európában, például Spanyolországban, Olaszországban és Görögországban általában magasabb a napenergia potenciál a több napsütéses óra és erősebb napfény miatt. Északabbra, például az Egyesült Királyságban és Skandináviában, alacsonyabb a potenciál.



10. ábra: Horizontális besugárzáson alapuló napenergia potenciál Európában

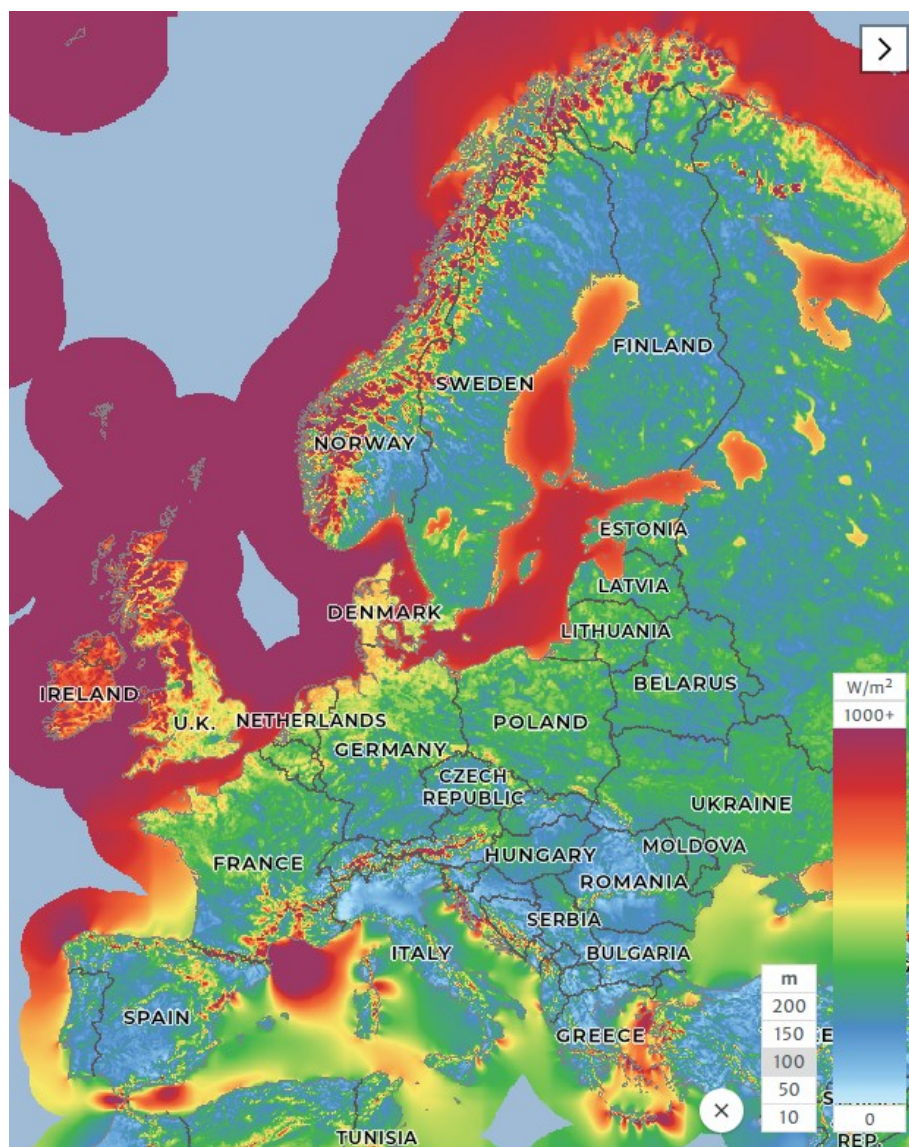
Forrás: Solargis (2021) alapján saját szerkesztésű ábra

Ehhez képest a 2023-ra becsült EU-ban telepített napenergia-kapacitás (263 GW) közel 60%-a az északibb európai területeken, például Németországban (82,1 GW), Hollandiában (22,5 GW), Franciaországban (18,7 GW), Belgiumban (9,5 GW) és Skandináviában található, ahol az időjárási körülmények és adottságok nem a legoptimálisabbak éves átlagban

nézve. Ezek közül is az egy főre vetített kapacitásban Hollandia, Németország és Belgium vezeti az élmezőnyt. Így potenciálisan más területekhez képest viszonylag alacsonyabb napenergia-hozamokat tudnak elérni. Egyébként Spanyolország közel 50%-kal nagyobb napenergia-potenciállal rendelkezik, mint Németország. Ezt felismerve, Spanyolországban is rohamosan épülnek ki az új kapacitások, így 2023-ban jelenleg 35,6 GW-al a második a rangsorban. E rangsor végén jelenleg pedig Horvátország, Luxemburg, Málta és Lettország áll, mind 0,5 GW alatti összkapacitással. A jövőbeli kilátásokat tekintve pedig, az előrejelzések szerint 2027-re a legrosszabb esetben is 471 GW-ra bővül a kumulált napenergia-kapacitás az EU-ban, míg legjobb esetben ez akár meghaladhatja a 700 GW-ot is. Mindezen kilátások élvonalába továbbra is Németország prognosztizált Spanyolország és Olaszország mellett (SolarPower Europe, 2023).

