

VILLAMOSENERGIA-TERMELÉS KÖRNYEZETI HATÁSAINAK ELEMZÉSE

Bodnár István

intézeti tanszékvezető, egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: vegybod@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A tanulmány a villamos energiatermelés környezeti hatásait mutatja be életciklus elemzés segítségével. Az erőművek a különböző energiaforrások révén eltérő mértékű hatást gyakorolnak a környezetre. A megújuló energiaforrások jellemzően kisebb karbon-lábnnyommal rendelkeznek és a primer energiafelhasználásuk is kedvezőbb. A hazai villamosenergia-rendszerben egyre nagyobb ütemben bővül a nap-elemes erőművek kapacitása, ezáltal az erőművi háttérrel fokozatos átalakulás jellemzi. A napelemek által szolgáltatott környezetbarát villamosenergiának köszönhetően csökkenhetnek a környezeti hatások.

Kulcsszavak: LCA, villamosenergia-termelés, karbon-lábnnyom, fosszilis energiahordozó kimerülés

Abstract

This paper presents the Life Cycle Assessment of Power Plants. The environment impact factors of power plants are different through the applied energy sources. The renewable energy source has less carbon-footprint and the fossil abiotic depletion potential is favorable. The capacity of photovoltaic power plants gradually growing in the Hungarian Grid thus, the power plant background undergoes a gradual transformation. Thanks to the environmentally friendly electricity provided by photovoltaic power plants, the environmental impact has been reduced.

Keywords: LCA, electric power generation, carbo-footprint, abiotic resource depletion potential

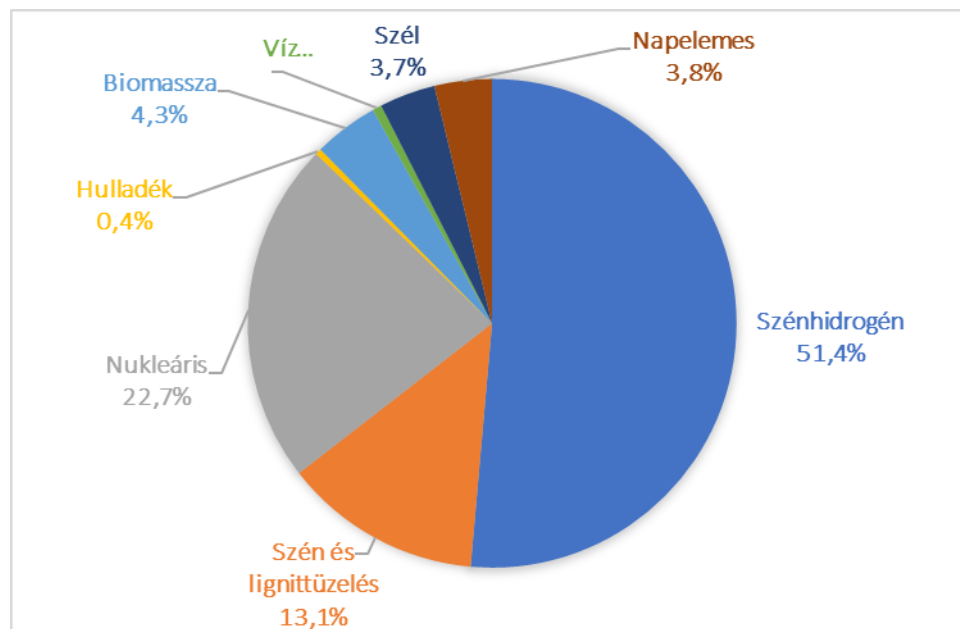
1. Bevezetés

A villamosenergia-felhasználás folyamatosan egyre nagyobb ütemben növekszik. Ahhoz, hogy ezt az igényt ki tudjuk elégíteni, folyamatosan bővíteni kell az erőműparkokat. A hagyományos, elsősorban a széntüzelésű erőművek az igen magas környezeti terhelésük miatt egyre kevésbé felelnek meg a fenntarthatósági törekvéseknek. A környezet védelme a károsanyagok kibocsátásának csökkentése révén valósítható meg. Mivel a Föld lakossága egyre csak növekszik, ezért egyre jelentősebb az emberi tevékenység okozta környezetkárosítás. A gyorsuló ütem lelassítása, vagy e hatások csökkentése, esetleges megszüntetése igen komoly műszaki feladat elé állítja az emberiséget. Kiemelt szerepet kapnak a környezettudatos mérnöki tevékenységek, mint például a környezetközpontú tervezés és üzemeltetés. Mivel a villamosenergia-termelés napjainkban még jellemzően magas környezeti kibocsátással jár, ezért az alternatív energiaforrásokon alapuló erőművek alkalmazása elkerülhetetlen a környezettudatosság szemléletének gyakorlati megvalósításában. Magyarországon az európai viszonylatban is kimagasló biomassza- és napenergiapotenciál révén elsősorban a biomasszaerőművek és a napelemes erőművek létesítése célszerű, így ezek terjedése a következő években fokozottan várható. A hagyomá-

nyos erőművek közül az atomerőművek adhatnak még megoldást az energiaéhség csökkentésére a környezet viszonylagos kis szennyezése mellett.

2. Erőművek Magyarországon

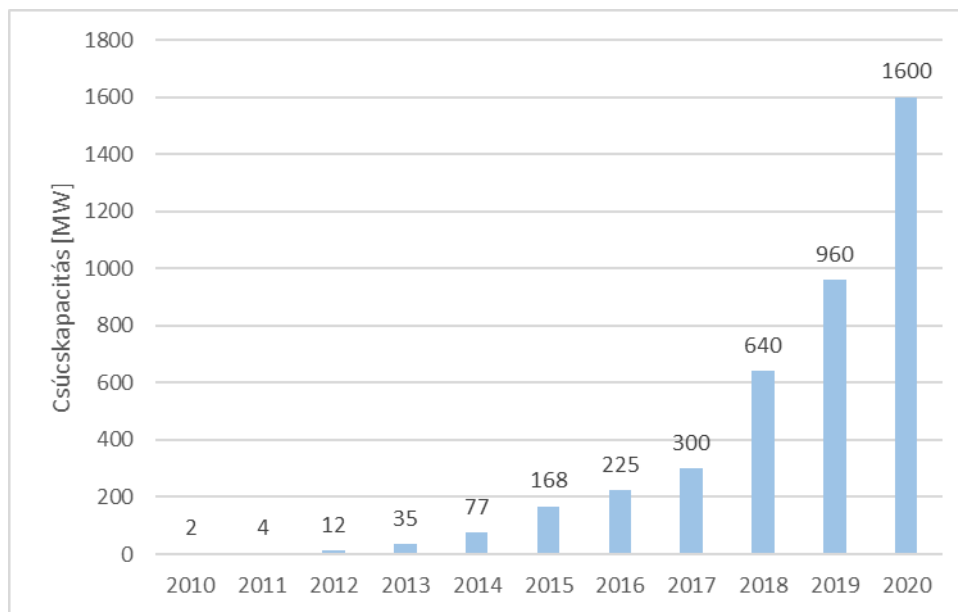
Magyarország erőművi hátterét folyamatos átalakulás jellemzi. Míg kezdetben szinte kizárólag hagyományos energiaforrásokon alapult, addig, az utóbbi években egyre nagyobb szerepet kaptak a megújuló energiaforrások. A sok éves leépülés után az elmúlt 5 évben egy kismértékű fejlődés indult meg. Bővültek a beépített kapacitások az újonnan telepített főleg napelemes erőművek révén. Ez a bővülés egyre gyorsuló ütemű. Az egyes erőművek, illetve energiaforrások részesedésének arányát, az a magyarországi erőművi háttér jelenlegi körképét az 1. ábra szemlélteti (Bodnár, 2019; Bodnár, 2017; Szűcs, 2019).



