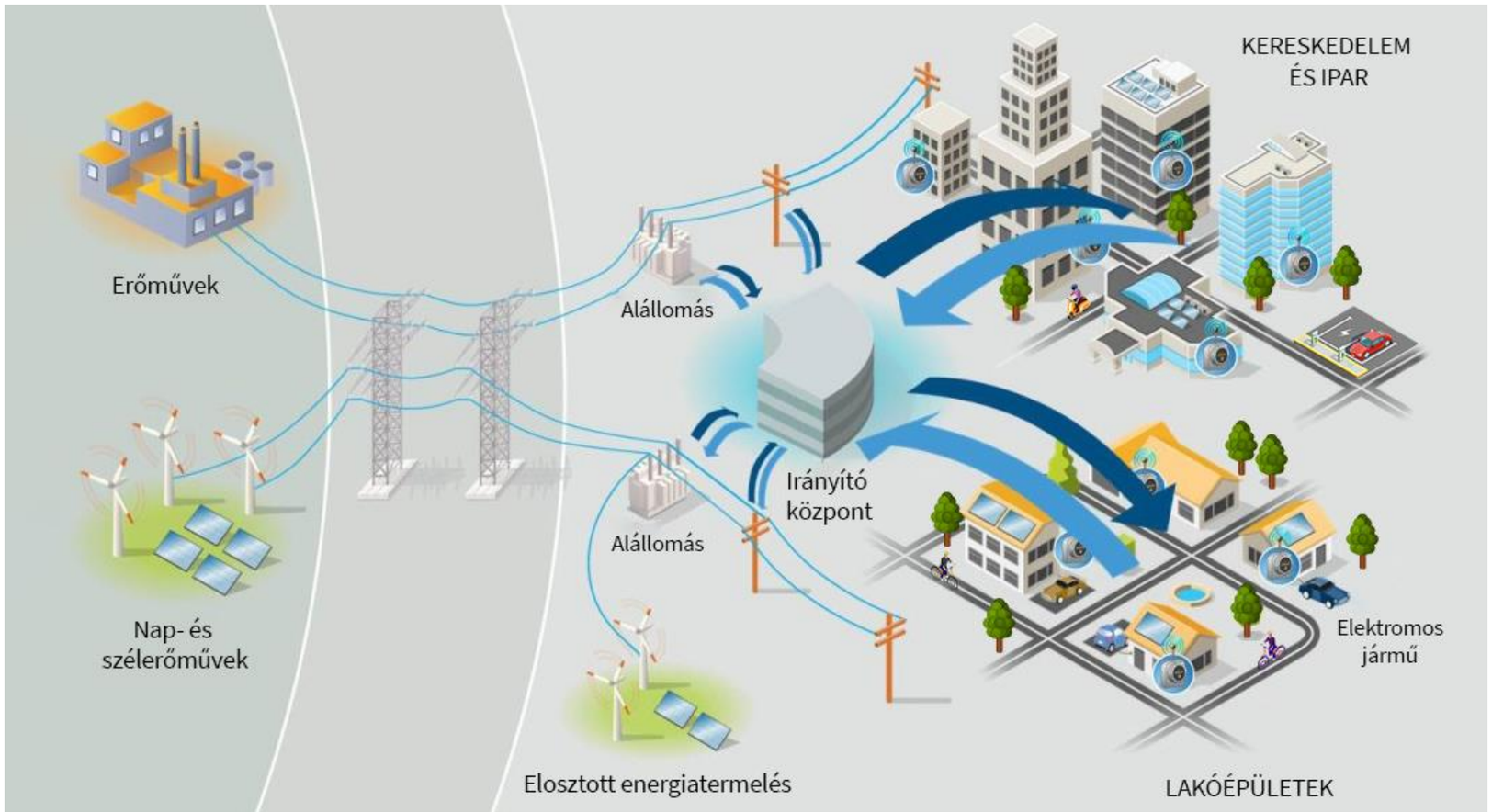
Energiaföldrajz és energiatervezés – egyetemi jegyzet

Dr. Munkácsy Béla

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar



Energiaföldrajz és energiatervezés

Készítette:

Dr. Munkácsy Béla

Szakmai lektor:

Baranyák Zoltán

műszaki szakoktató, energiagazdálkodási szakmérnök

Nyelvi lektor:

Dr. Szalay Katalin

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar

Földrajztudományi Központ

Környezet- és Tájföldrajzi tanszék

ISBN 978-963-284-594-4

2018.

Tartalom

Bevezetés: az energiaföldrajz felértékelődő szerepe 4

Az energetikában használatos fizikai alapismeretek 5

Az energiarendszer felépítése 9

Az energiarendszer működése és a fenntartható energiagazdálkodás pillérei az energialánc tükrében 23

A térbeliség egyre erősödő jelentősége – centralizált és decentralizált energiarendszerek 35

Forrásoldal 36

Az alaperőművek szerepe a 20. és 21. századi energiarendszerben 41

A villamosenergia-rendszer szabályzása centralizált és decentralizált megközelítésben 43

Szállítás 44

Felhasználás, fogyasztás 48

Energiatervezés a 20. és a 21. században 50

Az országos szintű energiatervezés 50

Az energiatervezés filozófiája 51

Az energiatervezés módszertana 51

Energiatervezés települési szinten 54

Szoftveres energiatervezés 57
Háztartási szintű energiarendszer 58
Az emberi tényező az energiagazdálkodásban: energiatudatosság és energiatakarékosság 60
A hatékonyság az energiagazdálkodásban és energiatervezésben 70
A megújuló energiaforrások 76
Napenergia 77
A passzív napenergia-hasznosítás 79
Az aktív napenergia-hasznosítás 83
A biomassza energetikai hasznosítása 96
Szilárd biomassza 97
Folyékony biomassza-üzemanyag 102
Biogáz 104
A szélenergia a 21. században 106
A környezeti hő 110
A vízenergia 112
Az energiatárolás 116
Az energiatervezés alapelemei – a potenciálok felmérése 123
Szempontok a megújulóenergia-potenciálok számításához 125
A műszaki potenciál számítása 125
Társadalmi-gazdasági potenciál számítása 130
A fogyasztás csökkentésében és az energiatárolásban rejlő lehetőségek és potenciálok számítása 131
A megújuló energiaforrások rendszerbe integrálása 134
A fogyasztás befolyásolása 134
Szinergiákon alapuló megoldások 134
Optimális energiamix 136
Az időjárástól függő termelés térbeli kiterjesztése minél nagyobb területre 136
Az energiarendszerek összekapcsolása 137
Az átalakítás és tárolás 139
További adalékok az energiagazdálkodás átalakításához 140
Az energiarendszer átalakításában rejlő kihívások 140
A megtérülési számítások problematikája 148
Közösségi energia és térbeliség 149

Bevezetés: az energiaföldrajz felértékelődő szerepe

A környezetgazdálkodás nem más, mint a természet erőforrásaival való sáfárkodás – jó esetben olyan módon, hogy közben az emberiség számára létalapot biztosító ökológiai rendszer stabilitását megőrizzük. Jelenleg még csak törekszünk egy ilyen módon működő környezetgazdálkodás megvalósítására, a gyakorlatban ettől még messze van az emberiség. A késlekedés eredményeképpen viszont egy globális ökológiai krízis résztvevői és szenvedő alanyai lehetünk (lásd pl. biodiverzitás rohamos csökkenése, globális éghajlatváltozás).

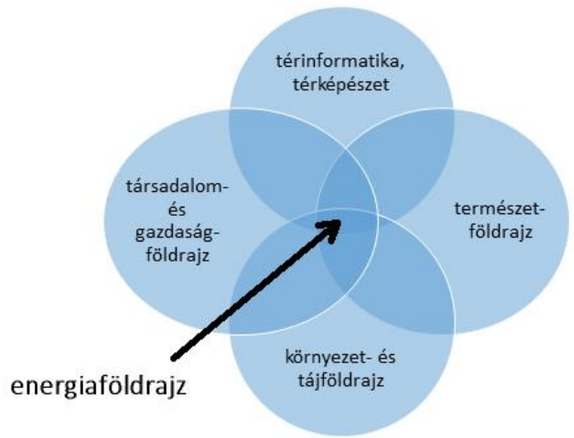
Az energia témaköre egészen az ezredfordulóig nem volt igazán szerves része a földrajztudománynak. A geográfia, ezen belül az energiaföldrajz, a 20. században gyakorlatilag kívülállóként vett részt az energiagazdálkodásról folyó diskurzusban. Vizsgálódási fókuszában alapvetően néhány témakör állt, így leginkább: a) a kitermelhető energiahordozók térbelisége; b) a villamosáram-termelés földrajzi aspektusai (telephelyelmélet); c) esetleges ipartelepítő tényezőként kapcsolódása más iparágakkal.

Az energiaföldrajz 21. századi fejlődésében két változás hozott radikális fordulatot: a) az energiatermelés decentralizálása, földrajzi szétterjedése és ebből fakadóan a **térbeliség felértékelődése**; b) a **térinformatika megjelenése**, amely teljesen új távlatokat nyitott az energiarendszer tervezésében és szervezésében. Ezek a jelenségek oda vezettek, hogy **ma a geográfia már nem külső szemlélője az energiarendszer változásainak**, **hanem annak egyre inkább meghatározó szereplője**. A megújuló energiaforrásokkal kapcsolatos elméleti vizsgálódások (pl. potenciálszámítások) és gyakorlati tervezési feladatok (pl. szélturbinák, naperőművek, energiatároló rendszerek elhelyezése) nem képzelhetők el felkészült, széles látókörű geográfus szakemberek közreműködése nélkül. Ez világosan látszik a nemzetközi gyakorlatban, ahol energetikával foglalkozó egyetemi tanszékek, kutatóintézetek, tervezőirodák már nem is nagyon léteznek a térinformatikában járatos szakemberek közreműködése, intenzív bevonása nélkül.

Az energiaföldrajz – a terület szerves fejlődésének eredményeként – mára egyike lett azon szakterületeknek, amelyek a geográfia legszebb hagyományait ápolják, értékeit hiszen színvonalas művelése csak komplex módon, a földrajztudomány többi ága ismereteinek integrálásával képzelhető el. Sőt, az energiaföldrajz ezen is messze túlmutató ismeretek alkalmazására támaszkodik, hiszen többek között a műszaki tudományok vagy a közgazdaságtan/környezetgazdaságtan alapvetéseinek ismerete nélkül sem tanácsos energiagazdálkodási kérdésekben határozott állásfoglalásokat tenni. A nemzetközi fejlődés irányai alapján azt is bátran kijelenthetjük, hogy **a földrajztudomány jövője szempontjából a fenntartható energiagazdálkodás és energiatervezés kulcsfontosságú területek**.

Jelen egyetemi jegyzet az ELTE TTK Környezet- és Tájföldrajzi tanszékén immár több mint 15 éve folyó energiaföldrajzi témájú oktató- és kutatómunka tapasztalatai alapján készült. A kötet sajátossága, hogy bár a jelenlegi helyzetet is érinti, mégis elsősorban a jövőbe tekintő technológiákra, megoldásokra, megközelítésekre fókuszál, hiszen a hallgatók feladata a jövő építése lesz, amihez nem a régi, hanem a legújabb ismeretekre van szükség.

Ezúton mondok köszönetet a kötet elkészítésében közreműködőknek. A nyelvi kérdések kapcsán Dr. Szalay Katalin mutatott kiutat, az energetikai összefüggések tisztázásában Baranyák Zoltán energiagazdálkodási szakmérnök, a tördelésben, az ábraanyag magyarításában Kovács Krisztina volt segítségemre. A kiadvány létrejöttét az ELTE támogatta.



1. ábra. Az energiaföldrajz kapcsolatrendszere a földrajztudományban (Zimmerer, K. 2010 nyomán szerk. Munkácsy B.)

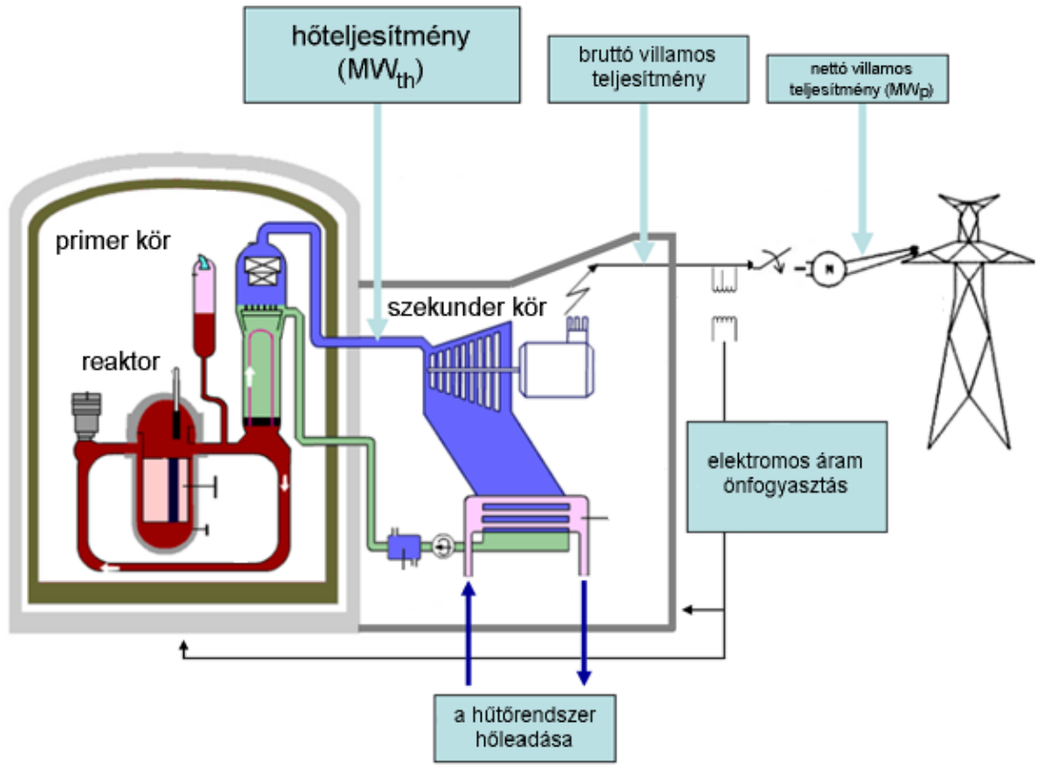
Az energetikában használatos fizikai alapismeretek

Az energiagazdálkodás igen sok tudományterület bevonásával művelhető magas szinten, ugyanakkor nem vitás, hogy az alapokat a fizika tárgykörén belül kell keresnünk. Ennek okán mindenekelőtt azokat a fizikában használatos szakkifejezéseket célszerű áttekinteni, amelyek nélkül az ezen témakörben folytatott vizsgálódás nem képzelhető el. Ugyanakkor nem szándékunk a közoktatásban megismert definíciók újraismétlése, inkább csak néhány megkerülhetetlen fizikai összefüggés felvillantása a cél, kifejezetten az energiagazdálkodás szemszögéből. Az alábbiakban a teljesítmény, az energia(mennyiség), a hatásfok, valamint a kihasználtság (kapacitásfaktor) témaköreit tekintjük át ebben a szellemben.

A különféle szakmai anyagokban, írásokban leggyakrabban egyes berendezések **teljesítménye** jelenik meg – termelési és fogyasztási szempontból egyaránt. Az hőerőművek esetében és hő- és villamos-teljesítményről egyaránt beszélni kell, mert ez esetben az első lépésben nyert hőenergiát alakítják át második lépésben villamos energiává (2. ábra). Mértékegysége az erőművek esetében általában **MW**-ban szerepel. Fontos, hogy az erőművek esetében a **névleges teljesítmény** mellett a **pillanatnyi teljesítményt** is megemlítsük, hiszen míg az előbbi egy fix érték, addig az utóbbi igény és lehetőség szerint változhat. Lényeges továbbá, hogy egyes erőművek hőt és villamos áramot is termelnek, így hő- (thermal - th) és villamos (power - p) teljesítményükkel egyaránt jellemezhetők. A jelenleg működő paksi atomerőművi blokkok (VVER 440) villamos teljesítménye például 500 MW_p, hőteljesítményük pedig 1350 MW_{th}, a négy blokk összesen 2000 MW_p + 5400 MW_{th}.

A fogyasztó-berendezések esetében is van értelme teljesítményről beszélni. A hétköznapi életben a leggyakrabban talán a lakásvilágítás kapcsán találkozunk a **Watt**-ban megadott értékkel. Nagyobb teljesítményű lámpához egységnyi idő alatt nagyobb áramfogyasztás, magasabb költség tartozik –, azonban az, hogy mennyi és milyen fényt biztosít, már az alkalmazott technológia függvénye (pl. izzó, fénycső, LED).

Az erőművek a pillanatnyi teljesítményük és az eltelt idő függvényében **termelnek** a rendszer számára **hő- és/vagy villamos energiát**. Ez esetben a mértékegység általában **MWh, GWh, TWh.** Sajnálatosan gyakori hiba a „MW per óra” vagy „kW per óra” kifejezés használata (talán a gyakran használt km/óra okozta berögzültség miatt) – ami nem elfogadható, hiszen ez esetben nem osztás, hanem szorzás történik. Ha az energiatermelő egység **csak hőt**, vagy **csak villamos energiát** biztosít a rendszer számára, akkor **szétválasztott** energiatermelésről (Separated Heat and Power, SHP) beszélünk. Ha mindkét másodlagos energiahordozó értékesésének feltételei rendelkezésre állnak, akkor **kapcsolt energiatermelés**, más néven **kogeneráció** valósul meg (Combined Heat and Power).



2. ábra. Az atomerőmű által hő- és villamos-teljesítményei a veszteségek és önfogyasztás tükrében (WNA 2016 alapján szerk. Munkácsy B.)

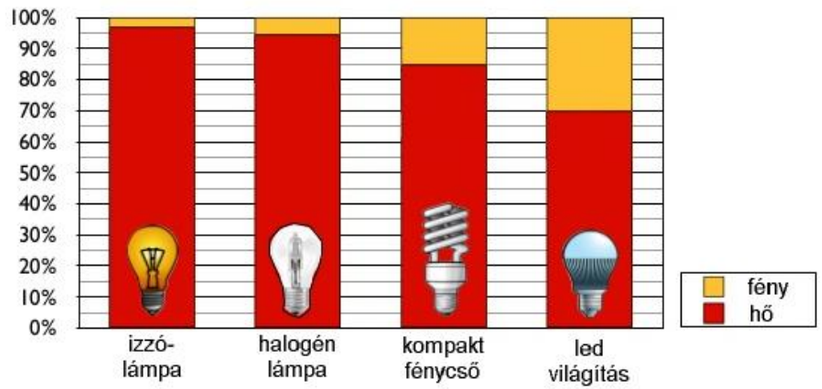
A fogyasztóberendezések esetében ugyancsak használjuk ezeket a mértékegységeket, ezek a berendezések működése során **elfogyasztott** (villamos) energia mennyiségére utalnak. Így találkozunk egyes háztartási eszközök energiahatékonysági címkéjén az éves fogyasztásra utaló adattal (3. ábra) – egy EU-szinten meghatározott jellemző fogyasztási mintázatot (mosógépeknél például évi 220 átlagos mosási ciklust) figyelembe véve.

3. ábra. Hűtőszekrény energiahatékonysági címkéje az éves szinten várhatóan elfogyasztott villamos energia mennyiségének feltüntetésével (162 kWh)

Egyes energiafolyamatok mennyiségi és minőségi értékelésének és elemzésének alapvető eszköze az **energiamérleg**. Ennek legfőbb rendeltetése az energiaveszteségek mértékének és okainak megállapítása elsősorban annak érdekében, hogy a szükséges energiamegtakarítási intézkedések kidolgozását segítsék. A mérleg az egyes energiafolyamatokban szereplő energiamennyiségeket veszi sorra a) a folyamatba bevitt; b) a folyamatból kinyert; c) a veszendőbe ment energiamennyiségek (pl. önfogyasztás) vonatkozásában. Az energetikai folyamatokban a kinyert energia és a bevitt energia hányadosa határozza meg a **hatásfokot**. Az **energiahatékonyság** ezzel összefüggő, ám ennél tágabb értelmezésben használt kifejezés: a teljesítményben, a szolgáltatásban, a termékben vagy az energiában kifejezett eredmény és a befektetett energia hányadosa. Az energiatermelésben ennek különös jelentősége azoknál a technológiáknál van, amelyek fogyatkozó energiaforrásokat használnak (pl. szén, nukleáris), vagy a megújulók közül olyanoknál, ahol a megújulás ütemét meghaladhatja a felhasználás üteme (biomassza, földhő). A hagyományos hő- és atomerőművek energetikai hatékonysága 30-35% - 2015-re vonatkozó adatok szerint a paksi atomerőmű esetében a 173 PJ-nyi fűtőelem felhasználásával 57 PJ-nyi villamos áramot állítottak elő, ami 32,9%-os hatásfokot jelent (MAVIR 2015). Ennél jobb eredményre ezen technológiák esetében csak akkor van lehetőség, ha a méreteket (leginkább a hőteljesítmény visszafogása érdekében) radikálisan csökkentjük, lényegében a manapság általános tekinthető teljesítmények századrészére! Csak igy érhető el, hogy a keletkező hő és áram egyaránt kezelhető mennyiségben keletkezzen, ténylegesen hasznosíthatóvá váljon és ezáltal a hatásfok 80-90% körüli értékre javuljon.

Az alacsonyabb energetikai hatásfok nem ennyire aggasztó például a nap- és hőenergia alkalmazásánál, hiszen ezek esetében a felhasznált energiaforrás lényegében korlátlan mennyiségben áll rendelkezésre. Nyilván árnyalni lehet és kell is ezt a problémát, hiszen természeti környezetben nem lényegtelen, hogy mekkora területigényt jelent egy adott teljesítményű nap- vagy szélerőművi beruházás – ilyen esetekben a magasabb hatásfok kisebb terület feláldozását eredményezi. Ez elsősorban a háztartási léptékű napelemes rendszerek méretezésénél jelentkező probléma, hiszen ez esetben általában igen korlátozott a rendelkezésre álló, jó tájolású tetőfelület mérete.

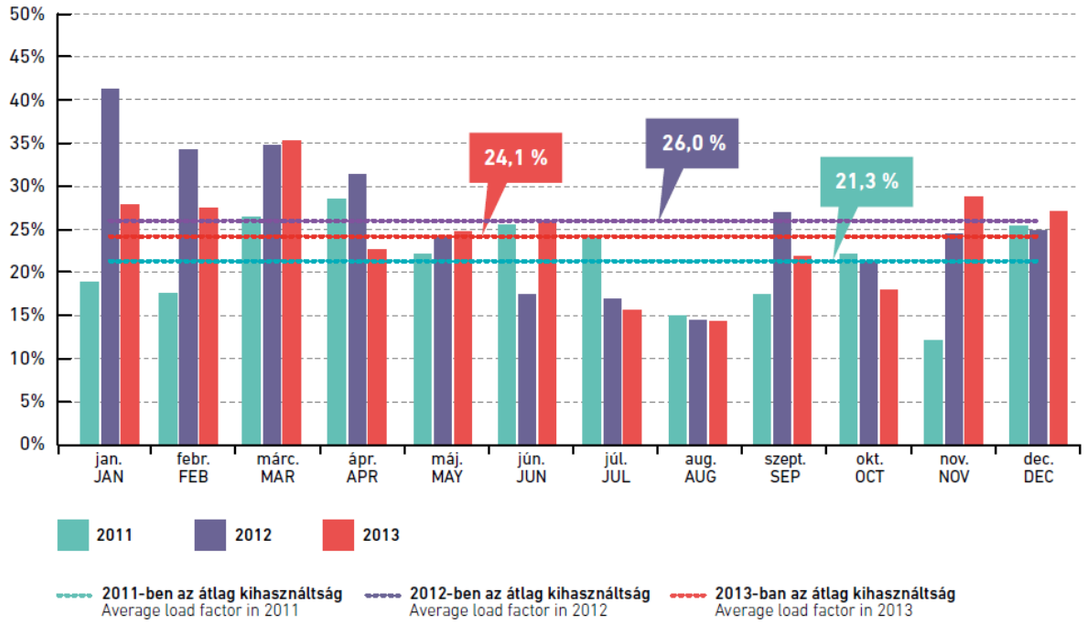
A hatékonyság a fogyasztás kapcsán is értelmezhető. Ez esetben ugyanazon minőségű energiaszolgáltatás (pl. 1500 lumen fényteljesítménnyel történő megvilágítás) létrehozásához szükséges, ténylegesen hasznosuló energia mennyisége a kérdés (4. ábra).



*4. ábra. Különféle világítási megoldások átlagos **hatékonysága** napjainkban – a **hő/fény arány** alapján (Glimmero, I. 2015 alapján szerk. Munkácsy B.)*

Összetettebb folyamatsorok elemzésére szolgál **a teljes életciklus során felhasznált és kinyert energia aránya** (Energy Return on Investment, röviden **EROI)**. Ennek a mutatónak a fontosságát az elmúlt évtizedben egyre nagyobb mértékben felhasznált nem-konvencionális energiahordozók (pl. olajpala, palagáz) kapcsán lehet látványosan bemutatni. Az életciklus-elemzések szerint ezeknél a kitermelés és feldolgozás olyan mértékű energiamennyiséget igényel, hogy a ténylegesen kinyert energia mennyisége átlagosan alig 5-10-szeres a befektetett energiamennyiséghez képest, de egyes amerikai olajpala-kitermelések kapcsán számoltak már döbbenetesen alacsony 1,1-1,8-as EROI értéket is (Yaritani, H. – Matsushima, J. 2014). Ez utóbbi esetben energetikai értelemben is megkérdőjeleződik a projekt hasznossága – nem is beszélve a környezeti szempontrendszerről, ami a nem-konvencionális fosszilis készletek kitermelése kapcsán különösen jelentős mértékű károkozást jelent.

A hatásfok mellett egy másik lényeges tényező is van, ami leírja egy-egy adott erőmű működését, ez pedig a **kapacitásfaktor.** Ez az egyes energiatermelő berendezések (vagy csoportjaik) **kihasználtságára** utal, amikor leírja, hogy egységnyi idő alatt a névleges teljesítményből adódó elméletileg lehetségeshez képest, mennyi energiát termeltek a rendszer számára, százalékban kifejezve. A kapacitásfaktor időegységről időegységre (pl. évről évre) változik. A szélerőművek esetében akkor volna ez az érték 100%, ha folyamatosan jelentős szélsebesség (a berendezések jó részénél 15-25 m/s) állna rendelkezésre – ebben a sebességtartományban dolgoznak csúcsteljesítménnyel a szélerőművek. Ez alatt részteljesítményt adnak le, e fölött biztonsági okból leállnak. A nap- és szélerőművek esetében az időjárás függvényében évről évre akár jelentős különbségek is lehetnek egy adott földrajzi térben számított kapacitásfaktorok között (5. ábra).

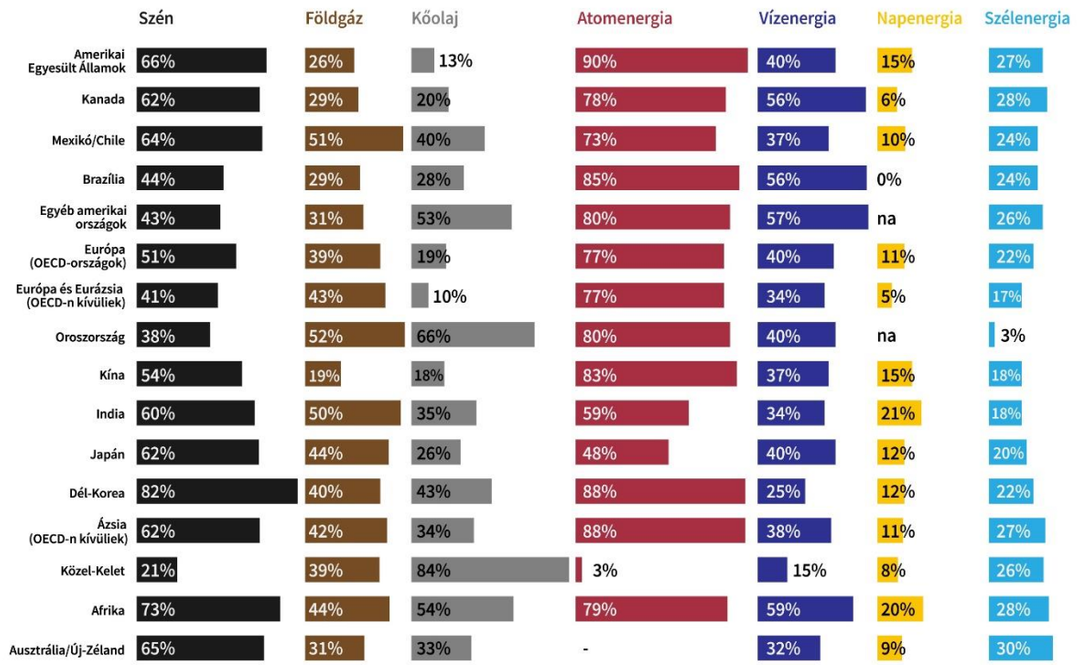


5. ábra. A szélerőművek éves kihasználtsága (kapacitásfaktora) 2011-2013 között Magyarországon (Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal, 2014)

Míg a nemzetközi szakirodalom a kapacitásfaktort, a hazai szerzők jó része a **csúcskihasználási óraszámot** használja a kihasználtság bemutatására, ami akkor volna 8760 óra (vagyis egy naptári évben az órák száma), amikor a kapacitás faktor 100%.

A különféle technológiák a szabályozási filozófia és a természeti adottságok függvényében más-más kihasználtsággal működnek (6. ábra):

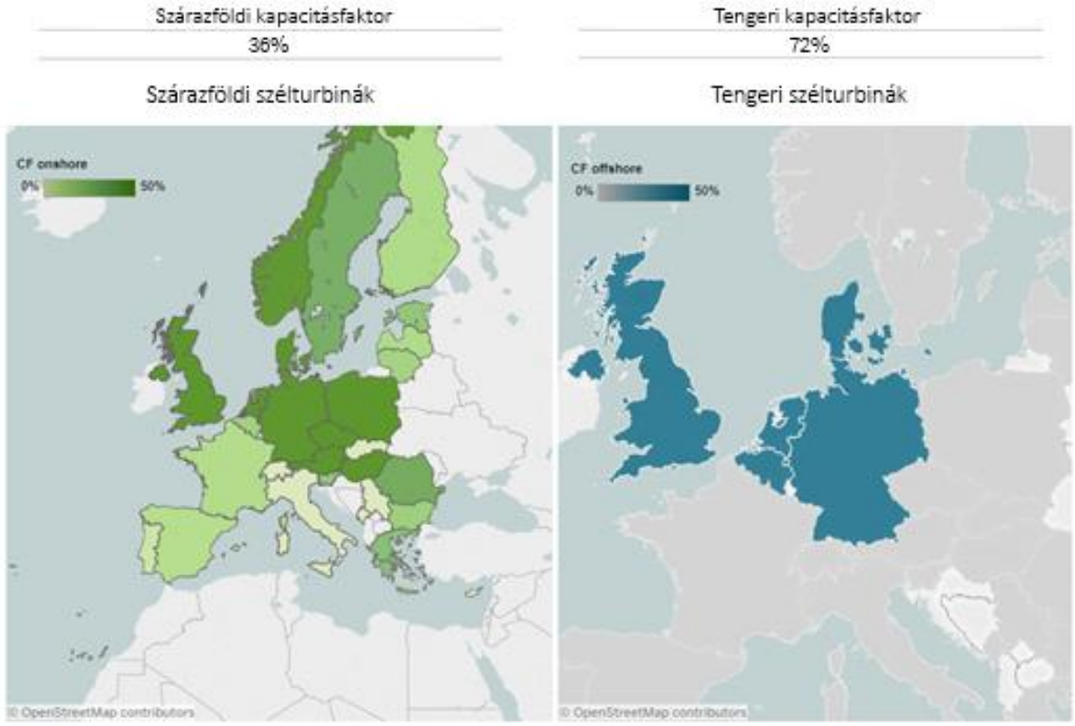
a) A 20. századi rendszerirányítás az alaperőművek esetében magas kihasználtságot követelt, a csúcserőművek esetében alacsonyat. Különösen jól látszik ez az atomenergia esetében, ahol általában 70-80% körüli értékek jellemzők, illetve a földgáztüzelésnél (30-40%), amit leginkább csúcsigények kielégítésére használnak;



6. ábra. Különféle technológiák átlagos kapacitásfaktora (EIA 2015 alapján szerk. Kovács K.)

b) A szélerőművek és napelemes rendszerek alapesetben az időjárás függvényében vesznek részt az áramtermelésben, kapacitásfaktoruk a technológiai fejlődés eredményeként rohamosan javul. A szélerőművek esetében ez az 1980-as években 10-15% körül járt, ma az átlag inkább 25% körüli, de a tengerbe telepített rendszerek esetében az 50%-os értéket is elérhet, akár éves szinten is. A napelemek esetében ez az adat – nyilván ugyancsak elsősorban a természeti adottságok függvényében – nagy mértékben szór az 5% és a 20-21% között (6. ábra).