A napenergia potenciál mellett a szélenergiában rejlő lehetőségek kiaknázása jelenti az EU másik fő megújulókon alapuló energiastratégiáját. E tekintetben az EU-ban jelentős lehetőségek rejlenek mind az onshore, mind az offshore szélerőművek telepítésében (11. ábra). Az előbbiek széles körben elterjedtek a kontinensen, például Németországban, Spanyolországban és Franciaországban, míg az offshore szélerőművek tekintetében az Északi-tenger és a Balti-tenger kiváltképp optimális helyszínek minősül, emiatt nem véletlen az sem, hogy Európa vezető szerepet tölt be a tengeri szélenergia területén, 2022-ben a globális tengeri szélenergia-kapacitás 47,1%-át tudhatja magáénak (Global Wind Energy Council, 2023).

Az EU 2023-ban az onshore és offshore szélerőművek tekintetében, együttesen 220 GW szélenergia kapacitással rendelkezett, melynek jelentős része Németországhoz (31,8%), Spanyolországhoz (13,9%) és Franciaországhoz (10,4%) tartozott. Az összkapacitás nagyrésze szárazföldi erőművekből tevődik össze (91%). Ugyanakkor offshore tekintetében is Németországé (9 GW) a vezető szerep, melyet Hollandia (5 GW) és Dánia (3 GW) követ. Az előrejelzések tekintetében, összhangban az EU-s direktívákkal nagyjából majdnem akkora kapacitásbővülésre számítanak a szakértők 2030-ra, mint amekkora a teljes EU-s szélenergia kapacitás volt 2020-ban (200 GW) (WindEurope, 2024).

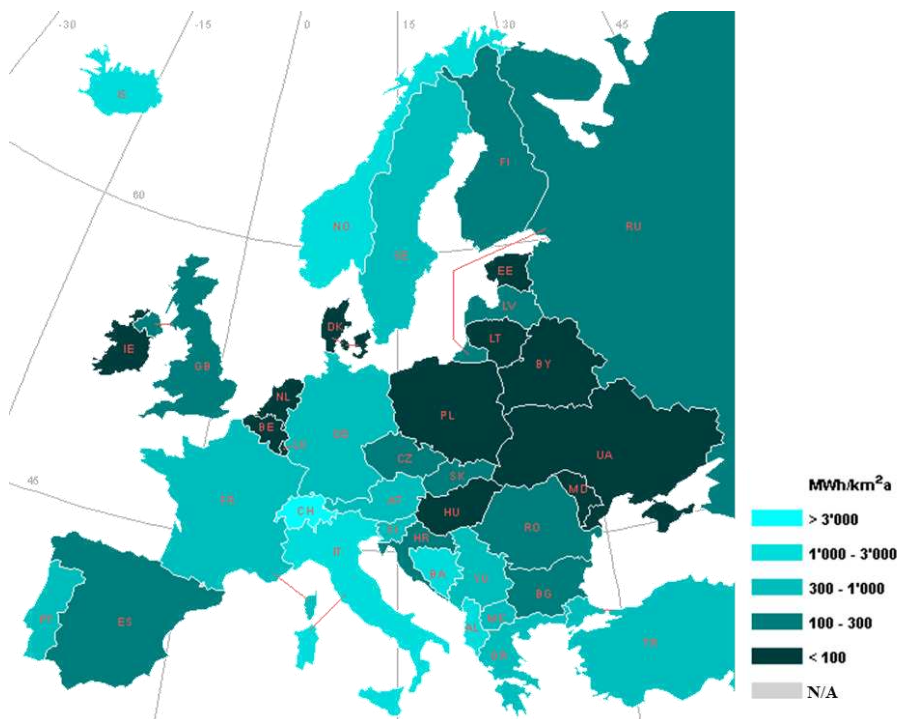


11. ábra: A szélenergia potenciál Európában

Forrás: Davis et al. (2023) és DTU Wind Energy és World Bank Group (én.)

A vízenergia hasznosítása az EU-ban régmúlta nyúlik vissza. Napjainkban a vízenergia egy érett szektornak minősül mind építési-technológiai, mind földrajzi potenciálok tekintetében. Ahogy a 12. ábra is szemlélteti, az egy négyzetkilométerre jutó energiapotenál tekintetében leginkább Európa északi, közép és délkeleti részein van kimagasló potenciál. Ezért

is van az, hogy 2022-ben Európában legnagyobb kiépített vízenergia kapacitással (beleértve a szivattyús tárolókat is) Norvégia (34 GW) és Törökország (32 GW) rendelkezett.



