

Erőművek életciklus-elemzése a fajlagos anyagfelhasználás tükrében

Korényi Zoltán

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, Budapest, Magyarország

Beérkezett: 2021. 04. 29.; Elfogadva: 2021. 07. 12.

Összefoglaló

A dolgozat témája a különböző erőműfajták életciklusra vonatkozó fajlagos anyagigényének a vizsgálata. Az elemzések a nemzetközi szakirodalmi források felhasználásával történtek. Módszere, a bázisadatok elemzése, majd az anyagigényeknek az erőmű beépített teljesítményére és az életciklus alatt megtermelt villamosenergiára vonatkoztatott fajlagos értékek meghatározása. Az eredmények azt mutatják, hogy a nap- és szélenergiaerőművek elterjedésével a hagyományos erőművek által felhasznált fosszilis energiaforrások (pl. a szén) bent maradnak ugyan a földben, de cserébe az új technológia legyártásához a hagyományos anyagokból (beton, acél, alumínium, réz stb.) fajlagosan jóval nagyobb mennyiségekre lesz szükség. Emellett megnő a ritkán előforduló fémek (gallium, indium stb.) felhasználása, ami Európában, a lelőhelyek hiányában, új kockázatokkal jár.

Kulcsszavak: erőmű, életciklus-elemzés, anyagigény, anyagellátási kockázat

Life-cycle analysis of power plants in the light of specific material use

Zoltán Korényi

Budapest University of Technology and Economics, Department of Energy Engineering, Budapest, Hungary

Summary

The topic of the study is to determine the material use of different power plant types. This is a part of the known life cycle analysis (LCA). The aim of LCA is to determine the impact of human activity on nature. The procedure is described in the standards (ISO 14040/41/42/42). Under environmental impact we mean changes in our natural environment, air, water, soil pollution, noise and impacts on human health. In the LCA, the environmental impact begins with the opening of the mine, continues with the extraction and processing of raw materials, and then with the production of equipment, construction and installation of the power plant. This is followed by the commissioning and then operation of the power plants for 20-60 years, including maintenance. The cycle ends with demolition, which is followed by recycling of materials. The remaining waste is disposed of. This is the complex content of life cycle analysis. Its purpose is to determine the ecological footprint of man.

The method of the present study is to isolate a limited area from the complex LCA process. This means determining the amount of material needed to build different power plants, excluding mining and processing of raw materials. Commercially available basic materials are built into the power plant's components.

The research is based on the literature available in the international area. The author studied these sources, analysed the data, and checked the authenticity. It was not easy because the sources from different times, for different power plants showed a lot of uncertainty. In overcoming the uncertainties, it was a help that the author has decades of experience in the realisation of power plants. It was considered the material consumption related to the installed electricity capacity of the power plant (tons/MW) as basic data.

The author then determined the specific material consumptions, allocated to the electric energy generated during the lifetime, in different power plants.

The calculation is carried out with the help of the usual annual peak load duration hours and the usual lifetime of the power plants.

The results show that with the spread of solar and wind energy, the fossil energy sources previously needed for conventional power plants will remain inside the Earth, but in exchange for the production of new technological equipment from traditional structural materials (concrete, steel, aluminium, copper and plastic), the special need

multiplies. If we compare the power plants using renewable energy with the electric energy produced during the life cycle of a nuclear power plant, the specific installed material requirement of a river hydropower plant is 37 times, that of an onshore wind farm it is 9.6 times, and that of an outdoor solar power park is 6.6 times higher.

Another important difference is that wind turbines, solar panels and batteries also require rare materials that do not occur in Europe (e.g. gallium, indium, yttrium, neodymium, cobalt, etc.). This can lead to security risks in Europe in the long run.

Keywords: power plant, life-cycle assessment, specific material need, material supply risk

Bevezetés

Földünk eltartó képessége és az emberiség túlzott természetfogyasztása közötti egyensúly megbomlása, valamint környezetszennyezésünk kritikus helyzete közismert. Amióta a természet élő és élettelen alkotóelemeinek a védelme az emberi figyelem központjába került, a hagyományos erőművek, a kibocsátott szennyezőanyagaik miatt, a közbeszédben általában negatív színben jelennek meg. Az őket leváltani szándékozó, megújuló energiát hasznosító erőművek pedig többnyire szinte csak pozitív jelzőket kapnak. A hagyományos erőművek létesítésének erőforrásai a bányászat útján kinyert nyersanyagok (kő, kavics, acél, réz stb.) és a folyamatos üzemeltetéshez szükséges primer energiafajták (szén, földgáz, uránium stb.). A megújuló energiát hasznosító erőművek esetében a primer energia (a nap és a szél) úgy mond „ingyen” jön, ezért csak bányászati erőforrásokra van szükség. A létesítésükhöz szükséges anyagok két csoportra oszthatók: hagyományos anyagokra (beton, acél, réz stb.) és a kevésbé közismert anyagokra (mangán, króm, molibdén, nikkel, szilícium, valamint az ún. ritka fémek, mint a diszprózium, neodimium, praeodimium, terbium stb.).

A megújuló energiát hasznosító erőművek tehát egyrészt a fosszilis primer energiát bent hagyják a földben, másrészt a hagyományos szerkezeti anyagokon kívül újabb, többnyire drága anyagokat használnak fel.