Felmerülhet a kérdés, hogy a nagyobb kapacitásfaktor magasabb minőségként, jobb mutatóként értelmezhető-e. Semmiképpen. A nagyon magas mutató sokkal inkább utal egyfajta rugalmatlanságra, ami a 21. század energiarendszerében inkább problémaként jelentkezik, hiszen az olcsó és tiszta időjárásfüggő technológiák rendszerbe integrálását akadályozza, a folyamatosan változó fogyasztói igényekhez való igazodást nehezíti. Ugyanakkor a kirívóan alacsony érték kapcsán felmerülnek a pénzügyi és energetikai megtérüléssel (lásd EROI) kapcsolatos kérdések.



7. ábra. A szárazföldi és tengeri szélerőművek napi átlagos kapacitásfaktora 2017. december 7-én (EWEA 2017 - https://windeurope.org/about-wind/daily-wind/)

Az energiarendszer felépítése

Az 1700-as évek közepéig az emberiség energiafelhasználása nem volt számottevő, az élet minden területén a megújuló energiaforrásokat (főként a biomasszát, később a szélenergiát) és az izomerőt (emberit és állatit egyaránt) vették igénybe. Mivel ezek **gyorsan újratermelődnek és valamilyen formában mindenhol rendelkezésre állnak**, a fő feladat a célnak leginkább megfelelő és az adott földrajzi térben leginkább optimálisan alkalmazható energiaforrások használatba vétele volt. Például a gabona őrlésére a folyóvizek közelségében vízimalmok jöttek létre, a széljárta vidékeken szélmalmok épületk, ahol egyik sem állt rendelkezésre, ott szárazmalmokban őröltek emberi izomerő, vagy igavonó állatok segítségével (az utolsó hazai szárazmalom Szarvason működött, 1962-ben zárt be). Az energia szállítása nem volt jellemző, így ilyen jellegű veszteségekkel nem kellett számolni. A fogyasztás vonatkozásában az igényeket jellemzően igyekeztek a lehetőségekhez igazítani, ami nagyban hozzájárult a túlhasználat elkerüléséhez.

A drámai változást az ipari forradalom, vagyis a **gőzgép, a széntüzelés** és az erre épülő **gépesítés** elterjedése, és ezzel az energiaigények gyors növekedése hozta. Lépésről lépésre alakult át a termelés, így például a nagy bányavidékek földrajzi koncentrálódása okán ezek közelében iparvidékek jöttek létre, de megindult a szén kereskedelme és szállítása is. Néhány évtized elteltével már globalizálódott az egész rendszer, majd ezt a kapcsolatrendszert tovább mélyítette és bonyolította a **kőolaj alapú közlekedés**, majd a **villamos energia** megjelenése és térhódítása.

A 20. századi megközelítésben az energiarendszer két fő területe a **hőenergia-** és a **villamosenergia-termelés** volt, amelyek **egymástól lényegében külön életet élve**, kisebb-nagyobb fűtőművek, illetve nagy teljesítményű centralizált hőerőművek, valamint a hozzájuk kapcsolódó infrastruktúra (szállítás és elosztás) segítségével elégítették ki a társadalom energiaigényét.

Az energiagazdálkodás elmúlt évtizedekben kialakult rendszerének főbb elemei:

- az **energiahordozók kitermelésével** kapcsolatos infrastruktúra (mindeddig leginkább bányák);

- **energiahordozók feldolgozásával** kapcsolatos infrastruktúra (pl. nukleáris fűtőelemek gyártása);
- **a szállítással kapcsolatos infrastrukturális elemek** (például a gázvezetékek vagy a villamosenergia-hálózat);
- az **áram- és/vagy hőtermelést végző létesítmények**;
- **az energiatárolás létesítményei** (hosszú és rövid távú; centralizált és decentralizált megoldások hő és villamos áram tárolásra);
- a **hulladékok elhelyezésével kapcsolatos létesítmények** (pl. salakhányók, illetve a tervezett, ám mindeddig hiányzó tárolókapacitások az atomerőművekből kikerülő kiégett fűtőelemek számára);
- a fogyasztóberendezések, amely az úgynevezett energiaszolgáltatásokat biztosítják (pl. a fénycső a világosságot, a centrifuga a kevésbé nedves ruhát)
- valamint az eddigieken túlmenően van a rendszernek egy mindeddig méltatlanul elhanyagolt további eleme, a fenti **energiaszolgáltatásokat igénybe vevő ember**.

A fejlesztési és üzemeltetési szempontok között a környezetvédelem, mint az egész társadalom hosszú távú érdeke, hosszú ideig egyáltalán nem jelent meg – és sok esetben ma is hiányzik az elemzésekből, értékelésekből. Ennek a szemléletnek a megváltozása csak lassan következik be, aminek okai az alábbiak:

- az energiatervezési döntésekbe eddig bevont szakemberek végzettségüket tekintve meghatározóan energetikusok, így értelemszerűen nem rendelkeznek azokkal a széles körű természettudományos ismeretekkel, amelyek révén a szektor környezetterhelésének következményeit képesek volnának átlátni (hiszen nem ez a dolguk);
- a már működő erőművek üzemideje több évtized, ezért az esetek jó részében gazdasági szempontból racionális döntés ennek kihasználása;
- országos léptékben ugyancsak hosszú ideig tarthat a hatékonyság növelésével kapcsolatos beruházások végrehajtása (így az energiaigény csökkentése) – mert például limitált azoknak az építőipari vállalkozásoknak a kapacitása, amelyek épületenergetikai felújításokra specializálódtak;
- a jelenlegi közgazdaságtani paradigma nem kezeli érdemben a földi rendszer környezeti korlátait. Például nem vesz figyelembe az árképzésben olyan járulékos, **közvetett költségeket**, amelyeket nem az (energia)szolgáltatás vagy termék termelője és fogyasztója, hanem valaki más fizet meg – esetleg földrajzi értelemben máshol és esetleg egy későbbi időpontban. Így például nem a brit áramfogyasztók fizették a skandináv tavak elsavanyodásának környezeti költségeit (pedig a savasodást brit széntüzelésű erőművek füstgáz-kibocsátása eredményezte), illetve nem a mai fogyasztók fizetik az éghajlatváltozás esetleg évtizedek múlva jelentkező kárainak kompenzálásáért, hanem a következő generációk. Ezek az úgynevezett **külső költségek** az **externáliák,** amelyek miatt a szennyező technológiák ára az indokoltnál lényegesen alacsonyabb (a kutatások szerint fele, harmada a valós költségnek, amelyet például a környezeti károk emelhetnek drámai mértékűre) – tehát a jelenlegi meglehetősen környezetszennyező energiarendszer első látásra, a termelőüzem szintjén olcsón termel, így nincs miért váltani;
- a környezeti szempontok még ma is csak papíron jelennek meg, a gyakorlatban háttérbe szorulnak egyes szűk csoportok gazdasági érdekei mögött. A hazai helyzetre (is) jellemző az alábbi idézet: „*…a törvény-előkészítés folyamata annyit tesz, hogy a törvényt a piaci szereplők megírják*.” (Tóth I. J. 2010) – vagyis amíg a **döntéshozók és a különféle lobbicsoportok a jelenlegi rendszer életben tartásában érdekeltek**, addig csak nagyon lassan javul a helyzet, sőt akár romolhat is, lásd az Amerikai Egyesült Államok „klímatudomány tekintetében szkeptikus”, valójában inkább egyes ellenérdekelt tőkés csoportok által finanszírozott és manipulált jelenlegi vezetését. A centralizált energetikai megoldások életben tartása tehát az állami szintű korrupció számára kifogyhatatlan forrást jelent, ezért egyes döntéshozói csoportok számára elemi érdek ennek a rendszernek az életben tartása (lásd a Budapesti Corvinus Egyetem Szociológia és Társadalompolitika Intézet Korrupciókutató-központ és az Energiaklub Szakpolitikai Intézet és Módszertani Központ e témában készített tanulmányainak sokaságát).

Az alábbiakban a **korábban felsorolt rendszerelemek** közül csak a legfontosabbakat tekintjük át a térbeliség és a környezeti vonatkozások figyelembe vételével.

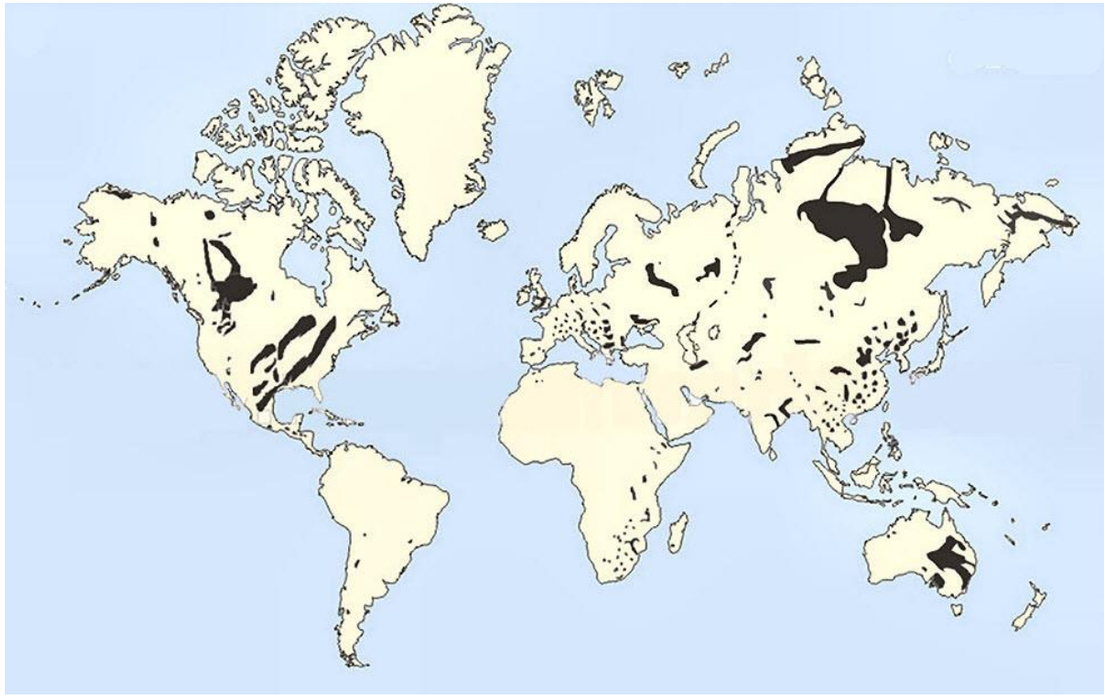
Bányászat

A megújuló energiaforrások többsége jelentős mennyiségben áll rendelkezésre szinte minden földrajzi térben, hiszen a aerotermia (a levegőből kinyerhető környezeti hő), a napsugárzás vagy a szél lényegében bármely földrajzi pontban elérhetők. Ezzel szemben a fosszilis tüzelőanyagok és az urán esetében a komoly területi korlátozottságot kell elsőként megemlíteni (9. ábra), ami nem csak viták, de egyre gyakrabban katonai konfliktusok, az emberi tragédiák és szenvedés forrása is. Maga a kitermelés ugyancsak jelentős probléma lehet, az alábbi felsorolás a legfontosabb hatásokat foglalja össze:

- munkahelyi ártalmak sokasága (pl. szilikózis), időről időre előforduló bányabalesetek;
- biodiverzitás csökkenése (főként a külszíni művelés esetében);
- talajszennyezés, talajpusztulás;
- tájrombolás;
- porszennyezés;
- vízfelhasználás és -szennyezés;
- lakott területek kitelepítésének, infrastruktúra áttelepítésének szükségessége;
- zajhatás.

8. ábra. Az olajkitermelés okozta környezetkárosításra rávilágító plakát (forrás: https://www.amnesty.org.uk/blogs/campaigns/come-shell-own-pay-clean)

A **fosszilis energiaforrások** (szén, kőolaj, földgáz) lebomlott növények vagy állatok maradványai. Előfordulásuk olyan földrajzi környezetben történt meg, ahol levegőtől elzárt bomlási folyamatok valósulhattak meg – általában egykori tengerek fenekén.



9. ábra. A jelentős szénkészletekkel rendelkező térségek (forrás: studylib.net)

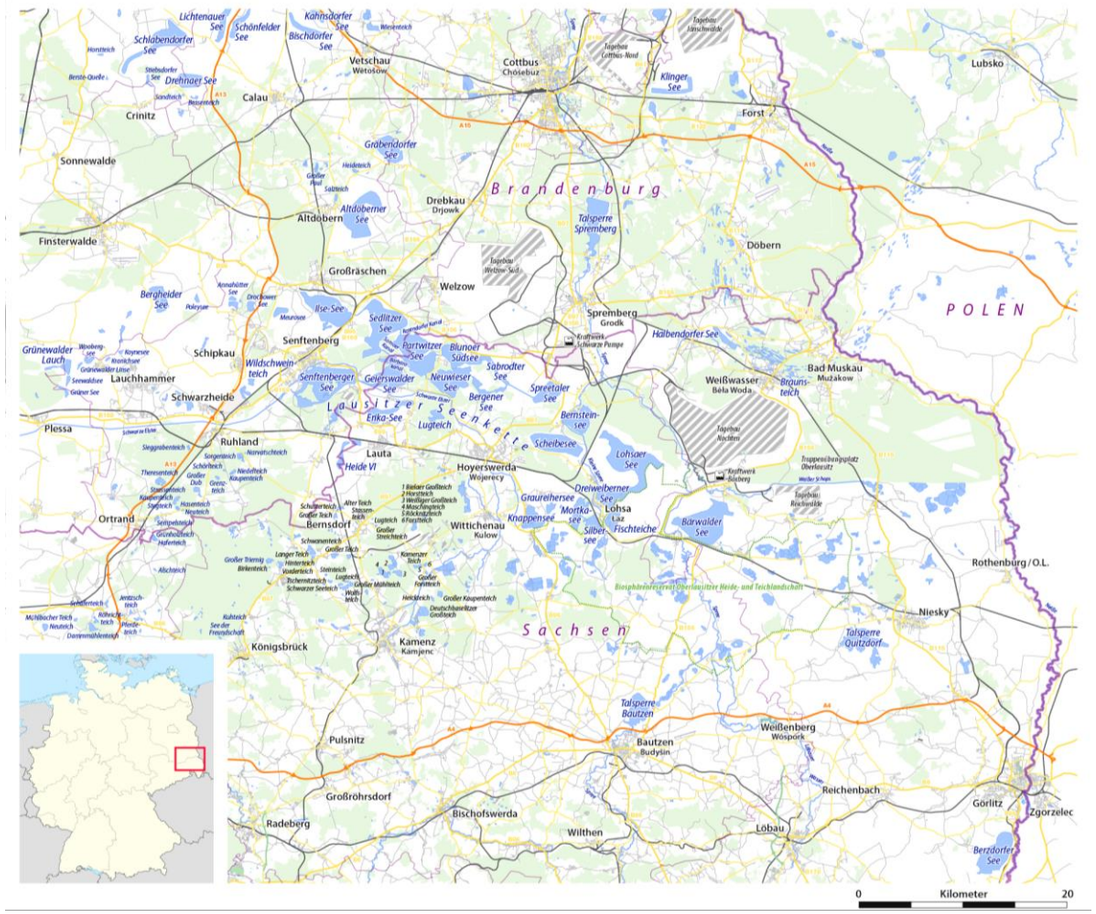
Lényeges problémakör ezek **kitermelése**, ami a készletek korlátozottsága és sajátos földrajzi elhelyezkedése, valamint a kitermeléssel járó környezetterhelés és egyre növekvő energiafelhasználás miatt egyre nehézkesebb, illetve egyre kevésbé vállalható. Ráadásul a hagyományos készletek erőteljes megfogyatkozásával előtérbe került különféle **nem-konvencionális** formák felhasználása csak tovább súlyosbítják a helyzetet (például palaolaj [shale oil], homokolaj [tar sand oil], palagáz [shale gas], homokgáz [tight sand vagy deep gas], széntelepek metánja [coalbed methane]). Kitermelésük általában elfogadhatatlan környezeti terhelést okoz (**10**. ábra), és jelentős – ráadásul a megmaradó készletek minőségének folyamatos romlásával egyre növekvő – mennyiségű energiát emészt fel.

***10**. ábra. Az olajhomok-kitermelés által érintett ökoszisztéma Kanadában (http://www.theenergycollective.com/mark-e-caine/185051/oil-sands-resource-technology-consequences)*

Éppen ezért vitatható, amikor egyesek a megújuló energiaforrások állítólagos **alacsony energiasűrűségé**re hivatkoznak. Ilyenkor ugyanis, eltekintve az életciklus-megközelítéstől, csak egyetlen állomását ragadják ki a teljes ciklusnak, leginkább azt, amikor a kitermelt olaj már hordóban, a kiválogatott szén vagy a feldolgozott nukleáris fűtőelem már az erőmű udvarán áll. Ily módon valóban lehetséges nagy energiasűrűséget kimutatni, csakhogy ennek így tudományos megalapozottsága nincs. A megújuló energiaforrások is átalakíthatók különféle másodlagos energiahordozókká, így például hidrogénné, ami már könnyedén

kiállja az efféle összehasonlítások próbáját – ám ez sem felel meg a tudományosság elvárásainak. Csakis **az adott erőmű <u>teljes életciklusára</u> vonatkozóan, az egységnyi megtermelt energiára vetített <u>területigény</u>** és az ezzel összefüggő hatások vagy egyes életciklusra számított emissziók, így az **egységnyi megtermelt energiára vetített <u>karbonkibocsátás</u>** alapján érdemes megtenni az összehasonlítást. Így már egészen más eredményt kapunk, hiszen a nem megújuló energiaforrásokat felhasználó erőművek esetében figyelembe kell venni az alábbiakat:

a) annak ismeretében, hogy egy széntüzelésű erőmű esetében 1000 MW villamos teljesítmény folyamatos biztosításához óránként 500-600 tonna közepes fűtőértékű szén felhasználása szükségeltetik (lignitből kétszer ennyi), könnyen elképzelhető, hogy hosszú évtizedeken át történő üzemeltetés esetén akár megyényi kiterjedésű bányavidék kitermeléséről kell beszélnünk (11. ábra);
b) figyelembe kell venni a különféle feldolgozóüzemek helyigényét;
c) számolni kell továbbá a törvényszerűen keletkező hulladékanyagok (meddő, salak, pernye, radioaktív hulladék) elhelyezéséhez szükséges infrastruktúra területigényével;
d) lényeges szempont továbbá, hogy vajon mennyi energiát kellett befektetni, amíg az iménti példában szereplő olaj a hordóba, a szén a halomba került − a kitermelés energiaigényétől a feldolgozás különböző fázisain át a szállítási lépések sokaságáig.



11. ábra. Az egykori külszíni bányászat területigényét érzékelteti a Lausitz térségében az egykori külszíni fejtések rekultiválásával létrehozott 3200 km² kiterjedésű mesterséges tóvidék (szerk.: Dörrbecker M., https://en.wikipedia.org/wiki/Lusatian_Lake_District#/media/File:Karte_vom_Lausitzer_Seenland.png)

További mérlegelést igényel, hogy a szélturbinák vagy aktív napenergiás rendszerek nem feltétlenül zárnak ki más területhasználatokat, sőt egyeseket még támogatnak is (gondoljunk csak a napelemekre, amelyek a parkolókban további hasznot hajtva árnyékolóként, esetleg az autópálya mellett zajvédő falként is funkcionálnak).

Az atomenergetika esetében szokás arra hivatkozni, hogy a nukleáris üzemanyag kiemelkedően nagy energiasűrűsége miatt csak nagyon kevés fűtőelemre van szükség, így a fenti problémák is szerényebbek, ám a valóság ennél árnyaltabb. Abból fakadóan, hogy 1 tonna fűtőelem legyártásához – az érc minőségének függvényében – 800-8000 tonna uránérc kitermelése szükséges, illetve **a kitermelt kőzet urán-oxid tartalma igen alacsony, jellemzően 0,5% alatti, ezért a hagyományos bányászat esetében a kitermelni, megmozgatni, elhelyezni szükséges kőzet mennyisége igen jelentős, akár ~tízezerszeres(!) lehet, ami egészen más megközelítésbe helyezi azt is, amit az energiasűrűséggel kapcsolatban gondolnunk kell**.

A fosszilis erőforrásokkal ellentétben az **urán** a környezetben mindenütt jelen van (legalább nyomokban), kitermelni azonban csak ott érdemes, ahol koncentrációja meghaladja a 0,05%-ot (Pór G. 2012), más források szerint a 0,03%-ot (Pátzay Gy. 2011). Megjegyzendő azonban, hogy **0,02% alatti urán-koncentráció esetén a teljes életciklusban több energiát kell a folyamat működtetéséhez befektetni, mint a kinyerhető energia, vagyis energetikai értelemben a tevékenység értelmét veszíti**. Ezt a törvényszerűséget a nemzetközi szakirodalom az „**energy cliff**” fogalmával írja le. Tehát az alacsony urán-koncentrációjú kőzettest kitermelésével, feldolgozásából jelentős többlet energiaigény következik, ami olyan mértékű CO_2-kibocsátást eredményez, ami végeredményben magasabb emissziót okoz egységnyi villamos energiára vetítve, mintha földgázt égetnénk. Ez a „**CO_2-csapda**” jelensége (Leewen, J. W. S. 2016).

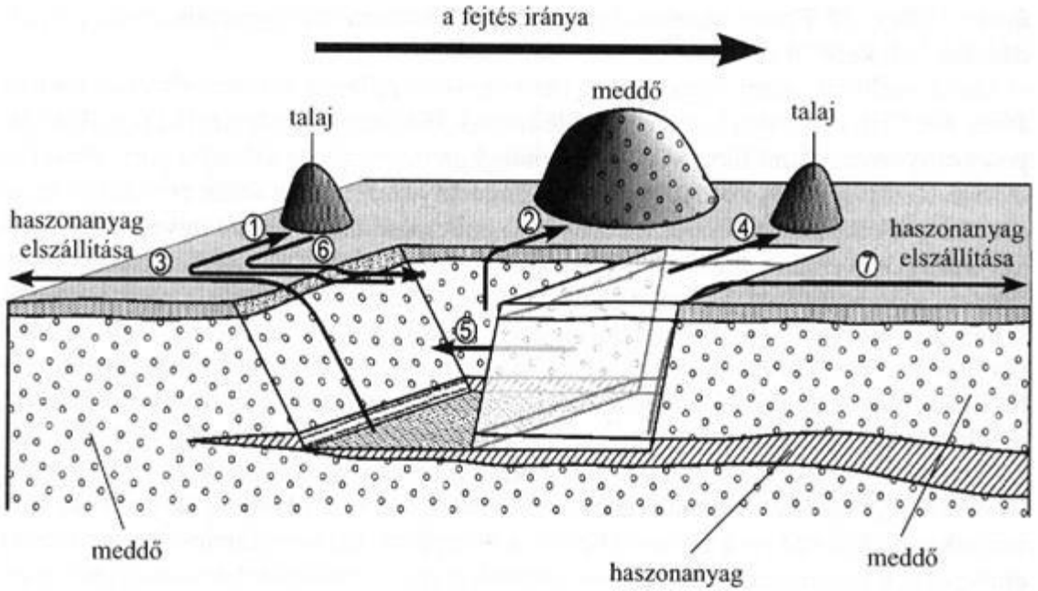
Az uránérc előfordulások jellemzően **urán-oxidokat** tartalmaznak. Ilyen leginkább az **uraninit**, vagy népszerűbb nevén uránszurokérc, amely a természetben jelentékenyebb mennyiségben fordul elő – bár csak kevés helyen, hiszen készletek főleg Kanadában, az Amerikai Egyesült Államokban, Csehországban, Dél-Afrikában, Marokkóban, Oroszországban, Kazahsztánban és Mongóliában, valamint Ausztráliában elérhetők.

A kitermelésének/kinyerésének 5 fő módja ismeretes (zárójelben a jelenlegi arányok):

- földalatti kioldás (in-situ leaching) – 45-50%;
- mélyművelés – 25-30%;
- külszíni fejtés 15-20%;
- főtermékből melléktermékként történő kinyerés – 5-10%;
- gyenge minőségű kitermelt érc vagy meddőhányó-kioldás (heap leaching) – 1-3%.

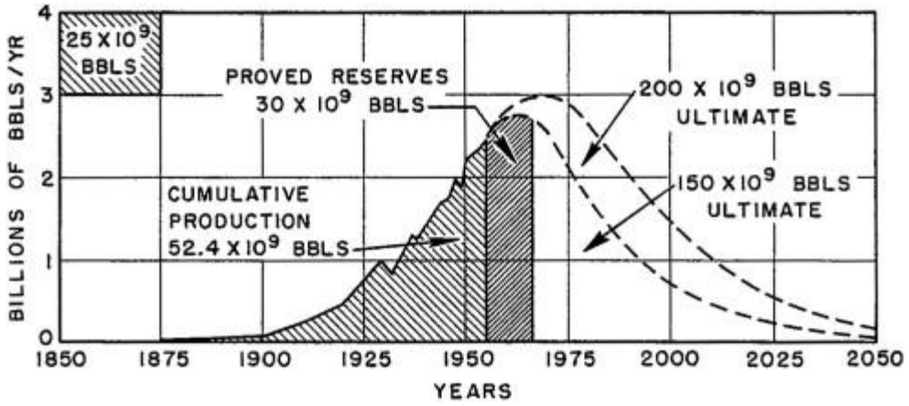
A különféle **kioldásos** megoldások (perkoláció) esetében kilúgozó ágensként leggyakrabban **nátrium-karbonátot vagy kénsavat** használnak. Ennek ismeretében belátható, hogy ezt a módszert csak ivóvízbázisoktól távol szabad alkalmazni, illetve az is, hogy a tevékenység lezárásával kulcsfontosságú az elszennyezett kőzetrétegek megtisztítása, átmosása. Az így kapott oldatok tisztítása további elkerülhetetlen feladat.

Ide tartozó problémakör a bányából kitermelt nem hasznosítható kőzetanyag, a **meddő** sorsa, amit rendszerint **meddőhányókon** formájában helyeznek el. Lehetőség függvényében völgyeket töltenek fel vele, máshol – főként a mélyművelésű bányáknál – többnyire kúpos, vagy dombszerű meddőhányók fordulnak elő. Gazdasági és erőforrásgazdálkodási szempontból egyaránt kulcsfontosságú az **értékes természeti erőforrás és a meddő aránya (stripping ratio)**, amit számolhatnak akár tömeg, akár térfogat egységekre, így lényeges ennek tisztázása is. Napjainkban a külszíni szénbányászat esetében ez az arány általában 3 és 7,5 között van tömegegységre vonatkoztatva, míg a **világátlag 4,5, vagyis 1 tonna szén kitermeléséhez további 4,5 tonna meddőkőzet megmozgatása tartozik** (12. ábra). Ez azonban nem jelenti azt, hogy az osztályozást követően **a bányából értékesített szénben** ne maradna akár meglepően nagy arányban szervetlen, éghetetlen alkotó. A gyakorlatban sokszor **akár 40-45%-nyi salakanyag** (hamu) **marad az égést követően vissza** (a fatüzelés esetén ennek aránya csak 1-2%). Fontos, hogy a fent említett mutatók folyamatosan romlanak, hiszen minden befektető, üzemeltető a legnagyobb profitra törekszik, vagyis mindig az elérhető legjobb minőségű energiahordozót termelik ki. Ezáltal a maradék mindig rosszabb és rosszabb minőségű lesz, ezért adott értékes erőforrás mellett egyre növekvő mennyiségű meddő keletkezésével kell számolni. A kitermelést a felfutó igények miatt is folyamatosan fokozni kell, ám ez csak egy darabig elképzelhető. Előbb vagy utóbb bekövetkezik a **hozamcsúcs**, ahonnan a kitermelés már nem fokozható tovább. Ha az igények növekedése nem csillapodik, akkor ennek közgazdasági következménye – a kínálat és kereslet törvényszerűségei alapján – az árak drasztikus emelkedése.



12. ábra. A külszíni bányászat során keletkező anyagmozgatás fő elemei (Dávid Á. 2013)

Az első országos léptékű hozamcsúcs, amelyre egy szakértő előre felhívta a figyelmet, az Amerikai Egyesült Államokban következett be az 1970-es évek elején. **Hubbert**, M. K. kőolajkutató geológus jelezte előre 1956-ban a 20 év múlva bekövetkező csúcsot – és ebben alig egy-két évet tévedett. 2010 óta az AEÁ olajkitermelése újra megnőtt, ami cáfolni látszik Hubbert koncepcióját, ugyanakkor látni kell, hogy a mostanában kitermelt készletek nem az amerikai kutató által vizsgált hagyományos, hanem úgynevezett „nem-konvencionális" források.



13. ábra: Hubbert olajhozamcsúcsot ábrázoló haranggörbéje (Hubbert, M. K. 1956)

Az első, az egész **világ kőolajkitermelésére vonatkozó**, széles körben ismert elméletet Campbell, C. J. angol és Laherrère, J. H. francia geofizikusok publikálták 1998-ban, amelyben 2004-re tették a globális olajkitermelés csúcsát (amely úgy tűnik, hogy a valóságban 2008–2009-ben következett be, ám azóta érdemben egyelőre nem csökkent, lényegében azonos szinten maradt). Természetesen más természeti erőforrások tekintetében is felmerül a hozamcsúcs problematikája. A **földgáz** esetében Bentley, R. W. (2002) 2020 környékére jelezte előre a kitermelés csúcsát, míg ugyanez a szén esetében a 2025 körüli időszakra várható (Zittel, W. – Schindler, J. 2007). Ugyanilyen alapon – hiszen a nukleáris-üzemanyagciklus sem zárt – alkalmazzák az elképzelést az **atomenergetikára** is. Itt még jobban kitapintható a jelenség lényege, hiszen a készletek földrajzilag jobban behatároltak. Tizenegy ország, köztük Magyarország, már kimerítette gazdaságosan felszínre hozható uránérckészleteit (NEA 2004). Világviszonylatban – ha a jelenleg gazdaságtalan alternatív megoldásokat is figyelembe vesszük – a kitermelés csúcsa 2035-2040 környékén várható, majd ezt követően jelentős árnövekedés prognosztizálható (Zittel, W. – Schindler, J., 2006).

Az egyes energiahordozók külön-külön vizsgálata ugyan érdekes eredményeket hozhat, ám sokkal korszerűbb megközelítés, ha **a lehetőségek összességét** igyekszünk figyelembe venni. Ebben a tekintetben jelent fontos lépést Duncan, R. C. 1989-ben megjelentetett, aztán többször pontosított koncepciója, amely az **Olduvai-elmélet** néven vált közismertté. Ennek lényege, hogy a népesség növekedése és a jelenleg meghatározóan felhasznált

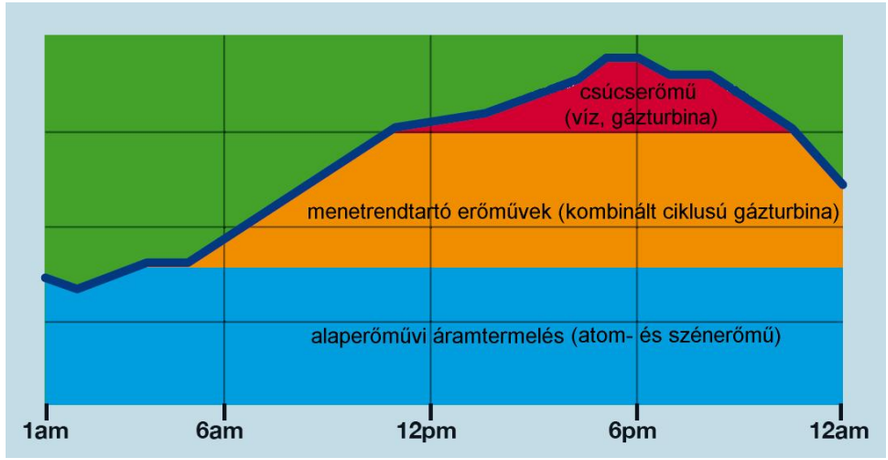
energiahordozó-készletek megfogyatkozásának eredményeként 2012-től hirtelen esés következik be a világ egy főre jutó teljes energiatermelésében, amit a szerző Olduvai-szakadéknak nevezett el – szerinte ugyanis ennek a zuhanásnak az eredményeképpen, néhány évtized múltán, ahhoz hasonló kőkori állapotok jellemzik majd az ipari társadalom utáni világot, mint amilyen a híres Olduvai-lelet idejében, kb. 1,8 millió éve lehetett (Duncan, R. C., 2007).