12. ábra: Elméleti vízenergia potenciál Európában

Forrás: Global Energy Network Institute (2017) alapján saját szerkesztésű ábra

Az EU esetében nagyjából 152 GW kiépített vízenergia kapacitásról beszélhetünk, melynek további jelentős része Franciaországhoz (26 GW), Olaszországhoz (23 GW) és Spanyolországhoz (20 GW) kapcsolódik. Tehát összességében többnyire hegyvidéki környezetben találhatóak meg az EU-s kiépített kapacitások és döntően duzzasztós víztározós formában, míg a folyóvízes, valamint nyitott és zárt rendszerű szivattyús-tározós erőművek egyenlő arányban oszlanak meg. Az Eurostat jelentése alapján a szakértők a vízenergiához kapcsolódó beruházási lehetőségeket főleg a már meglévő infrastruktúra hibrid megújuló technológiákkal történő modernizálásában (pl. hidrogéntermelés vagy úszó naperőmű kiépítésének lehetősége), másrészt pedig a szivattyús víztározók további kiépítéseiben,

illetve a magasan fekvő területeken a gleccserek visszahúzódása által létrejövő új tavak víztározós lehetőségeiben látják. Mindazonáltal, a vízerőművek számára a legmegfelelőbb helyszíneket már kiaknázták, további bővítések esetében számos akadályozó tényező van, mint például a szigorú szabályozási környezet, környezetvédelmi területek vagy magas beruházási költségek (Quaranta et al., 2023).

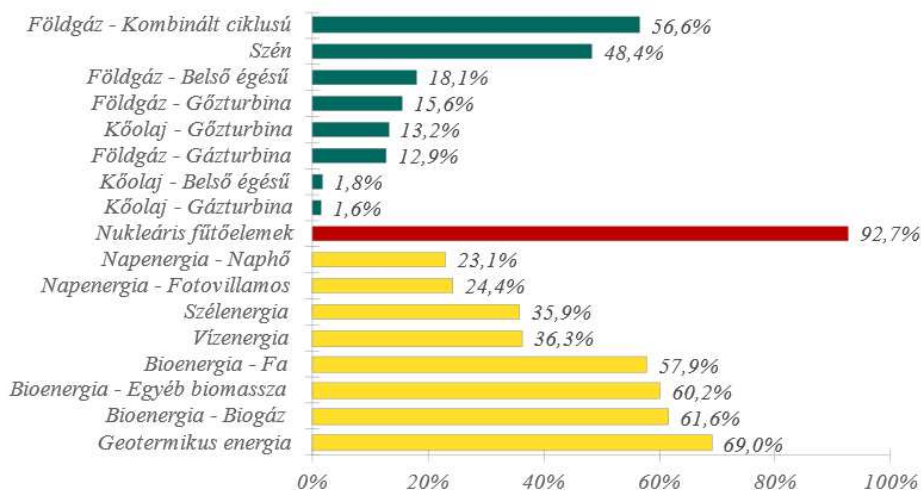
A geotermikus potenciálról csak röviden érdemes megemlékezni, mivel elsősorban inkább távfűtésre és egyéb épületenergetikai célokra alkalmas, mintsem villamosenergia-termelésre. A 40 °C és 150 °C közötti hőmérséklet ideális a távfűtéshez, míg villamosenergia-termeléshez elméletileg legalább 90 °C hőmérsékletű forrásokra van szükség a gőz előállításához, amely meghajthatja a turbinákat, de ez a gyakorlatban inkább a 150 °C feletti hőmérsékletet jelenti. Ezért is van az, hogy világszerte a geotermikus energia csak kb. 30 országban biztosít villamosenergia-termelési lehetőséget, míg több mint 80 ország használja fűtésre-hűtésre (International Renewable Energy Agency és International Geothermal Association, 2023). A 13. ábrán látható, hogy az egyes országok földtani adottságai milyen mértékben alkalmasak a geotermikus energia kiaknázására, azaz adott területegységre vetítve mekkora energia nyerhető ki. Alapvetően a geológiailag aktív zónák, mint pl. a vulkanikus területek jellemzően magas geotermikus gradienssel rendelkeznek, ami elősegíti a geotermikus energia gazdagságos kinyerését.

2021-ben a geotermikus villamosenergia-termelés globális beépített kapacitása 15,96 GW volt. 2022-ben egész Európát tekintve (3,5 GW) Törökországban volt a legnagyobb villamosenergia-termelést szolgáló geotermikus kapacitás beépítve (1,7 GW), míg Izlandon található területarányosan a legnagyobb a potenciál, mely 754 MW kiépített kapacitással bírt. Az EU-ban Olaszországban (916 MW) volt a legmagasabb, míg a soron következő Németországban már csak 50,1 MW állt rendelkezésre villamosenergia-termelésre (European Geothermal Energy Council, 2023). Fontos kiemelni, ahogy a fenti ábra is mutatja, Magyarországon jelentős geotermikus potenciál áll rendelkezésre, ám eddig ez nem került még kellően kiaknázásra – melyet jól érzékeltet a beépített kapacitás 3,35 MW nagysága –, habár itthon is szintén inkább a fűtés-hűtéshez kapcsolódó geotermikus energia részarányt lehetne növelni (Kujbus és Talamon, 2024).