Jelen tanulmány célja a felhasznált anyagmennyiségek meghatározása, azok fajlagosítása, a különböző típusú erőművek anyagfogyasztásainak az összehasonlítása, és ezekből következtetések levonása. Az időjárásfüggő termelésből származó villamosenergia-felesleg akkumulátoros tárolásának anyagigénye nem tárgya a dolgozatnak.

Civilizációnk létezésének alapfeltétele a *villamosenergia-szolgáltatás* folyamatossága. Napi életvitelünk villamosenergia nélkül nem lehetséges. A villamosenergia az erőművektől kiterjedt vezetékhalozatokon keresztül jut el a fogyasztókig. A halozatok nagyfeszültségű (750 kV, 400 kV, 220 kV, 132 kV), középfeszültségű (35 kV, 20 kV, 10 kV) és kisfeszültségű vezetékekből állnak, amelyek között transzformátorok biztosítják a feszültségátalakítást. Az erőművektől a vezetékhalozaton át a fogyasztói mérőórákig terjedő villamosenergia-ellátó rendszer legfőbb fizikai jellemzője az *50 Hertz frekvencia*. Ezt a rendszerirányítónak állandó értéken kell tartania úgy, hogy a folyamatosan változó fogyasztói teljesít-

ményekhez minden időpillanatban egyensúlyt biztosító *erőművi betáplálási forrásokat* rendel. Ha ez az egyensúly egy elég szűk határon belül nem tartható, akkor a villamosenergia-rendszer összeomlik. Az ilyen, a katasztrófa kategóriájába tartozó események általában ritkán fordulnak elő. (Kaliforniában 2019-ben vihar és erdőtüzek miatt, Texasban, 2021 februárjában regionális „black-out” miatt maradtak milliók áram nélkül. Oka nemcsak a szélsőséges időjárás, hanem leginkább a vezetékhalozatok hiányos műszaki állapota, továbbá a jelentős arányt képviselő időjárásfüggő erőművek szél- és naphiány miatti állása. Ehhez még egyes hagyományos erőművek rendelkezésre állási problémái is hozzájárultak.) A rendszer szintű kockázat folyamatos, ezért annak elkerülése magas színvonalú műszaki rendszert, és működtetési felkészültséget igényel.

A villamosenergia-rendszerben az erőművek feladata a primer energia átalakítása villamosenergiává, és annak betáplálása a vezetékes hálózatba. Jelen tanulmány az *„egytermékes”* erőművekre fókuszál, amelyek – hőszolgáltatás nélkül – kizárólag villamosenergiát szolgáltatnak. Az erőművek legfontosabb technológiai jellemzője a megbízható *ellátásbiztonság*.

Magyarország hosszú távú *biztonságvédelmi* stratégiájában fontos helyen szerepel a villamosenergia-*ellátás biztonsága*. A primer energiaforrások, a képzett munkatársak, a természeti tényezők, a versenypiaci árak, a pénzügyek stb. kockázatán kívül előtérbe kerültek a *nyersanyagok* és a kulcsfontosságú műszaki termékek, a pótkatatrészek hozzáféréseinek geostratégiai kockázatai is. A hagyományos erőművek alapanyagainak (acél, réz, alumínium, kő, kavics, cement stb.) elérhetősége sok országban biztosított, így ezek esetében a nemzetközi piacon többé-kevésbé kiegyensúlyozott ellátással lehet számolni. Nem ez a helyzet a rohamosan növekvő nap- és szél-erőművek területén. A növekvő volumenű napelemek, a szél-erőművek és az akkumulátorok különleges anyagokat, ritka fémeket is igényelnek, amelyek közül egyesek előfordulása az egész világon csak néhány országra koncentrálódik.

A különösen kritikus anyagok közé tartoznak a gallium (napelem-vékonyréteg, teljesítményelektronika), a neodim (állandó mágnes, lézer), az indium (napelem vékonyréteg, kijelzők), szkandium (tüzelőanyag-cella, Al-ötvező), diszprózium (generátor, motorok), a lítium és a kobalt (akkumulátorok). A rézigény is rendkívüli mértékben növekszik.

Európában eddig az ellátásbiztonság központi témáját a tüzelőanyag-import (főleg a földgáz) jelentette. A jövőben a megújuló energiahasznosítás térhódításával ez kibővül a ritka fémek importjának a kockázatával is. Mivel ezek nyersanyagforrásainak nagy többsége Európán kívül található, felgyorsult a technológiák geostratégiai veszélyeinek a kutatása is.

Az Európai Unióban, de különösen Németországban az „Energiewende” miatt erre különösen nagy súlyt fektetnek.

A vizsgálatok módszertana

A gyakorlati alkalmazhatóság érdekében elvégzett vizsgálatokhoz értelmezzük először a korlátozott terjedelmű életciklus-elemzést (life-cycle assessment, LCA), az annak alapjául szolgáló szakirodalmat, valamint a fajlagos anyagigények számításának módszerét.

Életciklus-elemzés

Az ember ökológiai lábnyomának számszerűsítésére a tudomány az életciklus-elemzés módszertanát alkalmazza. Az LCA a termékek, a folyamatok és szolgáltatások teljes életciklusa alatti környezetterhelését vizsgálja. Ez a teljes életút a „bölcsőtől a sírig” tart. Ennek szakaszai: a nyersanyagok kitermelése és feldolgozása, a termékgyártás, a szállítás, az erőmű építési munkálatai és a technológia szerelése, aztán a sokéves üzemeltetési szakasz, végül pedig a lebontás és az újrahasznosítás, illetve a hulladékelhelyezés. Környezetterhelésen a természeti környezetünk megváltoztatását, a levegő, a vizek, a talaj szennyezését, a zajhatást és az emberi egészséget befolyásoló hatásokat értjük. Az életciklus-elemzés eljárásait szabványosították (ISO 14040/41/42/42).