Az energiahordozók feldolgozásával kapcsolatos infrastruktúra

Ez a tevékenység főként a szén- és olajtüzelés előkészítő fázisai, valamint a nukleáris fűtőelemek gyártása kapcsán kiemelendő, illetve esetleg a biomassza kapcsán érdemel említést. A térbeliség és a környezeti hatások szempontjából a legjelentősebbnek a **nukleáris üzemanyag feldolgozás** tekinthető. A folyamatnak számos lépése van: a) őrlés; b) kezelés; c) dúsítás; d) fűtőelem gyártás. Természetesen az egész ciklus során keletkeznek radioaktív hulladékok, de a radioaktivitás döntő része a kiégett fűtőelemekben összpontosul. Ennek ellenére kiemelt figyelmet kell(ene) fordítani az **ércfeldolgozásból képződő zagytározói meddők** (mill tailings) kezelésére, rekultiválására, hiszen például gamma-sugárzás dózisintenzitásuk akár 20-30-szorosa is könnyen lehet a háttérértéknek, amit feltétlenül csökkenteni kell, és az érintett terület még így is csak erősen korlátozottan lesz hasznosítható. Az efféle meddők egészségkárosító hatása elsősorban az innen kilépő **radon gáz**[1] belélegzése révén érvényesül, meghatározóan daganatos megbetegedés formájában. A probléma megoldása alapesetben nem okoz komoly kihívást, hiszen néhány méternyi fedőréteg már kielégítő védelmet nyújt, hiszen hosszabb távon az erózió és az állatvilág hatásait is kompenzálni képes. A baj évtizedes vagy ennél is hosszabb távlatban olyankor keletkezik, amikor **a radioaktív anyagot tudatlanságból vagy a tájékoztatás elégtelensége okán széthordják – mint ahogyan erre a gyakorlatban már eddig is gyakran sor került**.

Áram- és/vagy hőtermelést végző létesítmények

Az áramtermelésben a legnagyobb kihívás, hogy a folyamatosan változó fogyasztói igényekhez kell igazítani a teljesítményt. Ennek okán a 20. században ezért az erőművek különböző típusai jöttek létre: a) a nehezen szabályozható, éppen ezért állandóan magas teljesítménnyel üzemelő, ún. zsinóráramot biztosító **alaperőművek** (széntüzelés, atomerőmű); b) a széles spektrumban alkalmazható **menetrendtartó erőművek**; c) a gyorsan reagálni képes **csúcserőművek** (14. ábra). A 21. században ez a rendszer alaposan megváltozni látszik, aminek a hátterében az időjárásfüggő megújuló energiaforrások nagyarányú megjelenése, az energiatárolási kapacitások igen jelentős bővülése, az export-import felértékelődése és a fogyasztói igények időbeliségének szabályozhatósága (demand side management) állnak.



14. ábra. A napi szintű áramigény-változást kielégítő, centralizált áramtermelő rendszer terhelési görbéje (Diesendorf, M. 2016)

[1] A **radon** a periódusos rendszer VIII. főcsoportjában található nemesgáz. Jele: Rn. A természetben a talajban és a kőzetekben előforduló színtelen és szagtalan gáz. Mindegyik izotópja radioaktív. A rádiumból alfa-sugárzást kibocsátva, radioaktív bomlás során keletkezik. A második leggyakoribb okozója a tüdőrák kialakulásának, ám a nemdohányzók esetében ezért elsődlegesen felelős.

Az elsősorban a **hőtermelésben** részt vevő ún. **fűtőművek** esetében is lényeges szerepe van az igények követésének, de mivel a hő tárolása egyszerűbb, illetve szigetszerűen működő rendszerekről van szó, ezért a műszaki kihívások is egészen másképpen fogalmazódnak meg.

A fosszilis tüzelőanyagok felhasználására támaszkodó különféle technológiák és alkalmazások sokasága miatt nem könnyű általános érvényű megállapításokkal élni. Ha mégis erre teszünk kísérletet, akkor alapvetően két problémakört kell kiemelni, amelyek változó mértékben, de mégis minden esetben korlátot jelentenek – vagy kellene, hogy jelentsenek – a felhasználásban: a fogyatkozó készletek és a jelentős környezetterhelés (emisszió). Az emisszió ez esetben sokféle lehet (leginkább lég-, víz- és zajszennyezés), de vannak további környezeti következmények, úgymint a tájrombolás vagy a biológiai diverzitásra gyakorolt káros hatások.

A fosszilis energiaforrások kibocsátásai közül a **mennyiség tekintetében** messze kiemelkedik az égetés után visszamaradó szilárd halmazállapotú anyag, a **salak** (nagyobb darabokba összetapadó hamu) **és pernye** (szálló por)**.** Ez utóbbi az 1 mm-nél ezerszer kisebb, mikrométeres mérettartományba tartozó hamuszemcsékre utal (particulate matter, **PM**). A szálló por szemcseméret alapján további csoportokba sorolható: a gyakorlatban megkülönböztetnek 10 mikronnál illetve 2,5 mikronnál kisebb részecskéket (PM_{10}; $PM_{2,5}$), melynek élettani jelentősége van, hiszen a 10 mikronnál kisebbek már túljutnak a garaton, a 2,5 mikronnál kisebbek pedig bejutnak a tüdőbe és onnan egyáltalán nem, vagy csak nehezen ürülnek ki. Ennek kapcsán az igazán aggasztó az, hogy a porszemcsék felületére tapadva a szennyező anyagok (toxikus fémek, rákkeltő dioxinok) nagyobb eséllyel képesek a tüdőbe lejutni, és ott egészségkárosító hatásukat kifejteni.

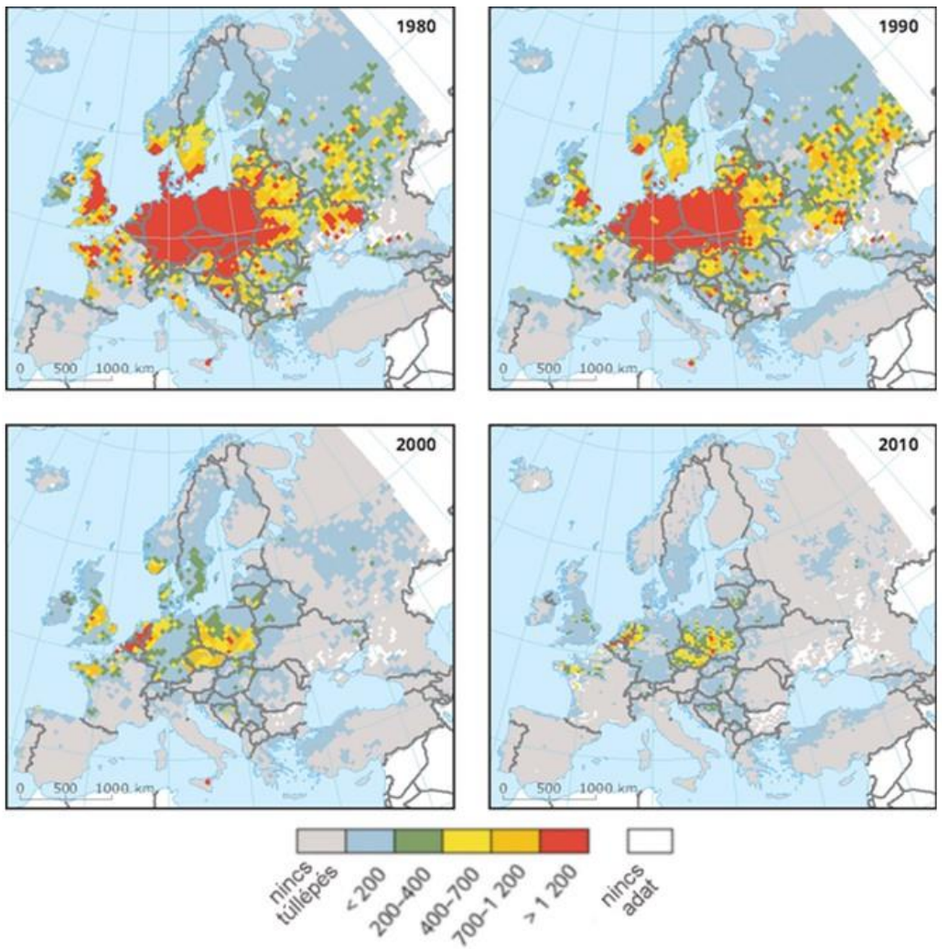
Például a Mátra Erőmű honlapján közreadott tájékoztató szerint az elégetett szén 20%-a kerül ki a folyamatból **salak vagy pernye** formájában. A hatalmas mennyiség mellett legalább ilyen mérvű probléma, hogy a szénben lévő **radioaktív anyagok** főként ezekben halmozódnak fel. Radioaktivitásuk a szén minőségétől függően akár több tízszerese is lehet a talaj, illetve általában a környezet átlagos radioaktivitásának. A mélyebb rétegekből származó, korábban kialakult feketekőszénnek nagyobb a radioaktivitása, így elsősorban **az Ajka környékén** bányászott szenekből keletkezett salak és pernye esetében **akár százszor több** radioaktív anyagot tartalmaz, de a Mecsekből, illetve Tatabánya és Oroszlány térségéből származó szén esetében is tízszeres-negyvenszeres sugárzásra számíthatunk. A salak radioaktivitása a szén égetési hőmérsékletétől is függ, magas hőmérsékleten (például hőerőműben égetve) a salak üvegesedik, így a **radon** kijutására kisebb mértékben kell számítani. A füstgázzal kilépő pernye mennyisége csővégi eszközökkel (pl. elektrofilterekkel) kellően magas hatékonysággal csökkenthető – ezek után már csak az így leválasztott, kinyert anyagok elhelyezése vagy észszerű felhasználása jelent újabb feladatokat: a leválasztott por ~95%-a lerakóra kerül, csak ~5% alkalmas cementipari vagy pernyebeton-gyártási célokra (a Mátrai Erőmű ide vonatkozó adatai szerint).

A kőszén kén- (akár 2-4%), illetve nitrogén-tartalma (1-2%) okán keletkeznek a levegőszennyezésként számon tartott vízben oldódó **kén-oxidok** és **nitrogén-oxidok** (utóbbihoz hozzájárul a légköri levegő jelentős nitrogén-tartalmának magas hőmérsékleten történő oxidációja is). Ezek a transzmisszió[2] során **kénes-** (H_2SO_3) és **kénsavvá** (H_2SO_4), valamint **salétromos-** (HNO_2) és **salétromsavvá** (HNO_3) alakulnak és szállítódnak, így nagy kiterjedésű területen járulnak hozzá a talaj és a víztestek elsavasodásához (lásd **száraz és nedves ülepedés**, utóbbi közismertebb nevén a savas eső).

A **globális szintű környezetszabályozás** egyik első és legfontosabb lépése éppen ezeknek a határon átívelő légszennyezéseknek a visszaszorítása volt, melynek kiindulópontja az ENSZ 1979-ben elfogadott Genfi Egyezménye. Ennek következményeként elsősorban a nyugat-európai térségben indult el az átalakulás, elsősorban az energiaszektorban. Alapvetően két irány bontakozott ki: egyfelől alacsonyabb kéntartalmú tüzelőanyagok kerültek előtérbe, így például megindult az átállás a biomassza felhasználására; másfelől csővégi megoldások (füstgáz-kéntelenítés) révén igyekeztek az erőművi kibocsátásokat visszaszorítani. Egy másik sikeres iránynak az üzemanyagok kéntelenítése bizonyult a közlekedési szektorban. Mint ahogyan az a 15. ábra látható, az 1980-as évekre jellemző igen aggasztó helyzet a fenti intézkedéseknek köszönhetően három évtized leforgása alatt rengeteget javult, az

[2] A szennyező anyagok szállítódása és átalakulása

ökoszisztéma savasodásnak való kitettsége erősen visszaszorult, mára csak Hollandia, Csehország, valamint Lengyelország déli része számít kifejezetten problémás területnek.



15. ábra: Az ökoszisztéma savasodásnak való kitettsége
*(a savasodás kritikus terhelés fölötti mértéke hektár/év, **H-ion ekvivalens**-ben kifejezve)*

Az erőművek szintjén tehát elsősorban a mésztejes **füstgáz-kéntelenítés** terjedt el széles körben, amelynek eredménye a gipsz. Ennek felét lerakón helyezik el, másik fele építőipari alapanyagként hasznosul. A még napjainkban is jelentős **nitrogén-oxid-kibocsátás** csökkentése is megoldhatónak látszik az úgynevezett „szelektív nem katalitikus redukáló" (SNCR) technológia megjelenésével és terjedésével. Ennek során ammónia (NH_3) vagy karbamid (CH_4N_2O) füstgázba való bejuttatásával nitrogén és vízgőz jön létre, így a keletkező termék már a légkörbe juttatható.

A légszennyezők közül mennyiség szempontjából messze kiemelkedik (**kg/kWh léptékű**), és következményei okán igen aggasztó a fosszilis tüzelésű erőművek **szén-dioxid** kibocsátása. A legrosszabb a helyzet a lignit égetésénél, ahol 1 kWh villamos energia megtermeléséhez a teljes életciklusban akár 1000 g is lehet a szén-dioxid-kibocsátás. Végeredményben a humán kibocsátás megnövekedése az ipari forradalom óta felborította a korábbi dinamikus egyensúlyi helyzetet, és megindult a **légköri koncentráció (immisszió) jelentős növekedése**, ami az ipari forradalom előtti 280-ról 400 ppm (parts per million) fölé emelkedett 2017-re. Ennek következménye a **globális éghajlatváltozás**nak nevezett jelenség, amely a fokozódó szélsőségek (hurrikánok, árvizek, szárazságok) révén lényegében évről évre nagyobb anyagi terhet jelent az emberiségnek.

Éppen ezért – bár **a fosszilis energiahordozók szerepe jelenleg még meghatározó – a korszerű energiagazdálkodás 2-3 évtizedes távlatban ezek leváltásával számol**. A „fosszilis lobbi" intenzív kampányának eredményeként felmerült ugyan a kibocsátott szén-dioxid felszín alatti geológiai tárolókban történő elhelyezésének lehetősége (Carbon Capture and Storage - CCS), esetleg a felhasználása is (Carbon Capture and Recycle - CCR) de szakértői berkekben konszenzus látszik kibontakozni a tekintetben, hogy ez a jelentős energiaigény és a költségek okán nem fog megoldást jelenteni.

Összegezve: a fosszilis energia felhasználása az egyike azon súlyos problémáknak, amelynek megoldása nélkül az emberiség néhány évtized leforgása alatt önnön életfeltételeit számolja fel a Föld bolygón.

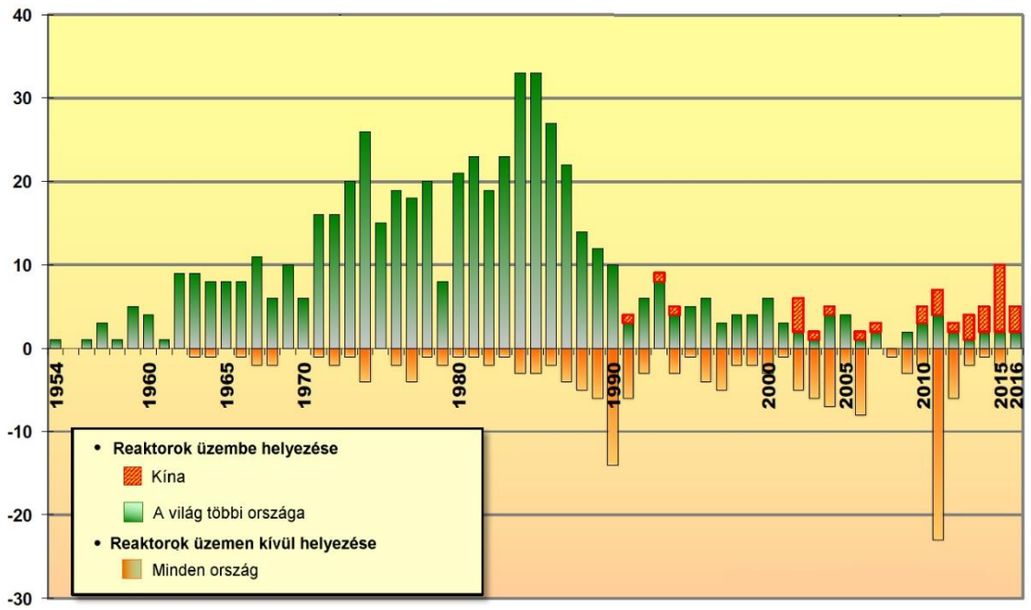
Az energiarendszer termelési oldalán az atomerőművek szerepét illetően a legnagyobbak a nézetkülönbségek a különféle szakmai műhelyek között. A technológia pontos megítélése már csak azért sem könnyű, mert a hozzá kapcsolódó információk meghatározó részét Magyarországon (is) titkosan kezelik, ezért a legkülönfélébb, a döntéshozatalban elemi fontosságú adatok és számítások csak korlátozottan – vagy még úgy sem – állnak rendelkezésre. Ez lényegében ellehetetleníti azt, hogy független szakértők végezzenek – a járulékos tevékenységekre is kiterjedő – gazdasági elemzéseket az új atomerőművek építése kapcsán.

Ami a műszaki megoldást illeti, az atomerőművek a fosszilis tüzelésű hőerőművekhez sok tekintetben hasonlóan működnek, ám esetükben a hőt az urán maghasadása szolgáltatja. A hasadás szabályozott láncreakcióként megy végbe, aminek során nagy mennyiségű hőenergia szabadul fel, amivel gőzt fejlesztenek, majd gőzturbina segítségével villamos áramot termelnek. Az atomerőművek az alábbi okok miatt nem fogadhatók el a 21. századi energia részeként:

- hőteljesítményük igen nagy, általában 1000-6000 MW körüli. A villamos teljesítményhez képest **legalább kétszeres hőteljesítményből fakadó hatalmas mennyiségű hőenergia** érdemi felhasználására nagyon korlátozottak a lehetőségek, így annak meghatározó többsége (pl. a paksi atomerőmű esetében 99,5%-a) a környezetet terheli;
- az atomerőművek **kimenő teljesítménye csak igen korlátozottan szabályozható**, így a rugalmas igények kielégítésére alkalmatlan, ami egyes országokban már most is komoly rendszerirányítási problémát jelent (Beckman, K. 2015);
- tervben van némileg **jobban szabályozható** erőművi blokkok építése, ám ezekre is igaz, hogy **gazdasági értelemben soha meg nem térülő befektetést jelentenek**. Ennek oka, hogy ha egy atomerőmű nem, vagy csak részteljesítménnyel üzemel, akkor nem termel bevételt sem, így teljes üzemideje alatt nem képes a befektetett tőkét visszatermelni (Felsmann B. 2015);
- az **villamosenergia-igények stabil ellátása csorbát szenved**, hiszen 500-1500 MW kapacitású erőművi blokkok tervezett karbantartásával vagy esetleges meghibásodásával akkora teljesítmény esik ki a termelésből, amit nem könnyű, vagy esetleg egy ideig nem is lehet pótolni;
- a környezetszennyező hatások közül kiemelkednek a maghasadás során keletkező **hulladékok, melyek** rendkívül radioaktívak, ráadásul sok esetben igen hosszú élettartamúak, ezért csak speciális nukleárishulladék-lerakókon helyezhetők el, ahol folyamatos őrzés és monitoring mellett több százezer évig kellene izolálni ezeket a környezettől – ám ilyen fogadóállomás egyelőre még sehol sem létesült a világban, (bár építésük néhol már folyamatban van);
- az atomerőműveket és feldolgozóüzemeket érintő **havária eseményeknek is** rendkívül tragikus következményei vannak. A műszaki problémák eddig legalább 25 esetben okoztak jelentős balesetet, ezek egy részében radioaktív anyagok is kerültek a környezetbe. A **Nemzetközi Nukleáris Eseményskálán** három balesetet soroltak az 5., vagyis a reaktormag súlyos sérülésével, jelentős következményekkel járó fokozatba (Sellafield, Egyesült Királyság – 1957; Lucens, Svájc – 1969; Three Mile Island, Amerikai Egyesült Államok - 1979). A Szovjetunióban jellemző viszonyok miatt kevéssé publikált az urali **Majak** térségében történt három súlyos szennyezés (1948-1955; 1957; 1968), amelyek közül az 1957 szeptemberében történt robbanás és következményei a Nemzetközi Nukleáris Eseményskálán 6. fokozatú minősítést kaptak – bár sok szakértő szerint valójában a 7. fokozatba volna sorolandó. A **csernobili** baleset (7. fokozatú katasztrófa) hatásai lényegében globális léptékűek. A leginkább megrázó, hogy a balesettel összefüggő daganatos megbetegedések a legújabb kutatások szerint Európában csaknem 1 millió embert érintettek. A beavatkozást igénylő – radioaktív cézium-137-tel szennyezett - terület kiterjedése 200 000 km^2 volt, a máig lezárt tilalmi zóna kiterjedése 2827 km^2, ami nagyobb, mint Nógrád megye. A **fukushimai** baleset (7. fokozatú katasztrófa) következményei egyelőre beláthatatlanok. A sugárszennyezett víz az erőműből a mai napig – és várhatóan még évekig – ömlik az óceánba, amelynek partmenti szakaszán folyamatosan a megengedett **határérték többezerszeresét** mérik*;*
- a **fegyveres harcok** szempontjából egyre inkább kiemelt szerephez jutnak a stratégiai fontosságú energetikai létesítmények. 1980 óta az iraki-iráni, az izraeli-iraki, izraeli-szíriai, amerikai-iraki konfliktus során számos esetben ért támadás különféle nukleáris létesítményeket;
- az atomtechnológia a **terrorizmus** számára is igen hatékony célpont. A Nemzetközi Atomenergia Hivatal adatai szerint 1995 és 2010 között **1266 esetben** történt sugárzó

anyagok – ebből 18 esetben dúsított uránium vagy plutónium – illegális szállítása vagy eltűnése;
- igen súlyos etikai kérdéseket vet fel a technológia **szoros kapcsolata a nukleáris fegyverkezéssel** (Bunn, M. 2010).

A fentiekben felsorolt negatívumok ellenére a világ országai közül 31-ben működnek atomerőművek – igaz, ez a szám 1-2 évtizeden belül csökkenni fog, mert az ipari országok egy részében már döntés született a meglévő kapacitások leépítéséről. A kapacitásbővítés csúcsidőszaka 1980-85 volt, ám **az 1986-os csernobili tragédia óta egyértelműen látszik az atomenergetika zuhanórepülése** (16. ábra).



16. ábra. Az atomerőművi kapacitások alakulása a világban 1954 és 2016 között – külön kiemelve a kínai adatokat (Schneider, M – Froggatt, A. 2016)

A kezdeti fellendülés oka az volt, hogy a technológia jól illeszkedett a 20. század centralizált energiarendszerébe, másfelől − elsősorban rövid távon − előnyös tulajdonságai is vannak. Ezek között elsőként a légkörvédelemben, újabban a klímavédelemben betöltött szerepét szokás kiemelni. Maga az atomerőmű – legalábbis működése közben − nem bocsát ki jelentős mennyiségben légszennyező anyagokat, ezért nem járul hozzá jelentősen a globális felmelegedéshez vagy a savas esők kialakulásához. Ugyanakkor téves az a hazánkban, főként az új atomerőmű kapcsán rendszeresen hangoztatott állítás, miszerint az atomenergiának nincs légszennyezése, hiszen a **teljes életciklusban** számolni kell egy számottevő levegőszennyezéssel – és egyéb emissziókkal is, leginkább a korábban már említett szilárd és iszapszerű radioaktív hulladékokkal. Az atomenergiának az uránérc bányászata és dúsítása, valamint az atomerőművek építése és bontása során jelentkezik **üvegházgáz-kibocsátása**, illetve ugyanez a kapcsolódó szállításokhoz is kötődik, de lényegesen kisebb mértékben, mint a fosszilis tüzelőanyagok esetében. A legutóbbi független számítások szerint a teljes életciklusban egységnyi villamosenergia-mennyiségre vetítve 90-150 g CO_2-e/kWh üvegházgáz-kibocsátással számolhatunk (Leeuwen, J. W. S. 2016) – ugyanakkor az atomipari szereplők elfogulatlannak éppen nem nevezhető publikációi ennél rendre kisebb értékekről, sokszor egyenesen nulla kibocsátásról adnak hírt. Mindazonáltal **az atomenergia teljes életciklusra vetített karbonkibocsátása egyelőre bizonyosan kedvezőbb, mint a legjobb fosszilisnek tekinthető földgázé (~400 g CO_2-e/kWh), ám a megújulókhoz képest (10-100 g CO_2-e/kWh) mégis számottevő**. Nem lényegtelen, hogy amíg a megújulók esetében a technológia fejlődésével ez az érték évről évre csökken, addig az atomenergia és a fosszilis tüzelés esetében az egyre rosszabb mutatókat produkáló **bányászat miatt folyamatosan növekszik**.

Napjainkban a nukleáris kapacitásbővítés a gazdag ipari országokban (ahol a környezettudatosság magasabb szintre jutott) már nem jellemző, sőt jellemzően a kapacitások teljes vagy részleges leépítése történik (Belgium, Németország, Olaszország, Spanyolország, Svájc, Franciaország). Az utóbbi 6-7 évben új erőműveket leginkább Kínában adtak át (16. ábra) – ám az is igaz, hogy a szélerőművek és napelemek révén biztosított villamos energia mennyisége Kínában már külön-külön is meghaladja az atomerőművek eredményeit.

Végezetül arról is érdemes említést tenni, hogy a sokat emlegetett **magfúzió** sem kecsegtet valódi megoldással. Egyfelől az extrém magas hőmérséklet miatt felmerülő technológiai problémák okán a gyakorlati alkalmazhatóság 30-40 éve folyamatosan tolódik újabb és újabb 30-40 évre. Az ezzel kapcsolatos **kutatás-fejlesztés költségei éves szinten csak az EU-ban 500 millió Eurót tesznek ki**, ezzel az energiagazdálkodás egészét nézve az atomenergetika kutatás-fejlesztésére szánt kiadások hasítják ki a legnagyobb szeletet a rendelkezésre álló forrásokból (és nem a megújulók támogatása, ahogyan azt sokan gondolják) (EEA 2016). Másodsorban nem világos, hogy milyen közvetlen környezeti következményei volnának a technológiának – ha sikerülne egyszer megvalósítani. Harmadrészt a közvetett következményekről kell említést tenni, amelyekről a Római Klub „A Növekedés határai" című tanulmánya már határozottan állást foglal. A számítógépes rendszerelemzés egyik forgatókönyvében végtelen erőforrásokat és hatékony környezetvédelmet feltételezve futtatták le a modellt, ami gyorsan megsokszorozódó népességet, ebből következően összeomló élelmiszer-ellátást jelzett előre, és emiatt vezetett az erőforrásgazdálkodás rendszerének összeomlásához. A korlátlan mennyiségű energia tehát közvetve, a túlnépesedésen keresztül okozná a társadalom és a gazdaság kudarcát.

A kapcsolt energiatermelés és típusai

Az energetikai hatékonyság javítása érdekében kidolgozott **kogeneráció** (kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés) csak az elmúlt évszázad utolsó egy-két évtizedében, már a decentralizáció eredményeként kezdett szélesebb körben elterjedni. **A kapcsolt energiatermelés lényege az áramtermelés során keletkező hő felhasználása termelési vagy háztartási célokra.** Ugyanakkor a tényleges kogeneráció a nyári időszakban, amikor jelentősen lecsökken a hőigény, sok esetben nem megvalósítható. Ennek a problémának a megoldására hűtést igénylő alkalmazások (pl. hűtőházak) elképzelhetők – így ma már a hőenergia mellett **hidegenergia-felhasználás** is számításba vehető. Azokat a rendszereket, ahol a hővel télen fűtenek, nyáron hűtenek (lásd abszorpciós és adszorpciós hűtőberendezések), **trigenerációs** megoldásoknak nevezzük. Legújabban már **quadgenerációra** is lehetőség van, ez esetben az égés során felszabaduló CO_2-ot is hasznosítják valamilyen ipari vagy mezőgazdasági célra.

A 21. században a rendszer több szempontból is radikálisan átalakul, az eddig egymással csak felszínes kapcsolatban lévő energiagazdálkodási területek összeköttetései egyre szorosabbá válnak. Ugyanakkor, mivel a hőenergia szállíthatósága korlátos, az egyenes következmény a lényegesen alacsonyabb, általában a **lokális hőigényekhez igazított teljesítmény** (1-10 MW villamos és ennél mintegy kétszer nagyobb hőteljesítmény)**,** ami nem más, mint **az elosztott termelés,** vagyis a **decentralizáció térnyerése**. Fontos megjegyezni, hogy az imént említett összefonódást erősíti, hogy a villamos energia számos további célra átalakítható, így akár hőenergiaként vagy közlekedési célra is felhasználható, és ennek következtében a szerepe a ezen területeken (hőenergetika és közlekedés) továbbra is erősödni látszik:

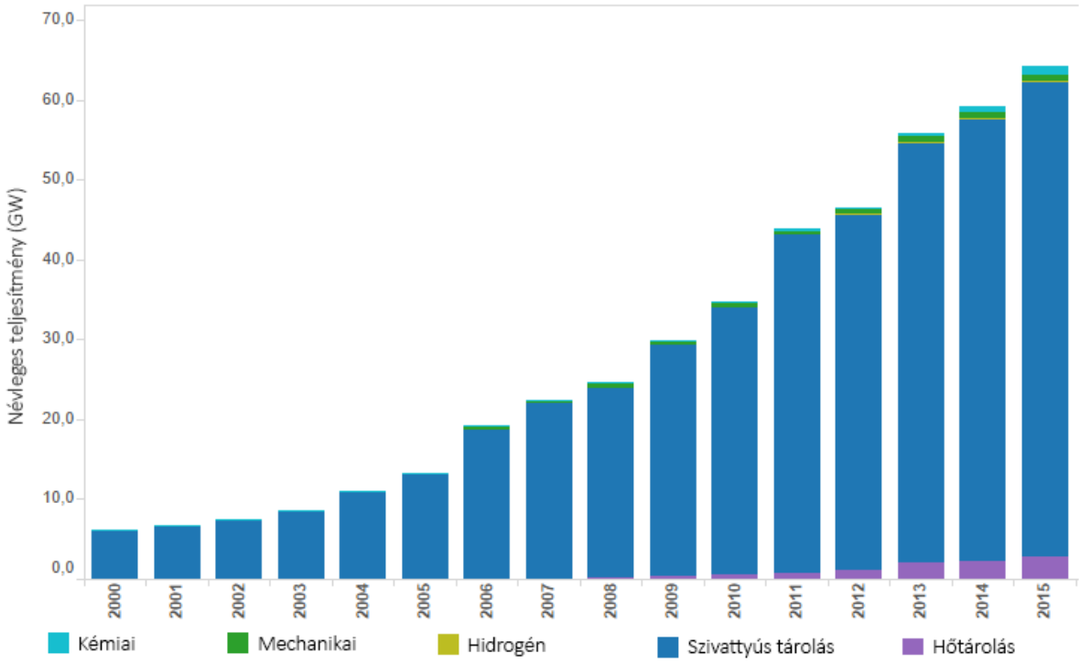
a) e pillanatban úgy tűnik, hogy az új technológiáknak, így elsősorban a környezeti hőt (például a levegő hőjét) áram segítségével felhasználó **hőszivattyú**knak köszönhetően a jövőben a villamos energia válik a hőenergia-termelés egyik meghatározó másodlagos energiahordozójává;
b) az elektromos autózás elterjedésével a villanymozdonyok, a trolibuszok és villamosok mellett már 5-10 éves előretekintésben is az várható, hogy a személygépjárművek, kistehergépjárművek és az autóbuszok jó része is villamos meghajtású lesz, míg 20-30 éves távlatban akár egy teljes, a nagy távolságú fuvarozást érintő átállás is elképzelhető.

Mindezen változások azt eredményezik, hogy a 20-40 éves távlatú energiatervezési feladatok végrehajtása során az eddiginél lényegesen nagyobb figyelmet kell szentelni a fentiekben felvázolt erősödő kapcsolatokra, összefüggésekre.