Érdemes még szót ejteni a bioenergiában rejlő potenciálokról is regionális aspektusban. Alapvetően a bioenergia Európa legfontosabb megújuló energiaforrása, 2021-ben a megújuló energiaforrásokból származó

Az egyes energiaforrások és -hordozók villamosenergia-előállításban betöltött szerepük

Fontosnak tartjuk azt is kiemelni, hogy különböző energiaforráshoz, illetve erőműhöz kapcsolódó beépített kapacitások azonos értékei (pl. 20 MW beépített kapacitással rendelkező nap- és szélerőmű) még nem jelentik azt, hogy ugyanakkora mértékben fognak tudni villamos energiát előállítani. Ezt számos erőműspecifikus tényező befolyásolja. Ezért érdemes összevetni a különféle energiaforrások és -hordozók (pontosabban a kapcsolódó technológiák) kapacitásfaktorait is (14. ábra). Ez azt mutatja meg, hogy egy adott erőmű adott időegység alatt ténylegesen termelt, valamint ugyanezen időszak alatt folyamatosan, teljes üzemmódban elméletileg előállítható villamos energiának az aránya mekkora. Más szóval azt méri, hogy egy adott erőmű milyen gyakran működik maximális teljesítményen.



**14. ábra: Különböző közüzemi méretű generátorok
átlagos kapacitásfaktorai az áramtermelésben**

Forrás: U.S. Energy Information Administration (2024) alapján saját készítésű ábra

Az Egyesült Államokbeli erőművek alapján végzett felmérés alapján jól látszik, hogy messze az atomerőművek rendelkeznek a legmagasabb kapacitásfaktoral (92,7%), tehát egy átlagos atomerőmű az üzemidő több mint 90 százalékában termel áramot. Ehhez képest egy fotovillamos naperőmű csak 24,4%-ban termel áramot. Az összehasonlítást ugyanakkor megfelelő kontextusban érdemes tenni, figyelembe véve valamennyi erőmű esetében az

egyedi jellemzőket (pl. naperőművek időjárásfüggő jellege, atomerőművek fel-le kapcsolásának gazdasági és technikai jellemzői stb.).

Emellett Evans et al. (2009) rámutat arra, hogy az erőművek összehasonlítása során a bemeneti elsődleges energiaforrások és -hordozók villamos energiává történő átalakításának hatékonysága fontos paraméter. Ugyanis az átalakítás során is éri veszteség a rendszert az erőművek be rendezéseinek hatásfokából adódóan, valamint a szállítás során a távvezetékek ellenállása miatt. Hatékonyságot lehet növelni pl. kombinált ciklusú erőművekkel, ahol a gázturbinából keletkező hőenergiával gőzt fejleszthetünk, meghajtva ezzel egy másodlagos generátort, vagy olyan (ko-, illetve trigenerációs) erőművekkel, ahol ugyan másodlagosan nem áramfejlesztés a cél, de legalább a keletkező extra energia hasznosulhat fűtés, illetve fűtés-hűtés céljából. Továbbá magának az erőműnek is van egy alap önfogyasztása. Mindezeket együttvéve, jelentős energiaveszteség történik az átalakítás során. Az 1. táblázat tartalmazza az egyes erőműtípusok átlagos villamosenergia-termelő hatékonyságát.

1. táblázat: A villamosenergia-termelés hatékonysága különböző technológiák használata mellett

Technológia	Hatékonyság
Geotermikus energia	10% – 20%
Napenergia - Fotovillamos	4% – 22%
Napenergia - Naphő	8% – 26%
Atomenergia	30% – 36%
Bioenergia	16% – 43%
Szélenergia	23% – 45%
Kőolaj-tüzelésű	30% – 42%
Széntüzelésű	32% – 45%
Földgáz	45% – 53%
Vízenergia	– 95%

Forrás: Evans et al. (2009) és Lawson (é.n.) alapján saját készítésű táblázat

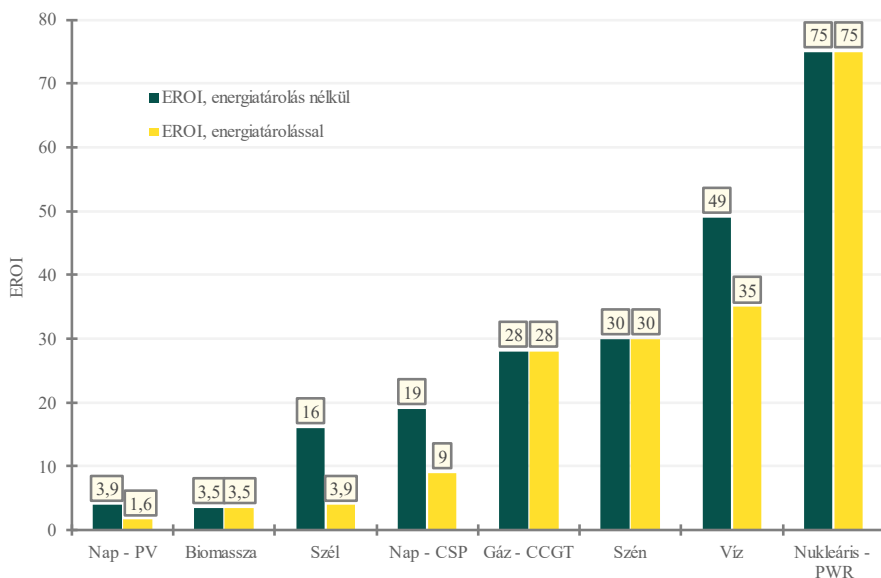
Messze a vízerőművek rendelkeznek a legnagyobb hatékonysági fokkal, melyet a földgáztüzelésű hőerőművek követnek. A nap- és szélenergia esetében a hatékonyság nagyban függ a technológiától és a telepítés során figyelembe vett földrajzi adottságoktól, míg a geotermikus energiánál a