Ez a tanulmány arra vállalkozott, hogy a gyakorlatban legjellemzőbb erőműveinkre elkészíti a felhasznált anyagok leltárát, majd azt viszonyítja a „hozamhoz”, vagyis a működési élettartam alatt megtermelt villamosenergia mennyiségéhez. Az anyagok leltárán a beépített szerkezetek és alkatrészek anyagai értendők. A leltárnak nem része a nyersanyag-kitermelés és -feldolgozás anyagmértéke, valamint a működési élettartam alatt beépített cserealkatrészek. Az LCA ezen szűkített terében kapott fajlagos anyagfelhasználási mutatók alkalmasak arra, hogy a különböző erőműveket mint „anyagfogyasztókat”, a környezeti beavatkozás szempontjából is összehasonlítsuk. Alkalmas továbbá arra is, hogy az erőművi stratégiák készítésekor a beszerzési, a szállítási, a raktározási és az építési volumeneket megbecsüljük.

Szakirodalmi visszatekintés

A környezetvédelem erőteljes előtérbe kerülésével, a megújuló energiahasznosítás felgyorsulásával, Németországban az „Energiewende” bevezetésével, az életciklus-

elemzés szabványosított (ISO 14040) módszertanát felhasználva, az 1990-es évek második felében felgyorsultak azok a kutatások, amelyek az ökológiai lábnyomok számszerű vizsgálatát tűzték ki célul. Ennek élenjáró szellemi műhelyei lettek a svájci ETH Zürich, az USA-beli National Renewable Energy Laboratory (NREL), a Stuttgarter Egyetemen az Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Münchenben a Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), Norvégiában a Trondheimi Egyetem, a Norwegian University of Science and Technology (NTNU) és még sokan mások. Ezeknek a kutatásoknak fontos célja volt az is, hogy elemezzék az ellátásbiztonság szempontjából kritikus anyagokat, azok földrajzi előfordulását, a jövőbeli elérhetőségét, a geopolitikai, a helyi társadalmi és politikai kockázatokat. Az EU-ban ezt szolgálja az Európai Bizottság Joint Research Centre (JRC) tudományos szervezete is.

Az áttanulmányozott irodalmi forrásokból kiderül, hogy az erőművek anyagmérlegének precíz, általánosítható, tudományos pontosságú meghatározása a jelenlegi adatbázisok szintjén aligha lehetséges. Ennek számos oka van. A legjellemzőbb, hogy mivel a megépített erőművek kapacitása és technológiája a hely szerint (folyóvíz, talajmechanikai adottságok, klimatikus viszonyok, magasságsszintek, helyi előírások stb.), időben is, a megrendelő szándéka és a komponensek gyártói konstrukciója szerint változik. Vagyis az erőmű nem szériatermék. Az erőműépítés jellemzően több évig tartó folyamata, a közben fejlődő technológiák, az új anyagfajták, anyagminőségek is hozzájárulnak a változékonysághoz.

Ezen bizonytalanságokon túl nehézséget jelent az adatok hozzáférése, azok begyűjtése, későbbi validálhatósága, a sokféleség miatti rendszerbe szedése. Ilyen nemzetközi adatgyűjtési előírások sem léteznek. A szerző által áttanulmányozott források is visszatükrözik ezeket a nehézségeket. Az ellenmondásos adatoknál, a kiválasztás egyes eseteinél segített a szerző évtizedes erőmű-létesítési tapasztalata is.

A felhasznált források közül az egyik legrégebbi, leg részletesebb tanulmány (*Briem et al. 2005*) a német Gazdasági Minisztérium megbízásából készült. Célja az volt, hogy a kiválasztott technológiákra (tüzelőanyag-cella, szél-erőművek, biomassa és fosszilis erőművek) a 2010. esztendőig előrevetítve végezzen életciklus-vizsgálatot. A Stuttgarter Egyetem energetikai intézetének (IER) szellemi műhelyében készült elemzések közül (*Marheineke 2002*) a teljes életciklusukra vonatkozó környezetterhelésekre koncentrált, az anyagfelhasználásokat a bánya szintjén értelmezi (bauxit, vas, réz és mészkő). Erre is építve készült (*Mayer-Spolm et al. 2007*) jelentése, amely a modellszámításai eredményeit a teljes életciklus alatti kumulált anyag, energia és kibocsátási mérlegre vonatkoztatja, kiegészítve a károsanyag-kibocsátások emberi egészségre gyakorolt kockázatával, amelyet az „elvesztett emberi életek” (Years of Life Lost, YOLL) indikátorral számszerűsít. A „stuttgarter iskola”, társintézmé-

nyeket is bevonva, az „Energiewende” hatásaira és kihívásaira keresi a választ. A nap- és szélenergia nagy-mértékű kapacitásbővítésének két komoly hatása van. Egyrészt a nap- és szélenergia kicsi energiasűrűsége (W/m^2) miatti nagy fajlagos anyagfelhasználás nagymértékben megnöveli a hagyományos anyagok (beton, acél, alumínium, réz, üveg és műanyag) fajlagos mennyiségi igényét. Másrészt új, speciális anyagokra van szükség. A szélenergia generátoraihoz neodym és diszprózium, a napelemekhez pedig – típusaik szerint – szilícium, kadmium, indium, gallium, diselenit stb. szükséges. Ez a folyamat a nyersanyagok szűkössége és Európa számára hátrányos földrajzi leelőhelyei miatt a jövőben nagy kockázatokat jelenthet. Erre több tanulmány keresi a választ (Blengini et al. 2020; Carrara et al. 2020; Wetzel 2015; 2016).