Energiatárolás

A közkeletű tévedés szerint az energiatárolás a megújuló energiaforrások térnyerésével szükségszerűen felbukkanó meglehetősen költséges megoldás, ami elkerülhető volna, ha továbbra is a korábban alkalmazott technikai elemeket alkalmazzuk. Ezzel szemben a valóság az, hogy maga a műszaki megoldás azért vált szükségessé, és a kiépült kapacitás egy része azért valósult meg (17. ábra), mert **a zsinóráramot adó atom- és széntüzelésű erőművek nem képesek az időben változó fogyasztói igényekhez igazodni**. Emiatt a menetrendtartó

és a csúcserőművek mellett sok esetben szükséges volt tárolási megoldások kiépítése is. Mindemellett a megújuló energiaforrások egy része jól szabályozható teljesítményt ad, valójában csak egy részük, leginkább a szélerőművek és a napelemes megoldások rohamos térnyerése miatt vált szükségessé további tárolási kapacitások üzembe állítása – leginkább azért mert az alternatív megoldások, így a rugalmas árképzésre és az információs technológiára épülő „okos rendszerek” elterjedése nem kellő ütemben történik.



17. ábra. Az energiatárolási kapacitás változása globális léptékben típusonkénti csoportosításban (DOE 2017)

A **hőenergia** rövid távú, legfeljebb néhány napos tárolása a háztartások szintjén már a 20. században elérhető volt. Ugyancsak rendelkezésre állt műszaki megoldás, nevezetesen a szivattyús tárolás, akár nagyobb mennyiségű **villamos energia** rövid távú tárolására a víz helyzeti energiájának formájában. A 21. században egyre inkább felértékelődő technológiai megoldások sokasága tartozik ebbe a tárgykörbe. Napjainkban a nagyon rövid (másodperces léptékű) és a nagyon hosszú (szezonális léptékű) energiatárolás terén mutatkozik igen jelentős technológiai fejlődés. A legegyszerűbb és napjainkban leggyorsabban gyarapodó tárolási módok a különböző szuperkapacitások és akkumulátoros technológiák, de gazdaságossági szempontból akadnak lényegesen kedvezőbb lehetőségek, illetve egészen új irányok is (az "áramból-gázt" technológia; a folyékony és a sűrített levegős energiatárolás). Ez utóbbi megoldások esetében a térbeliségnek és az ezzel kapcsolatos ismereteknek igen nagy jelentősége van, így geográfusok bevonása nélkül sok rossz megoldás születhet a gyakorlatban.

A megújuló energiaforrások villamosenergia-rendszerbe integrálásának szempontjából lényeges kérdés a **tárolási kapacitások méretezése**. A jelenlegi technológiai lehetőségek figyelembe vételével, elsősorban a napi szintű szabályozási feladatok ellátásához és a frekvenciastabilitás biztosításához elegendő lehet a támogatandó erőművi teljesítmény **nyolcadát-tizedét** rendszerbe állítani, vagyis például egy 3000 MW-os rendszerben 300-360 MW tárolókapacitást üzembe helyezni, például gyorsan reagálni képes akkumulátorok vagy szivattyús tározók formájában (Kubik, M. 2018). Ez lényegesen kisebb, mint amit 1-2 évtizede gondoltak, miszerint a megújuló kapacitások megkövetelik az ugyanakkora léptékű tárolási vagy fosszilis háttér-kapacitást.

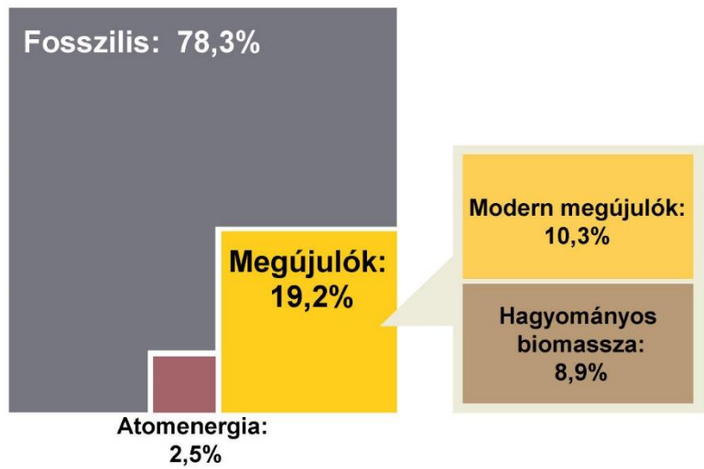
Az energiarendszer működése és a fenntartható energiagazdálkodás pillérei az energialánc tükrében

A rendszer működése szempontjából a 20. században alapvetésnek számított, hogy az energia áramlása lényegében egy irányba, a centralizált rendszer központjaiban lévő termelőtől a periférián elhelyezkedő fogyasztó irányába történt. Az **energialánc** a **20. századi energetikai értelmezésben** az alábbi módon állt össze:

1. bánya: ahol az **elsődleges energiahordozókat** kitermelik;
2. elsődleges feldolgozás: például a szenet különválasztják a meddőtől, osztályozzák, az olajat, a földgázt víztelenítik;
3. másodlagos feldolgozás, például az erőművi áramtermelés. A két feldolgozási lépés eredménye a **másodlagos energiahordozó**;
4. szállítás: például a távolsági szállítást szolgáló nagyfeszültségű vezetékrendszer révén;
5. elosztás: pl. az áram esetében az kisfeszültségű elosztóhálózat révén;
6. végfelhasználás, vagyis **energiaszolgáltatások** igénybe vétele.

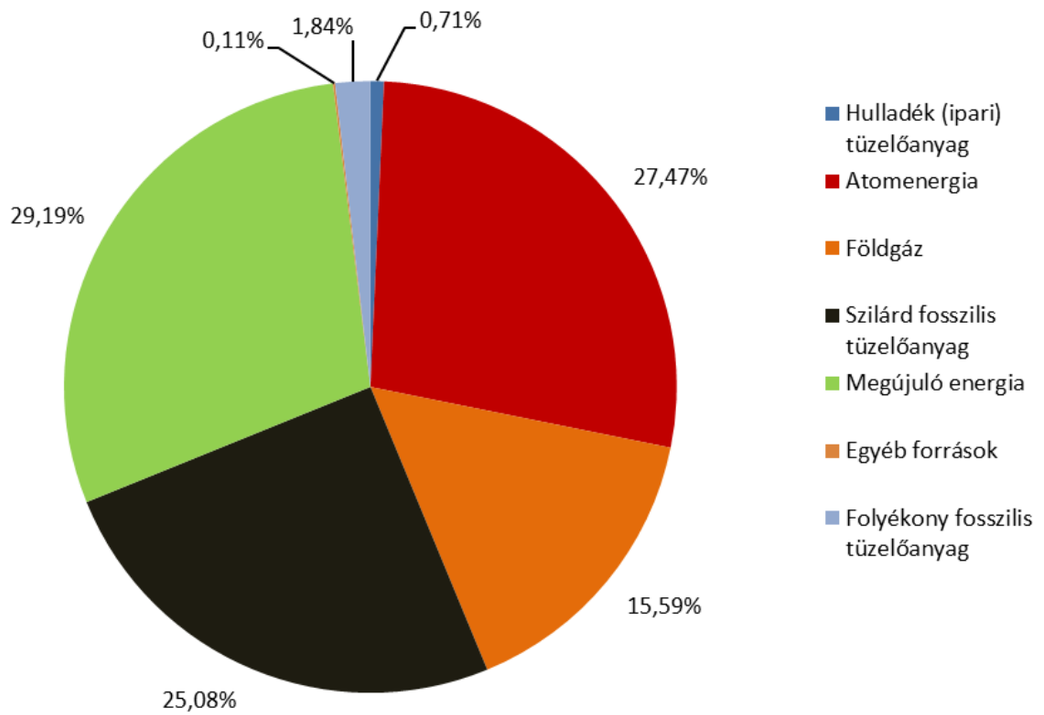
A folyamat első lépése tehát a természetben elérhető energiahordozók kitermelése. Globális léptékben az elsődleges energiahordozók felhasználása folyamatosan növekszik, az 1970-es 230 000 PJ értékről mára 590 000 PJ-ra kúszott fel. Jelenleg a fosszilis energiaforrások felhasználása dominál (18. ábra), közöttük mennyiségben komoly eltérések nincsenek: a kőolaj felhasználása a legjelentősebb (a fosszilis forrásokon belül közel 39%, leginkább közlekedési felhasználás), ezt a szén (35%), majd a földgáz (26%) követi (IEA 2016a).

A forradalmi változások azonban elindultak. Az energiarendszer forrásszerkezetében az iparosodott országokban a megújuló energiaforrásokra vonatkozóan a viharos gyorsaságú kapacitásbővítés tanúi vagyunk (25. ábra), ám globális léptékben néhány évtizedig még bizonyosan a fosszilis energiaforrások dominanciája lesz megfigyelhető. Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy sok tekintetben nem állnak rendelkezésünkre pontos statisztikai kimutatások e téren, ugyanis a megújuló energiaforrások felhasználásának jelentős részéről mérések, kimutatások híján nincsenek érdemi adatok (így például a fejlődő térségben összegyűjtött és felhasznált szerves hulladékokból, például szárított állati trágyából nyert hőenergia vagy az ipari országokban a napkollektorok, napelemek által megtermelt hőenergia mennyiségéről). A felhasznált erőforrások arányáról a legvalószínűbb globális léptékű becslést az 18. ábra mutatja.



18. ábra. A primer energiaforrások becsült részaránya a globális végső energiafogyasztásban (tehát a fogyasztókhoz eljutó energiamennyiségre vetítve). Forrás: REN21 (2016)

A változások különösen látványosak az **Európai Unióban**, ahol a **villamosenergia-termelés** tekintetében az utóbbi években már a megújuló energiaforrások váltak a legfontosabb szereplővé, részarányuk 2016-ban elérte a **30%**-ot. A tendencia bizonyosan töretlenül folytatódik a közeljövőben is, tizenöt éven belül (2030-ra) célként az 50%-os részarány elérése fogalmazódott meg. Az áttörés ezen a területen a leglátványosabb, a hőtermelésben és a közlekedésben kicsit lassabb.



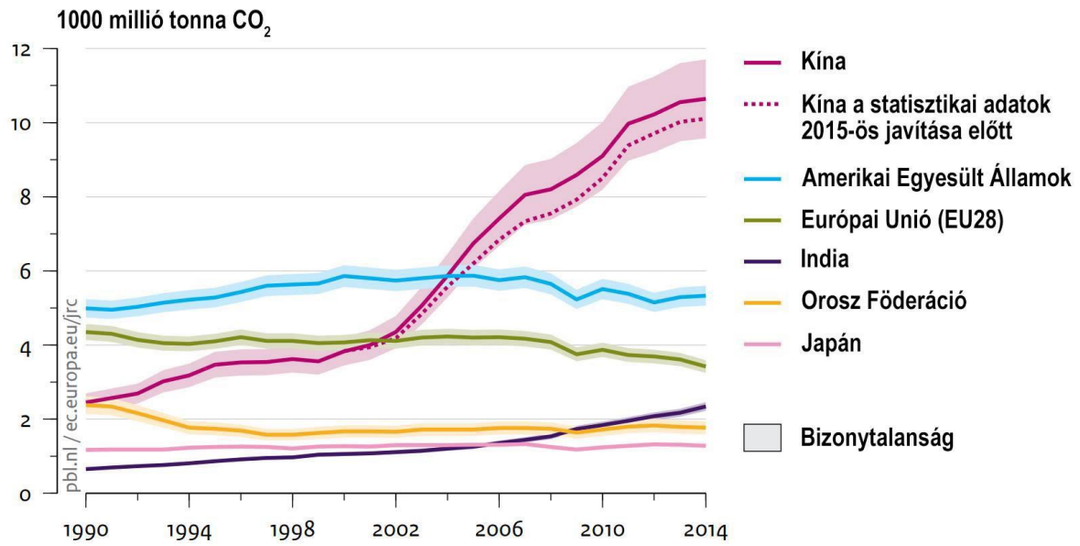
19. ábra. Az EU28 villamosenergia-termelésének forrásszerkezete 2014-ben (az Eurostat adatsora alapján szerk.: Havas M.)

A jelenleg tapasztalható **energetikai fordulat** fő okai:

- a fosszilis és nukleáris energetika az egyre aggasztóbb mértékben **fogyatkozó készletekre** támaszkodik – a fosszilis energiaforrásokhoz és uránérchez való hozzáférés, az olcsón kitermelhető készletek megcsappanásával műszakilag **egyre nehezebb és egyre drágább,** vagyis előbb-utóbb bekövetkeznek a **hozamcsúcsok**, ahonnan a kitermelés már nem növelhető tovább. Az egyes energiahordozók külön-külön vizsgálata ebből a szempontból már önmagában is tanulságos eredményeket hozhat, ám sokkal korszerűbb megközelítés, ha a hozzáférés korlátosságának összességét igyekszünk figyelembe venni;
- a fogyatkozó és egyre drágább készletek **nemzetstratégiai szempontból kulcsfontosságú területekre** (közlekedés, szállítmányozás, villamosenergia-ellátás, kommunikáció) vannak hatással és jelentenek évről évre fokozódó **ellátásbiztonsági kockázatot**;
- a megújuló energiaforrásokat felhasználó **technológiák ára** sok esetben radikálisan csökkent, így ezek ma már sok esetben a legolcsóbb befektetési alternatívát jelentik;
- zuhan az **energiatárolás ára** – a rövid távú hőtárolás már eddig is általános volt, azonban ma már az elektromos áram tárolására is egyre többféle lehetőségünk van;
- egyre szélesebb körben terjed a felismerés **a megújulók térnyerésével járó közvetett előnyökről**: a) a megújuló források decentralizáltan és helyben (akár vidéki környezetben) termelnek bevételt, helyben kínálnak **foglalkoztatást** (lásd: lemaradó térségek fejlesztése); b) erősítik az **energiademokráciát**, ami az egyének és közösségek számára fontos érték (a tőkés társaságok és egyes döntéshozók számára viszont egyre inkább zavaró); c) a kisebb környezetterhelés miatt **csökkenő egészségügyi kiadásokat** eredményez;
- a fosszilis és nukleáris energetika által okozott **környezeti költségek és károk** (pl. az éghajlatváltozás következményei, a kiégett fűtőelemek elhelyezésének nehézségei és költségei, a reaktorbalesetek révén környezetbe kerülő sugárszennyezés) olyan mértékűek, hogy az ezekkel összefüggő kiadásokat (pl. a károk helyreállítását) egyre kevésbé lehet finanszírozni. Vélhetően leginkább ez a tény motiválja az elmúlt években felgyorsult nemzetközi éghajlatvédelmi összefogást is.

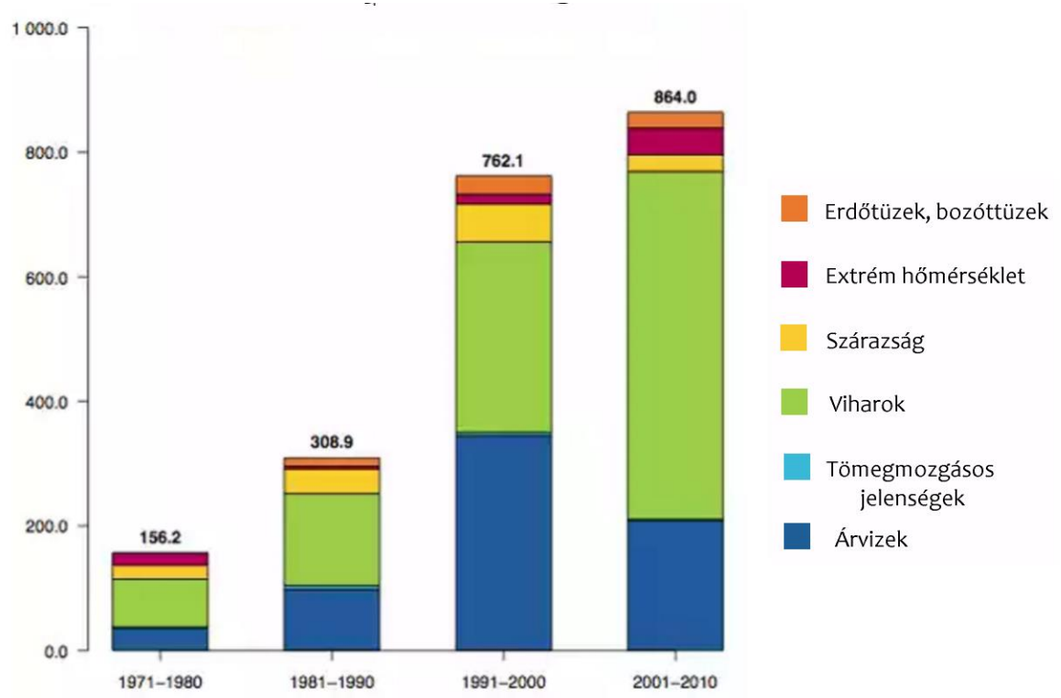
Első benyomásunk persze lehet az, hogy ebben a tekintetben már nincs aggodalomra ok, hiszen az ENSZ munkájának köszönhetően megvan a nemzetközi összefogás, a gazdag országok – így hazánk is – jó úton járnak a kibocsátás-csökkentésben. Legalább húsz európai országban megvalósult a „szétkapcsolás” (decoupling), tehát a gazdaság teljesítményének növelése mellett sikerült a szén-dioxid-kibocsátás növekedését megfékezni – aminek elsősorban az energetikai forrásszerkezetváltás és a hatékonyságnövelés áll a hátterében. Ha azonban mindennek a mélyebb összefüggéseit vizsgáljuk, már nincsen okunk ilyen felhőtlen

optimizmusra, hiszen az adatokból az is látszik, hogy nagyrészt inkább egyfajta térbeli átrendeződése valósult meg a gyártásnak, és ezzel együtt a kibocsátások földrajzi eloszlásának. A termelés keletre (főként Kínába) tolódása az ottani kibocsátások 500-600%-os növekedését okozta 25 év alatt (Olivier, J. et al. 2015), ami csak részben indokolható a helyi igények növekedéséből fakadó kibocsátás-növekedéssel.

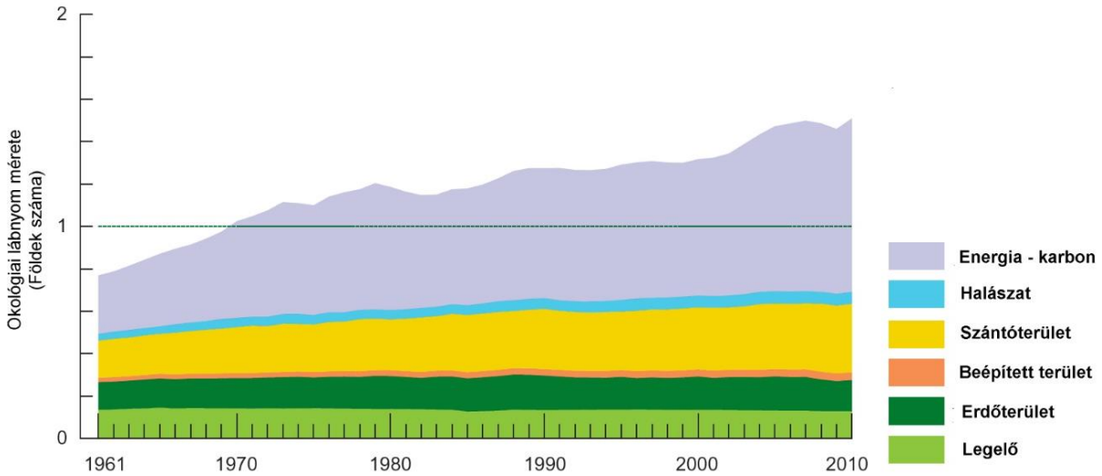


20. ábra. A fosszilis tüzelőanyag égetéséből és a cementgyártásból származó szén-dioxid-emissziója a világ 5 legnagyobb kibocsátója és az EU28 esetében (Olivier, J. et al. 2015. alapján szerk: Kovács K.)

És mivel a globális kibocsátás folyamatosan nő, a katasztrófák számossága és a károk mértéke is rohamosan növekszik – utóbbi egy emberöltő alatt az ötszörösére emelkedett. És a helyzet a **Stern-jelentés** (2006) szerint csak romlani fog. A Világbank volt vezető közgazdásza szerint a **korai, határozott cselekvés hasznai** (tulajdonképpen a károk elkerüléséből fakadóan) lényegesen nagyobbak volnának, mint a költségei. Napjainkban a GDP 1%-át teszi ki a károk mérséklésének és a kibocsátás csökkentésének elvárt költsége – ám ha ez elmarad, néhány évtized múltán a globális GDP-nek akár 20%-át is felemészthetik a kiadások.



21. ábra. Az éghajlatváltozás okozta természeti csapások okozta anyagi károk évtizedes bontásban (mrd USD) (Goldberger, S. 2014.)



22. ábra. Az ökológiai lábnyom, ezen belül az „energialábnyom” méretének változása a Föld eltartóképességének függvényében (McLellan, R. ed. 2014)

Az emberiség által okozott környezeti problémák súlyosságát jól érzékelteti a 22. ábra **ökológiai lábnyom** ábrázolása. Ez az 1990-es években kifejlesztett módszertan alkalmas arra, hogy a különféle terheléseket (input és output oldalon egyaránt) egységesen, **területegységben** fejezze ki. Ezáltal végre lehetővé válik, hogy a **földi rendszer korlátossága** (erőforrás és szennyezéselnyelés terén egyaránt) a számításokban megjelenjen, illetve a gazdaság és társadalom különféle ágazatainak terhelése, továbbá különböző országok (vagy akár kisebb területi egységek) környezeti teljesítménye összehasonlíthatóvá váljon. Ugyanakkor arra is fel kell hívni a figyelmet, hogy a módszertan számos pontatlanságot rejt magában, hiszen a terhelések egy részét – közvetve vagy közvetlenül – térben kifejezni nem egyszerű, vagy egyáltalán nem is lehetséges. Azonban minden hibája és hiányossága ellenére kulcsfontosságú mutatóról van szó, amit az is igazol, hogy immár 11 ország (így például Svájc, Finnország, Japán, Ecuador) fogadta el hivatalos mutatóként.

A 22. ábra érzékletesen mutatja be, hogy a humán populáció életstílusa mind erőforrás oldalon, mind a kibocsátások tekintetében aggasztó változást mutat a közvetlenül vagy közvetve igénybe vett területek növekvő mérete révén. Az is világosan látszik, hogy a földi eltartóképességet az emberiség a mindenkori terhelésével már évtizedekkel ezelőtt átlépte. Ez úgy lehetséges, hogy egyfelől korlátosan raktározott erőforrásokat használunk fel (pl. felszín alatti vízkészlet vagy fosszilis energiaforrások), amelyek idővel megfogyatkoznak; másfelől a hatások jelentős része csak később fog súlyos problémákat okozni (pl. az atomenergetika, amely esetében például az erőművek épületei csak az életciklusuk végén, a következő generációk számára fognak súlyos anyagi és környezeti terhet jelenteni).

Ezzel párhuzamosan az eltartóképesség, vagyis a **biokapacitás**[3] csökkenésével is számolnunk kell – mégpedig általában is (a természetes élőhelyek csökkenésével), de egy főre vetítve különösen (a globális népességnövekedés miatt). Mindez még úgy is nyugtalanító, hogy mind a biokapacitás, mind az ökológiai lábnyom mértékére vonatkozó számítások egyelőre inkább jelzésértékűnek tekinthetők, mint a fenntarthatóság hajszálpontos mérőszámainak. Kiemelt figyelmet érdemel az ún. **karbonlábnyom** drámai növekedése, ami a fosszilis tüzelőanyagok használatával együtt járó légszennyezés fokozódására utal. Az utóbbival kapcsolatos számítások legfőbb megállapításai:

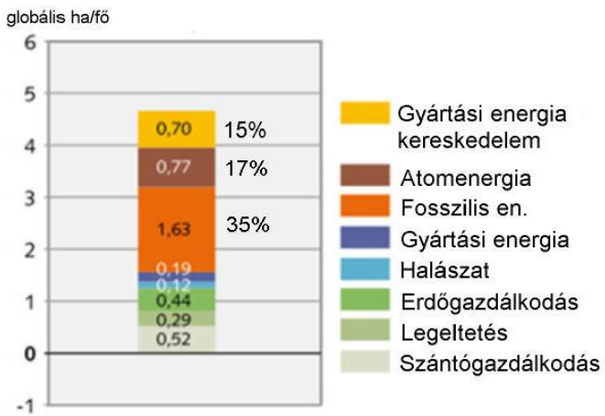
a) az energetika által okozott fő probléma globális léptékben a szén-dioxid-kibocsátás;
b) a megújuló energiaforrások alkalmazásával általában elhanyagolható mértékű környezetterhelés, ezen belül igen alacsony szénkibocsátás jár;
c) az atomenergetika globális léptékben szerény jelentőségű (hiszen az elsődleges energiaellátás 2,5%-át fedezi, lásd 18. ábra), így a globális ökolábnyomot jelentősen nem befolyásolja. Ugyanakkor azokban az országokban, ahol részaránya az áramtermelésben meghatározó, ott szignifikánsan járul hozzá a környezet

.

[3] A biológiai rendszer azon képességének mértéke, amely révén ez az emberiség számára értékes biológiai anyagokat és szolgáltatásokat állít elő és egyúttal befogadja az emberi tevékenységekből származó különféle szennyezéseket

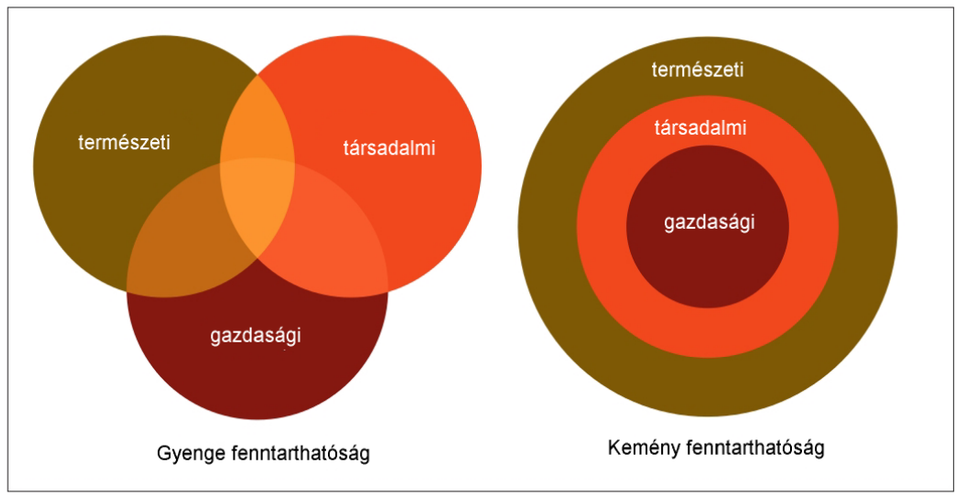
terheléséhez, így értelemszerűen a teljes ökológiai lábnyomban való részesedése is jelentős.

A svájci szövetségi statisztikai hivatal számításai szerint **az ország teljes ökolábnyomának 17%-a** az atomerőművek üzemeltetésével hozható kapcsolatba (FSO 2006), az áramtermelésben elért 40% körüli részesedés mellett. A hasonló részarány okán vélhetően hazánk esetében is ilyen mértékű, vagyis 15-20% közötti lehet a paksi atomerőmű ökológiai lábnyoma, ami igen magas érték, tekintettel arra, hogy a fennmaradó 80-85%-ba tartozik minden egyéb emberi tevékenység és következményei – az input és output oldalt egyaránt figyelembe véve.



23. ábra. Svájc ökológiai lábnyomának főbb alkotóelemei (FSO 2006) – az oszlop mellett %-ban megadott értékek az energialábnyom egyes elemeinek a teljes ökológiai lábnyomból való részesedésére utalnak.

Ezen a ponton érdemes utalni a **fenntarthatóság**gal kapcsolatos ismeretekre, amelyekről egyes ellenérdekelt, befolyásos csoportok sikeres dezinformációs kampányának eredményeként, illetve a természettudományos műveltség általánosan alacsony szintje miatt, meglehetősen zavaros nézetek alakultak ki. Az egyik téves elképzelés szerint a fenntarthatóság három pillérének (környezeti, társadalmi, gazdasági) kapcsolatrendszerében a környezeti szempont azonos súlyú volna a többivel („gyenge" fenntarthatóság). A fenntarthatósággal kapcsolatban megjelent és főként közgazdászok és döntéshozók körében terjedt széles körben a „fenntartható növekedés" koncepciója is, ami a „fából vaskarika" tipikus esete, hiszen a fejlődés és növekedés még véletlenül sem egymás szinonimái: a fejlődéssel minőségi, a növekedéssel mennyiségi változásokat írunk le. A zárt földi rendszerben pedig az állandó növekedés előbb vagy utóbb a rendszer fizikai és biológiai korlátjaiba ütközne.



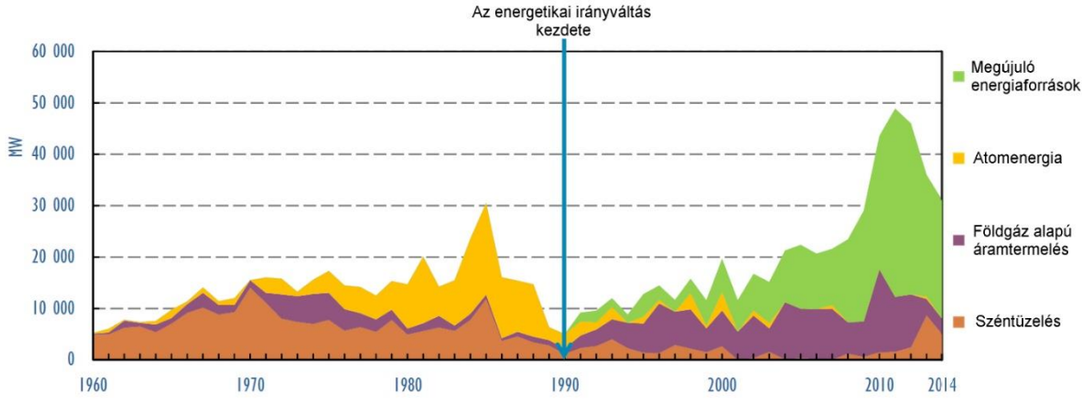
24. ábra. A fenntarthatóság két megközelítése (http://www.buildmagazine.org.nz)

Ugyanakkor a gyenge fenntarthatóság koncepciója, sőt akár a „fenntartható növekedés" téveszméje is számos nemzetközi és nemzeti szintű stratégiai dokumentumban megjelennek, ezáltal kihatásukat tekintve rendkívül károsak, hiszen téves döntéseket támogatnak. A földi rendszer működését ugyanis a környezeti-természeti törvényszerűségek határozzák meg, amelyeket a döntéshozók sok esetben figyelmen kívül hagynak. Sokan vélik úgy, hogy ezen jelenség hátterében elsősorban a gazdaság (így a tőkés társaságok) érdekeit, a rövid távú

szempontok dominanciáját és a természettudományos alapismeretek hiányát kell meglátnunk.

A természettudományos törvényszerűségekkel szemben haladni azonban csak rövid távon lehetséges, ennek súlyos következményei (így például az éghajlatváltozás és például az ebből következő menekültáradat) előbb-utóbb a mindenki számára nyilvánvalóvá válnak. A megoldást a „kemény” fenntarthatóság alapvetéseinek alkalmazása jelentené, amelynek lényege az, hogy **az ember alkotta szabályokat a természeti törvényszerűségekhez kellene igazítani**, hiszen a természeti rendszer erőforrásai nélkül sem a társadalmat, sem a gazdaságot nem tudjuk működtetni. Szerencsére az ember alkotta szabályok bármikor megváltoztatható előírásrendszerek, ám a **Római Klub** 1972-es „***A növekedés határai***” című jelentése óta tudjuk, hogy ehhez a váltáshoz csak igen korlátozott idő áll rendelkezésre – ha ez egyáltalán még lehetséges (hiszen a húsz évvel később publikált „***A növekedés határain túl***” c. jelentésük szerint az erőforrás válság már nem kerülhető el).

A természeti törvények figyelmen kívül hagyásának tipikus esete az atomenergia használata, vagyis amikor olyan technológiát alkalmazunk, amely esetében nem veszünk tudomást sem a bizonyosan bekövetkező (hulladék), sem a lehetséges (reaktorbaleset) következményekről. A fordulathoz a sokadik súlyos atomerőmű-balesetre volt szükség (Csernobil, 1986), és csak ennek tudható be, hogy elkezdődött az energetikai fordulat, vagyis az atomenergetika visszaszorulása a „fejlett” európai országokban (25. ábra).