1. ábra. Az összes hazai erőmű beépített teljesítőképességének primer szerinti megoszlása 2018. december 31-én.

Magyarországnak 23 nagyerőműve van, amelyek bruttó beépített teljesítménye 6.756,9 MW, de ez a teljesítmény nem használható ki teljes mértékben az erőművek önfogyasztása, valamint az állandó hiány miatt. Az ország legjelentősebb erőműve a Paksi Atomerőmű, 2.012,8 MW kapacitással rendelkezik. Ezen kívül 22 nagyerőmű vesz részt a rendszerszintű koordinációban (4.744,1 MW), melyek közül 16 szénhidrogénnel, 3 szén- és lignittel, további 3 pedig elsősorban biomassza tüzeléssel üzemel (Szűcs, 2019). Állandó hiányt azok az erőművek idéznek elő, amelyek ugyan üzemképesek, ennek ellenére mégsem üzemeltetjük őket. Az állandó hiány mértéke csaknem 1.222 MW, így a rendelkezésre álló nagyerőművi teljesítmény 5.534,9 MW, ehhez jön hozzá a kiserőművek nettó mintegy 1.800 MW teljesítménye. Az utóbbi években folyamatosan csökkent a szén és lignittüzelésből, valamint a kőolajszármazékokból származó villamosenergia részaránya a hazai villamosenergia rendszerben, azonban a napelemes erőművek száma ugrásszerűen megnőtt. Az elmúlt évtizedben jelentős fejlődést

mutatott a fotovoltaikus erőművek csúcsteljesítményének növekedése. 2010-ben csupán 2 MW, 2014-ben 77 MW, 2018-ban már 640 MW 2019-ben pedig 960 MW volt az összkapacitás. 2020-ban meghaladta az 1.600 MW-os beépített kapacitást, 2021-ben pedig már át is lépte a 2.000 MW-ot a hazai napelemes erőműpark (Bodnár, 2019; Bodnár, 2017; Stróbl, 2015). Az egyre gyorsuló növekedés a háztartási kiserőműveknek és a nagyteljesítményű napelem-farmoknak egyaránt köszönhető. Jelenlegi legnagyobb naperőmű a paksi, 20,6 MW teljesítménnyel. Az utóbbi években jelentős teljesítményű naperőmű-park létesült még Bükkábrányban, Felsőzsolcán, Százhalombattán és Visontán, valamint számos erőmű van épülőben.



2. ábra. A magyarországi napelemes erőműpark csúcsteljesítményének alakulása az elmúlt évtizedben.

Nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a villamosenergia iránti igény évről évre növekedik, és a napi csúcsterhelések is évről évre egyre nagyobbak. A napi csúcsterhelések az utóbbi években jellemzően 6.500 és 7.000 MW között alakultak, amely értékek meghaladják a hazai erőműpark nettó kapacitását, így az import függőség igen jelentős. Éves szinten a hazai villamosenergia-igény több, mint harmadát importból fedezzük. Ennek több oka is ismeretes. Egyrészt a hazai erőműpark előregedett, így hatékonyságuk jelentősen eltér az elvártaktól, így üzemeltetésük sok esetben nagyobb költséggel jár, mint amennyiért a megtermelt villamosenergiát el tudják adni; másrészt a külföldi termelők a kiemelkedő hatékonyságú erőműveik miatt, vagy a saját országbeli fogyasztási igény hiánya miatt olcsóbban tudják a rendelkezésünkre bocsátani a villamosenergiát. A közeljövőben ezek az arányok jelentősen nem fognak változni, annak ellenére sem, hogy nagyvolumenű erőműépítések várhatók (Paks II és napelemes erőművek). Ennek legfőbb oka, hogy számos hazai nagyerőmű még ebben az évtizedben eléri a tervezett, illetve a már korábban meghosszabbított élettartamát, így azok leállítása elkerülhetetlen. A Mátrai Erőmű várhatóan 2025-2026 körül olyan döntés előtt fog állni, amely az erőmű teljeskörű felújítását, vagy a teljes leállítását fogja eredményezni. Ha az utóbbi valósul meg, akkor mintegy 1.000 MW kapacitás fog kiesni a Magyar Villamosenergia Rendszerből. Amit csak részben fog tudni kompenzálni, az addig létesítendő új 2.000 MW teljesítményű napelemes erőműpark.

Szintén nem elfelejtendő, hogy míg a hagyományos energiaforrásokat, vagy a biomasszát, illetve biogázt hasznosító erőművek éves teljesítménykihasználtsága átlagosan 70-90% között alakul, addig a napelemes erőművek 10-15%-át használják ki a kapacitásuknak. Ráadásul a napelemek termelése időhöz kötött és időjárás függő, így nem alkalmas arra, hogy teljes mértékben kiváltani a hagyományos erőműveket. Mindezeket figyelembe véve elkerülhetetlen a helyi-, vagy az ipari méretű villamosenergia-tárolás bevezetése. Helyi szinten az akkumulátoros és a forgó mozgáson alapuló tárolók, ipari méretekben a hidrogén alapú, vagy a szivattyús-tározós vízerőművek jelenthetnek megoldást.

A fokozatosan kieső teljesítmények pótlására pedig további korszerű erőművek építése szükséges, hogy elkerülhető legyen az importtól való függőség további növekedése és a környezetbarátabb villamosenergia-termelés megvalósítható legyen; a villamosenergia fajlagos karbonlábnyomának a csökkentése megtörténjen.