A felhasznált tanulmányokból megállapítható, hogy az adatgyűjtés fent vázolt nehézségei miatt az erőművek tonnában vagy t/MW értékkel megadott anyagfelhasználási értékei nagy szórásokat mutatnak. Az alapul vett adatbázis mintegy 130 értéket tartalmaz. Ebben a szórások, a szén- és földgáztüzelésű erőműveknél a betoni igény esetében $\pm 50\%$ -on belüli, az acéligénynél $\pm 30\text{--}40\%$ -nyi, rézigénynél $30\text{--}70\%$ tartományban voltak megállapíthatók. A nap- és szélenergia erőműveknél az acéligény szórása 20% -nyi, a rézigény $30\text{--}70\%$ -os tartományban mozgott. A nemzetközi irodalomban általában az erőművekre elvégzett LCA elemzések többsége főleg a CO_2 -kibocsátásokra, az energiahozamokra, az ökológiai és humán hatásokra koncentrálnak. A felhasznált anyagmennyiségek elemzése főleg a napelemek és az akkumulátorok kapcsán, csak az utóbbi időben kapott nagyobb lendületet. A fent leírtak miatt ezért célszerű már a bázisadatokat is kellő óvatossággal kezelni. Az életciklus alatt megtermelt villamosenergiára vonatkoztatott fajlagos anyagmennyiségek is eltérőek lehetnek aszerint, hogy az esztendő 8760 naptári órájához képest mekkorára vesszük fel az éves csúcskihasználási óraszámokat, továbbá hány évre adjuk meg a működési élettartamot.

Az erőművekbe beépített anyagok fajlagos tömegének meghatározása

A fajlagos anyagfelhasználást a következő két egyenlettel értelmezhetjük:

- a beépített anyagok tömegét, a *beépített villamos teljesítményre* vonatkoztatva:

$$M = m_p \cdot P \quad [\text{tonna}]$$

ahol:

- M [t]: a beépített anyagok tömege;
- m_p [t/MW]: fajlagos anyagmennyiség a beépített villamos teljesítményre vonatkoztatva;
- P [MW]: beépített villamos teljesítmény.

- a beépített anyagok tömegét a működési *élettartam* alatt megtermelt villamos energia mennyiségére vonatkoztatva:

$$M = m_E \cdot P \cdot \tau_{cs} \cdot i \cdot 10^{-3} \quad [\text{tonna}]$$

ahol:

- M [t]: a beépített anyagok tömege;
- m_E [kg/MWh]: fajlagos anyagmennyiség az életciklus alatt megtermelt villamos energiára;
- $E = P \cdot \tau_{cs} \cdot i$;
- P [MW]: beépített villamos teljesítmény;
- τ_{cs} [h/év]: csúcskihasználási óraszám (a 8760 órához képest);
- i [év]: az üzemi évek száma.

A vizsgált erőművek és alapadataik

Vizsgálataink szempontjából a villamosenergiát termelő erőműveket két csoportra osztjuk:

- *hagyományos erőművek*: kőszén- és barnaszén-tüzelésű, földgáztüzelésű (nyitott gázturbina ciklusú és kombinált gőz-/gázturbina ciklusú), valamint atomerőművek;
- *megújuló energiát hasznosító erőművek*: időjárásfüggő, változókéony teljesítményű, nap- és szélenergia erőművek, a folyami vízerőművek és a szabályozható biomassza-tüzelésű erőművek.



1. ábra | A Gönyüi Erőmű (saját forrás)



2. ábra | Kémény- és kazánalozás (saját forrás)

Annak érdekében, hogy az energetikában nem járatos olvasónak is legyen elképzelése a valóságos erőművekről, közzéteszünk néhány fényképet a szerző saját tapasztalati múltjából. Az *1. ábra* a Győr közelében, a Duna partján megépített, folyóvízhűtésű kombinált ciklusú (gáz- és gőzturbinás) Gönyüi Erőművet mutatja. Beépített villamos teljesítménye 433 MW, a beépített gázturbina tömege ~300 t, a gőzturbináé ~200 t, a főtranszformátoré ~400 t. A *2. ábra* a 60 m magas kémény és a 25 m magas hőhasznosító-kazán alapozását mutatja.

A *3. ábra* Magyarország első közcélú, 2001-ben üzembe helyezett, 20 kV-os hálózathoz csatlakozó széltornyát, a Kulcsi Szélerőművet mutatja. A torony 65 m magas, a rotor átmérője 44 m, teljesítménye 600 kW. A torony tömege ~90 t. A 14 m átmérőjű vasbeton alapja gombafej alakú, amelybe 120 m³ betont építettek be. Európában, szárazföldi (on-shore) kivitelben általában a 2–3 MW körüli széltornyok terjedtek el.