25. ábra. Új áramtermelő-kapacitások az OECD európai tagállamaiban 1960-2014 között (IEA 2016b)

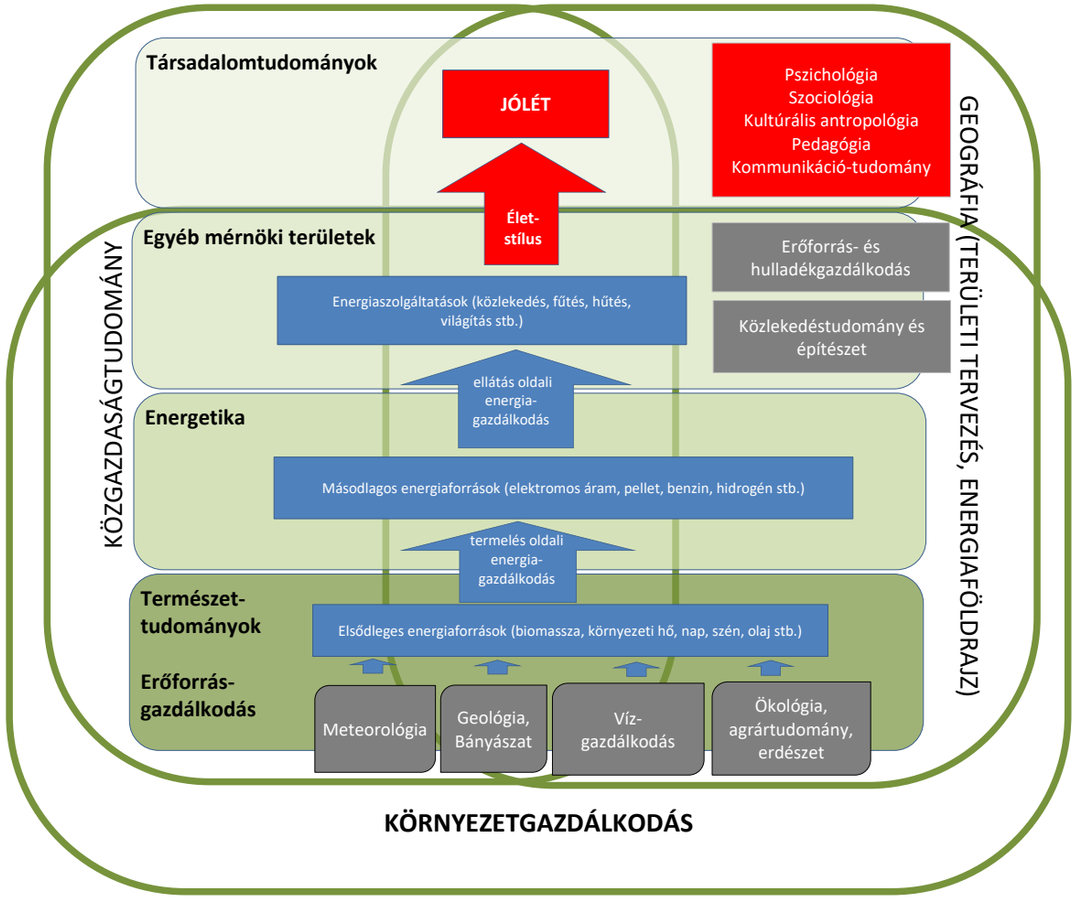
A környezeti szempontok érvényesítésével beszélhetünk **fenntartható energiagazdálkodásról** is, amelynek fő célja, hogy oly módon biztosítsa az emberiség energiaigényét, hogy eközben az ökológiai lábnyom ne lépje túl a ökorendszer biztosította kereteket. Tekintettel erre a szigorú feltételrendszerre, a fenntartható energiagazdálkodás az **alábbi beavatkozások együttes alkalmazása** révén érhető el:

1. **Fogyasztáscsökkentés**
    - Hatékonyság növelése – A MŰSZAKI TÉNYEZŐ
    - Takarékosság/Mértékletesség – AZ EMBERI TÉNYEZŐ
2. **Megújuló energiaforrások alkalmazása környezetkímélően**
    - Helyi lehetőségek függvényében - LOKÁLIS léptékben
    - Egymással kombinálva
3. **Kereslet oldali szabályozás** (Demand Side Management), rugalmas árképzés, okos rendszerek alkalmazása révén a tárolás vagy energiaimport elkerülése;
4. A **környezetgazdálkodás rendszerébe való szerves beágyazás** révén a **szinergiák** kihasználásával (lásd 28. ábra);
5. Európai szintű, igen szoros **energetikai együttműködés**;
6. **Energiatárolás –** környezetkímélően és a legkisebb energetikai veszteség árán.

A fenntartható energiagazdálkodásra való átállás jegyében megindult **az energiarendszer decentralizációja**, vagyis a kis teljesítményű energiatermelés térhódítása, amely legtöbbször helyben rendelkezésre álló, megújuló energiaforrásokra épít. Ennek egyenes következményeként az energialánc végén a hagyományos fogyasztók mellett egyre nagyobb számban jelennek meg azok, akik már termelnek is (**prosumer =** producer + consumer), így – főleg a napelemes technológia révén – fogyasztói mivoltuk mellett áramtermelőként is feltűnnek a rendszerben. Már az eddigiekben felsoroltak alapján is világosan látszik, hogy az energiatervezésben sokkal nagyobb és összetettebb rendszerben kell gondolkodni, mint ezidáig.

Ezt az összefüggésrendszert mutatja be a 26. ábra az **energialánc**nak egy olyan ábrázolásával, amely feltárja az energiagazdálkodás szélesebb kapcsolatrendszerét is. Az ábra arra hívja fel a figyelmet, hogy nem húzhatunk éles határvonalat a mezőgazdálkodás, az erdőgazdálkodás, a vízgazdálkodás, a hulladékgazdálkodás és az energiagazdálkodás között, hiszen ezek a valóságban egy adott földrajzi térben nyilvánvalóan szorosan, egymástól elválaszthatatlanul kapcsolódnak össze (például az anyag- és energiaáramlás tekintetében). Amikor a mezőgazdaság vagy az erdőgazdaság energianövényeket termel (ráadásul eközben energiahordozókat használ fel), nyilvánvalóan szerepet játszik az energiagazdálkodásban is. Ez még akkor is így van, ha a hétköznapok gyakorlatában ezek között az ágazatok között sajnos még éles határvonal húzódik. Az energiagazdálkodás tervezésében és megvalósításában leginkább energetikus szakemberek, a hulladékgazdálkodási tevékenységben hulladékgazdálkodási mérnökök, a mezőgazdálkodásban meghatározóan agrármérnökök vesznek részt. A tervezési folyamatok is külön-külön, egymástól függetlenül, egy-egy viszonylag szűk ismeretanyagra alapozva történnek, kölcsönösen figyelmen kívül hagyva egymás eredményeit, az összefüggések tágabb körét. Az ábra arra is rávilágít, hogy a 21. században, a megújuló energiaforrások visszatérésével, a bányászat mellett ismét számos egyéb, lényegesen szelídebb módja van az elsődleges energiaforrások kinyerésének és az ezt követő átalakítási folyamatoknak.

De legalább ennyire fontos az energialánc másik vége. Napjainkban mintha nem kapna kellő figyelmet az a tényt, hogy az egyes folyamatok kulcsfontosságú pontjaiban az ember a főszereplő (pl. mint tervező, mint jogszabályalkotó, mint fogyasztó). A fentieket tekintetbe véve, Nørgaard, J. (1998) koncepciójával egyetértve megállapítható, hogy **az energialánc folyamatait végeredményben egy nehezen megragadható, ugyanakkor kulcsfontosságú tényező, a jólét (illetve az erről alkotott képünk) és az ennek elérése érdekében kialakított életstílus határozza meg. Az energialánc minden korábbi lépése ezekre vezethető vissza. Ezek határozzák meg, hogy mennyi energiát használunk fel és sok esetben még azt is, hogy milyen forrásból származik ez az energia. Ebből következően nem szerencsés a 21. században olyan energiatervezési eljárást működtetni, amely nem vesz tudomást erről a fenti, alapvetően társadalomtudományi összefüggésről.** Az energiafogyasztás mértéke és jellege tehát nagy mértékben befolyásolható a jólétről alkotott fogalmaink formálásával, alakításával (lásd: energiatudatosság). Valójában tehát sokkal többről van szó, mint az energiagazdálkodás egyszerű reformjáról: egy lényegesen bonyolultabb, **rendszerszintű probléma megoldása a feladat**.



26. ábra. Az energialánc multidiszciplináris megközelítésben

Ezt támasztják alá azok a kutatások is, amelyek azt igazolják, hogy a fogyasztás mai szintjét nem csak a jelenlegi energiaforrások nem képesek fedezni, de a legtöbb ipari országban a megújuló energiaforrások potenciáljai is csak szerényebb igények kielégítésére elegendők (pl. MacKay, D. 2009). Ráadásul azt is le kell szögeznünk, hogy bár **egy adott energiaforrást tekinthetünk megújulónak, önmagában ez még nem jelenti azt, hogy ennek felhasználása környezeti, ökológiai értelemben fenntartható**. Tehát tulajdonképpen az elkerülhető környezetkárosítás okán még a megújuló energiaforrások alkalmazása esetén is körültekintő területi- és energiatervezésre van szükség.

A 26. ábra láthatóvá teszi az **energiagazdálkodás kapcsolódási pontjait, amelyek révén az a környezetgazdálkodás többi eleméhez illeszkedik**. Ezt azért tartjuk megkerülhetetlennek, mert egy adott földrajzi térben csak ilyen **holisztikus megközelítés** eredményezhet fenntartható gazdálkodást. Az energiagazdálkodási vagy akár a hulladékgazdálkodási folyamatok tervezőjének – hatékony és környezeti szempontból is elfogadható megoldások kialakítása érdekében – tisztában kell lennie a kapcsolódó szakterületek kínálta lehetőségekkel, **szinergiákkal**. Ennek érdekében ma már olyan **csapatmunkára** van, illetve volna szükség, ahol az energiatervezésben a hulladékgazdálkodók, mező- és erdőgazdálkodók is helyet kapnak. Példaként vehetjük az energetikai célú biogáz-termelést. Ez esetben szem előtt kell tartani, hogy a társadalom számára a nagy mennyiségben keletkező szerves hulladékok ártalmatlanítása egyre nehezebben és költségesebben megoldható feladat – miközben ennek kezelésére a biogáz-technológia olyan megoldást nyújt, ami az energiatermelés és a talajerő-utánpótlás szempontjából is előnyökkel jár. Ebből a megfontolásból a biogáz-termelést olyan hulladékalapú energetikai megoldásként értelmezzük, ahol egy adott – ám meglehetősen szűk – földrajzi térben a termelő tevékenységek (pl. állattartás, élelmiszeripar) során keletkező hulladékok és a települési szilárd és folyékony hulladékok felhasználásával hozzuk létre az energiahordozót (jelen esetben a magas metán-koncentrációval jellemezhető biogázt). Ehhez tehát ismerni kell az adott földrajzi térben lejátszódó anyag- és energiaáramlás jellegét, mennyiségi mutatóit, vagyis a termelési folyamatokat és az ennek során képződő hulladékok mennyiségét és minőségét, illetve tisztában kell lenni a kommunális szektorban történő hulladékkeletkezés törvényszerűségeivel, valamint a szállítási lehetőségekkel is. Nem fogadható tehát el napjaink azon gyakorlata, amelyben a befektető – fittyet hányva az adott földrajzi térben jelentkező anyagáramlásokra, így például a környező települések hulladékgazdálkodási problémáira, valamint az iparszerű mezőgazdaság környezeti káraira (pl. a monokultúrás termelésből fakadó intenzív vegyszerhasználatra) – energetikai ültetvényeket hoz létre, hogy ilyen módon biztosítsa a saját maga számára szükséges ideális összetételű biomasszatömeget (27. ábra). Ez tipikusan egy olyan döntéshozói és tervezési gyakorlat, ahol kizárólag energetikai területen jártas szakértők a fenti meglehetősen komplex összefüggések

ismeretének hiányában (vagy ezeket figyelmen kívül hagyva) hoznak olyan évtizedekre meghatározó jogszabályokat vagy befektetési döntéseket, amelyekkel más környezetgazdálkodási területek és a társadalom egésze számára kifejezetten komoly károkat okoznak.

27. ábra. A monokultúrára épített rossz környezetgazdálkodási gyakorlat (http://global.mongabay.com/news/bioenergy/2007/01/biogas-maize-holds-large-potential-in.html)

A szektorok közötti szinergia kihasználására másik példa a **napelemes préssel** ellátott utcai hulladékgyűjtő edényzet („Big Belly", 28. ábra). Ez egy jelentéktelenek tűnő, ám számos szempontból mégis példaszerű fejlesztés több téren is jelentős környezeti előnyökkel jár. Az eszköz a laza térfogatú vegyes hulladékot tömöríti, a szokásoshoz képest hétszeres gyűjtőkapacitást eredményezve. Ennek hozadéka, hogy ezáltal töredékére csökkenthető a teherautós begyűjtés energiaigénye és környezetterhelése. A gyakorlatban tehát az utcai szemetesek napi szintű ürítése helyett elegendő lehet a heti egyszeri ürítés, amivel nem csak a felhasznált fosszilis üzemanyag mennyisége csökkenthető egy csapásra akár 85%-kal, de a levegő- és zajszennyezés, valamint a meglehetősen karbantartás-igényes gyűjtőjármű terhelése is hasonló mértékben redukálódik.

28. ábra. Napelemes energiaellátással működő présszerkezettel ellátott utcai hulladékgyűjtő Grazban (Fotó: Munkácsy B. 2016)

A hulladékgazdálkodás és energiagazdálkodás kapcsolata az **újrahasználat** (reuse) kapcsán is bemutatható. Ennek lényege, hogy a keletkező hulladékoknak egy jelentős része – jó esetben valamiféle lokális vagy regionális rendszerben (pl. betétes újrahasználati rendszerben) – újra visszavezethető a fogyasztásba (pl. a betétdíj által generált motivációnak köszönhetően), ezáltal olyan energiamegtakarítások születnek, amelyek az adott termék (pl. sörösüveg, borosüveg) legyártásához és szállításához szükséges energiaigények elkerülésével vagy csökkentésével függenek össze. Például betétes rendszerben az üvegcsomagolás akár 40-szer is megfordul, vagyis ennyi csomagolóanyag kitermeléséhez, szállításához és

legyártásához szükséges energiamegtakarítás keletkezik – ugyanakkor nyilván jelentkezik az üvegmosás esetében némi többlet hőenergia-igény, de ennek mértéke lényegesen szerényebb, ráadásul környezetkímélő technológiákkal is fedezhető. Hangsúlyozni kell, hogy a rendszerszintű megoldások mellett családi és közösségi szintű újrahasználati megoldások is léteznek (pl. újságcsere, bolhapiac; javítóműhellyel összekapcsolt újrahasználati központ), amelyek környezeti előnyei legalább ennyire kitapinthatók. Ennél értelemszerűen kisebb az **újrafeldolgozás** (recycling) által elérhető energiamegtakarítás. Ugyanakkor ezzel a megoldással is elkerülhető a bányászat és feldolgozás erőforrás-igényeinek és környezeti kárainak sokasága, például az alumínium esetében a különösen komoly környezeti kockázatot rejtő timföldgyártás vörösiszap-termelése.

29. ábra. Az eldobható papír és műanyag eszközök, dobozos és műanyagpalackos italok igényes, környezet- és energiatudatos munkakörnyezetben nem elfogadhatók (Fotó: Munkácsy B.)

Az energiatervezés nézőpontjából kiemelten fontos a nagy energiafogyasztó tevékenységek (épületüzemeltetés, közlekedés) megismerése, az itt rejlő fogyasztáscsökkentési lehetőségek feltárása és a beavatkozási módok minél sokrétűbb alkalmazása. Az épületek hőfelhasználása esetében már hazai példák, így a Solanova-projekt is igazolják, hogy megközelíthető vagy elérhető akár a 10-szeres hatékonyságnövelés is (vagyis a tizedére csökkentett energiafelhasználás és károsanyag-kibocsátás). A közlekedésben egy egyszerű technológiaváltás (elektromos közlekedésre való átállással) csak 3-4-szeres hatékonyságnövekedést kínál, ám az ELTE Környezet- és Tájföldrajzi Tanszékén végzett szoftveres modellezés szerint strukturális beavatkozásokkal (a közlekedési és szállítási igény csökkentésével, így például vidéki munkahelyteremtéssel, a távmunka támogatásával) összességében ugyancsak elérhető volna a felhasznált energiahordozók mennyiségének tizedére csökkentése. Azonban az már a fentiek alapján is világosan látszik, hogy a szükséges beavatkozások, energiatervezési feladatok messze túlmutatnak az energetikusok kompetenciáin, tehát az eredmények eléréséhez alapvető fontosságú volna más területek szakértőinek bevonása!

Felhasznált és ajánlott irodalom:

ALTER/Le Groupe de Bellevue (1978): A study of a long-term energy future for France based on 100% renewable energies. Reprinted in The Yearbook of Renewable Energies 1995/96 (1995). London: James and James

Beckman, K (2015): Steve Holliday, CEO National Grid: “The idea of large power stations for baseload is outdated”. http://energypost.eu/interview-steve-holliday-ceo-national-grid-idea-large-power-stations-baseload-power-outdated/

Bunn, M. (2010): Securing the Bomb 2010 - Securing All Nuclear Materials in Four Years. Harvard Kennedy School, Harvard University. 132 p.

Campbell, C. J. - Laherrère, J. H. (1998): The end of cheap oil. Scientific American 3. 98. pp. 80–85

Dávid Á. (2013): Építés- és környezetföldtan. Főiskolai jegyzet, Eszterházy Károly Főiskola. http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0038_12_david1_hu/ar01s08.html

DOE (2017): Global energy storage database. Department of Energy, US. http://energystorageexchange.org/

Duncan, R. C. (2007): The Olduvai Theory - Terminal Decline Imminent. The Social Contract Journal, 17. 3. pp. 141–151. http://www.thesocialcontract.com/artman2/publish/tsc1703/17_3_duncan.shtml

EEA (2016): Renewable energy in Europe 2016 – Recent growth and knock-on effects. European Environment Agency. 78 p. http://www.appa.es/descargas/ventajas/Ventajas_Biocarburantes_01.pdf

EIA (2015): Electric generator capacity factors vary widely across the world. (US Energy Information Administration) https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=22832

Eliassen, R. (1971): Power Generation and the Environment. Bulletin of the Atomic Scientists 27. 7. pp. 37-42.

Felsmann B. (2015): Működhet-e Paks II. állami támogatások nélkül? Az erőműtársaság vállalatgazdasági közelítésben. Energia Klub. 38 p. https://energiaklub.hu/files/study/paks2_allami_tamogatas_2015jun.pdf

FSO (2006): Switzerland's Ecological Footprint. Federal Statistical Office. 56 p. https://www.bfs.admin.ch/bfs/en/home/statistics/sustainable-development.assetdetail.343230.html

Glimmero, I. (2015): The EU Lightbulb Ban. http://www.slideshare.net/IngerGmo/the-eu-lightbulb-ban-47366507

Goldberger, S. (2014): Eight ways climate change is making the world more dangerous. https://www.theguardian.com/environment/blog/2014/jul/14/8-charts-climate-change-world-more-dangerous

Hubbert, M.K. (1956): Nuclear Energy and the Fossil Fuels. Paper presented at the Spring Meeting of the Southern District Division of Production, American Petroleum Institute Spring Meetings http://www.hubbertpeak.com/hubbert/1956/1956.pdf

IEA (2016a): Key world energy statistics. (International Energy Agency) 80 p. https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf

IEA (2016b): Re-Powering Markets. Market design and regulation during the transition to low-carbon power systems. https://www.iea.org/media/presentations/160218_RepoweringMarkets_slides.pdf

Johansson, T. B. - Steen, P. (1979): Solar Sweden: an outline to a renewable energy system. Stockholm, Secreta-riat for Future Studies

Kubik, M. (2018): 'Digital inertia': Energy storage can stabilise grid with 1/10 the capacity of thermal generation. https://www.energy-storage.news/blogs/digital-inertia-energy-storage-can-stabilise-grid-with-1-10-the-capacity-of

Leeuwen, J. W. S. (2016): Nuclear power in tis global context. In.: Geographical Locality Studies, 4. 1. pp. 726-787. http://www.frugeo.co.uk/TYPESET_GLS4_ed_onl_col_eBookPDF.pdf

MacKay, D. (2009): Sustainable Energy — without the hot air. UIT, Cambridge, 383 p.

MAVIR (2015): A magyar villamosenergia-rendszer (VER) 2015. évi adatai. 95 p.

McLellan, R. ed. (2014): Living Planet Report 2014. 180 p. http://ba04e385e36eeed47f9c-abbcd57a2a90674a4bcb7fab6c6198d0.r88.cf1.rackcdn.com/Living_Planet_Report_2014.pdf

Meadows, D. H. – Meadows, D.L. – Randers, J. – Behrens, W. W. (1972): Limits to growth. 227 p. http://www.donellameadows.org/wp-content/userfiles/Limits-to-Growth-digital-scan-version.pdf

Meadows, D. H. - Meadows, D. L. - Randers, J. (1992): Beyond the Limits – Confronting Global Collapse and Envisioning a Sustainable Future; Post Mills, Vermont Chelsea Green Publishing Company (ISBN 1-85383-130-1)

Munkácsy B. (2014a): A megújuló energiára alapozott energiatervezésről. In.: A fenntartható energiagazdálkodás felé vezető út. Erre van előre! – Vision 2040 Hungary 2.0. pp. 9-14.

Munkácsy B. (2014b): A Zero Carbon Britain projekt – a jövő újraértelmezése. In.: A fenntartható energiagazdálkodás felé vezető út. Erre van előre! – Vision 2040 Hungary 2.0. pp. 52-59.

Nørgaard, J (1998): Sustainable Energy Future - Nordic Perspective. Keynote at workshop „Sustainable and Peaceful Energy Future in Asia", 28. - 30. September 1998, Seoul

Olivier, J. et al. (2015): Trends in global CO_2 emissions: 2015 Report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. 80 p. http://edgar.jrc.ec.europa.eu/news_docs/jrc-2015-trends-in-global-co2-emissions-2015-report-98184.pdf

Pátzay Gy. (2011): Atomenergetika és nukleáris technológia. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. Egyetemi tananyag, ISBN 978-963-279-468-6, 239 p. http://www.kankalin.bme.hu/Dok/Konyvek/Atomenergia/Atomenergetika_animaciok%20nelkul.pdf

Pór G. (2012): Atomenergetikai alapismeretek. EDUTUS Főiskola. http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017_61_atomenergetikai_alapismeretek/ch02.html

REN21 (2016): Renewables 2016 - Global Status Report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. 272 p.

Tóth I. J. (2010): Kormányzati kudarcok, járadékvadászat és korrupciós kockázatok a magyar villamosenergia-szektorban. Budapesti Corvinus Egyetem Szociológia és Társadalompolitika Intézet Korrupciókutató-központ. 128 p. http://energiakontrollprogram.hu/sites/energiakontrollprogram.hu/files/ekp_tanulmany_jaradekvadaszat-es-korrupcio.pdf

Yaritani, H. – Matsushima, J. (2014): Analysis of the Energy Balance of Shale Gas Development. In Energies 2014, 7(4), 2207-2227; doi:10.3390/en7042207

WNA 2016: Nuclear Power Reactors. World nuclear Association. http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx

Zimmerer, K. (2010): Retrospective on nature-society geography: tracing trajectories (1911-2010) and reflecting on translations. Annals of the Association of American Geographers 100(5): 1076–1094.

Zittel, W.– Schindler, J. (2007): Coal: Resources And Future Production. Energy Watch Group, 47 p. http://www.energywatchgroup.org/fileadmin/global/pdf/EWG_Report_Coal_10-07-2007ms.pdf

Zittel, W.– Schindler, J. (2006): Uranium Resources and Nuclear Energy. Energy Watch Group, 48 p. http://www.lbst.de/publications/studies__e/2006/EWG-paper_1-06_Uranium-Resources-Nuclear-Energy_03DEC2006.pdf

A térbeliség egyre erősödő jelentősége – centralizált és decentralizált energiarendszerek

Az **elmúlt két évszázad során** lépésről lépésre alakult át az addig teljes mértékben decentralizált gazdálkodás – és benne az energiagazdálkodás is. Jól érzékelteti ezt a folyamatot a malmászatban bekövetkezett radikális változás. Példaként vehetjük az Alföld déli térségét, ahol például Szegeden 1860-ban még 90 vízi- és 30-40 szárazmalom őrölte a gabonát, de voltak a környéken szép számmal szélmalmok is (Juhász A. 1960). Mára egyetlen malomüzemben folyik a termelés a városban.

A 20. század végére a **centralizált**ság az energiagazdálkodásban is végletessé vált, amelynek ugyan számos oka van, mégis kiemelendő a **profitmaximalizálás és a méretgazdaságosság**: a beépített teljesítmény növelésével párhuzamosan csökken a fajlagos tőkeköltség (Ft/MW; Euro/MW). A kialakult centralizált energiarendszer legfőbb jellemzői az alábbiak:

- kevesebb telephely: összességében kisebb földrajzi területre összpontosuló helyi konfliktus, kevesebb adminisztráció, kevesebb szakember;
- nagyobb – általában 500 MW feletti, de akár több ezer MW – villamos teljesítményű erőművek, amelyek alkalmatlanok a hatékony kogenerációra, hiszen az ezzel együtt járó mintegy **kétszeres hőteljesítmény** olyan léptékű, amely messze túlmutat az erőművet befogadó település (pl. Paks, Százhalombatta, Gyöngyös) 10 MW nagyságrendű téli hőigényén. A hő továbbszállítása pedig csak igen korlátozott, legfeljebb 15-20 km-es körzetben elképzelhető;
- az centralizált erőmű építése tőkeigényes, ezért ebből a helyi közösségek kiszorulnak (így bevételük az üzemeltetésből csak korlátozottan származik), ám a mérettel arányosan egyre nagyobb baleseti kockázat és bekövetkező kár, valamint a működésből fakadó sok esetben igen jelentős környezetkárosítás **terheit nekik kell viselniük**.

A jól működtetett **decentralizált energiarendszerek**nek – és benne a helyben rendelkezésre álló **megújuló energiaforrások**nak – a központosított rendszerrel szemben az alábbi jelentős **pozitívumai** lehetnek:

- a helyi adottságok jobb kihasználásával elérhető a helyi gazdaság fejlesztése és az importfüggőség csökkentése;
- a sok egység miatt nagyobb az energiarendszer üzembiztonsága, **stabilitás**a;
- az egyes elemeknek és a rendszer egészének is jobb az irányíthatósága (ki-bekapcsolás, szabályozhatóság);
- a kisebb erőművek **kisebb tőkebefektetést igénylő, egyszerű technológiájú, könnyen karbantartható egységek**, ráadásul általában **fokozatosan bővíthetők vagy csökkenthetők** a kapacitások;
- kisebbek az átalakítási és szállítási **veszteségek**;
- a teljes életciklusra vetítve **alacsonyak a környezeti kockázatok** – ezen belül kiemelten alacsony a karbonkibocsátás;
- **finanszírozási előny**t jelenthetnek az európai uniós és egyéb nemzetközi támogatások;
- jelentősebb a **munkahelyteremtő** szerep (például a technológiákhoz kapcsolódó kutatás-fejlesztés, a berendezések előállítása, a rendszer működtetése, karbantartása, bizonyos energiaforrások előállítása terén). Többletfeladatok jelentkez(het)nek például a tervezés, az engedélyezés, az ellenőrzés és a rendszerirányítás szintjén is.

Felmerül a kérdés, hogy ha a különbség ilyen nyilvánvaló, vajon miért nem valósult meg még mindenhol a decentralizáció. Ennek hátterében az alábbi **hátráltató** tényezők vannak:

- a jelenlegi gazdasági környezetben sajnálatos módon **nem érvényesül a „szennyező fizet elv**”, ami azt eredményezi, hogy a fosszilis és atomerőművek óriási **externális költségei** irreálisan alacsony áron teszik elérhetővé az ezekkel a környezetterhelő technológiákkal termelt másodlagos energiahordozókat – ezáltal az alacsony externális költséggel dolgozó megújuló alapú technológiák versenyhátrányba kerülnek;
- **nem érvényesül az „elővigyázatosság elve”**, vagyis a döntéshozók nem kellő bölcsességgel és körültekintéssel járnak el, amikor nem ismerve, illetve alábecsülve a következményeket, olyan technológiát támogatnak, amely hosszú távon (száz vagy akár százezer éves előretekintésben) eddig ismeretlen mértékű és fajtájú környezeti

következményekkel járnak (lásd az atomerőművek kiégett fűtőelemeinek elhelyezése, amely mindezidáig globális léptékben megoldatlan);
- az energiatervezés és -termelés, rendszerirányítás és intelligens együttműködés felkészült **szakembereket** igényel, ám ehhez láthatóan nem minden országban vannak meg a feltételek. Ezen a téren hazánk is komoly kihívásokkal küzd, hiszen a 21. századi energetikai megoldásait megismerni vágyó fiatal szakemberek sok esetben csak külföldi környezetben ismerkedhetnek meg a legújabb technológiákkal és az ezekhez szorosan kapcsolódó korszerű szemlélettel és informatikai ismeretekkel;
- különböző mértékű **műszaki jellegű kihívások** akadályozhatják az energetikai irányváltást, így például a) a jelenlegi centrális szerkezetű szállító- és elosztóhálózatokhoz nehézkes lehet a csatlakozás, amelyet a sokszor monopolhelyzetben lévő áramszolgáltatók még tovább nehezíthetnek; b) az időjárásfüggő energiahordozóknál a fogyasztástól eltérőek a napi és éves terhelési görbék, ami rendszerszintű beavatkozásokat (a fogyasztás időbeli elcsúsztatását, az energiatárolási kapacitások bővítését, export-importot) tesz szükségessé;
- az elmúlt évtizedekben hatalmas gazdasági erőfölényt (és ezzel együtt járó politikai kapcsolatrendszert) szerző jelenlegi **energialobbi** minden eszközzel a régi rendszer életben tartására és bevételeinek megtartására törekszik;
- az előző pontból fakadóan bizonyos országokban (így például Magyarországon) nehezen vagy egyáltalán **nem kiszámíthatók a jogi és gazdasági szabályozás** változásai.

Forrásoldal

Az energialánc első lépései az elsődleges energiahordozók kinyerésével és átalakításával kapcsolatosak. E tekintetben kiemelendő, hogy még mindig határozott a **fosszilis energiaforrások dominanciája** (18. ábra), ebben – legalábbis globális léptékben – csak szerény mértékű csökkenés mutatkozik évről-évre. Ez a változás egyes kiemelt térségekben sokkal gyorsabban történik, így néhány európai országban rohamos forrásszerkezet-váltás tapasztalható, ami a megújuló energiaforrások és ezzel a decentralizált energiarendszer látványos térnyerését eredményezi.

A fosszilis energiaforrások vagy az uránérc koncentráltan fordulnak elő, ezért például jól meghatározhatók a kőolajkitermelés vagy szénbányászat által érintett térségek. Ezek, mint primer vagy elsődleges feldolgozáson átesett energiahordozók nagy mennyiségben, viszonylag olcsón szállíthatók akár interkontinentális léptékben is – hiszen a szállítási folyamat tetemes környezeti kárait nem fizeti meg a fogyasztó (lásd externális költség). Az olcsó szállíthatóság következménye, hogy elsősorban a földgáz- és olajtüzelésű, valamint az atomerőművek esetében a **telephelyválasztást** nem az erőforrás lelőhelye határozza meg – ám a gyengébb fűtőértékű lignit és barnaszén esetében ennek már lényegesen nagyobb jelentősége van. Tehát a 20. században mindent felülíró méretgazdaságosság következményeként a fosszilis és atomerőműveink egyre nagyobb teljesítményűek, és ennek a tüzelőanyag-ellátás nem szabott gátat. A nagy méretből fakadó törvényszerűen alacsony energetikai hatékonyság (30-35%) a primer energiahordozó olcsó hozzáférhetősége miatt a legutóbbi időkig nem okozott problémát – mint ahogyan a környezeti terhelések és kockázatok sokasága is csak a 21. században eredményez **energetikai rendszerváltás**t, igaz, egyelőre csak a gazdag és a szakterületet érintően kiterjedt kutatással és fejlett oktatással rendelkező országokban.