3. Az életciklus-elemzés módszertana

Az életciklus-elemzés (LCA- Life Cycle Assessment) napjainkban az egyik legjobban teret hódító környezetmenedzsment rendszereszköz, amelynek alkalmazása elsősorban az egymást helyettesítő szolgáltatások, termékek és technológiák esetén a legcélravezetőbb. Az LCA kapcsán számszerűsítést és becslést végzünk arra vonatkozóan, hogy egy termék, technológia, vagy szolgáltatás teljes élettartama során (előállítás, annak elosztása, felhasználása át a belőle képződő hulladék ártalmatlanításáig) milyen környezeti terheléseket okoz, illetve milyen és mennyi természeti erőforrást használ fel (beleértve az energia-kiadásokat is) (Bodnár, 2017; Kósi és Valkó, 2008; Fruergaard és Astrup, 2011).

Az ISO 14040 szabvány alapján az életciklus-elemzés a következőképpen definiálható: "a termékkel kapcsolatos környezeti tényezők és potenciális hatások értékelésének olyan módszere, amely leltárt készít a termékkel kapcsolatos folyamatok rendszerének bemeneteiről és kimeneteiről; kiértékeli az ezekkel kapcsolatos potenciális környezeti hatásokat; értelmezi a leltári elemzésnek és a hatáértékelés fázisainak eredményeit a tanulmány céljainak figyelembevételével".

Klasszikus értelemben környezetbarátnak csak akkor nevezhetünk egy terméket, vagy egy technológiát, ha maga a termék, illetve a gyártása és fogyasztása során keletkező hulladékoknak közvetve és közvetlenül nincs környezetterhelő hatásuk. Ebben az értelemben az adott termékre vonatkozó ökológiai mérleg a „bölcsőtől a sírig” terjedő szemléletben pozitív, de legalábbis semleges a környezetre nézve (Bodnár, 2017). A gyakorlatban elképzelhetetlen egy olyan termelési, és fogyasztási folyamat, ami hulladékmentesnek tekinthető, ezért maga a pozitív jelző használata ez esetben arra utal, hogy a termékekre és technológiákra vonatkozó kedvezőtlen környezeti hatások kisebbek. Egy termék vagy egy technológia környezetbarát jellegének felismerése nem egyszerű feladat és a gyakorlatban számos ellentmondással találkozhatunk.

Az életciklus-elemzésnek négy fő szakasza ismeretes. Az első szakaszban az elemzés célját és tárgykörét határozzuk meg. A második szakaszban leltárelemzést végzünk, hogy az alapvető fizikai törvényszerűségek, mint például az anyag- és az energiamegmaradás törvénye érvényesül-e. A harmadik szakasz a legérdekesebb, hiszen itt valósul meg a hatáselemzés. A leltáradatok alapján minden anyag- és energiaáramhoz környezeti hatást rendelünk. A környezeti hatásokat úgynevezett környezeti hatáskategóriákba soroljuk. Végezetül a negyedik szakasz az LCA eredmények összehasonlítása, kiértékelése és a döntéshozatal (Bodnár, 2017).

Az elemzés folyamán a második szakaszban minden egyes hatáskategóriára vonatkoztatva meghatározunk egy referencia egységet, amihez viszonyítjuk a többi, azonos hatást kifejtő leltár-adatot. Pl. az üvegház-hatású gázokat kg CO₂-egyenértékben mérjük. 1 kg CO₂ globális felmelegedésre gyakorolt

hatása 1 kg CO₂-egyenértéket képvisel. A metán emissziók globális felmelegedéshez való hozzájárulását kg CO₂- egyenértékben kifejezett érték adja meg, ami az alkalmazott módszertől függően lehet 21, 23, vagy 25 kg is. Egy leltáradat több hatáskategóriához is kapcsolható (Bodnár, 2017; Fruergaard és Astrup, 2011).

A hatáskategóriák súlyozására különböző módszerek léteznek, amelyek az élet-ciklus modellezését követően lehetővé teszik a lehetséges környezeti hatások kifejezését indikátor segítségével. Vizsgálataink során a GaBi 8 nevű kereskedelmi forgalomban kapható életciklus-elemző szoftver ingyenesen hozzáférhető próbaverzióját is alkalmazhatjuk. A GaBi 8 szoftver mintegy 100 kiértékelő módszer tartalmaz (pl.: CML 96, CML 2001, EDIP 97, EDIP 2003, EPFL 2002+, TRACI, Eco-indicator 95, Eco-indicator 99 stb.), és ezzel gyakorlatilag lefedi a jelenleg legelterjedtebben használt módszereket (Bodnár, 2017; Fruergaard és Astrup, 2011).

Amennyiben a villamosenergiát terméknek, az azt előállító erőművet pedig egyszerűen technológiának nevezzük, akkor előállhatnak olyan alternatív megoldások, amelyek a környezetre nézve nem csak, hogy semlegesek, hanem egyes környezeti hatáskategóriák esetében negatív előjelű „terhelésért” felelősek. Ezen technológiák alkalmazása a környezetre nem káros, hanem kedvező hatást gyakorolnak. Ilyenek lehetnek például a biomassza alapú energiatermelő rendszerek. Azonban nagyon nehéz és lényegében fenntartható módon nem is valósítható meg egy folyamatosan negatív környezeti hatással rendelkező rendszer kialakítása.

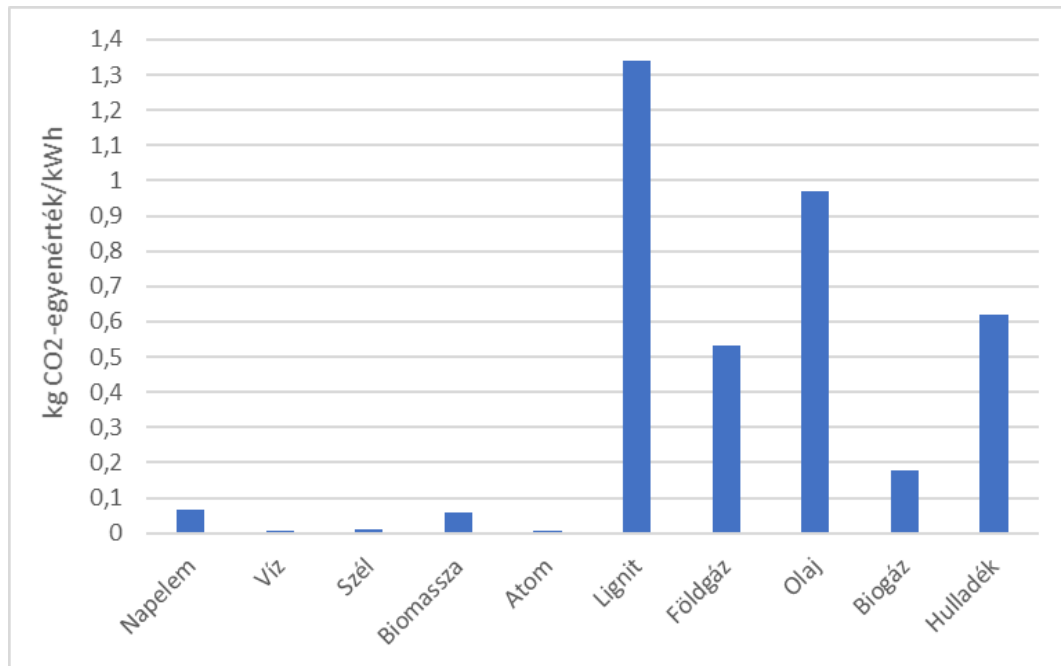
4. Erőművek szén-dioxid kibocsátása LCA szemlélettel