A *4. ábra* egy széles körben elterjedt, tipikus szabadtéri, horganyzott acéllábakon álló napelem park paneljeit mutatja. Területigényüket tájékoztató jelleggel, 1 ha/MW körüli értékkel lehet becsülni. A piacon elterjedt napelem modulok többségükben szilícium alapanyagú monokristályos és polikristályos technológiával készülnek.



3. ábra | Kulcsi Szélerőmű (saját forrás)



4. ábra | Napelem park (Fotó: Bóka Zsuzsa)

Az erőművek anyagfelhasználási bázisadatai

Az irodalmi adatok feldolgozását követően az erőművek fajlagos anyagigényeit, az m_p [tonna/MW] jellemzővel, a szerző az *1. táblázatban* foglalta össze. (A táblázat számai a következő forrásokra támaszkodnak: Briem et al. 2005; Wetzel 2015; 2016; Carrara et al. 2020; Marheineke, 2002; Mayer-Spohn et al. 2007.) A szélerőművek esetén a táblázatban a nem hagyományos anyagok (összesen 1,8 t/MW) nincsenek külön kimutatva, de az „Összes” oszlop száma tartalmazza ezeket. Ezen, nem hagyományos anyagok közé tartoznak a generátor állandó mágneséhez szükséges neodym és diszprózium, továbbá krom, mangán, molibdén, nikkel, praseodymium és terbium.

Hasonlóan a naperőművek 2. és 3. tételénél is az „Összes” oszlop tartalmazza a táblázatban nem feltüntetett szilíciumot (4 t/MW) és ezüstöt (0,02 t/MW) is.

A hagyományos erőművek esetében a táblázat „Összes” tételén felül, az „egyéb anyagok” mennyisége többetként 0,5–1,5%-ra tehető.

A különböző erőművek életciklus alatt megtermelt villamosenergia-mennyiségeinek kiszámításához szükség van az éves csúcskihasználási óraszámokra és az üzemeltetés éveinek a számára. Ezeket a gyakorlatban használatos adatokat a *2. táblázat* tartalmazza. A szél- és naperőművek csúcskihasználási órázámjai a hazai meteorológiai körülményeket veszik figyelembe.

A vizsgálatok eredményei

Az *1. és 2. táblázatban* szereplő adatok felhasználásával, a fenti egyenletek alapján elvégzett, életciklus alatt termelt villamos energiára vonatkoztatott fajlagos anyagmennyiségek (m_E) értékeit a *3. táblázat* tartalmazza. A táblázat számai azt mutatják meg, hogy egy adott erőmű teljes működési életciklusában megtermelt villamosenergia egy kilowattórájára hány kilogramm beépített anyag jut.

A *3. táblázat* számait megvizsgálva láthatjuk, hogy a megújuló energiát hasznosító víz-, szél- és naperőművek fajlagos anyagfelhasználása többszöröse a hagyományos

1. táblázat | Hagyományos anyagok teljesítményre vonatkoztatott fajlagos mennyiségei (m_p)

S. sz.	Erőművek fajtái	Beton	Acél	Alumínium	Üveg	Réz	Műanyag	Összes
		t/MW	t/MW	t/MW	t/MW	t/MW	t/MW	t/MW
1.	Szélpark – szárazföld	369	152,1	0,7	8,0	2,1	4,60	538
2.	Naperőmű – tetőn	0	16,2	44,7	80,49	10,7	6,57	129
3.	Naperőmű – szabadtéren	61	67,9	7,5	80,49	26,6	8,6	222
4.	Biomassza	159	51,0	1,3	0,003	0,6	0,1	212
5.	Víz erőmű – folyami duzzasztással	11 026	203,9	0,1	0,001	3,12	0,1	11 234
6.	Barnaszénerőmű	250	100,0	0,6	0,0208	1,3	1,0	353
7.	Feketeszén-erőmű	250	80,0	0,6	0,0217	1,3	1,0	333
8.	Kombinált ciklusú erőmű	98	31,0	0,2	0,12	0,62	0,47	130
9.	Atomerőmű	424	63,1	0,21	0,01	1,52	0,1	489

(Saját szerkesztés)

2. táblázat | Az erőművek működési életciklusának adatai

S. sz.	Erőművek fajtái	Fajlagos beépített össz tömeg	Csúskihasználási óraszám (τ_{cs})	Élettartam
		t/MW	h/év	év
1.	Szélpark – szárazföldön	538	2200	25
2.	Naperőmű – tetőn	129	1000	30
3.	Naperőmű – szabadtéren	222	1100	30
4.	Biomassza tüzelésű (faapríték)	212	7000	30
5.	Víz erőmű – folyami duzzasztással	11 234	5000	60
6.	Barnaszénerőmű	353	7000	35
7.	Feketeszén-erőmű	333	7000	35
8.	Kombinált ciklusú erőmű	130	7500	30
9.	Atomerőmű	489	8000	60

(Saját forrás)

3. táblázat | Hagyományos anyagok életciklus alatt megtermelt villamos energiára vonatkoztatott fajlagos mennyiségei (m_E)