hőforrás hőmérséklete határozza meg a keletkező gőz mennyiségét, így a generátor áramtermelő képességét (Evans et al., 2009).

Az átlagos kapacitásfaktorok és a hatékonysági arányok mellett érdemes még bevonni az értékelési körbe az Energetikai Megtérülési Mutatót (*Energy Return on Investment, EROI*) is. Az EROI azt mutatja meg, hogy egy adott energiaforrás kitermelése során mekkora energiát nyerünk vissza a befektetett energiához képest. Tehát ha egy energiaforrás kitermelése során 1 egységnyi energia befektetése mellett 10 egységnyi energia nyerhető ki, akkor az EROI értéke 10 (10:1) (Hall et al., 2014). Továbbá Hall et al. (2009) kutatásuk során arra a következtetésre jutottak, hogy egy új energiaprojektnek minimum 3-as EROI-val kell rendelkezni, vagy ennél jelentősen magasabbal, ha figyelembe vesszük a humán erőforrás szükséglet, valamint a negatív környezeti hatások kompenzálására tett erőfeszítések energiaköltségét is. Weißbach et al. (2013) munkásságában ez a küszöb EROI-érték 7-re tehető, mely alatt a szerzőtársak szerint a fejlett gazdaságokban funkcionális problémák keletkezhetnek a társadalom működésében, míg ennél magasabb arány esetében pedig nagyobb a potenciál a gazdasági növekedésre.

Az EROI mutató használatában ugyanakkor rejlik egy bizonytalansági faktor is, nevezetesen az, hogy hol kell meghúzni a figyelembe vevő rendszerhatárokat. Ezért érdemes külön megvizsgálni az EROI mutató nevezőjét és számlálóját is, mint bemeneti és kimeneti energiamennyiségeket. Egy átlagos energiaprojekt három fázisból tevődik össze: kivitelezés, működtetés és leszerelés, ahol mind a három fázisban történik energiabefektetés, míg energiakinyerés csak a működtetés során jelentkezhet. A nehézségek alapvetően ott kezdődnek, hogy a jelenlegi energiarendszerünket képező energiaprojektek többnyire ma is működésben vannak, tehát nem lehet megbecsülni pontosan se az összesen befektetett, se a kitermelt energiamennyiségeket. A befektetett energiákhoz szokták sorolni a felhasznált anyagokba beágyazott energiákat, a humán erőforrások energiafogyasztását, az erőművek önfogyasztását, valamint egyéb kapcsolódó szolgáltatások energiaigényességét. Ezek nagy része közvetett energiának minősül, így nagyon nehezen becsülhetőek meg, míg a leszerelési költségek nem is szerepelnek e listán, hiszen azoknak a pontos bekövetkezési idejük és mértékük nem adható meg. Hasonlóan nehézségek adódnak a kitermelt energiamennyiség számszerűsítésénél, hiszen mialatt a végső energiák hasznos energiákká alakulnak át, további veszteségek (szállítási, konverziós) érik a megtermelt energiamennyiséget. Továbbá az energia-

keresleti görbék, valamint külső környezeti hatások szélsőséges eseményeket generálhatnak a megtermelt és hasznosításra kerülő mennyiségek tekintetében, amelyeket akár érdemes lehet kiszűrni a számításokból (pl. magas energiakereslet idején alacsony szélereősség szemben egy fordított esettel, avagy olajkiömlések és gázszivárgások esetei). Tehát megnehezíti az EROI számítását és a különböző erőforrások EROI-értékeinek összehasonlítását a standardizált megközelítés hiánya (Hall et al., 2014; Kelly, 2016; Weißbach et al., 2013). A 15. ábra számos energiaforrás és -hordozó EROI-értékeit mutatja meg Weißbach et al. (2013) eredményei alapján.