Napjaink egyik legfontosabbnak tartott környezeti hatáskategóriája a globális felmelegedési potenciál, azaz a szén-dioxid kibocsátás és annak hatása. Az egyes erőművek a teljes élettartamuk során igen különböző mértékben bocsátanak ki széndioxidot. A tisztának mondott technológiák, mint például a napelemes-, és a szélturbinás erőművek működésük során ugyan nem bocsátanak ki környezetterhelő anyagokat, azonban azok gyártása, telepítése és a szanálást követő újrahasznosítása, vagy ártalmatlanítása már igen. Ezek értelmében definiálnunk kell a közvetlen és a közvetett kibocsátásokat.

A közvetlen kibocsátások az erőmű közvetlen működése során, a mindennapi üzemeltetés és villamosenergia-termelés során keletkező kibocsátásokat foglalja magába. A közvetett kibocsátás kategóriájába tartoznak az erőműgyártási, telepítési és szanálási folyamatok által okozott kibocsátások. A közvetlen kibocsátások könnyen számszerűsíthetők és mérhetők, míg a közvetett kibocsátások csak az életciklus-szemlélet révén becsülhetők. A közvetlen kibocsátásokat a közvetett kibocsátások fajlagos értékével korrigálni (rendszerint növelni) kell, mégpedig úgy, hogy a tervezett élettartam alatt felgyülemlett közvetlen kibocsátásokat az élettartam alatt megtermelt villamosenergia mennyiségével elosztjuk. Egyes esetekben előfordulhat, hogy a közvetett kibocsátások negatív előjelűek, így az összesített kibocsátás kisebb, mint a közvetlen kibocsátás. Ez első sorban a biomassza és biogáz alapú erőművek-nél figyelhető meg, mivel ott a közvetett kibocsátásoknál kerül számszerűsítésre a bioanyag megújuló volta.

A 3. ábra az egyes erőművek karbon-lábnymát szemlélteti 1 kWh villamosenergia előállítására vonatkoztatva szén-dioxid-egyenérték kibocsátásban mérve a teljes életciklus szemlélet mellett. Megfigyelhető, hogy az atomerőművek karbonlábnyma a legkisebb (4,68 gCO₂-egyenérték/kWh). A második legkisebb szén-dioxid-egyenértékű üvegházhatást okozó gázkibocsátással a vízerőművek rendelkeznek, a mintegy 5,49 gCO₂-egyenérték/kWh értékkel. Ezt követik a szél-erőművek (10,1), a biomassza (57,5) és a napelemes (65) erőművek. A legnagyobb kibocsátás a lignittüzelésű erőműnél tapasztalható (1.340 gCO₂-egyenérték/kWh). A hulladéktüzelésű (szilárd települési hulladék) (621

gCO₂-egyenérték/kWh) erőművek a gáztüzelésű, valamint a lignit/szén és olaj tüzelésű (970 gCO₂-egyenérték/kWh) erőművek között helyezkednek el. Magyarországon 1 kWh villamosenergia előállítása 2019-ben átlagosan 317 gCO₂-egyenértékű üvegházhatású gáz kibocsátással járt. Ezek alapján elmondható, hogy amennyiben ettől kisebb kibocsátással termelő erőművek (atom, víz, szél, napelem, biomassza és biogáz) hosszútávú üzemeltetésében gondolkodunk, akkor a villamosenergiatermelés karbon-lábnyma jelentősen csökkenthető.

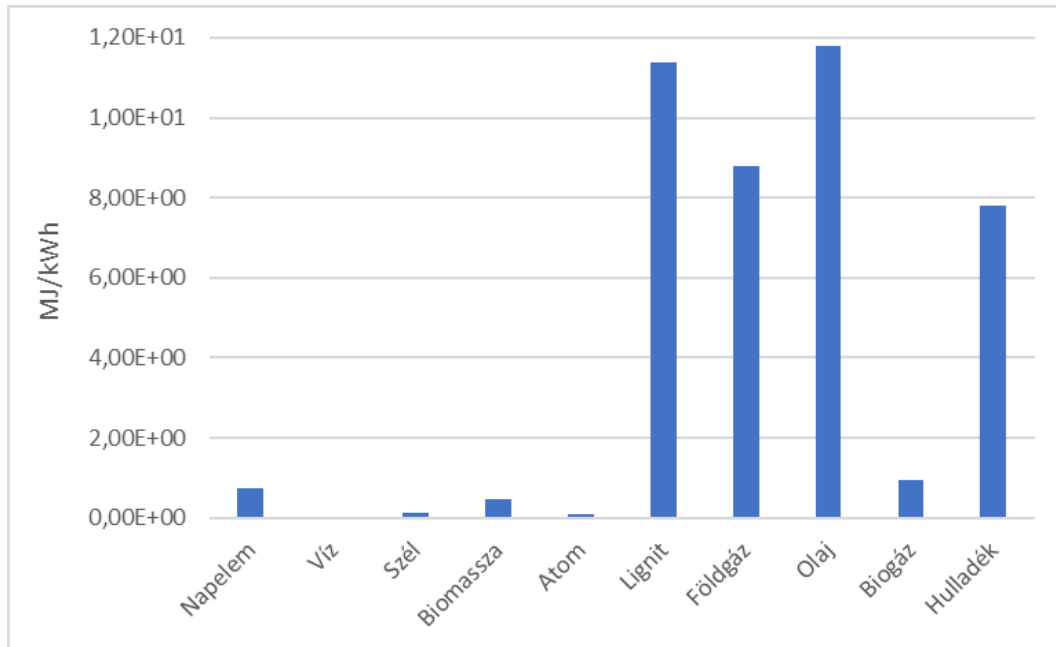


3. ábra. Erőművek karbon-lábnyma szén-dioxid-egyenértékben kifejezve, életciklusszemlélettel.