S. sz.	Erőművek fajtái	Beton	Acél	Alumínium	Üveg	Réz	Műanyag
		kg/MWh	kg/MWh	kg/MWh	kg/MWh	kg/MWh	kg/MWh
1.	Szélpark – szárazföldön	6,709	2,765	0,0127	0,145	0,0382	0,08364
2.	Naperőmű – tetőn	0,000	0,541	1,4890	2,683	0,3567	0,21900
3.	Naperőmű – szabadtéren	1,839	2,058	0,2273	2,439	0,8061	0,26061
4.	Biomassza-erőmű	0,757	0,243	0,0062	0,0000	0,0029	0,00048
5.	Víz erőmű – folyami duzzasztással	36,754	0,680	0,0003	0,0000	0,0104	0,00033
6.	Barnaszénerőmű	1,020	0,408	0,0024	0,0001	0,0053	0,00408
7.	Feketeszén-erőmű	1,020	0,327	0,0024	0,0001	0,0053	0,00408
8.	Kombinált ciklusú erőmű	0,435	0,138	0,0009	0,0005	0,0028	0,00207
9.	Atomerőmű	0,884	0,131	0,0004	0,00002	0,0032	0,00021

(Saját számítások)

erőművek fajlagos anyagigényeinek, ahol a víz erőművek tömege nagyjából beton. A sok szám közötti tájékozódás megkönnyítésére vezessük be a relatív anyagfelhasználási mutatót. Mivel az *atomerőművekhez* közismerten nagy mennyiségű beton és acél szükséges, válasszuk azt összehasonlítási alapul. Legyen az atom-

erőmű életciklusa alatt megtermelt villamosenergiára vonatkoztatott anyagigénye (m_E) *egységnyi*, $A = 1$. A többi erőműnél azt vizsgáljuk, hogy az α esetükben az atomerőműhöz képest hány-szoros (n) anyagmennyiséget kell beépíteni ($n \times A$). Ezeket a relatív anyagfelhasználási értékeket mutatja a 4. táblázat.

4. táblázat | Erőművek életciklus alatti villamosenergiára vonatkoztatott relatív anyagfelhasználása. Referencia: atomerőmű, A = 1 egységnyi

S. sz.	Erőművek fajtái	Beton	Acél	Alumínium	Üveg	Réz	Műanyag
		n × A	n × A	n × A	n × A	n × A	n × A
1.	Szélpark – szárazföldön	7,6	21	29	6 982	12	401
2.	Naperőmű – tetőn	0,0	4,1	3403	128 784	113	1051
3.	Naperőmű – szabadterén	2,1	16	519	117 076	255	1251
4.	Biomassza-erőmű	0,9	1,8	14	0,7	0,9	2,3
5.	Víz-erőmű – folyami duzzasztással	42	5,2	0,8	0,2	3,3	1,6
6.	Barnaszénerőmű	1,2	3,1	5,6	4,1	1,7	20
7.	Feketeszénerőmű	1,2	2,5	5,6	4,3	1,7	20
8.	Kombinált ciklusú erőmű	0,5	1,0	2,0	26	0,9	10
9.	Atomerőmű. A =	1	1	1	1	1	1

(Saját forrás)

A 4. táblázat számai alapján megállapítható, hogy amikor a megújuló energiát hasznosító erőművek fosszilis energiaforrásokat váltanak ki, akkor cserébe, a szerkezeti elemek gyártásához, Földünk hegyeiből és a földfelszín alól sokszoros mennyiségű más anyagot kell kitermelni.

Az össztömegben belül *betonból* a *folyami duzzasztott víz-erőmű* 42-szer, a *szélpark* 7,6-szer, a *szabadtéri naperőmű park* (a lábazat alapjaihoz) 2,1-szer annyi betonmennyiséget igényel, mint egy atomerőmű. *Acélból* a *folyami víz-erőműnek* 5,2-szer, a *szabadtéri naperőmű parknak* 16-szor, a *szélparknak* 21-szer nagyobb a relatív acéligénye. *Alumíniumból* a *naperőművek* 500-szoros, illetve több ezerszeres fajlagos alumíniummennyiséget igényelnek. A napelemek óriási *üvegigénye* mindenki számára nyilvánvaló. A *naperőművek rézigénye* 100-200-szoros, a *műanyag-felhasználásuk* pedig nagyságrendileg 1000-szeres.

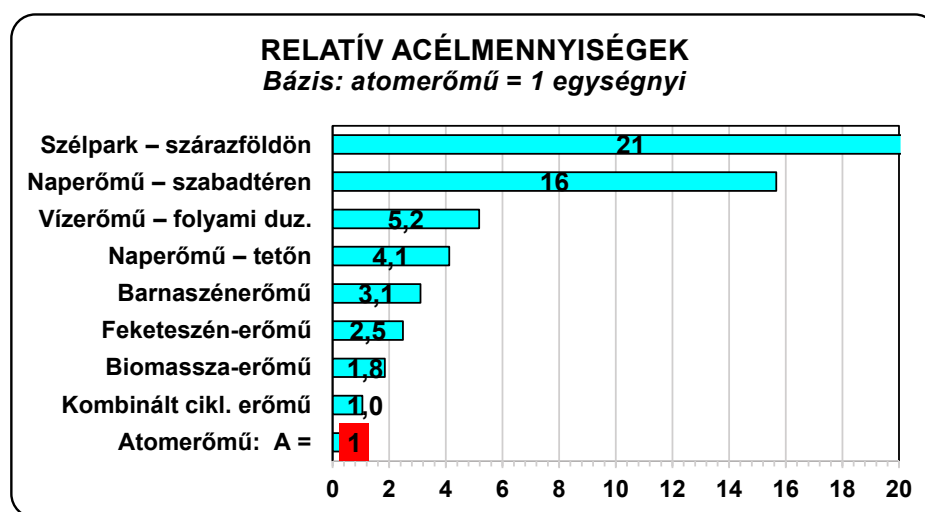
A naperőművek esetén megjegyezzük, hogy a fenti vizsgálatok a jelenlegi piac 95%-át kitevő *mono- és polikristályos szilícium* alapanyagú modulokat veszik figye-

lembe. Nem foglalkoznak a piac 4-5%-át jelentő vékonyfilmes napelem technológiákkal (CdTe, CIGS és a-Si). Ezek a szilíciumon és ezüstön kívül főleg az Európában nem előforduló anyagokat (kadmium, tellúr, indium, gallium, szelénium, germánium) használják.