A centralizált energiarendszer működésével kapcsolatos egyre szaporodó problémák miatt az 1990-es évek óta előtérbe kerülő, decentralizálta(bba)n termelő **megújuló energiaforrások** sok szempontból más jellegűek. Földrajzi előfordulásuk, energiasűrűségük jelentősen különbözik a térben koncentrálódott energiahordozókhoz képest. Térbeli megjelenésüket folt- és pontszerű ábrázolás helyett általában izovonalas térképekkel írhatjuk le, vagyis minden földrajzi pontban egymást átfedve érhetők el. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy például a környezeti hő, a szél- és napenergia lényegében mindenhol elérhető, sőt egy adott földrajzi pontban akár mindhárom egyszerre kiaknázható.

A nagyobb távolságra történő szállítás általában csak másodlagos átalakítás után, villamos energia vagy egyéb másodlagos energiahordozó formájában (pl. hidrogén, szintetikus gáz) gazdaságos. Mivel minden átalakítás – és persze a szállítás is – veszteséges, így az (energia)hatékonyság korában a fentiek egyenes következménye a helyben termelés és a helyi energiaigények felértékelődése, ami a kisebb erőművi teljesítmények felé tolta a fejlődés irányát.

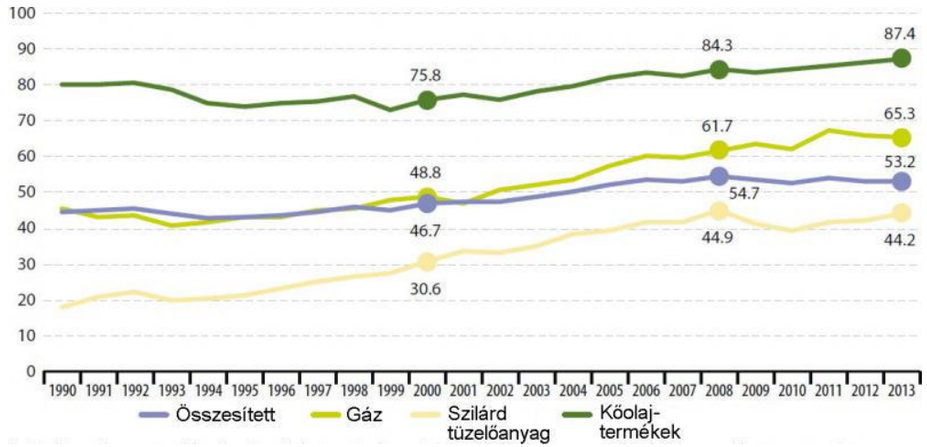
A **megújuló energiaforrásokra épülő technológiák esetében** általában a nagyobb darabszám, ám kisebb (néhány száz kW-os, néhány MW-os) villamos- és hőteljesítmény a jellemző. Ez általában kisebb hálózati veszteséget, egyes esetekben a kogeneráció lehetősége miatt magasabb (kapcsolt) erőművi hatásfokot és az erőforrás okán „környezetbarátabb" működést biztosít. Ehhez képeset kivételt jelenthetnek a nagy teljesítményű síkvidéki vízerőművek („Három Szoros" Vízerőműrendszer – Jangce, Kína), centralizált biomasszatüzelésű erőművek (Drax 1980 MW, Egyesült Királyság), szárazföldi szélerőmű-parkok (Altamont-hágó 576 MW, Amerikai Egyesült Államok), tengeri szélfarmok (London Array 630 MW, Egyesült Királyság). Ugyancsak futótűz-szerűen terjednek az értékes termő- vagy természeti területeket érintő zöldmezős beruházásban megépült naperőművek (Cestas Solar Park 300 MW, Franciaország), melyek ökológiai és társadalmi hatásaik miatt sem tekinthetők fenntarthatónak.

Egyre határozottabban megfigyelhető tendencia tehát **a megújuló energiaforrások egyre inkább centralizált felhasználása**, ami csak abban az esetben elfogadható, ha a környezeti terhelés ezáltal nem növekszik túlzott mértékben. A napenergia példájával élve: akár 1000 MW-os léptékű napelem-farmok is működhetnek viszonylag szerény környezeti terheléssel olyan sivatagi környezetben, ahol csak korlátozottan befolyásolják az eredendően is szegényes ökoszisztéma működését, és nem járnak értékes termőterület elvesztésével sem (pl. Tengger Desert Solar Park 1547 MW, Kína). Ugyanakkor ennek az **újracentralizálódás**nak a társadalmi következményeire is érdemes rávilágítani, hiszen ezzel az **energiademokrácia** terén elért eredmények sérülnek, újra fokozódik a társadalom ellenállása, vagyis felerősödik a **NIMBY-jelenség** (Not In My Backyard). Ennek példája, hogy a szélerőműveiről híres Dánia legszelesebb észak-nyugati térségében több mint 10 éve nem valósult meg jelentősebb szélerőmű-beruházás a környék lakosságának ellenállása miatt. A főleg tőkés társaságok által tervezett projektek ugyanis a környéken élők számára nem hoznának érdemi hasznot, általuk nem épülne a közösség, ezért nincs meg ezen projektelképzelések helyi szintű támogatottsága.

A **megújuló energiahordozók térnyerése** így vagy úgy, de határozott tendencia az egész világban. Az így **formálódó energiarendszerekben a forrásszerkezet diverz**, az egyes egységek névleges teljesítménye szerényebb, általánosságban 10 MW-ig terjedő. Ideális esetben a kiserőművek együttműködésével **virtuális erőmű** jön létre, amelyben az egyes egységek olyan kooperatív rendszert alkotnak, ahol a **szabályozási központ** egyfajta intelligens hálózati együttműködést koordinál és ennek optimális működtetése érdekében kommunikál az országos rendszerrel. A virtuális erőművek további lényeges jellemzői:

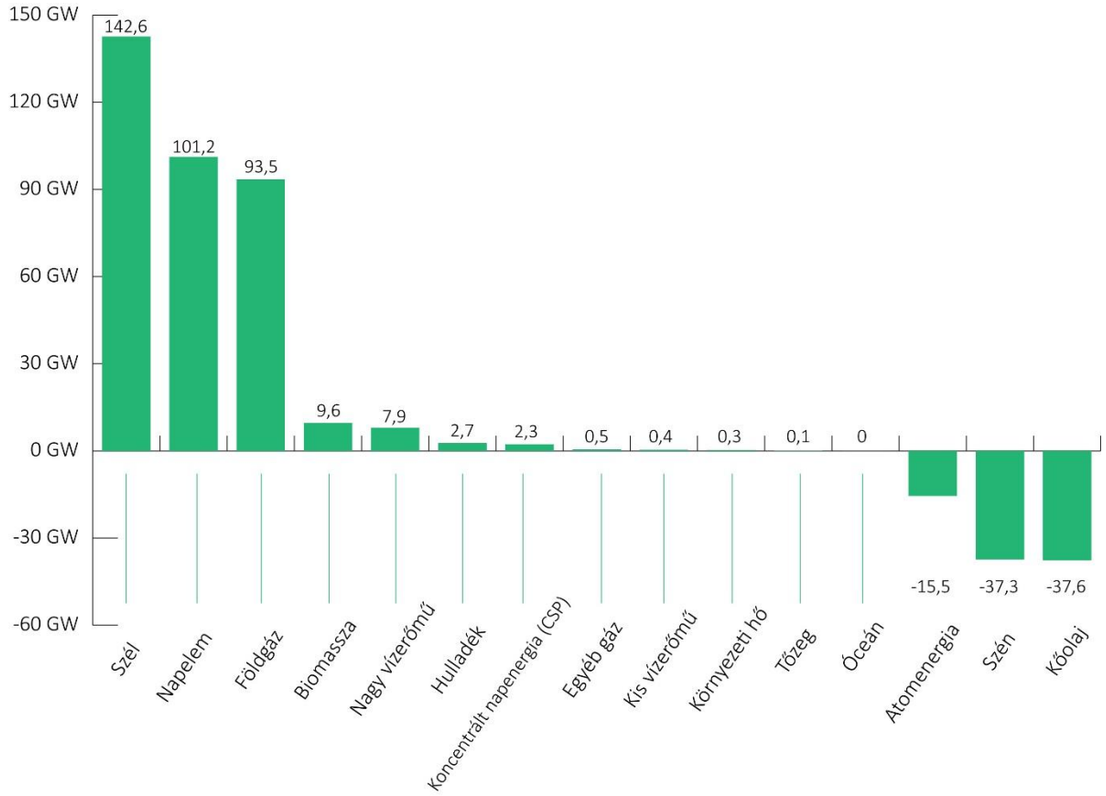
- a termelők és a fogyasztók földrajzi közelsége (bár megvalósítható egymástól távolabbi erőművekkel is);
- a decentralizált tervezés (annak erényeivel és kockázataival);
- a termelő kapacitások mellett a rendszer egyéb részeit is létre kell hozni és működtetni szükséges, így például a kapcsolódó decentralizált energiatároló-kapacitásokat.

A jelenlegi, még fosszilis túlsúllyal jellemezhető forrásszerkezet ugyanakkor egy stratégiai szempontból aggasztó jelenségre is felhívja a figyelmet: **kontinensünk importfüggősége** évről évre egyre jelentősebb mértékű. Értéke a hivatalos statisztikák szerint összességében, az atomenergiát helyi erőforrásként kezelve, 53%-os (Eurostat 2016). Valójában azonban az atomerőművek működéséhez szükséges tüzelőanyagot és technológiát a legtöbb ország, így Magyarország is, külföldről, sőt a kontinens határain túlról szerzi be. Ennek figyelembe vételével például hazánk esetében a hivatalos nyilvántartásokban szereplő 65-70% helyett **kiszolgáltatottságunk valójában 80-85%-os**.



30. ábra. Az EU28 energiafüggőségének alakulása 1990 és 2013 között. Az adatsorban az atomenergia helyi erőforrásként szerepel. Az adatok %-ban. (Eurostat 2016)

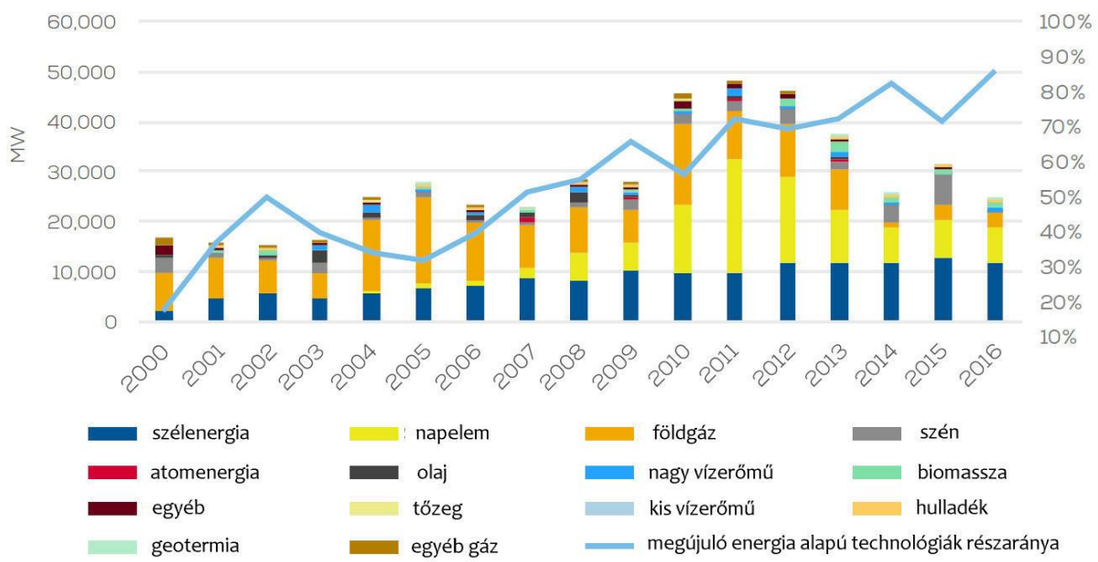
Nyilvánvaló, hogy sok egyéb mellett ennek a stratégiai jelentőségű kiszolgáltatottságnak a felismerése motiválja az országok többségét az energetikai irányváltás kapcsán. A fordulat mélységét jól jelzi, hogy hova vezetett az 1986 után megindult változás: az Európai Unió villamosenergia-szektorában már meghatározóan szél- és naperőművek épültek, miközben a 20. századi technológiák egyre nyilvánvalóbban szorulnak ki a piacról (31. ábra) – ráadásul úgy, hogy a jelenséget egyelőre csak néhány ország kapacitásbővítése mozgatja (32. ábra).



*31. ábra: Az áramtermelő-kapacitások változása és a megújuló energiaforrásokra alapuló technológiák **összesített kapacitásváltozása 2000-2016 között** az EU országaiban (GW) (az EWEA alapján szerk. Kovács K.)*

A **megújuló energiaforrások és az ezeket felhasználó technológiák** igen sokfélék. Velük kapcsolatban kevés általános érvényű megállapítást tehetünk. Ezen kevés közül a legfontosabb, hogy **a földrajzi térben mindenhol elérhetők**, ezért valamilyen formában bárhol alkalmazhatjuk őket, ami által csökken az országok, hatalmi csoportosulások közötti

konfliktus veszélye. Ha semmiféle más előny nem származna a megújuló energiahordozók alkalmazásából, mint az, hogy így elkerülhető az energiaforrásokért folytatott háborúskodás és az ezzel járó mérhetetlen emberi szenvedés, már abban az esetben is kötelességünk volna az ez irányú fejlesztések feltétlen támogatása. De az előnyök ennél lényegesen sokrétűbbek – ahogyan ez az előző fejezetben elő is került.



*32. ábra. Az áramtermelő-kapacitások **évenkénti változása** (MW) és a megújuló energiaforrásokra alapuló technológiák **részarányának** változása (%) 2000-2016 között az EU országaiban (az EWEA alapján szerk. Munkácsy B.)*

A megújuló energiaforrások alkalmazásának előnye, hogy életciklusuk során képesek visszanyerni azt az energiát, amelyet a felhasználásukhoz szükséges berendezések legyártása során befektettünk. Az konkurens technológiák esetében ez nem áll fenn, hiszen nem elég, hogy ezen rendszerek kiépítése és lebontása is energiaigényes, de az általuk termelt hasznos energia előállításához további folyamatos tüzelőanyag-utánpótlást igényelnek.

1. táblázat. Egyes megújuló energiaforrások alkalmazására jellemző energia-megtérülési idők (forrás: Pehnt, M. et al. 2009)

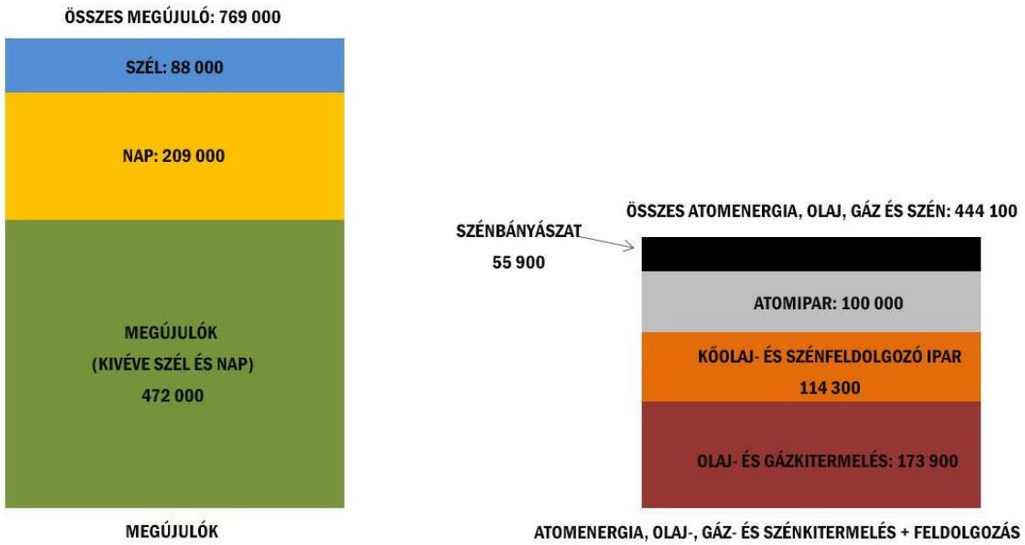
A megújulóenergia-alkalmazás	**Energia-megtérülési idő**
Szélerőmű	3–7 hónap
Termovillamos naperőmű Észak-Afrikában	3–7 hónap
Geotermikus hőenergia	7–10 hónap
Vízerőmű	9–13 hónap
Napkollektor	18–30 hónap
Vékonyfilmes fotovillamos rendszer Közép-Európában	24–36 hónap
Polikristályos fotovillamos rendszer Közép-Európában	36–60 hónap

Ugyancsak általánosságban igaz, hogy a megújuló energiaforrásokra való áttérés a gazdaság számára igen komoly lehetőséget rejt, hiszen az új technológiák egyre szélesebb körű alkalmazása folyamatos fejlesztéseket és beruházásokat igényel, ami korunk növekedésorientált gazdaságában lényeges szempont.

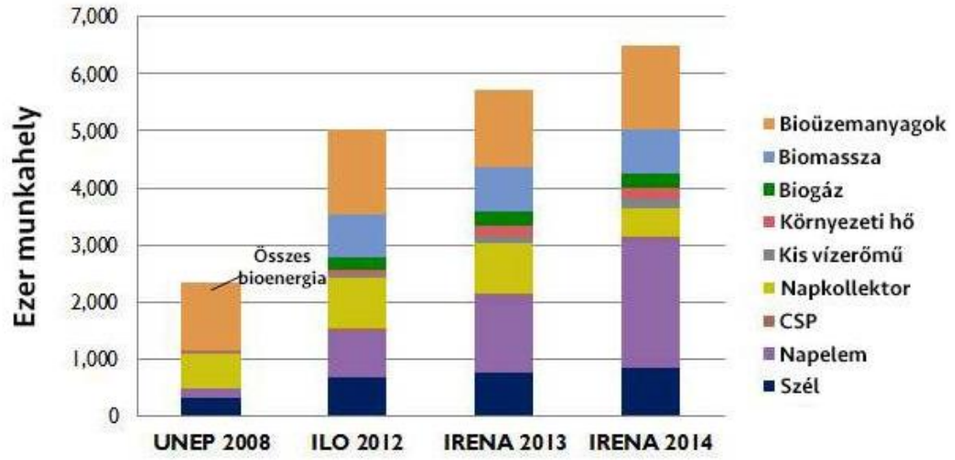
Ugyancsak közös előnyként említhető a fenti átalakulási folyamatnak a **foglalkoztatottságra** gyakorolt hatása, hiszen a decentralizált energiarendszer létrehozása nem egyszerűen csak a munkanélküliség visszaszorításában játszik szerepet, de hatása hatványozottan jelentkezik, hiszen a vidéki, elmaradottabb területeken is munkalehetőséget kínál – gondoljunk csak a biomassza alapú technológiák alapanyagigényének fedezésére.

Míg az energiaátmenet kritikusai bírálják, hogy a fosszilis erőművek bezárásával munkahelyek szűnnek meg, így emberek ezrei veszítik el az állásaikat, addig a valóság ennél lényegesen árnyaltabb képet mutat. A megújulóenergia-ipar már abban az esetben is több munkavállalót foglalkoztat, mint a hagyományos energiaszektor, ha egyelőre az utóbbi járul hozzá nagyobb mértékben az energiaigények kielégítéséhez. Így van ez az Amerikai Egyesült

Államokban is, ahol a megújuló energiaforrások 2014-ben alig **10%-os arányban** fedezték a teljes fogyasztást (EIA 2015), miközben az energiaiparban foglalkoztatottak csaknem **64%-ának** biztosítottak munkahelyet (Glennie, J. 2016) – lásd 33. ábra. Ha a globális foglalkoztatási képet vizsgáljuk, akkor a megújulóenergia-technológiák közül a napelemes megoldások emelkednek ki a munkahelyteremtés szempontjából, ezt a bioüzemanyagok előállítása és fej-fej mellett a szélerőművek, illetve szilárd biomasszatüzelés követik (34. ábra).



33. ábra. Foglalkoztatási adatok az Amerikai Egyesült Államok energiaszektorában (Glennie, J. 2016 alapján szerk.: Kovács K.)

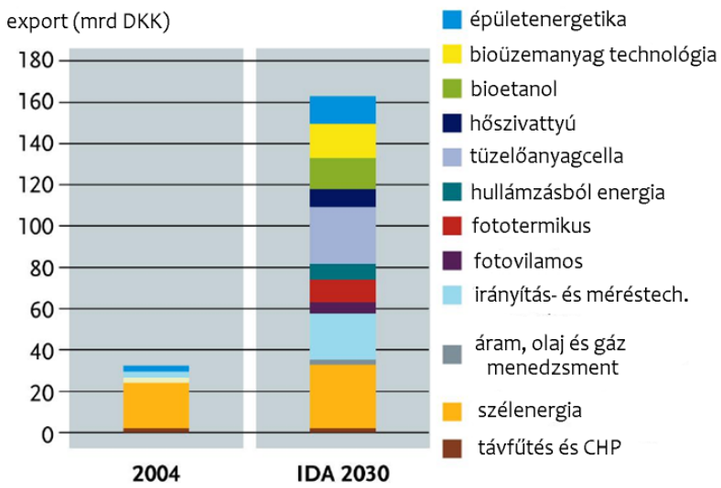


34. ábra. A megújulóenergia-szektorban foglalkoztatottak számának változása 2008-2014 között, globális kitekintés (Renner, M. 2014 alapján szerk. Kovács K.)

Néhány, a megújuló energiaforrásokat általában érintő közkeletű tévhitet is el kell oszlatni. Az első ilyen téves nézet, hogy a megújuló energiaforrások **használata drága**. Látnunk kell, hogy – bár valóban léteznek drága alkalmazások is − számos olyan megoldást ismerünk és használunk, amelyik kifejezetten olcsók (sőt, akár ingyenesen áll rendelkezésre, pl. direkt típusú passzív napenergia-hasznosítás, lásd később). Ráadásul a korábban még drága technológiák egyre gazdaságosabbá válnak, részben a fejlesztések és a tömegtermelésre való átállás, részben a fosszilis energiaforrások árának növekedése miatt (ennek köszönhetően következett be a magyar háztartások sokaságánál a földgázról fatüzelésre való átállás a gázár-támogatások 2005-2010 közötti leépítését követően). És itt nem csak a közvetlen költségekre kell gondolni, hanem a „*szennyező fizet*” elv alapján a **közvetett, externális költségek**re is.

Érdekes és jellemző az, ahogyan egyes külföldi szakmai szervezetek közelítenek a fentiekben vázolt különféle társadalmi és gazdasági kihívásokhoz. Például a **Dán Mérnökök Társasága** a megújulókkal kapcsolatos kérdések kapcsán nem nehézségeket, hanem sokkal inkább lehetőségeket lát (IDA 2006). A szervezet 2006-ban megjelentetett 100%-ban megújuló energiahordozókra építkező energiaforgatókönyve a jelenleg is számottevő **exportbevételek csaknem hatszoros növekedését várja 2030-ra** az energetikai technológiák külföldi

értékesítéséből (35. ábra). Ugyanezen jelentésben jelentős kiadáscsökkenést kalkuláltak az egészségügyi szektorban a javuló környezeti teljesítmény miatt, ami ismét csak a megújulók további terjedésének kormányzati támogatását indokolja.

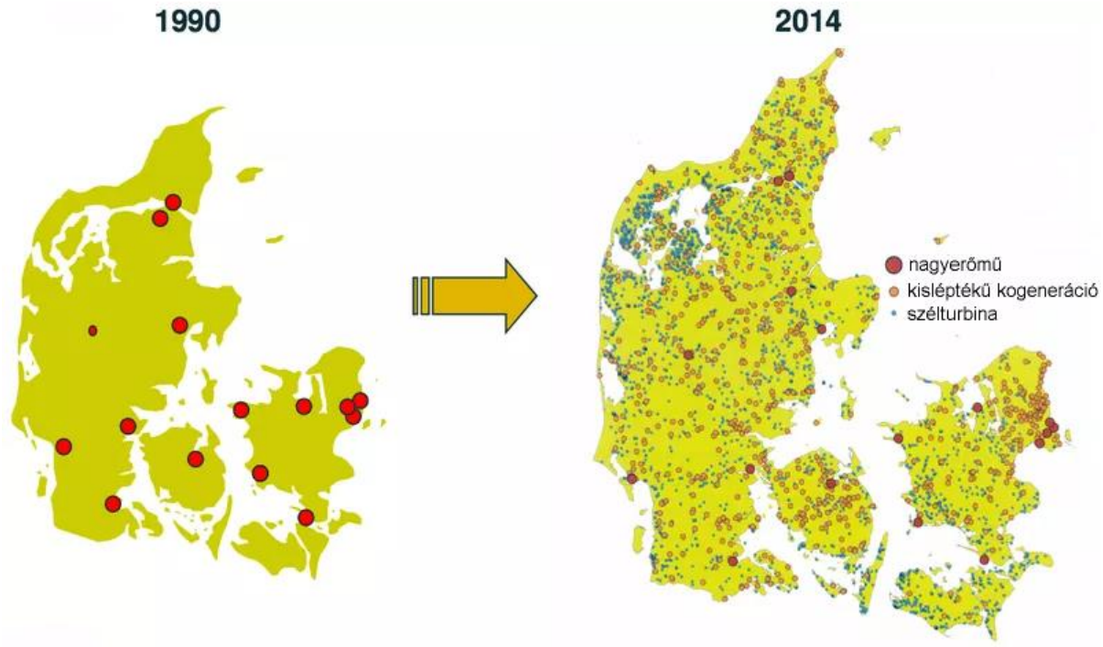


35. ábra. A dán energiaszektorban rejlő innovációs megoldások exportjából 2004-ben befolyt és 2030-ra tervezett bevételek a Dán Mérnökök Szövetségének energiaterve szerint (IDA 2006)

Az alaperőművek szerepe a 20. és 21. századi energiarendszerben

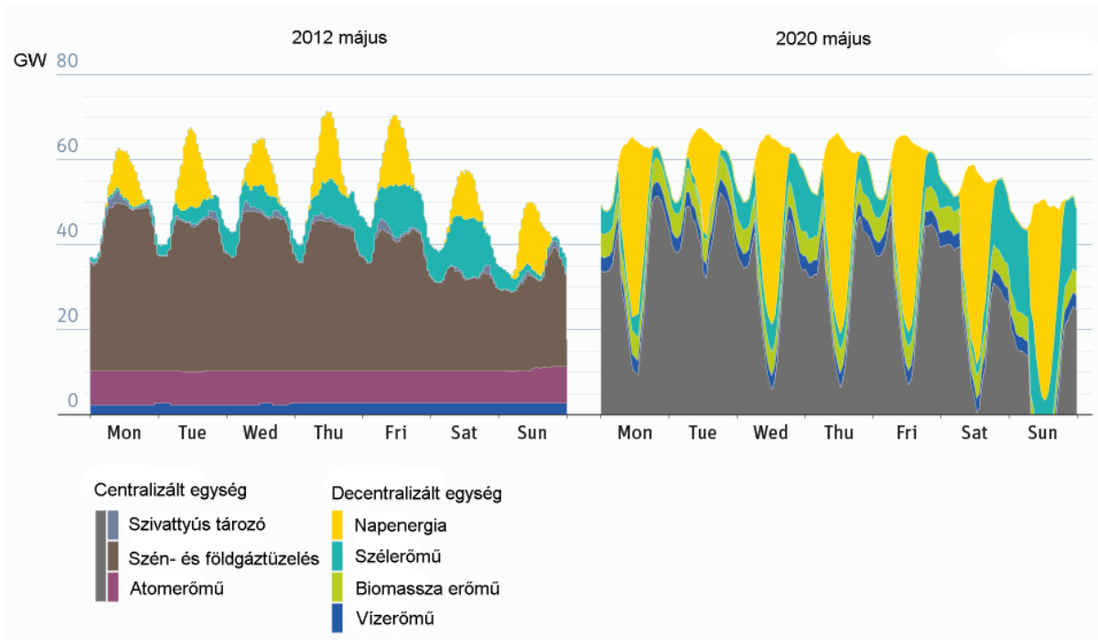
A központosított energiarendszer létrejöttét erősen befolyásolta, hogy kezdetben az áramszolgáltatás csak néhány nagyobb városban volt meghatározó (a vidéki térség ellátatlan volt – mint ahogyan ez a világ számos térségében még ma is így van), illetve az ipari tevékenység is jól behatárolható térségekben, az iparvidékeken dominált. Mivel az energiahordozók abban az időben olcsón álltak rendelkezésre és nem merült fel, hogy a készletek valaha kimerülhetnek, így az sem volt probléma, hogy a 20. század közepétől épített, jellemzően egyre nagyobb hőerőművek energetikai hatékonysága igen alacsony, 30-35% körüli volt. Mivel a környezetvédelmi szempontrendszer sem jelent még meg, így az indokoltnál lényegesen nagyobb környezetterhelés sem okozott különösebb fejtörést. Ezek eleinte helyi szintű szennyezésben csúcsosodtak ki, és már az 1900-as évszázad közepén súlyos problémákat okoztak. Erre az egyik első példa az 1948 októberében, **Donorában** (Amerikai Egyesült Államok, Pennsylvania) bekövetkezett 21 haláleset és mintegy 6000 súlyos légúti megbetegedés, amelynek – mint utóbb kiderült – egyetlen oka a súlyos levegőszennyezés és ebből fakadóan a szmog kialakulása volt.

A 20. század utolsó évtizedétől kezdődően a **helyi, környezetkímélő energiaforrások felértékelődése** meglepően rövid idő alatt radikális változást eredményezett az energiarendszerben. A néhány nagyerőművet felvonultató centralizált rendszerből a legtöbb országban kisebb-nagyobb mértékben decentralizált villamosenergia-rendszert sikerült létrehozni (36. ábra). De a legnagyobb változást nem is a **térbeli jelleg** átalakulása, hanem a felhasznált energiahordozók **forrásszerkezet**ének és ebből fakadóan a **működési jellemző**inek megváltozása okozta – és okozza a mai napig. A helyi, környezetkímélő energiaforrásokra támaszkodó megoldások egy része – ráadásul éppen azok a technológiák (napelemek és szélturbinák), amelyek versenyképes alternatívát jelentenek a 20. századi megoldásokkal szemben – az időjárás függvényében változó teljesítménnyel dolgoznak, vagyis egyelőre csak részben igazíthatók az igények változásához (leginkább az igények csökkenésekor leállítással, a hálózatról való leválasztással). Ez az elmúlt években az egész rendszerirányítási filozófia megváltozását eredményezte. **Egyre inkább középpontba kerül a rugalmasság és a gyors reagálás képessége**, ami a korábbiakhoz képest gyökeres változás, hiszen mindeddig a stabilitás és a kiszámíthatóság domináltak, ezek jelentették az értéket.



36. ábra. A decentralizálás helyzete 1990-ben és 2014-ben Dániában (Danish Energy Association 2013, http://www.slideshare.net/npenergyconsumers/2-anders-stougeifc)

A 37. ábra jól érzékelteti azt a változást, ami már középtávon kihívást jelent majd a rendszerirányítóknak. Látható, hogy alig néhány esztendő múlva a német energiarendszerben a rugalmas árképzés és egyéb kereslet oldali szabályozási beavatkozások révén az igények időbeli átrendeződése várható, ami 10-20%-kal **kisebb, ám időben sokkal elnyújtottabb csúcsterheléseket** eredményez – jobban igazodva a megújuló energiaforrások rendelkezésre állásához. Az is jól érzékelhető, hogy a megújuló energiaforrások már ebben a rövid, 5 éves előretekintésben is sok esetben akár a teljes villamosenergia-igényt is képesek lesznek majd fedezni, ezáltal nem hagynak teret a lényegesen drágábban termelő, de főként nehezen reagálni képes, hagyományos alaperőművi technológiáknak. Erre a felismerésre hivatkozva napjainkban a kutatói berkekben az az álláspont kezd kikristályosodni, hogy az centralizált elven működő alaperőművi áramtermelés sorsa megpecsételődött, sőt, mára ezt egyre több gyakorlati szakember is idejétmúltnak tekinti. Nemrégiben például az Egyesült Királyság és Új-Anglia villamosenergia- és földgáz-rendszerének irányítója nyilatkozott úgy, hogy az alaperőművek kora lejárt: „*The idea of large power stations for baseload is outdated*" (Beckman, K. 2015).