5. Erőművek primer energiaigénye LCA megközelítésben

Az erőművek primer energiaigénye fejezi ki, hogy milyen mértékben járulnak hozzá a fosszilis energiaforrások kimerüléséhez. Az abiotikus kimerülő fosszilis források mértékegysége MJ. A következőkben azt vizsgálom, hogy 1 kWh villamosenergia előállítása különböző energiahordozókat alkalmazó erőművekben, milyen mértékben járul hozzá a fosszilis energiahordozók kimerüléséhez, azaz mekkora mennyiségben használ fel fosszilis energiahordozókat. A 4. ábra szemlélteti a kapott eredményeket. Mivel 1 kWh villamosenergia életciklusszemléletű előállítása a referencia egység, ezért 3,6 MJ (=1 kWh) az úgynevezett energiazérópont. Az ettől nagyobb primer energiaigényű erőművekben termelt villamosenergia nagyobb fosszilis energiaforrás felhasználással jár, mint, amennyit az erőmű villamosenergia formájában megtermel.

A zérópontnak első sorban az energiamixeknél van jelentősége, mivel egy-egy nemzet villamosenergia-termelése jellemzően nem egy energiaforráson alapul. Az adott nemzetek energia mixe az erőművi kibocsátások kapacitás arányos összegzésével állítható elő. Azok az országok, amelyeknél ennél az értéknél nagyobb a villamosenergiatermelés primer energiafelhasználása, azoknál a fosszilis energiahordozók gyorsabb ütemben merülnek ki azáltal, hogy az energiatermelés nagyobb energiafelhasználással jár, mint amennyit az erőmű előállít.



4. ábra. Erőművek primer energiaforrás-felhasználása MJ-ban kifejezve, életciklusszemlélettel.

6. A Magyar Villamosenergia-rendszer LCA egyenlege

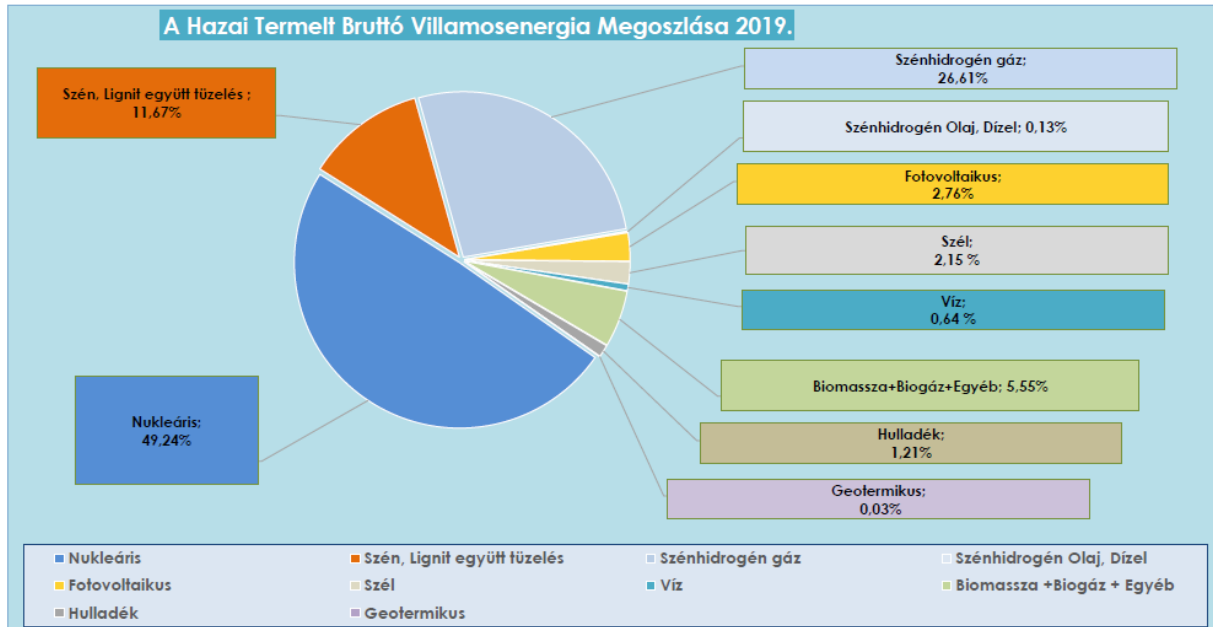
Magyarország 2019-ben 33.075,15 GWh villamosenergiát termelt. A fogyasztás 45.660,51 GWh volt. A 12.585,35 GWh különbséget importból fedeztük. Ez azt jelenti, hogy a hazai villamosenergiafogyasztás 72,44%-t tudtuk megtermelni és 27,56%-át fedeztük más nemzetek termeléséből. A termelés erőművekenkénti (energiaforrásonkénti) megoszlását az 5. ábra szemlélteti, míg a 6. ábra ugyan ezt a fogyasztási oldalra nézve (MAVIR).

Mind a termelt, mind az elfogyasztott villamosenergia tekintetében a nukleáris energia, azaz az atomerőműből származó villamosenergia dominál. A hazai termelésű villamosenergia 87,65%-a hagyományos erőművekből származott és csak a 12,35%-a megújuló energiaforrásokból (5. ábra).

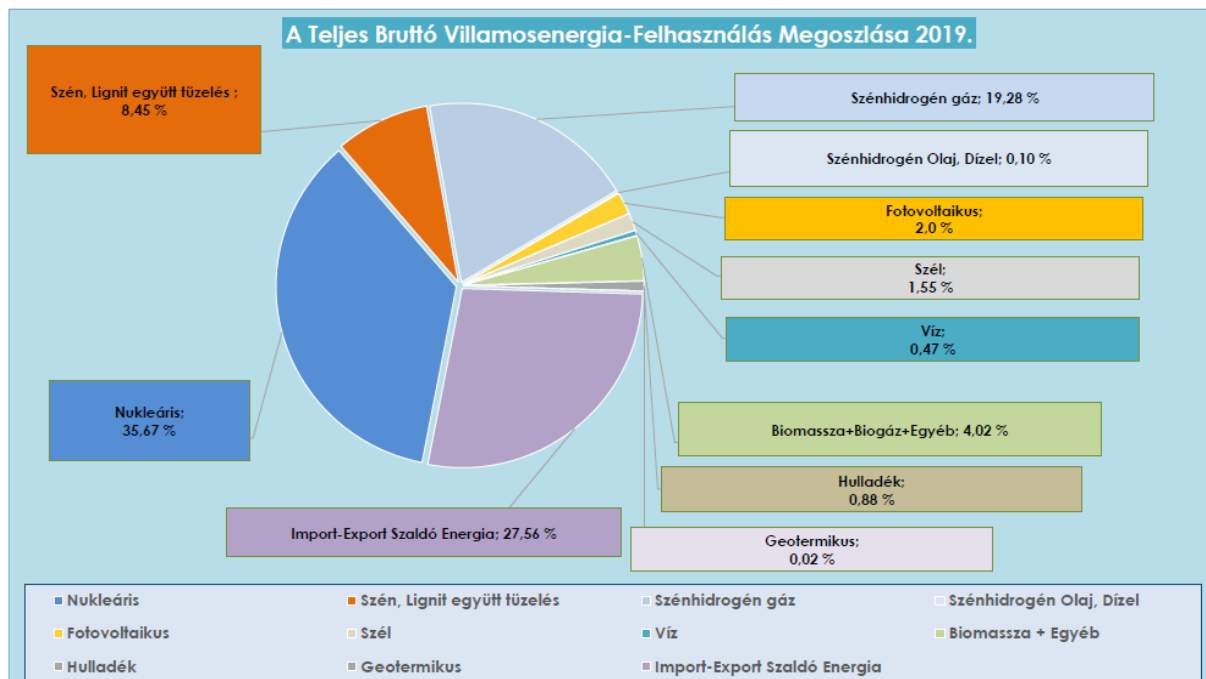
Amennyiben az elfogyasztott villamosenergiát vesszük alapul, akkor megfigyelhető, hogy 63,49%-a származott a hazai hagyományos erőművekből és csak 8,94%-a a hazai megújuló energiaforrásokat alkalmazó erőművekből. Azonban nem hagyható figyelmen kívül, hogy a hazánkba érkező 27,56%-nyi villamosenergia a környező országok erőművi háttérének függvényeként szintén tovább bontandó hagyományos és megújuló energiaforrásokra. Ezek pontos összetétele ismeretében lehet az import energia felosztását meghatározni. Amennyiben az import energia olyan országból származik, ahol a megújuló energiaforrások és a hagyományos erőművek aránya hasonló a hazaiéhoz, akkor a hazai termelésű és az importból származó villamosenergia fajlagos környezeti kibocsátása között nem lenne különbség.