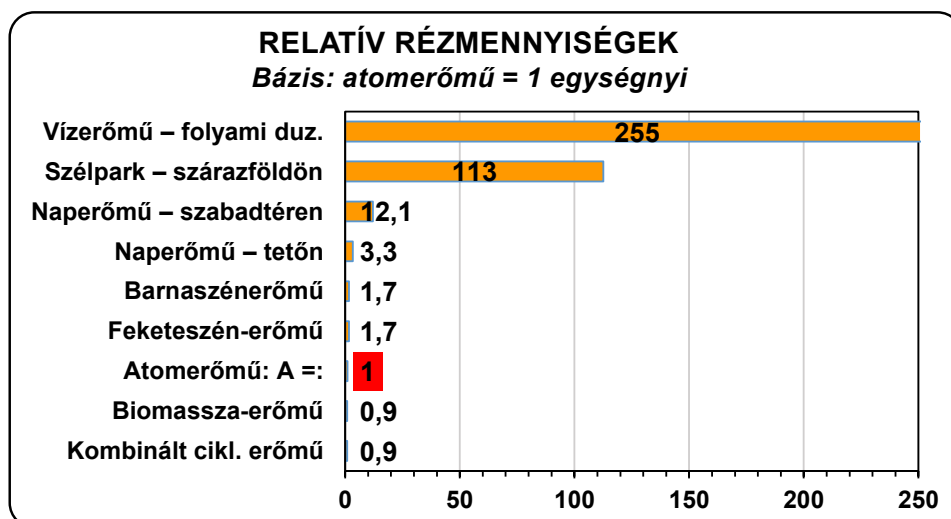
Természetesen a táblázatok számai – az irodalmi áttekintésnél leírtak miatt – a változatos, nem mindig beazonosítható körülmények okán, meglehetősen nagy bizonytalanságot mutatnak. Az arányok és a tendenciák viszont olyan súlyúak, hogy azokat az egyes technológiák komplex értékelésénél, az életciklus-elemzésekben, az ökológiai lábnyom vizsgálatánál nem lehet figyelmen kívül hagyni.

A végeredményt vizuálisan is alátámasztva, az egyes erőművi technológiák életciklusra vonatkoztatott *acéligény szerinti sorrendjét* az 5. ábrán mutatjuk be. A *rézigények szerinti sorrend* a 6. ábrán látható.

Belátható, hogy a fentiekben bemutatott fajlagos anyagjellemzők egyrészt árnyalják a „megújuló” energiahasznosítás ökológiailag csak előnyösnek hirdetett meg-



5. ábra | Életciklusra vonatkoztatott acélfelhasználások relatív sorrendje (Saját forrás)



6. ábra | Életciklusra vonatkoztatott rézfelhasználások relatív sorrendje (Saját forrás)

oldásait, másrészt a nemzetgazdaság számára is fontos szempontok további vizsgálatára sarkallhatják az illetékeket.

Összefoglalás

A környezetvédelem, az energetikai ellátásbiztonság és bizonyos nemzetbiztonsági szempontok is indokoltá teszik, hogy a hazai erőművi portfólió tervezésénél a beépítésre kerülő technológiák anyagfajtaát, a szükséges anyagmennyiségeket, azok földrajzi előfordulásait is a nemzetgazdasági tervezés fókuszába helyezzük. Az Európai Unióban külön szervezet (JRC) felelős ezért.

Jelen tanulmány azt a célt tűzte ki, hogy a rendelkezésre álló szakirodalmi források alapján értékelje az erőművek fajlagos anyagfelhasználásának a helyzetét. A fenti elemzésekből kiderül, hogy nem állnak rendelkezésre olyan, statisztikailag nagyszámú elemet tartalmazó adatbázisok, amelyekből a különféle erőműtípusokra megbízható, valós anyag-felhasználási értékek nyerhetők. Ez jelenleg az erőművi technológiák sokszínűsége miatt nem is várható el.

A kapott eredmények – e vázolt körülmények figyelembevételével – alkalmasak a természetfogyasztásunk megítélésére, a stratégiai irányaink továbbgondolására és a tendenciák további elemzéseire.

A vizsgálatokból levonható *első üzenet* gyakorlati jellegű: a fajlagos anyagigények ismerete segítséget jelenthet a nemzetgazdasági tervezés (beszerzési és szállítási volumenek, raktározás, a körkörös gazdaság tervezése, a komplex folyamatok költségelemzése stb.) számára.