*37. ábra. A villamosenergia-rendszer működése a 2012-es **centralizált** (balra) és a 2020-as "**részben decentralizált**"(jobbra) keretek között a német villamosenergia-rendszerben (http://energytransition.de)*

A villamosenergia-rendszer szabályzása centralizált és decentralizált megközelítésben

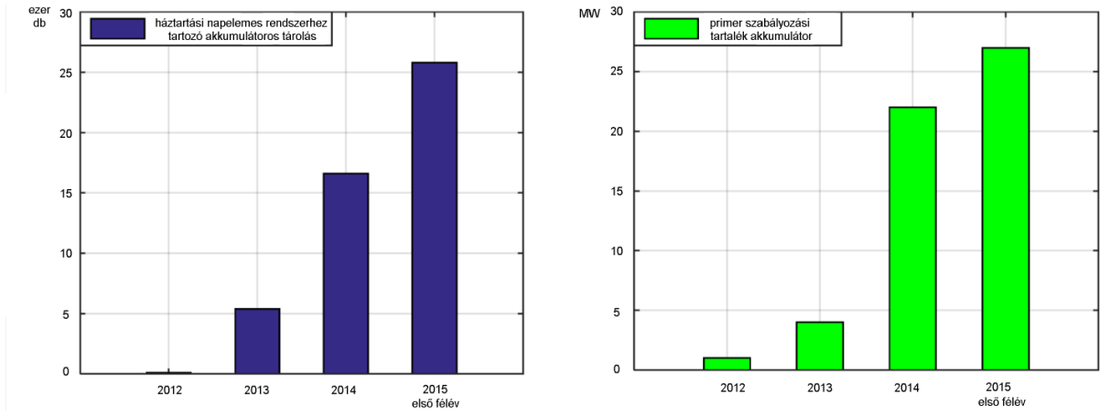
A fogyasztókat a földgázhálózat, a távhőrendszer, valamint a villamosenergia-rendszer látja el különféle energiahordozókkal. Mindegyik terület esetében igen lényeges az ellátás biztonságos megvalósítása, amiért az ún. **rendszerirányítás** a felelős. Az alábbiakban ennek működését a legösszetettebb struktúra, a villamosenergia-rendszer példáján mutatjuk be vázlatosan.

A villamosenergia-rendszer az erőművek és a villamos hálózat együttműködő hálózatát jelenti. A rendszerirányítás célja **a termelés és a fogyasztás közötti egyensúly fenntartása**. A **20. századi megközelítés szerint** ennek érdekében az alábbi feladatok végrehajtása szükséges:

- az **igények** előrejelzése (sokéves statisztikai adatok alapján és például a meteorológiai előrejelzések figyelembe vételével, 1-2%-os hibahatárral);
- az előrejelzett igények alapján történő **tervezés és termelés**: alap-, menetrendtartó- és csúcserőművek segítségével (lásd 14. ábra);

A **terhelés** (értsd: fogyasztás) **váratlan, nagyobb változása vagy üzemzavar** (termelő gépegység váratlan kiesése) **esetén a váltakozó áram 50 Hz-es frekvenciaértéke megváltozik**, ennek korrekciója például import tartalékforrás igénybe vételével, vagy a fogyasztók korlátozásával, ám **elsődlegesen a rendszerirányítási tartalékok** révén történik. Szükség esetén először – és automatikusan – a **primer szabályozás** avatkozik be, lényegében másodperceken belül, teljes kapacitását legalább 15 percen át a rendszer rendelkezésére bocsátva. A mai magyar villamosenergia-rendszerben az elvárt **primer szabályozási tartalék** ±30-40 MW, amelyet az **ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity)** határozott meg. A később bekapcsolódó **szekunder és tercier szabályozás** feladata, hogy a teljesítményegyensúly beállításával mielőbb „visszaszabályozza" a frekvenciát az előírt értékre. A csúcsterhelés függvényében Magyarországon legalább ±150 MW szekunder szabályozásra van szükség.

A 21. századi decentralizált, megújuló energiaforrásokra támaszkodó energiarendszerben a primer szabályzás során az elsődleges szabályozási tartalékolást egyre inkább **szuperkondenzátorok** és **akkumulátorok** oldják meg – sőt, az akkumulátorok várhatóan a szekunder szabályozás terén is egyre nagyobb teret nyernek. Ezek egyelőre drágább beruházást jelentenek, de lényegesen jobban viselik a gyors ki- és bekapcsolást, le- és felterhelést, mint a hagyományos erőművi gépegységek.



38. ábra. A napelemes rendszerekbe illesztett akkumulátoros tárolók számának és a primer szabályozási tartalékot képező akkumulátor-rendszerek teljesítményének változása Németországban (Hartig, A. 2015)

Lényeges még a szabályozási területen túlmutató ún. **tartalék kapacitás** problémaköre. Az Európai Villamosenergiai Rendszeregyesülés (Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity, röviden **UCTE**) előírása szerint minden tagország gyorsindítású tartalék kapacitásának legalább az adott tagországban működő legnagyobb blokk teljesítőképességével kell megegyeznie. Mivel a magyar villamosenergia-rendszerben a paksi atomerőmű blokkjai a legnagyobbak, így ezek villamos teljesítőképességéhez (500 MW) kell méretezni a gyorsindítású erőművi kapacitást. A tervezett új atomerőmű megépülése ennek a tartalék kapacitásnak a jelentős emelését eredményezné (1200 MW-ra), ami újabb terhet róna az adófizetőkre.

Szállítás

A centralizált energiarendszer egyik leggyengébb pontja több szempontból is a szállítás, ami egyfelől **nemzetstratégiai kérdés**, hiszen könnyen térdre lehet kényszeríteni egy országot az energiahordozó szállításának megakadályozásával. Ennek példája az **orosz-ukrán földgáz vita**, melynek legkritikusabb időszaka 2009-ban volt, amikor néhány napra leállt a földgáz szállítása Európába.

Ugyanakkor a politikai helyzet viharos változásai is sodorhatnak egyes gazdaságokat kellemetlen helyzetbe, mint ahogyan ez **Kubával** történt a Szovjetunió összeomlását és ezzel együtt a **szovjet olajimport leállását követően**. A dízelolajtól függő mezőgazdaság tulajdonképpen az egyik napról a másikra veszítette el energiaforrását, ezzel lényegében leállt az országban a korunkra jellemző iparszerű agrártermelés (ehhez képest mellékes, de a közlekedés és az ipari termelés jó része is lebénult). Az, hogy az 1990-es évek elején Kuba át tudta vészelni ezt a súlyos erőforrás válságot, azt sok szerencsés tényező szerencsés együttállásának köszönheti, amelyek között van a megmaradt hagyományos agrárismeretek (pl. állati igaerő alkalmazásának gyakorlata), a városi közösségek ereje, a nemzetközi segítség, ami nem kis részben civil csoportoktól, így például permakultúrával (talajtakarásra, ökológiai alapelvekre támaszkodó növénytermesztés) foglalkozó szervezetektől érkezett. Legalább ilyen fontos volt az, hogy 1980-ra Kubában megfékezték a népességnövekedést, ami nagyban hozzájárult ahhoz, hogy sikerült a még kezelhető keretek között tartani a társadalmi feszültségeket. Sokak szerint a történetnek mindannyiunk számára van tanulsága, hiszen az **olajhozamcsúcs (peak oil)** és az ebből fakadó drasztikus áremelkedés hasonló helyzetet teremthet akár már egy-két évtizedes távlatban globális szinten is.

Az energiahordozók szállítása másfelől potenciális környezeti probléma a súlyos környezetterhelés, valamint a kapcsolódó baleseti kockázat miatt. Ennek kapcsán a tengeri kőolajszállításról szokás megemlékezni, hiszen a legnagyobb katasztrófák ehhez kötődnek: 1979-ben az Atlantic Empress tanker baleseténél 341 000 000 liter olaj, 1989-ben az Exxon Valdez zátonyra futásakor 50 000 000 liter olaj került a tengeri környezetbe, jóvátehetetlen károkat okozva. Az elsőre biztonságosabbnak tűnő vezetékes olajszállítás is problémás terület. Csak az Amerikai Egyesült Államokban 2000 óta átlagosan 650 különféle baleset, üzemzavar jelentkezik a vezetékrendszerben évente, amelynek jó része kisebb-nagyobb olajszivárgással is jár, ami akár jelentős ivóvízkészlet sérülését, vagy termőtalaj károsodását is eredményezi (a felügyeleti szerv, a Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration honlapján közreadott adatsor szerint). A probléma mértékét jelzi, hogy 1983-ban a Kolva folyó mentén [Szovjetúnió] egy szivárgó olajvezetékből 314 000 000 liter olaj került a természeti környezetbe – ami egy olajtanker balesetekor kijutó mennyiséggel összemérhető.

39. ábra. A francia nukleáris ipar ellátási láncának interkontinentális lépései (OpenSourcemap.com)

A szállítás a másodlagos energiahordozók kapcsán is igen lényeges probléma. A **hőenergia** 15-20 km-nél messzebbre a jelenlegi csővezetékes technológiával nem szállítható nagyobb veszteségek nélkül, ezért a nagyerőművek (atom, szén) nem tudják érdemben hasznosítani a sokezer MW hőteljesítményből fakadó elképesztő mennyiségű hőenergiát, így az legnagyobbrészt a környezetbe kerül (40. ábra). A 21. században a hőenergia szállítása

vélhetően továbbra is csak lokális szinten képzelhető el, ezzel erősítve a kisléptékű energetikai alkalmazások, a kogenerációs megoldások helyzetét.

40. ábra. A Drax (Egyesült Királyság) a világ legnagyobb és legkevésbé hatékony biomassza tüzelésű erőműve – a hűtőtornyokon kibocsátott hőveszteség ~8000 MW felhasználatlan hőteljesítményt jelent (3960 MW villamos teljesítmény mellett) - (fotó: TheWritingZone, flickr)

Ehhez kapcsolódóan kell említést tenni a **távhőszolgáltatás**ról, amely hazánkban leginkább azok körében kedvezőtlenebb megítélésű, akik azt nem veszik igénybe; miközben azok, akik fogyasztóként jobban ismerik, lényegesen pozitívabb véleményt alkotnak róla. Maga a technológia számos előnnyel kecsegtet, ezért számos gazdag európai ország (Dánia, Svédország, Ausztria) előszeretettel alkalmazza és fejleszti. A fogyasztó számára kényelmes, gazdaságos, jól szabályozható; a település számára jól kézben tartható (kibocsátása kontrollálható) és a lakott területektől távolabb eső, vagyis kevésbé zavaró légszennyezést jelent; összességében a nemzetgazdaság számára hatékony erőforráshasznosítást biztosít.

A távfűtéses rendszerben a hőenergiát egy központi **fűtőműben** állítják elő. Ebben rejlik az egyik remek lehetőség, hiszen a technológia vagy a tüzelőanyag környezetkímélőbbre váltása sokkal egyszerűbb, mint egy olyan település esetében, ahol ugyanezt az egyedi fűtési megoldások ezreinél kell elérni. Egyre gyakrabban fordul elő, hogy a forrásoldalon megújuló energiahordozók, de méginkább ezeknek valamiféle, a helyi földrajzi adottságokra alkalmazott kombinációja jelenik meg, mint például biomassza + napenergia (lásd „Az aktív napenergia-hasznosítás” című fejezetet).

41. ábra: Kistelepülési szintű bio-szolár fűtőmű Burgenlandban (Fotó: Munkácsy B.)

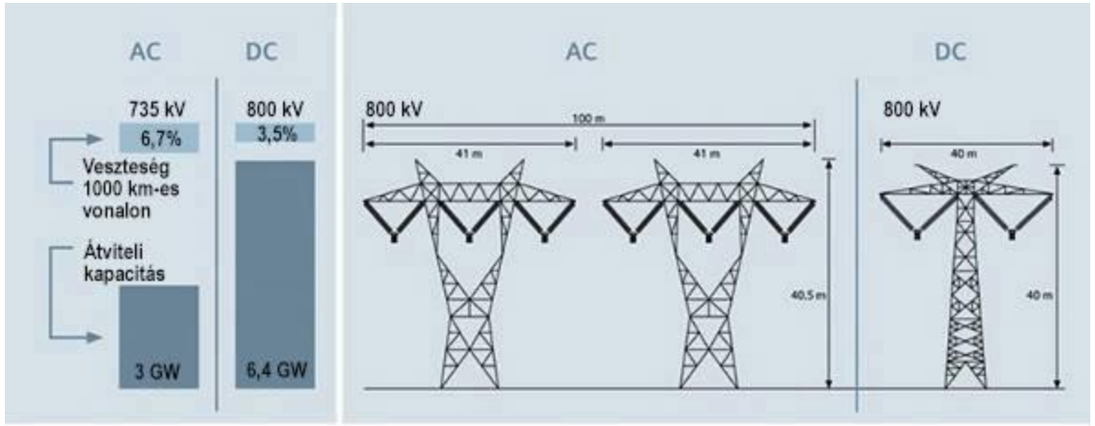
A központilag megtermelt hőt jól szigetelt vezetékeken, jó esetben a felszín alatt juttatják el a fogyasztókhoz. Az elmúlt évtizedek során az előremenő vízhőmérsékletet sikerült lépésről lépésre csökkenteni, ennek eredményeként beszélünk első, második és harmadik generációs technológiákról. A közeli jövőben a **negyedik generációs távfűtőrendszerek** térnyerésével számolnak, amelynél már igen alacsony, **~50°C-os víz szállításáról van szó**, ami felületfűtési és -hűtési megoldások révén hasznosítható (Lund, H. et al. 2016).

Az előzőekből következően a hőenergia-gazdálkodás kulcsfeladata a lokális jelentőségű **távfűtéses-távhűtéses rendszerek** minél gyorsabb bővítése és terjesztése. Dániában (a hazánkéhoz igen hasonló népsűrűség mellett) a nettó hőigény kielégítésében a távfűtés jelenlegi részaránya 46%, de a – részben térinformatikai, részben energiatervezési vizsgálatok alapján – úgy tűnik, hogy minden szempontból célszerű volna ezt a részarányt jelentősen tovább növelni, akár a 70%-os értékig (Lund, H. et al. 2010).

A **villamos energiát** a fosszilis tüzelőanyaggal működő hőerőművekben és az atomerőművekben turbinákkal meghajtott generátorok termelik, amelyek **váltakozó áramot** állítanak elő. **A villamos energia szállítása szintén elsősorban váltakozó áramra alapozott rendszereken keresztül történik**. A nagyobb távolságra történő szállítása a **távvezetékekből és a transzformátor-alállomásokból álló átviteli hálózat** segítségével történik. Mivel **a feszültségszint növelésével jelentősen csökkenthető a szállítási veszteség** – a feszültség megduplázásával négyszeres hatékonyságjavulás érhető el –, ezért nagyfeszültségű, tehát jellemzően 220 - 750 kV-os távvezetékeken (hazai nyomvonalhossz ~3700 km) történik a szállítás. Az átviteli hálózat és a fogyasztók közötti villamos energia szállítását biztosító **elosztó hálózat** jellemzően 0,4 kV-os kisfeszültségű, 10 és 20 kV-os középfeszültségű, illetve 120 kV-os nagyfeszültségű távvezetékekből és földkábelekből, valamint a transzformátor-alállomásokból épül fel. A transzformátor-alállomások a villamos energia különböző feszültségszintek közötti átalakítását végzik.

Napjainkban ezen a téren is a változás korát éljük, ugyanis gyorsan terjednek az általánosan alkalmazott váltakozó áramú technológiával szemben a **nagyfeszültségű egyenáramú villamos távvezetéknek** (HVDC - high-voltage, direct current), amelyek

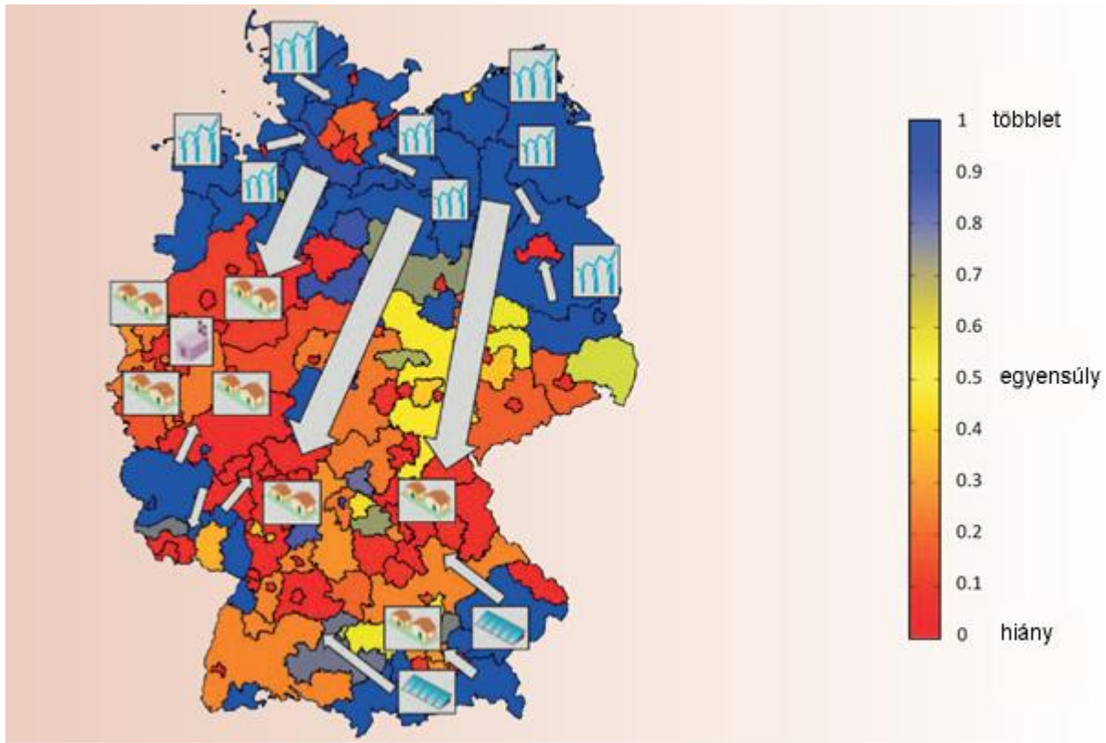
- a mintegy 50%-kal kisebb veszteségnek köszönhetően akár több ezer km-es távolságra is lehetővé teszik az eddiginél jelentősebb árammennyiség továbbítását;
- elérhetővé teszik távoli megújuló energiás projektek rendszerbe kapcsolását (pl. tengeri szélfarmok);
- kisebb területfoglalással kisebb tájképi hatást fejtenek ki, mert a hagyományos két oszlop helyett csak egy elegendő;
- kisebb természeti kárt okoznak, mert a 100 méteres helyett kb. 40%-kal kisebb szélességet igényelnek a villanypászták kialakításánál (42. ábra).



42. ábra. A hasonló jellemzőkkel rendelkező nagyfeszültségű váltakozó áramú (AC - Alternating current) és egyenáramú (DC - Direct current) távvezetékrendszer vázlatos összehasonlítása az átviteli kapacitás, a veszteség és a területfoglalás szempontjából (www.energy.siemens.com alapján szerk: Kovács K.)

Mindemellett nyilvánvalóan a helyi jelentőségű rendszerek összekapcsolása is lényeges. A **mikrogridek** egy adott funkcionális egységben összekapcsolódó energiatermelési és fogyasztási együttműködést jelentenek. Ezek decentralizált termelési egységei akár **virtuális erőmű**ként is az országos hálózatra kapcsolódhatnak, vagyis a központi rendszer nézőpontjából ezek egyetlen erőműként válnak értelmezhetővé.

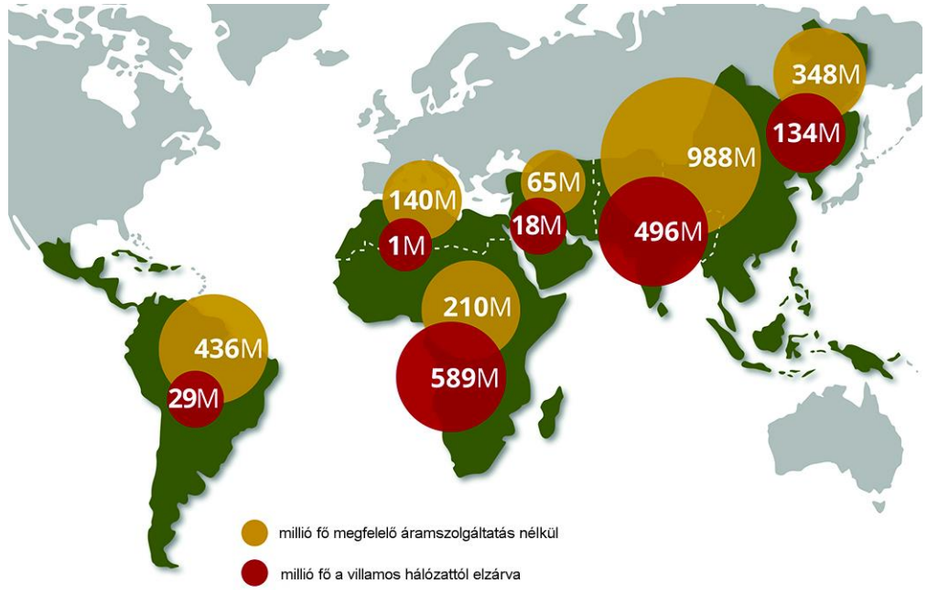
Az elektromos áram szállítása tehát a 21. században is kulcsterület lesz, sőt ennek felértékelődésére lehet számítani. A jövőben a nemzetközi együttműködéseknek erősödniük kell annak érdekében, hogy a rendszer a legkisebb zökkenőkkel legyen képes a megújuló energiaforrások befogadására. Sőt, ennek nagyobb, eltérő természeti adottságú területekkel rendelkező országok esetében akár az országon belül is lehet jelentősége. Ennek iskolapéldája Németország, ahol az északi részek a szélerőművek, a déli területek a napelemek terén rendelkeznek jelentékeny kapacitásokkal. Ez egyfajta egymásrautaltságot jelent az egyes térségek között (amit optimistaként akár lehetőségként is értelmezhetünk). A villamos energia szállítása nagy mennyiségben tehát elkerülhetetlen, és egyre sürgetőbb feladat – országon belül és kívül egyaránt (lásd 43. ábra).



43. ábra. Egyes német térségek energetikai helyzete a megújuló energiaforrásokat hasznosító technológiák és a kereslet-kínálat tükrében (http://transition.web.unc.edu/files/2015/06/germany_electricitymap.png)

Felhasználás, fogyasztás

A térbeliség, illetve a decentralizálódás a fogyasztás szempontjából is lényeges terület, hiszen az egyre bővülő távvezeték-hálózatok és a villamos hálózattól akár függetlenül is működő megújuló energiás alkalmazások, valamint a hozzájuk szervesen kapcsolódó különféle tárolási technológiák bizonyosan a fogyasztók körének lényeges bővülését eredményezik. Jelenleg **1,2 milliárd ember** egyáltalán nem tud csatlakozni a villamos hálózathoz, de legalább kétszer akkora azok száma, akikhez ugyan eljut az elektromos áram, de korántsem olyan megbízhatóan, mint ahogyan mi azt az európai gyakorlatban megszoktuk. Ez lényegében azt jelenti, hogy **a humán populáció csaknem fele** tartozik abba a körbe, ahol vélhetően **jelentős egy főre jutó áramfelhasználás-növekedéssel számolhatunk** az elkövetkező évtizedekben – remélhetőleg többségében már decentralizált módon, megújuló energia alapon. Ugyanakkor figyelemre méltó az az aggodalom is, ami például a szénlobbi részéről érzékelhető az energiaszegénység vonatkozásában – ami a remélt profit szempontjából érthető, hiszen ez a szektor a megújulós alkalmazások legnagyobb konkurense a még ellátatlan térségekben. Nem szorul hosszas magyarázatra, hogy miért ad okot aggodalomra ez a versengés, hiszen a globális éghajlatváltozás már jelenleg is aggasztó mértékű, így a karbonkibocsátás új forrásokból származó további növekedése minden eddigi éghajlatvédelmi erőfeszítést feleslegessé tenne.



44. ábra. A villamos hálózathoz való hozzájutás szempontjából problémás földrajzi területek (Boyce, G. H. 2014)

Felhasznált és ajánlott irodalom:

Beckman, K. (2015): Steve Holliday, CEO National Grid: “The idea of large power stations for baseload is outdated”. http://energypost.eu/interview-steve-holliday-ceo-national-grid-idea-large-power-stations-baseload-power-outdated/

Boyce, G. H. (2014): Modern Energy: The “Golden Thread” That Connects People, Economies, and Progress. Cornerstone, the official journal of the world coal industry.

EIA (2015): What are the major sources and users of energy in the United States? US Energy Information Administration. http://www.eia.gov/energy_in_brief/article/major_energy_sources_and_users.cfm

Eurostat (2016): Energy dependence EU-28 1990-2013.jpg http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Energy_dependence_EU-28_1990-2013.jpg

EWEA (2017): Wind in Power. – 2016 European Statistics http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA-Annual-Statistics-2016.pdf

Glennie, J. (2016): US renewables employs more than nuclear, oil, gas & coal combined. https://www.saskwind.ca/blogbackend/2016/5/30/us-renewables-employment

Hartig, A. (2015): From Generation to Integration: New Business Opportunities in the German Energiewende. In Proceedings of the Energy Storage Europe Conference (ESE 2015), Düsseldorf, Germany, 9–11 March 2015

IDA (2006): Danish Society of Engineers' Energy Plan 2030. –Ingeniørforeningen i Danmark, 2006, 65 p. www.ida.dk/sites/climate/introduction/Documents/Energyplan2030.pdf

Juhász A. (1960): Vízimalmok a szegedi Tiszán. Szeged, 1960. a Móra Ferenc Múzeum Évkönyve, klny. http://epa.oszk.hu/01600/01609/00003/pdf/MFME_EPA01609_1958_1959_127-141.pdf

Lund, H.- Möller, B. – Mathiesen, B.V. – Dyrelund, A. (2010): The role of district heating in future renewable energy systems, In: Energy 35 (2010) 1381-1390.

Lund, H.— Duic, N. — Østergaard, P. A.—Mathiesen, V. B. 2016: Smart energy systems and 4th generation district heating. In.: Energy 110. pp. 1-4. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.105

Pehnt, M. et al. (2009): Renewable Energies – Innovation for a Sustainable Energy Future. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Germany. p. 129., 2009.

Renner, M. (2014): Jobs in Renewable Energy Expand in Turbulent Process. http://vitalsigns.worldwatch.org/vs-trend/jobs-renewable-energy-expand-turbulent-process

Schneider, M – Froggatt, A. (2016): The World Nuclear Industry Status Report 2016. http://www.worldnuclearreport.org/Report-2015-Executive-Summary.html

Energiatervezés a 20. és a 21. században

Az **energiatervezés** kapcsán mindenekelőtt azt kell hangsúlyozni, hogy ez esetben egy hosszú távú, több évtizedre előretekintő feladat végrehajtásáról van szó. Ezzel szemben a rövid távú – legfeljebb néhány napos, hetes - tervezés az úgynevezett **rendszerirányítás** feladatkörébe tartozik.

Az energiatervezés többféle szinten is elképzelhető, de a gyakorlatban az alábbiakat érdemes megkülönböztetni:

- országos szint;
- települési szint;
- termelő üzem szintje – ezzel a szinttel a gyártással, termeléssel összefüggő speciális elvárások és adottságok miatt nem foglalkozunk;
- épület szintje.

Az egyes szinteken folyó konkrét lehetőségek és módszertanok sok tekintetben különböznek egymástól, de az alábbi lépések tekintetében mégis hasonlóak:

- tervezési célok meghatározása;
- kiindulási állapot meghatározása;
- a lehetőségek feltérképezése (mind a termelés, mind a fogyasztás terén);
- a fejlesztések lépéseinek ütemezése.

Az országos szintű energiatervezés

Egy Albert Einsteinnek tulajdonított gondolattal egyetértve valóban úgy tűnik, hogy „*egy problémát nem lehet ugyanazzal a gondolkodásmóddal megoldani, amivel azt létrehoztuk*” („Probleme kann man niemals mit derselben Denkweise lösen, durch die sie entstanden sind.”). Ezt az energiagazdálkodás aktuális kihívásaira alkalmazva: ha valódi megoldást akarunk a szektor által okozott környezeti, társadalmi és gazdasági problémák sokaságára, akkor szakítani kell azzal a kizárólag energetikai és rövidtávú gazdasági szempontrendszerrel, amely az ipari forradalom óta meghatározója volt minden ide vágó döntésnek és az energialábnyom drámai növekedését eredményezte. A megoldás, vagyis a tragikus összeomlás elkerülésének kulcsa tehát – ha beszélhetünk még ilyenről a környezeti és erőforrás-válságnak ebben a szakaszában – a **minél nagyobb, összetettebb rendszerben** és a **minél hosszabb időtávban** való gondolkodás.

A „minél nagyobb és összetettebb rendszer” mindenképpen többet kell jelentsen, mint a hőtermelés vagy az áramtermelés keretein belül gondolkodás. Nem jelent megoldást az sem, ha megpróbáljuk az energiaszektorra kibővíteni a megoldáskeresést. Sőt, az ennél sokkal nagyobb rendszer, a környezetgazdálkodás egésze is csak részben fedi le azt a területet, ahol az energiatervezési feladat során a válaszokat keresnünk kell. A régi energiarendszer összeomlásának küszöbén, egy új, életképes struktúra létrehozásához ki kell terjesztenünk vizsgálódásainkat részben a komplex természettudományos ismeretekre, de részben olyan társadalomtudományi összefüggésrendszerekre is, amelyek már az etika, a szociológia, a pszichológia vagy a kulturális antropológia tudományterületeibe tartoznak (lásd 26. ábra26. ábra) (Nørgaard, J. 1998). Ez néhány fejlettebb energiatervezési gyakorlattal rendelkező országban (Németország, Dánia, Norvégia, Nagy-Britannia) már nem kérdés. Arrafelé számos olyan társadalomtudóst találni, aki energiatervezéssel foglalkozik, sőt, ilyen tárgyú egyetemi képzést irányít; de olyan mérnököt is, aki a társadalomtudományok területére merészkedve jutott meghatározó, energiagazdálkodással kapcsolatos felismerésekre. A legsikeresebb, leginkább előremutató projektek azok, ahol a műszaki, természettudományi és társadalomtudományi problémák szakértői a saját területüket művelve, mindhárom tudományág szükségességét és relevanciáját elismerve, szoros együttműködésben dolgoznak együtt.

Az energiatervezés optimális esetben tehát egy igen komplex és felelősségteljes tevékenység, amely a tervezett fejlesztések révén a nemzetgazdaság és az egész társadalom szempontjából lényeges problémákra keres válaszokat. A tervezési feladat évtizedes léptékű előretekintést jelent, hiszen az energiarendszer átalakítása igen lassú folyamat. Szélsőséges példaként szolgál a szlovákiai Mochovce térségében tervezett két atomerőművi blokk, amelyek építése 1987-ben kezdődött és várható befejezése – sok csúszást követően – 2017-ben történhet. Az átadást követően az atomerőmű 30-60 éves távlatban határozhatja meg

egy ország energetikai jövőképét, de hasonlóan hosszú időtávlatban kell gondolkodnunk például a villamos hálózat vagy a gázvezeték-rendszer kapcsán is.

Az energiatervezés filozófiája

Az energiatervezési gyakorlatot a **tervezés filozófiája** alapján két fő csoportba sorolhatjuk:

a) A **korábbi fogyasztási tendenciákra** alapozó tervezés, amelynek fő célja az – általában növekvő – energiaigények kielégítése. Ebben az esetben az érvelés lényege az, hogy a gazdasági növekedéshez elengedhetetlenül szükséges az energiafogyasztás növelése. Kérdésként merül fel, hogy miért kerül ebben a megközelítésben egyes gazdasági szereplők érdeke a többi gazdasági szereplő és a társadalom érdekei elé;
b) A **környezeti rendszer korlátait** figyelembe vevő tervezés, amelynek fő célja, hogy a társadalom egészének hosszú távú érdekeit figyelembe véve biztosítsa az energiaellátást.

A környezet korlátait figyelembe vevő tervezés érzékletes példája az ENSZ 2016. novemberi klímaértekezletén (COP22) elfogadott nagyívű koncepció, a **Marrakech Vision,** amelyben a klímaváltozás szempontjából várhatóan erősen érintett csaknem 50 ország (Climate Vulnerable Forum) a **100% megújuló energia részarány lehető leggyorsabb elérését** tűzte ki célul: *„We strive to meet 100% domestic renewable energy production as rapidly as possible, while working to end energy poverty and protect water and food security, taking into consideration national circumstances.” – Igyekszünk olyan gyorsan elérni a 100% megújuló energia részarányt, ahogyan csak lehetséges, eközben dolgozunk az energiaszegénység felszámolásán, megvédjük a vizeket, előrelépünk a élelmiszer-biztonság terén – mindezt a nemzeti sajátosságok figyelembe vételével.*

Maga a „**100% megújuló energia koncepció**”, mint akár nemzeti szinten érvényesíthető elképzelés, nem újkeletű. Először Sørensen, B. E. (1975), dán fizikus vetette fel a Science hasábjain, hogy ez Dánia esetében akár 2050-re elérhető volna. A következő évben az amerikai Lovins, A. vezette be az energiahatékonysággal és megújulókkal jellemezhető átmenetre a „*soft energy path*” kifejezést. Az első szoftveres modellezéssel alátámasztott tudományos jelentés 2006-ban látott napvilágot, az ugyancsak dán Lund, H. (2006) jóvoltából. Hazánkban az első ilyen, számítógépes modellezéssel készített 100% megújuló energia-forgatókönyv az ELTE Környezet- és Tájföldrajzi Tanszékén készült „Erre van előre – Egy fenntartható energiarendszer keretei Magyarországon” címmel (Munkácsy B. et al 2011) – ugyancsak dán közreműködéssel.