Az import energia jellemzően Ukrajna villamos erőműveiből érkezik, ahol a megújuló energiaforrások aránya kisebb és a hagyományos erőművek, jellemzően a szén- és a lignittüzelésű erőművek aránya nagyobb, mint a hazaié. Ez azt jelenti, hogy a hazai villamosenergiafogyasztás üvegházhatású

gáz kibocsátása és primer energiaigénye nagyobb, mint a hazai termelésű villamosenergiánál tapasztalható értékhez.



5. ábra. A hazai termelésű villamosenergia energiaforrásonkénti megoszlása 2019-ben.



6. ábra. A hazai villamosenergiafelhasználás energiaforrásonkénti megoszlása 2019-ben.

A hazai termelésű villamosenergia 2019-ben átlagosan 317 gCO₂-egyenértékű üvegházhatású gáz kibocsátással járt, ezzel ellentétben a hazai felhasználású villamosenergia ugyan ebben az évben 401 gCO₂-egyenértéket képviselt. A hazai hagyományos erőművek a kibocsátott üvegházhatású gázok 94,95%-ért felelősek, míg csak a maradék 5,06% származik a megújuló forrásokat alkalmazó erőművekből. Ez szintén azt az állítást erősíti meg, hogy az import energia jellemzően hagyományos energiaforrásokból, kiemelten szén-, lignit-, olaj- és/vagy földgáztüzelésű erőművekből származott.

Amennyiben az import energia származási országában/országában az erőművi háttér a magyarországiéhoz képest több megújuló energiaforrást tartalmazna, akkor a hazai villamosenergiafogyasztás fajlagos kibocsátása kisebb lenne. Mivel a hazai fogyasztásra jutó fajlagos kibocsátás ennél 26,5%-kal nagyobb, ezért ebből arra lehet következtetni, hogy a megújuló energiaforrások és/vagy a nukleáris energia részesedése az import energiában kisebb, mint a hazai termelésűben, tehát jellemzően fosszilis alapú.

A fosszilis energiaforrások kimerülése tekintetében a hazai termelésű villamosenergia 3,88 MJ értéket képvisel 1 kWh villamosenergiára vonatkoztatva. A hazai fogyasztású villamosenergiánál ez az érték 4,16 MJ. Ennél a környezeti hatáskategóriánál 7,22% a különbség, amely szintén a hagyományos energiaforrások irányába viszi el az importból származó villamosenergia származását. Mindkét értéknél jól látható, hogy a primer energiaigény a zérópont felett van, azaz több fosszilis energiaforrást használunk fel, mint amennyit villamos energia formájában elő tudunk állítani. A hazai termelésnél 7,78%-kal, a felhasználásnál 15,56%-kal nagyobb a primer energiafelhasználás a zéróponthoz képest. Tehát még mindig nagy a fosszilis tüzelőanyagokat alkalmazó erőművek részaránya.

Viszonyítási alapként az Európai Unió országainak átlaga: 416 gCO₂-egyenérték és 4,47 MJ. Svájc esetén ezek az értékek 162 gCO₂-egyenérték és 1,5 MJ. Itt már megfigyelhető, hogy a fosszilis energiaforrások aránya a villamosenergiatermelésben 58,33%-kal a zérópont alatt alakul, tehát a megújuló energiaforrások dominálnak.

Amennyiben a hazai termelést vesszük alapul a fajlagos kibocsátások meghatározására 2019-ben és várhatóan 2030-ban, akkor az 1. táblázatban szereplő termelési adatokat kapjuk eredményül.

Alapfeltevés, hogy 2030-ra a Paks II projekt megvalósul és a mostani atomerőmű sem kerül leállításra, vagyis az atomerőművek kapacitása 2 GW-ról 4,4 GW-ra emelkedik. Mindemellett a napelemes erőművek a jelenleg üzemelő 1 GW-os kapacitása 6 GW-ra bővül és a Mátrai Erőmű leállításra kerül. Amennyiben azt feltételezzük, hogy más energiaforrások termelése nem változik, azaz kapacitásbővítés nem valósul meg, ellenben a villamosenergia-fogyasztás 20%-kal bővül, akkor a hazai termelés a hazai fogyasztás 97,33%-át tudja fedezni, azaz a külföldi függőség tizedére csökken.

Továbbra sem szabad elfelejteni, hogy a 2030-ban várhatóan üzemben lévő hagyományos erőműveink üzemanyaga csaknem 100%-ban külföldről fog származni, így ugyan közvetlenül nem függünk más országok villamosenergiarendszerétől, de közvetve a tüzelőanyagok származási országától továbbra is nagy lesz a függőségünk.

2030-ra várhatóan a hagyományos erőművek részesedése a hazai villamosenergiatermelésben 83,77%-ra fog csökkenni, míg a megújuló energiaforrások aránya 16,23%-ra fog nőni köszönhetően a napelemes erőműveknek. A hazai villamosenergiatermelés 2030-ra várható energiaforrásonkénti megoszlását a 7. ábra szemlélteti.

Amennyiben a tervezett beruházások megvalósulnak akkor a Magyarországon termelt villamosenergia karbon-lábnyoma 2030-ban 107 gCO₂-egyenérték/kWh értékre csökken. A 2019-es évhez képest ez 66,25%-os csökkenést jelent. A fosszilis energiaforrások kimerülésére gyakorolt hatás a 2019-évhez képest 2030-ban akár 56,96%-kal is kisebb lehet, azaz 1,67 MJ/kWh értékre csökken (8. ábra).