15. ábra Különböző energiaforrások és -hordozók szerinti EROI-értékek energiatárolással vagy anélkül

Forrás: Weißbach et al. (2013) alapján saját készítésű ábra

Az ábrán két érték látható mindegyik erőműtípushoz, mivel a korrekt összehasonlíthatóság miatt figyelembe kell venni a tárolókapacitás kiépítésének szükségességét is egyes energiaforrások időjárás- és termelésfüggő jellege miatt (pl. nap- és szélereőművek), míg a tüzelőanyagok magukban tárolják az energiapotenciált, ezért nincs szükség külső tárolóra. A becslések szerint jelenleg az atomenergiának van a legnagyobb EROI-a, míg a legalacsonyabbal a fotovillamos naperőművek rendelkeznek. Összességében viszont, ha azzal számolunk, hogy az elérhető karbonsemleges

technológia folyamatosan javulni fog a jövőben (mind az output, mind az input tekintetében), akkor ezzel együtt az EROI-mutató is javulni fog.

Tehát míg a nap- és szélenergia megújuló energiaforrásnak minősül, addig az ezek kiaknázására kiépített – és jelen technológiai korlátok között behatárolt – erőművek már nem feltétlenül tekinthetők megújulónak összességében, mivel jelentős az energiaigényessége ezen eszközök legyártásának és a felépítmények megvalósulásának, nem beszélve arról, hogy ezen erőművek tervezett hasznos élettartama 25-30 évre tehető szakértői becslések alapján. Mindazonáltal, az EROI-mutató hasznos információval tud szolgálatni afelől, hogy milyen energiamegtérülése van az egyes projekteknek.

Következtetések

A természeti erőforrások fontossága vitathatatlan az emberiség és a gazdaság számára. Így az erőforrásokért folytatott versengés egy olyan globális jelenség, amely az emberi történelem kezdete óta jelen van, és mely a különböző természeti erőforrások, mint például víz, termőföld, ásványi anyagok, olaj és gáz iránti igényből fakad. Ezek az erőforrások alapvetően szükségesek a gazdasági fejlődéshez, a társadalmi jóléthez és a nemzetbiztonsághoz, így az államok, vállalatok és egyéb csoportok gyakran versenyeznek a hozzáférésért és az ellenőrzésért.

Tanulmányunkban arra kerestük első körben a választ, hogy az EU milyen tartalékokkal rendelkezik jelenleg a főbb ásványvagyonokat illetően. Vizsgálatunk során arra a következtetésre jutottunk, hogy az EU se a fosszilis tüzelőanyagok, se a nukleáris fűtőanyag tekintetében nem számít gazdasági nagyhatalomnak az ismert és gazdaságosan kitermelhető tartalékok ismeretében. Így a hagyományos és atomerőműveinkhez szükséges energiahordozók importálása nélkülözhetetlen, szerencsére a szállítást és a stratégiai készletezést ezen energiahordozók fizikai tulajdonságai lehetővé teszik. Erre jó gyakorlati példa a téli gáztárolás, amely lehetővé teszi az energiaellátók számára, hogy a téli hónapokban, amikor a gázfogyasztás jelentősen megemelkedik a fűtési igények miatt, kielégítsék a megnövekedett keresletet. Ez a gyakorlat segít kiegyensúlyozni a gázpiac szezonális ingadozásait, stabilizálhatja az árakat, és növeli az energiaellátás biztonságát azáltal, hogy biztosítja a szükséges gázmennyiséget a csúcsgázfogyasztási időszakokban, vagy amikor a megújulóakra az időjárási körülmények miatt nem számíthatunk. Másik oldalról nézve, az olaj- és

gázipar különösen érzékeny a geopolitikai kockázatokra, mivel ahogy láthattuk az ásványvagyon földrajzi koncentrációját, javarészt a világ politikailag és gazdaságilag jelenleg instabilabb régióinak bővelkednek ezen tüzelőanyagokkal. Végezetül az atomenergia, így az uránbányászat társadalmi elfogadottsága nagyon megosztó, ugyanakkor várhatóan az urán iránti globális kereslet növekedni fog a jövőben az atomenergia tiszta és viszonylag gazdaságos villamosenergia-termelő jellegéből kifolyólag.