A *második üzenete* az, hogy az emberiség ökológiai lábnyomait a megújuló energia hasznosításának mértékén felüli elterjesztése nem fogja eltüntetni, mert az *anyagfelhasználása sokszorosára nő*. Ennek oka, hogy az új technológiák kétségkívül visszafogják a fosszilis energiaforrások kitermelését, de cserébe a Föld más földrajzi

helyein felgyorsítják az egyes nyersanyagok kitermelését. Megtöbbszöröződik a hagyományos anyagok (kő, kavics, acél, réz), a nemesfémek és különleges anyagok (szilícium, ezüst, króm, mangán, molibdén, nikkel, kobalt, lítium stb.) kibányászása. Soha nem látott mértékben lesz szükség a földfémekre és a ritka földfémekre (alumínium, gallium, indium, ittrium, neodímium, terbium, szamárium stb.), vagyis a fosszilis energiaforrások kitermelését más nyersanyagok kibányászása váltja fel.

A *harmadik üzenete*, hogy a természetfogyasztásunk és ezzel a hulladéktermelésünk mértékét nem az új technológiákkal, hanem alapvetően fogyasztásunk csökkentésével lehet csak megoldani. Mivel a nagymértékű fogyasztáscsökkenés jelenleg irreálisnak tűnik, ezért már most fel kell készülni arra, hogy a nap- és szélenergiaerőművek 25–30 év működés után lebontásra kerüljenek. Kiemelt fontosságú feladattá válik, hogy a megnövekedett mennyiségű bontási anyagokat hogyan tudjuk újrahasznosítani, hogyan tudjuk beilleszteni a körkörös gazdaság folyamataiba.

A *negyedik üzenete*, hogy Európa számára megjelenik egy új geostratégiai biztonsági kockázat, mivel az új, különleges anyagok itt nem találhatóak meg. Egy esetleges krízishelyzetben az alkatrészek pótlásának ellehetetlenülése drasztikus árnövekedést okozhat és blokkolhatja az energiaszolgáltatást. Adott, nem várt esetben, nemzetbiztonsági kérdéssé is válhat.

Az *ötödik üzenet* kapcsolódik a 2020-ban kiadott Nemzeti Energiastratégia 2030 dokumentumhoz (NES-2). Eszerint 2021–2030 között meg fog épülni a Paks 2 Atomerőmű (2200 MW). További naperőművek (+4650 MW) létesülnek (a fele háztetőn, fele szabadterén). Három kombinált ciklusú erőmű (1800 MW) és biomassza erőművek (400 MW) fognak megépülni.

Ezeknek az erőműveknek a fenti módszer szerint becsült anyagmennyiség-igénye: kb. 2,2 millió tonna tömegű. Tétélezzük fel, hogy ezt az anyagmennyiséget 20

tonnás teherautókkal szállítjuk az erőművi telephelyekre. A Paks 2 atomerőmű anyagaihoz 54 ezer, a naperőművek anyagaihoz 41 ezer, a kombinált ciklusú erőművek anyagaihoz 12 ezer és a biomassza erőművek anyagaihoz kb. 5 ezer fuvarra lesz szükség. Ez 2030-ig összesen 112 ezer *teherfuvar* lebonyolítását jelenti. Ezen becsült adatok alkalmasak lehetnek további költség- és környezet-terhelési számítások elvégzésére is.

Zárásként tehát kijelenthető, hogy a fajlagos anyagigények fent meghatározott eljárása az ökológiai lábnyom elemzésén kívül, sok más célra is alkalmazható. Az is belátható továbbá, hogy a bemutatott bizonytalanságok további vizsgálatok elvégzését indokolják.

Irodalomjegyzék

- Blengini, G., Latunussa, C., Eynard, U., de Matos, C., Wittmer, D., Georgitzikis ... Pennington, D. (2020): Study on the EU's list of Critical Raw Materials. Final Report. Luxembourg: Publications Office of the European Union. p. 153.
- Briem, S., at al., dreizehn Autoren (2005): Lebenszyklusanalysen ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechniken. München: Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik; Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft (LEE); Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), p. 341.
- Carrara, S., Alves Dias, P., Plazzotta, B., & Pavel, C. (2020): Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system. Luxembourg: Publications Office of the European Union, p. 68.
- Marheineke, T. (2002): Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugung. Forschungsbericht. Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), pp. 194–224.
- Mayer-Spohn, O., Wissel, S., Voß, A., Fahl, U., & Blesl, M. (2005, 2007): Lebenszyklusanalyse ausgewählter Stromerzeugungstechniken. Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), p. 9.
- Muteri, V., & Curto, D. (2020): Review on Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic Panels. https://www.researchgate.net/publication/338384189_Review_on_Life_Cycle_Assessment_of_Solar_Photovoltaic_Panels, p. 39
- Smoucha, E., Fitzpatrick, K., Buckingham, S., & Konox, O. (2016): Life Cycle Analysis of the Embodied Carbon Emissions from 14 Wind Turbines with Rated Powers between 50 kW and 3,4 MW. Edinburg University, UK, Scotland's Rural College, UK, University of New England, Australia. Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Application, Vol. 6. No. 4. p. 10. DOI: 10.4172/2090-4541.1000211.
- Wetzel, M. (2015): Materialbedarf von Stromerzeugungssystemen - Szenarienpfadanalyse für Deutschland. Forschungsarbeit. Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Institut für Technische Thermodynamik, pp. 1–99.
- Wetzel, M. (2016): Materialbilanzen und Auswirkungen von Materialverfügbarkeit auf europäische Energieszenarien unter Berücksichtigung von Importen regelbaren Solarstroms. Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, p. 99.