1. táblázat. Hazai termelésű villamosenergia energiaforrásonkénti megoszlása GWh-ban.

2019		2030	
Hagyományos erőművek	Termelés, GWh	Hagyományos erőművek	Termelés, GWh
Nukleáris	16.285,91	Nukleáris	35.829,002
Szén- és lignittüzelés	3.859,96	Szén- és lignittüzelés	0
Földgáz	8.801,88	Földgáz	8.801,88
Olaj	44,2	Olaj	44,2
Hagyományos erőművek összesen	28.991,95	Hagyományos erőművek összesen	44.675,082
Megújuló energiaforrások	Termelés, GWh	Megújuló energiaforrások	Termelés, GWh
Napelem	914,37	Napelem	5.486,22
Szél	709,93	Szél	709,93
Víz	213,22	Víz	213,22
Biomassza és biogáz	1.836,5	Biomassza és biogáz	1.836,5
Hulladék	399,95	Hulladék	399,95
Geotermikus	9,24	Geotermikus	9,24
Megújuló energiaforrások összesen	4.083,2	Megújuló energiaforrások összesen	8.655,06
Hazai termelés összesen	33.075,15	Hazai termelés összesen	53.330,142
Import	12.585,35	Import	1.462,47
Hazai fogyasztás összesen	45.660,51	Hazai fogyasztás összesen	54.792,612

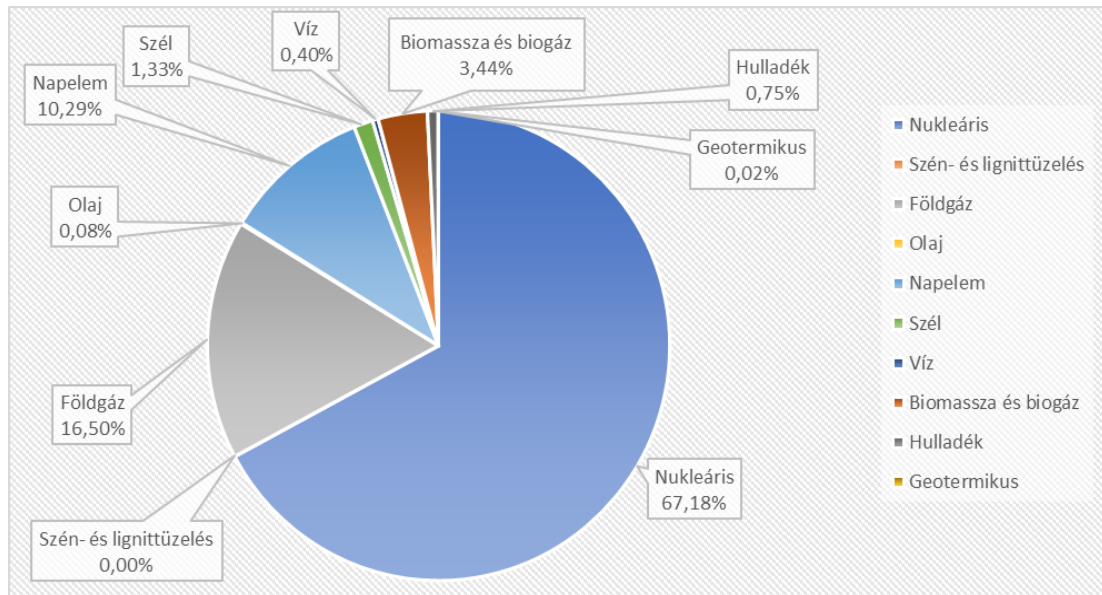
A fosszilis energiaforrások kimerülésére gyakorolt hatásonál megfigyelhető, hogy 2030-ban a hazai termelésű villamosenergia primer energiaigénye az energiazérópont alatt található. Tehát kevesebb fosszilis energiaforrást használunk fel, mint amennyit villamosenergia formájában megtermelünk.

A jelentős mértékű javulás annak köszönhető, hogy a napelemes- és az atomerőművek részesedési aránya a hazai termelésű villamosenergiában 2030-ban várhatóan 83,41%-ot tesz majd ki, míg 2019-ben ez az arány csak 61,59% volt.

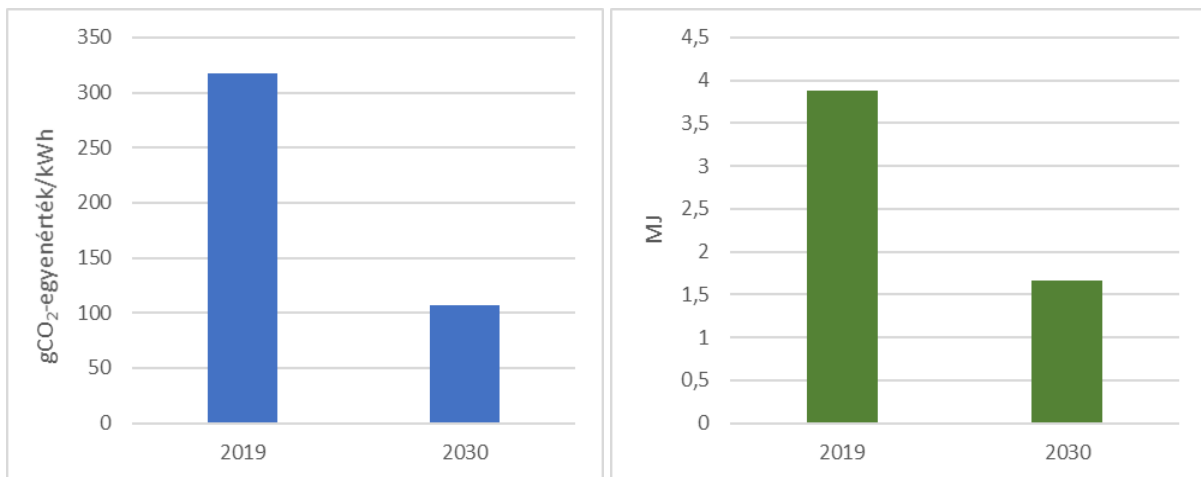
Mivel 2030-ban a várható import villamosenergia aránya 3% alatt marad, ami várhatóan továbbra is fosszilis alapú erőművekből fog származni, ezért a hazai felhasználású villamosenergia üvegházhatású gázkibocsátása és a fosszilis energiaforrások kimerülésre gyakorolt hatása valamivel nagyobb értékű lesz, mint ami a hazai termelésű villamosenergiánál tapasztalható.