Ezek után a megújuló energiapotenciálok kerültek megvizsgálásra, melyből az következik, hogy az EU különböző régiói különböző mértékben rendelkeznek nap-, szél-, víz- és geotermikus energia potenciálokkal. Összességében tehát jelentős, de egyúttal korlátozott potenciálok rejlenek a megújuló energiaforrások és -hordozók további kiaknázásában az EU-ban. Az EU preferenciarendszere megoszlik az egyes lehetőségek között, mely nem csak földrajzi adottság, hanem energiapolitikai irányelvek és gazdasági szempontok kérdése is. Ettől eltekintve az EU egy integrált megközelítést alkalmaz, így valamennyi megújuló energiaforrás fejlesztését ösztönzi, amely lehetővé teszi az erőforrások diverzifikációját és az energiaellátás biztonságának növelését. Azonban a megújulók melletti elköteleződés mellett számos korábban már ismertetett problémát és korlátot kell áthidalnia az EU-nak. Szemben az energiahordozókkal, a megújuló energiák tárolása még nem megoldott, korunk egyik nagy kihívását jelenti. Az infrastruktúra korszerűsítésének, valamint a villamosenergia-hálózat folyamatos bővítésének igénye, a sokszor lassú engedélyeztetési folyamatok, illetve számos esetben a lakosság ellenállása további nehézségeket okozhatnak a megújuló energiát felhasználó erőművek terjedésében. Továbbá kiemelendő az is, hogy bár a megújuló energiarendszerek jelenleg alacsonyabb EROI-értékekkel bírnak, mint a hagyományos tüzelőanyag alapú erőművek, valamint nem lehet elmenni amellett sem, hogy bár maguknak a primer megújuló energiaforrásoknak egy jó része, úgymint a nap- és szélenergia kevésbé függenek a földrajzi korlátoktól, ugyanakkor ezek hasznosíthatóságához szükséges eszközök előállítására, üzemeltetésére, majd leszerelésére is energia (anyag és munkaerő)-igényes folyamat. Az ezekhez kapcsolódó földrajzi megoszlások pedig fontos (rég-új) geoenergetikai dilemmákat vetnek fel – tehát mindezeket figyelembe véve szükséges kiértékelni mind a megújuló, mind pedig a megtérülő és társadalmilag hasznot nyújtó pozitív jelzőket valamennyi energiarendszert illetően.

Végezetül, a harmadik kutatási kérdésünk arra kereste a választ, hogy mindezen energiaforrásokra és -hordozókra épülő villamosenergetikai technológiák közül melyek a legoptimálisabban felhasználhatóak gazdasági aspektusban. A megújuló energiák közül messze a vízenergiában rejlő potenciál hasznosítható a leghatékonyabban a mozgási energia villamos energiává történő átalakítására, mivel magas az átalakítás hatásfoka, relatíve magas EROI-val rendelkezik, valamint képes egyenletesen, megbízhatóan energiát biztosítani. Továbbá az energiatárolás és a terheléskiegyenlítés révén a hálózat stabilitása szempontjából is jelentős előnyökkel jár. Ezért a vízenergia az egyik leghatékonyabb és legmegbízhatóbb villamosenergia-termelő forrás. A másik pedig az atomenergia, mely a legnagyobb energiaintenzitással, kapacitásfaktorial és EROI-val rendelkezik az összes közül. Összességében tehát a primer energia elektromos árammá történő konvertálhatóságának vizsgálata is rendkívül kritikus a természeti erőforrások energetikai szempontú értékelése során, mely jelentősen képes árnyalni az egyes energiaforrások és -hordozókban rejlő potenciálokat azok hozzáférhetőségétől függetlenül.

Köszönetnyilvánítás

A tanulmány elkészítését a Pécsi Tudományegyetem, Földtudományok Doktori Iskola támogatta.

Irodalomjegyzék

- Bihari, P. (2012). *Energetikai alapismeretek*. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék.
- Bioenergy Europe (2022). *Statistical Report Bioelectricity 2022*. Bioenergy Europe.
URL: <https://tinyurl.com/3ss754rx>
- Bohn, P. (1992). Meg nem újuló természeti erőforrásaink. *Gazdaság & Társadalom*, 3(1-2.), 142–183.
- Bora, G., és Korompay, A. (2003). *A természeti erőforrások gazdaságtana és földrajza*. Aula Kiadó.
- BP (2021). *Statistical Review of World Energy 2021*.
- Davis, N. N., Badger, J., Hahmann, A. N., Hansen, B. O., Mortensen, N. G., Kelly, M., Larsén, X. G., Olsen, B. T., Floors, R., Lizcano, G., Casso, P., Lacave, O., Bosch, A., Bauwens, I., Knight, O. J., Potter van Loon, A., Fox, R., Parvanyan, T., Krohn Hansen, S. B., ... and Drummond, R. (2023). The Global Wind Atlas: A High-Resolution Dataset of Climatologies and Associated Web-Based Application. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 104(8), E1507–E1525.
DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0075.1>
- DTU Wind Energy, & World Bank Group. (é. n.). *Global Wind Atlas*. Retrieved October 22, 2023
URL: <https://tinyurl.com/2tn7w246>
- EMBER (é. n.). *European wholesale electricity price data*. EMBER. Retrieved September 26, 2023
URL: <https://tinyurl.com/2s3umep7>
- Energy Institute (2023). *Statistical Review of World Energy 2023*.
- European Environment Agency (2023). *The European biomass puzzle Challenges, opportunities and trade-offs around biomass production and use in the EU*.
DOI: <https://doi.org/10.2800/834565>
- European Geothermal Energy Council (2023). *EGEC Geothermal Market Report*.
URL: <https://tinyurl.com/46asy7p4>
- Eurostat. (é. n. -a). *Energy production by energy source. Gross production of electricity and derived heat from combustible fuels by type of plant and operator* [nrg_ind_pehcf]. Luxembourg: Eurostat.
URL: <https://tinyurl.com/5fpn7j7n>
- Eurostat. (é. n. -b). *Energy production by energy source. Gross production of electricity and derived heat from non-combustible fuels by type of plant and operator* [nrg_ind_pehnf]. Luxembourg: Eurostat.
URL: <https://tinyurl.com/4bpkkhtf>
- Eurostat. (é. n. -c). *Natural gas imports by partner country. Energy imports dependency* [nrg_ind_id]. Luxembourg: Eurostat.
URL: <https://tinyurl.com/4hp5jx35>
- Evans, A., Strezov, V., & Evans, T. J. (2009). Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), 1082–1088.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.03.008>

- Global Energy Network Institute (2017). *Renewable Energy Resources in Europe*. Global Energy Network Institute.
- Global Wind Energy Council (2023). *Global Offshore Wind Report 2023*.
URL: <https://tinyurl.com/mt9svh6z>
- Hall, C. A. S., Balogh, S., & Murphy, D. J. R. (2009). What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have? *Energies*, 2(1), 25–47.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en20100025>
- Hall, C. A. S., Lambert, J. G., & Balogh, S. B. (2014). EROI of different fuels and the implications for society. *Energy Policy*, 64, 141–152.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>
- International Renewable Energy Agency, & International Geothermal Association (2023). *Global geothermal market and technology assessment*.
URL: <https://tinyurl.com/28ru48wc>
- Kelly, M. J. (2016). Lessons from technology development for energy and sustainability. *MRS Energy & Sustainability*, 3(2), 1–13.
DOI: <https://doi.org/10.1557/mre.2016.3>
- Kerekes, S. (2007). *A környezetgazdaságtan alapjai*. Aula Kiadó.
- Kujbus, A., & Talamon, A. (2024). Preparing Geothermal Energy Profiles in the Pannonian Basin in Hungary. *49th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.
- Lawson, B. (é. n.). *Electricity Generating and Distribution Efficiency. The Electropaedia*. Woodbank Communications Ltd.
- Mádai, F. (2011). *Ásványvagyron gazdálkodás* (Elektronik). Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar.
- Molnár, S. (2021). *Energetikai alapismeretek*. Magyar Mérnöki Kamara.
- Nuclear Energy Agency, & International Atomic Energy Agency (2023). *Uranium 2022: Resources, Production and Demand*.
URL: <https://tinyurl.com/56dmtkd7>
- Quaranta, E., Georgakaki, A., Letout, S., Kuokkanen, A., Mountraki, A., Grabowska, M., Gea Bermudez, J., & Tattini, J. (2023). *Clean Energy Technology Observatory: Hydropower and Pumped Hydropower Storage in the European Union – 2023 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets*. Publications Office of the European Union.
DOI: <https://doi.org/10.2760/841176>
- Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2023). *Energy*. Our World in Data.
URL: <https://tinyurl.com/mtxve6ef>
- Sarpong, S. (2021). Geopolitics of Natural Resources. In D. Crowther & S. Seifi (Eds.), *The Palgrave Handbook of Corporate Social Responsibility* (pp. 1–21). Palgrave Macmillan.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22438-7_15-1
- Smil, V. (2018). *Energy and Civilization*. MIT Press.
DOI: <https://doi.org/10.7551/mitpress/9780262035774.001.0001>
- Solargis (2021). *Solar resource maps of Europe*. Solargis.
URL: <https://tinyurl.com/42t9u3x6>
- SolarPower Europe (2023). *EU Market Outlook for Solar Power 2023-2027*.
URL: <https://tinyurl.com/zevx6zh5>
- Szilágyi, I. (2018). *Geopolitika* (Második kiadás). Pallas Athéné Könyvkiadó.

- Tietenberg, T. H., & Lewis, L. (2012). *Environmental & Natural Resource Economics* (9th ed.). Pearson Education.
- U. S. Energy Information Administration (é.n.). *International Energy Data*. Energy Information Administration. Retrieved August 6, 2023
URL: <https://tinyurl.com/hbe3mn9u>
- U. S. Energy Information Administration (2024). *Electric Power Monthly*. U. S. Energy Information Administration.
URL: <https://tinyurl.com/yre9ntuy>
- Vajda, G. (2004). *Energiaellátás ma és holnap*. MTA Társadalomkutató Központ.
- Vidakis, I., Baltos, G., & Balodis, J. (2017). Geopolitics of energy versus geoenergy of politics. *Social Sciences Bulletin*, 2(25), 38–55.
- Wallner, A., & Stein, P. (2012). *Uranium Mining in and for Europe*.
- Weißbach, D., Ruprecht, G., Huke, A., Czerski, K., Gottlieb, S., & Hussein, A. (2013). Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants. *Energy*, 52, 210–221.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.029>
- WindEurope (2024). *Wind energy in Europe. 2023 Statistics and the outlook for 2024-2030*.
- World Nuclear Association (2024). *Nuclear Power in the European Union*. World Nuclear Association; World Nuclear Association.
URL: <https://tinyurl.com/32mwyf3p>
- Yergin, D. (2011). *The Quest: Energy, Security, and the Remaking of the Modern World*. Penguin Press.