Nem szabad elfelejteni, hogy a napelemes erőművek névleges teljesítményüket optimális esetben csak 11 és 15 óra között tudják biztosítani. Ezekben az órákban a 6 GW napelemes erőmű és a 4,4 GW

atomerőmű akár 10,4 GW teljesítményt is szolgáltatna. Várhatóan ezen időszakban a csúcsfogyasztás nem fogja meghaladni a 8-8,5 GW-ot, így ezekben az időkben a többlet termelést vagy el kell tárolni, vagy exportra kell bocsátani.



7. ábra. A hazai termelésű villamosenergia energiaforrásonkénti megoszlása várhatóan 2030-ban.



8. ábra. A hazai termelésű villamosenergia energiaforrásonkénti karbon-lábnyoma és primer energiaigénye 2019-ben és várhatóan 2030-ban.

Amennyiben ezen megoldások nem jöhetnek szóba, akkor az erőműveket le kell szabályozni, korlátozni a termelésüket, hogy a villamosenergia-rendszer üzembiztos legyen. Legegyszerűbben és leggyorsabban a napelemes erőművek szabályozhatók. Az éjszakai órákban, illetve azokban a napszakokban, amikor a napelemes erőművek nem termelnek, más erőművek üzemeltetése válik szükségessé

a fogyasztás (alapterhelés) biztosítására. Ilyenkor vagy az eltárolt villamosenergiát lehetne visszatermelni a hálózatra, vagy a hiányt importból lehetne fedezni.

Hosszú távon a villamosenergia eltárolása lenne megoldás nagyipari méretekben, szivattyús-tározós vízerőművek segítségével, de szóba jöhet a helyi szintű, akár lakossági, akár kisipari energiatárolás is akkumulátoros, vagy forgó mozgáson alapuló energiatárolókban. Amíg az energiatárolási problémák nem oldódnak meg, addig az import-export függőség továbbra is fennál, így a fentebb bemutatott arányok változhatnak.

A napelemes erőművek hiszterézis jellegű szabályozása ideiglenesen jó megoldásnak tűnhet, viszont ilyenkor azzal kell számolni, hogy a termeléskorlátozásból származó bevételkiesés révén az erőmű megtérülési ideje megnő. A bevételkiesés egyenértékű a kiadások növekedésével, azaz a létrejövő anyagi különbözetet valakinek állnia kell. Erre számos példa ismeretes azokban az országokban, ahol a beépített napelemes erőművek kapacitása nagyobb, mint amennyit az ország villamosenergia-rendszere képes lenne elviselni szabályozás nélkül. Egy megoldás, hogy amikor a napelemes erőművek túltermelése miatt a rendszer termelési oldala nagyobb, mint a fogyasztási oldal, és leszabályozásra, valamint vezérelhető fogyasztók bekapcsolására nincs lehetőség, akkor a villamosenergiát olcsóbban, vagy akár ingyen szolgáltatják a fogyasztók részére. A rendszer összeomlásának elkerülés érdekében időnként olyan eset is előáll, amikor a fogyasztók kapnak pénzt, azért, hogy fogyasszanak. Hosszú távon egy ilyen rendszer – gazdaságosan – nem tartható fent, ezért a villamosenergia tárolásának irányába kell elmozdulni. Kézenfekvő megoldás lehet a lakossági napelemes rendszereknél a helyi villamosenergia-tárolására helyezni a hangsúlyt és a közvetlenül hálózatcsatolt napelemes rendszerek helyett az energiatárolót tartalmazó kombinált, hibrid rendszerek létrehozása és azok elterjedésének – jogi, műszaki, és gazdasági – támogatása. A tudatosság alapelveinek alkalmazása a hosszútávú rendszertervezésben elkerülhetetlen, ezért szimulációk, modellezések, valamint modellfejlesztések és a statisztikai adatokon nyugvó teljeskörű értékelésre van szükség.

7. Összefoglalás és következtetések

Összességében elmondható, hogy 2019-ben a hazai termelésű villamosenergia karbon-lábnyoma és primer energiaigénye is alacsonyabb értéket mutatott, mint a hazai felhasználású villamosenergia hasonló értékei. Ennek az az oka, hogy a hazai importfüggőség csaknem 30%-os arányt képvisel, és az importenergia olyan országból származott, ahol a fosszilis tüzelőanyagokon alapuló villamosenergia-termelés a mérvadó. Amennyiben Magyarországon 2030-ra a napelemes- és az atomerőművekből származó villamosenergia aránya a mostanihoz képest 35,43%-kal nőne, akkor egyrészt az importfüggőség a mostani tizedére csökkenne, másrészt a karbon-lábnyom csaknem harmada lenne, mint ami napjainkban tapasztalható, mindemellett a primer energiaigény is az energiazérópontra alá mérséklődne. Ahhoz, hogy ez megvalósulhasson új és környezetbarát erőművek létesítése, valamint a meglévők korszerűsítése és a villamosenergia tárolás napi szintű problémáinak a megoldása, bevezetése szükséges. Az erőműépítések tudatos tervezése és a termelés-fogyasztás optimalizálásának megvalósítása nélkül az importtól való függőség nem csökkenthető jelentős mértékben, ezért jelentős figyelmet kell szentelni a hazai villamosenergia-rendszer fejlesztésére.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka az NTP-SZKOLL-20-0022 azonosítószámú „Fókusz'21 - Középpontban a közösség digitális kompetenciák fejlesztése által” projekt keretében valósult meg az Emberi Erőforrások Minisztériuma és az Emberi Erőforrás Támogatáskezelő támogatásával.

Irodalom

- [1] Bodnár, I. (2019). *Napelem működésének alapjai, a napelemes villamosenergia-termelés elmélete és gyakorlati megvalósítása*. Miskolci Egyetem, p. 108.
- [2] Bodnár, I. (2017). *Fás szárú biomasszák és települési szilárd hulladékok termikus hasznosítása*. Miskolci Egyetem, p. 164.
- [3] MAVIR adatszolgáltatási felülete: <https://www.mavir.hu/web/mavir/adatpublikacio> (letöltés dátuma: 2020. május 4.)
- [4] Szűcs, G. (2019). *Magyarország villamos energia termelése és felhasználása 2018-ban*. <https://villanyautosok.hu/2019/11/12/magyarorszag-villamos-energia-termelese-es-felhasznalasa-2018-ban/> (megtekintés dátuma: 2020. május 2.)
- [5] Kósi, K., Valkó, L. (2008). *Környezetmenedzsment*. Típotex Kiadó, Budapest, p. 307.
- [6] Fruergaard, T., Astrup, T. (2011). Optimal utilization of waste-to-energy in an LCA perspective. *Waste Management*, 31, 572-582. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.009>
- [7] Stróbl, A. (2015). *A magyarországi erőműépítés jövője, főbb kérdései*. Előadás anyag, Energetikai Szakkollégium, Budapest.