A fentiek tükrében azon már nem csodálkozunk, ha különféle kutatóintézetek (pl. Centre for Alternative Technology, Wales), egyetemi műhelyek, szakmai szövetségek (pl. Dán Mérnökök Szövetsége), civil szervezetek (pl. INFORSE-Europe, Energiaklub, Greenpeace) évről évre előrukkolnak tudományosan megalapozott koncepciókkal. **Az igazi áttörést azonban az első kormányzati döntés hozta, amely célként határozta meg a teljes áttérést a megújuló energiaforrásokra 1998 -ban Izlandon**. Ezt azóta számos más ország, így Dánia is követte. Ez a folyamat vezetett a korábban említett „Marrakech Vision” létrejöttéhez, ahol már tömegesen fogalmazták meg célként kormányzati vezetők az energetikai rendszer gyökeres átalakítását.

Ezen a ponton újra rá kell irányítani a figyelmet arra, hogy az átalakulás csak az energiarendszer gyökeres reformjával képzelhető el, ami az iparosodott országokban az energiafogyasztás növekedésének megfékezését is jelenti. Ugyanakkor az utóbbi években **megdőlt az a sok évtizedes tendencia, hogy a gazdaság élénkülését csak az energiafogyasztás és hulladékképződés növekedése mellett képzelhetjük el**. A **2000-2014 közötti időszakot vizsgálva megállapítható, hogy 21, többségében iparosodott ország (köztük hazánk) oly módon növelte gazdasági teljesítményét, hogy eközben sikeresen csökkentette az energiafelhasználást és a szén-dioxid-kibocsátást** (Aden, N. 2016) – más kérdés, hogy ennek az eredménynek egy jelentős része a termelés keletre tolódásából származik, vagyis a saját karbonkibocsátásunk jó részét Ázsiába exportáltuk.

Az energiatervezés módszertana

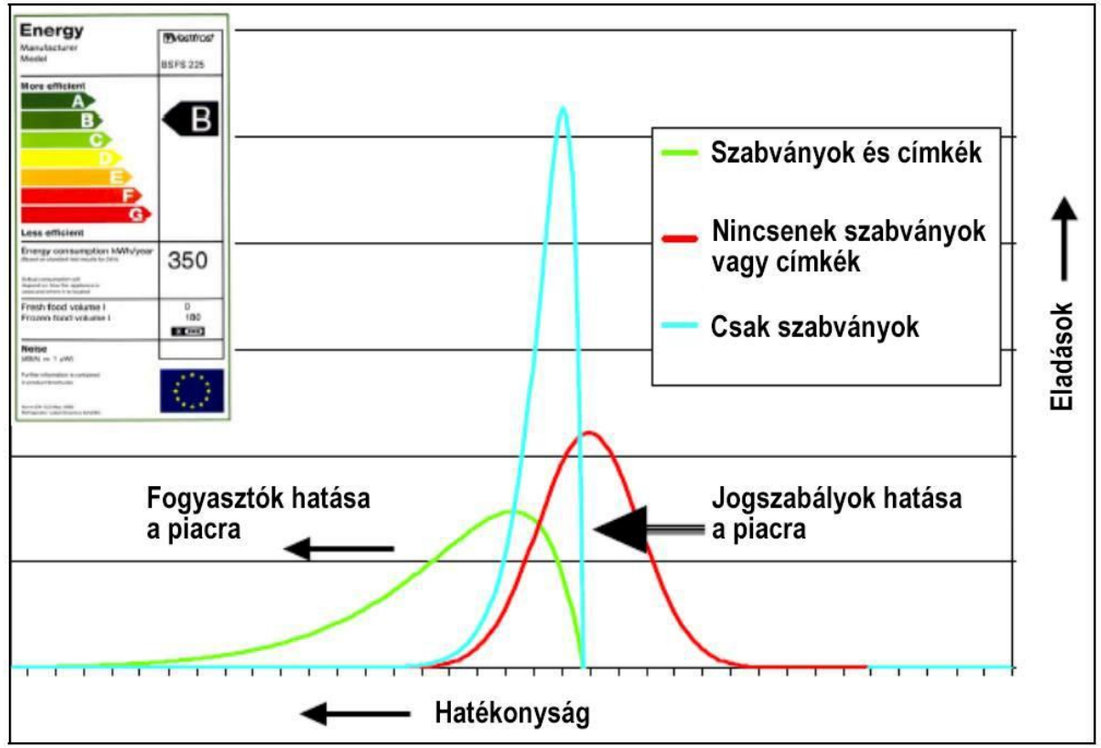
A tervezés **módszertana** alapján további két fő irány jellemző:

a) A 20. században alkalmazott **egyszerű műszaki megközelítés**, ahol meghatározóan energetikus mérnökök végzik a tervezési munkát – rossz esetben szinte kizárólag olyan szakemberek, akik az energialáncnak lényegében csak egyetlen állomásával, az

erőművi áramtermeléssel foglalkoznak (például Magyarország Energiapolitikai Tézisei);

b) A 21. századi elvárásokhoz igazodó **multidiszciplináris megközelítés**, amikor a lehető legtöbb szakterület részt vesz a munkában, kiemelt figyelemmel a környezeti terhelés és az emberi tényező kérdésköreire.

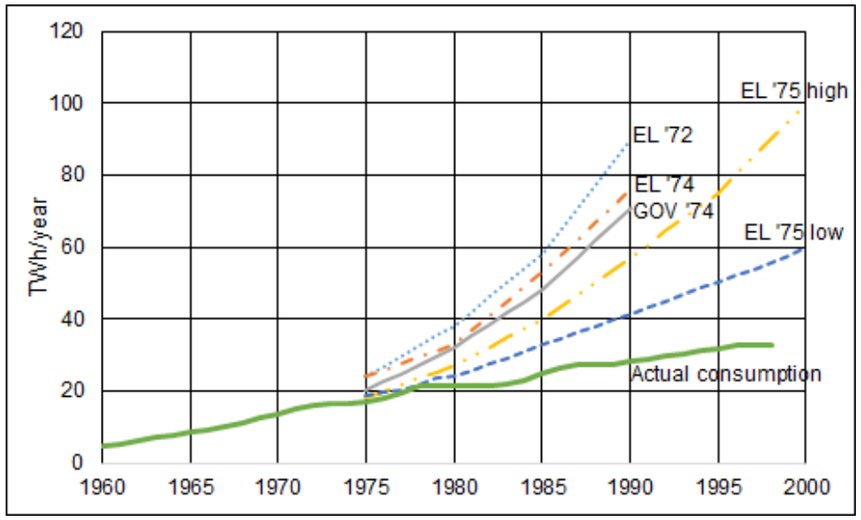
Itt kell ráirányítani a figyelmet arra, hogy a műszaki szemléletű energiatervezésének sok évtizedes hibája, hogy nem veszi figyelembe a környezetgazdálkodás többi területén felhalmozódott tudást (sőt, néha a közvetlenül kapcsolódó társterületek, így az épületenergetika és közlekedésenergetika egyre gyarapodó ismeretanyagát sem). A társadalomtudományok még ennyi szerepet sem kapnak, pedig bizonyos területeken jól kimutatható a fontosságuk. Erre példa egyes műszaki eszközök (a szabályozási dokumentumokban gyakran „Energy related Products" - ErP) kereskedelme. Ez esetben ugyanis egyfelől a gyártókra egyre szigorodó energiahatékonysági előírások vonatkoznak, miközben másfelől ezek vásárlását befolyásolja egy ehhez kapcsolódó eszközrendszer, amely a fogyasztói tájékozódást **címkézés**sel (labelling) igyekszik támogatni. A témában folyó kutatások egyértelműen igazolják az emberi tényező fontosságát a környezettudatos fogyasztók vásárlási döntéseiben – sőt, sok esetben arról is beszélhetünk, hogy ez **társadalmi elvárás**ként fogalmazódik meg egyes társadalmi csoportok körében. Akár úgy is fogalmazhatunk, hogy egyes körökben ma már egyfajta – **jó irányba mutató – státuszszimbólum** a kiemelkedő energiahatékonyságú (A^{+++}) műszaki eszközök vásárlása.



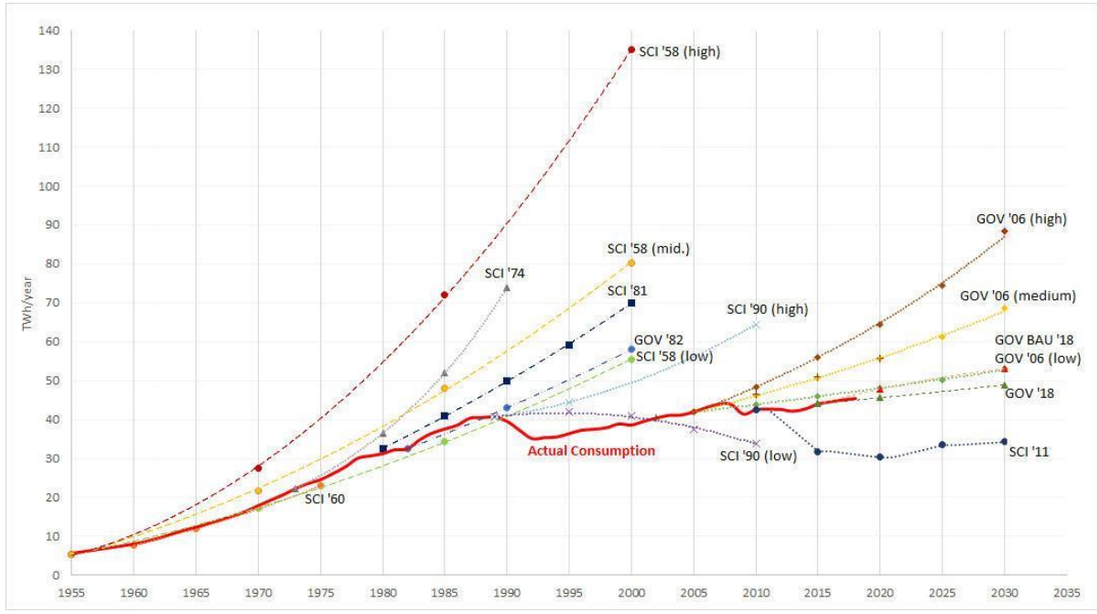
45. ábra. A hatékonysági sztenderdek és a címkézés együttes hatása a hatékonyság javulására (EC 2015 alapján szerk: Kovács K.)

A műszaki megközelítéssel készített stratégiák – az évtizedekre visszanyúló tapasztalatok szerint – rendszeresen túltervezik a kapacitásokat (lásd 46. ábra és 48. ábra). Ebben az esetben sem zárhatjuk ki az emberi tényező hatását, hiszen jól látható, hogy bizonyos energetikai fejlesztésekben (pl. atomerőművek építésében) érdekelt szakemberek hajlamosak saját területükre koncentrálni. Ez a gyakorlatban azzal a következménnyel jár, hogy a korábbi évtizedek technológiái a reálisnál lényegesen nagyobb támogatást élveznek,

míg a korszerű megoldások háttérbe szorulnak – lényegében ugyanez a jelenség fékezi a megújuló energiaforrások térnyerését a műszaki felsőoktatásban is.

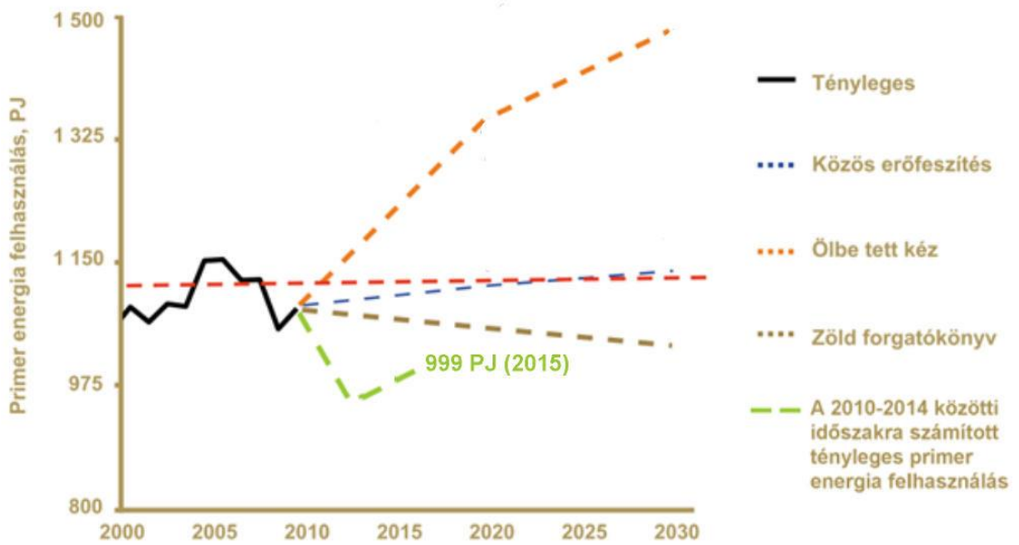


46. ábra. A dán kormányzat és az áramszolgáltató cégek által az 1970-es években felvázolt különféle áramfogyasztási elképzelések a tényleges fogyasztás tükrében (Nørgård, J. 1998 alapján szerk.: Szalontai L.)



47. ábra. A különféle hazai energiatervezési dokumentumok által előrejelzett villamosenergia-felhasználás a tényleges fogyasztás tükrében (szerk.: Csontos Cs.). A SCI '90 (Fleischer T. 1990) és SCI '11 (Munkácsy B. et al. 2011) arra hívják fel a figyelmet, hogy a szabályozási környezet megváltoztatásával megoldható volna az energiafelhasználás csökkentése

A 48. ábra alapján világosan látható, hogy az energiafogyasztás mértéke jól befolyásolható gazdasági szabályozással. A hazánkban 2013-ban bevezetett rezsicsökkentési politika megfordította a 2005 óta szinte folyamatosan csökkenő energiafogyasztási trendet. Ezt megelőzően a primerenergia-fogyasztás a 2005. évi 1166,1 PJ-ról 2013-ra 956,6 PJ-ra csökkent, ám az árcsökkentés a fogyasztók döntéseit látható módon a nagyobb fogyasztás irányba befolyásolta (2015-ben 1011 PJ), vagyis a rezsicsökkentés eredményeképpen visszaszorultak az energiahatékonysági beruházások, lelassultak a megújuló energiahordozókat érintő fejlesztések, végeredményben pedig nőtt hazánk szennyezőanyag-kibocsátása.



48. ábra. A 2012-ben megjelent Nemzeti Energiastratégia 2030 forgatókönyveiben szereplő előrejelzések és a fogyasztás valós alakulása (KSH 2016)

Hivatalos nemzeti energiastratégiánk a 2030-ig terjedő időszakban növekvő energiafogyasztással számol (1147 PJ teljes primerenergia-ellátás 2030-ra) – valamint az ezzel együtt járó növekvő karbonkibocsátással. A koncepció leginkább az áramigények növekedését feltételezi, az elképzelés szerint évente 1,5%-os mértékben. A probléma abban rejlik, hogy a környezeti rendszer az erőforrások, és a tűrőképesség vonatkozásában is korlátokat szab a növekedésnek. Az előrejelzésben szereplő növekedési elképzelés tehát nem veszi figyelembe a természeti-környezeti rendszer működési törvényszerűségeit, ami arra utal, hogy a gondos tervezés néhány elemi vonatkozása kimaradt a stratégiából. Például **semmiféle olyan mechanizmus, szabályozási elképzelés nem jelenik meg a dokumentumban, amely révén a legkisebb remény is lehetne a fogyasztás csökkentésére.**

A hazai tervezési dokumentumok közötti inkoherenciára hívja fel a figyelmet az a tény, hogy az előzőekben tárgyaltak teljesen ellentétesek a **Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia** által megfogalmazott kibocsátáscsökkentési célokkal.

Energiatervezés települési szinten

Települési szinten a gyakorlatban két irány látszik. A nagyobb települések esetében inkább bevett gyakorlat az energiarendszer felépítésének és működtetésének tényleges megtervezése - ugyanakkor az országos léptéktől eltérően mindezt nem a termelés, hanem a fogyasztás irányából megközelítve. A kisebb települések esetében – humán erőforrás hiányában – nem jellemző a tervezés, így fennáll az a veszély, hogy a fejlesztéseket nem az átgondolt koncepció, hanem azok a pályázati lehetőségek határozzák meg, amelyek nyilvánvalóan nem lehetnek tekintettel sem a helyi adottságokra és lehetőségekre, sem pedig az igényekre. Itt szinte minden esetben egyfajta sodródás jellemző.

Ugyanakkor még a nagyobb településeken is nehézséget okozhat a multidiszciplináris megközelítéshez szükséges relatív **nagyszámú szakembergárda** hiánya. Sőt, a probléma még súlyosabb, hiszen hazai példák sokasága arra is rávilágít, hogy az egyetemet végzett szakemberek részvétele sem feltétlenül garancia még a legegyszerűbb projektek sikeres megvalósítására sem (49. ábra).

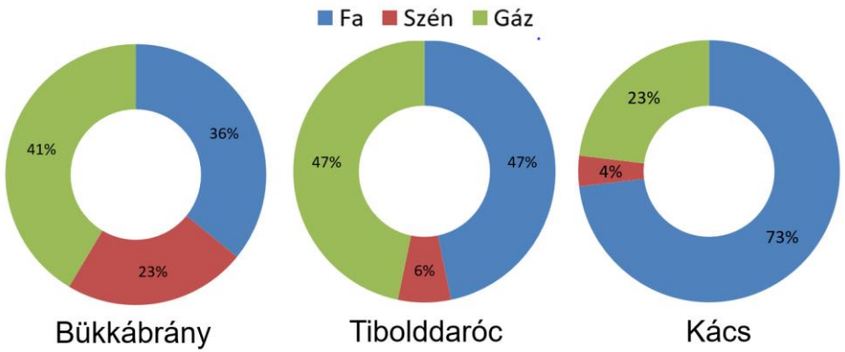
49. ábra. A déli oldalra már nem fért el, így az északira is jutott azokból a napelemekből, amelyek egy elektromos autók töltésére szolgáló állomás energiaellátását kellene fedezzék egy Bükkaljai kistelepülésünkön. Ez egy olyan alapvető méretezési hiba, ami egyszerű osztással-szorzással megelőzhető lett volna. (Fotó: Munkácsy B.)

50. ábra. Egy elektromos autó töltőállomás egy bükkaljai önkormányzat udvarán elzárva, így a berendezésről még a faluban élők sem tudnak (fotó: Munkácsy B.)

A települési szintű energiatervezés egyik kulcsa a **részvételi tervezés**, ami nyilvánvalóan csakis a **megfelelő mélységű szakmai megalapozás** után hozhat reális és elfogadható eredményeket. A felkészült moderátorok szerepe minden ilyen közösségi megalapozottságú projektben kiemelkedő fontosságú annak érdekében, hogy ne a leghangosabb vélemények határozzák meg a fejlesztés irányait, hanem a leginkább alkalmas, ténylegesen reális koncepció valósuljon meg.

Mindazonáltal a települési szintű energiatervezés némely tekintetben egyszerűbb, mint az országos szintű munka, mert **kisebb és kevésbé összetett a vizsgálandó rendszer**; más szempontból viszont mégis nehezebb a feladat, mert **nem állnak rendelkezésre a szükséges kiindulási adatok**, információk (amik legalábbis elvileg országos szinten könnyebben elérhetők, ám a tapasztalatok szerint számos esetben azért fenntartásokkal kezelendők). A gyakorlatban sokszor előfordul az a hiba, hogy az országos alapadatok felhasználásával készülnek települési szintű koncepciók és tervek. Ennek a veszélye abban rejlik, hogy egy-egy településen az országos átlagtól igen nagy eltérések is lehetnek, sőt látszólag hasonló, egymáshoz földrajzilag igen közel fekvő települések adottságai és lehetőségei is nagyban különbözhetnek a helyi adottságok függvényében. A helyi adatok felvételezése, a helyi

lehetőségek feltérképezése éppen ezért semmiképpen nem kerülhető el, még akkor sem, ha meglehetősen munkaerőigényes és igen alapos felkészülést igényel.



51. ábra. A fűtési energiafelhasználás forrásszerkezete földrajzilag egymás közvetlen szomszédságában található, ám eltérő tájhasználatú települések esetében

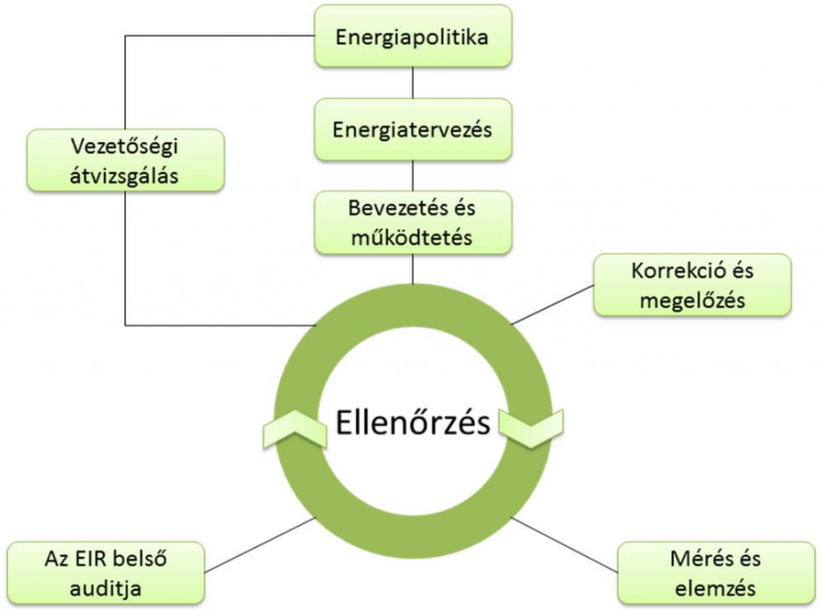
A települési szintű tervezéshez komoly módszertani segítséget nyújt az európai **Polgármesterek Szövetsége** (Covenant of Mayors), amely **Fenntartható Energia Akciótervek** (Sustainable Energy Action Plan, **SEAP**) vagy újabban **Fenntartható Energia- és Klímaakciótervek** (Sustainable Energy and Climate Action Plan, **SECAP**) készítésére igyekszik rávenni a települési önkormányzatokat. A program keretében megvalósított projektekkel a települések költségmegtakarítást érhetnek el, és sokmilliárdos hazai és európai pályázati források is megnyílhatnak előttük. A kezdeményezés célja, hogy a települések az energiahatékonyság és a megújuló energiaforrások használatának növelésével legalább 20%-kal mérsékeljék szén-dioxid-kibocsátásukat 2020-ig, 2030-ra pedig érjék el a 40%-os csökkentést. A csatlakozással a települések vállalják, hogy Akciótervben mutatják be a cél eléréséhez szükséges lépéseket. Arra is van lehetőség, hogy kisebb települések egymással összefogva közös tervek készítésébe fogjanak.

A települési szintű energiafejlesztési elképzelések lényege ugyanaz, mint az országos szint esetében. Első lépésben egy víziót alakítanak ki; második lépésben feltárják a pillanatnyi állapotot (pl. kibocsátási jegyzéket készítenek); harmadik lépésben meghatározzák a megvalósítandó intézkedéseket; negyedik lépésben megtörténik a kivitelezés; a folyamatsor utolsó lépéseként a monitorozás és szükség esetén a korrekció marad feladatként.

Bármiféle működőképes koncepció logikája az alábbi pontokban foglalható össze:

1) Első lépésben a helyi társadalmi csoportok közreműködésével egy **helyi szintű politikai döntés** szükséges, amelyben célul tűzik ki azt, hogy a település (vagy településrész) energiaszükségletét 15-20 éves távlatban teljes mértékben (de legalább nagyobbrészt – ennél szerényebb céloknak kevés értelme van) helyi megújuló energiákból fedezze;
2) Fel kell mérni a pillanatnyi állapotot és ez alapján a helyi civilek és szakértők minél intenzívebb bevonásával stratégiai szintű akciótervet (vagy terveket) szükséges készíteni (ebben reális célokat megfogalmazni). Ebben az energetikára a nagyobb környezetgazdálkodási rendszer részeként kell tekinteni, figyelembe véve az ebben rejlő kapcsolódási lehetőségeket. A „Polgármesterek Szövetsége" által favorizált tervezési folyamatban talán egy kicsit nagyobb hangsúly kerül a települései önkormányzat által felügyelt területekre (önkormányzati intézmények, autópark, közvilágítás), de ettől nyilvánvalóan el lehet térni;
3) A tervet a határidők és a költségkeret betartásával meg kell valósítani – közben időszakosan meg kell vizsgálni, hogy az elért eredmények az időtervvel mennyire vannak összhangban.

A települési szintű energiatervezés természetesen más módszertannal is megvalósítható. A települések egy része az **ISO 50001** nemzetközi szabvány követelményei szerint (52. ábra) igyekszik az energiatervezési, energiairányítási feladatokat megoldani. Ugyanakkor energetikai tervezéssel foglalkozó mérnökirodák a saját módszertanuk alapján, testre szabott megoldásokat kínálva ugyancsak a települések rendelkezésére állnak.



52. ábra. Az ISO 50001:2011 szabvány logikája

Szoftveres energiatervezés

Ma már világszerte számos szoftver létezik, melyeket különböző kutatóintézetek, szakmai műhelyek az energiarendszerek vizsgálatához fejlesztettek ki, mint segédeszközt, és amelyek a nyilvánosság számára is elérhetők. Mivel az egyes programokat különböző célokból hozták létre, nem létezik egy, minden igényt kielégítő szoftver, tehát a vizsgálat és a vizsgált energiarendszer jellegétől függ, hogy egy-egy feladatra melyik program a legalkalmasabb.

A megfelelő program kiválasztásában segíthet az egyes szoftverek csoportosítása legfontosabb jellemzőik szerint:

- célja: pl. szimuláció, forgatókönyv-készítés, technikai vagy gazdasági optimalizáció;
- földrajzi területe: projekt alapú, lokális, regionális, országos, nemzetközi, globális;
- az előretekintés időkerete: pl. egy év, néhány év, 25-50 év, limit nélkül;
- az elemzés időléptéke: pl. másodperc, perc, óra, nap, hónap, év;
- az elemzés speciális fókusza: pl. megújulók integrálása, vízenergia, villamosenergia-piac;
- vizsgált energiaszektorok: villamos energia, hő és közlekedés szektorai;
- képes-e 100% megújuló szimulációra: csak villamosenergia-rendszert és/vagy teljes energiarendszert, vagy egyiket sem vizsgálja ebből a szempontból;
- elérhetőség: ingyen hozzáférhető, kereskedelmi forgalomban van, csak belső használatra készült, projekt alapú költségtérítéssel használható;
- elterjedtsége: letöltések/vásárlások száma (CONNOLLY, D. et al. 2009 nyomán).

Az „Erre van előre” energiaforgatókönyv

Az ELTE Környezet- és Tájföldrajzi Tanszéke és a Környezeti Tervezési és Nevelési Hálózat együttműködésével 2010-ben indult egy oktatási-kutatási projekt, amelynek célja az volt, hogy kiderüljön, vagyon elvileg lehetséges-e Magyarországon egy 100%-ban megújuló energiaforrásokra támaszkodó rendszer létrehozása. Az első lépésben 23 fős (3 egyetemről), a második lépésben 17 fős (4 egyetemről), részben egyetemi oktatókból, kutatókból, gyakorlati szakemberekből és egyetemi hallgatókból álló szerzőgárda az **International Network for Sustainable Energy** (INFORSE) európai szervezetétől kapott módszertani segítséget.

A szerzők az alábbi szakterületeket képviselték:

- Geográfus (regionális elemző, terület- és településfejlesztő, környezetkutató)
- Környezetmenedzser;
- Környezetfizikus;
- Gépészmérnök;
- Villamosmérnök;
- Agrármérnök;
- Építészmérnök;
- Megújuló energia szakértő;

- Közgazdász;
- Pszichológus.

A munka eredményeként egyfajta „best case scenario”-t, vagyis egy olyan forgatókönyvet állítottak össze, amely – leginkább a szabályozási környezet szempontjából – optimális körülményeket feltételez, és olyan utat vázol fel, amely elemzések szerint elvezethet egy fenntartható, hosszú távon is működőképes energiarendszer kialakításához.

A szerzők szerint az energiagazdálkodás nem pusztán műszaki és gazdasági probléma, amit majd a mérnökök – esetleg közgazdászok bevonásával – megoldanak helyettünk. A feladatok bonyolultsága messze túlmutat a műszaki megoldásokon, szükségessé teszi a holisztikus megközelítést. Mivel az energiaszolgáltatásokat emberek veszik igénybe, ezért valódi megoldások nem születhetnek a társadalomtudományok értő művelőinek bevonása nélkül. Mivel az anyag- és energiaáramlás folyamatai egy adott földrajzi térben történnek, így széleskörű társadalom- és természetföldrajzi ismeretekkel rendelkező, a térbeliség problematikájával foglalkozó geográfusok mellőzésével a felmerülő kérdésekre ugyancsak nem lehet helyes választ adni.

A fenti komplex megközelítésű vizsgálat és a hozzá szervesen kapcsolódó számítógépes elemzés azt támasztják alá, hogy – egy optimális forgatókönyvet feltételezve – hazánk egész energiagazdálkodása 2040-ig fenntartható pályára volna állítható (Munkácsy B. et al. 2011).

A forgatókönyvben ~30%-ra(!) történő csökkenés lehetősége látszik 2050-ig az összes nettó energiaellátás adataiban, vagyis ezt a 2000. évi 1089 PJ-ról 2050-re 296,9 PJ-ra lehetne leszorítani. Lényeges, hogy ez nem megszorításokkal, hanem jórészt hatékonysági és társadalomszervezési megoldásokkal érhető el.

A térinformatikai kutatás eredményeként leszögezhető, hogy a korábbi vélekedésekkel ellentétben, a megújuló energiaforrások igenis rendelkezésünkre állnak abban a mennyiségben, amire reálisan szüksége lehet egy fejlett technológiát észszerűen alkalmazó társadalomnak. A forgatókönyvben a megújuló energiaforrások legnagyobb mértékű felhasználására 2040-ben kerül sor, ekkor kissé meghaladja a 480 PJ-t (az elsődleges termelésben, míg az összes nettó energiaellátásban 412 PJ) – a modell szerint ekkorra volna lehetséges a fosszilis és atomenergia teljes kiváltása hazánkban. Ezt követően a hatékonyság további folyamatos javításának és a takarékosságnak az eredményeképpen az energiafelhasználás mértéke tovább csökkenhet.

A forgatókönyvben a **villamosenergia-felhasználás jelentősége megnő, ugyanakkor volumene lényegében nem változik**. A felhasznált villamos energia mennyisége – annak ellenére, hogy szerepe sokkal szerteágazóbb lesz, mint napjainkban – 2010-ben és 2040-ben egyaránt 117 PJ körüli mennyiségnek adódik, majd 2050-re 102,5 PJ-ra csökken. A jövőbeli villamosenergia-rendszer azonban jelentősen különbözhet majd a maitól. A forgatókönyvben ugyan egységes országos villamosenergia-rendszerrel számoltak, de a szerzők szerint **a távoli jövőben nem lesz szükség a napjainkban domináló energiaszolgáltató óriáscégekre**. A helyi megújuló energiaforrásokon alapuló, decentralizált rendszer alapegységei (háztartások, települések, ipari létesítmények) jórészt önmagukat lesznek képesek ellátni villamos energiával, a hálózat pedig inkább csak a fölösleggel való kereskedelemre szolgál majd. Ez az átalakulás azonban – csakúgy, mint a fosszilis energiaforrásokról való átállás – főleg gazdasági és politikai szempontból lesz majd komoly kihívás, hiszen a napjainkban még nagy gazdasági hatalommal bíró energetikai óriásvállalatok a végletekig fognak ragaszkodni az általuk preferált, elavult technológiákhoz.

Háztartási szintű energiarendszer

Leszögezhetjük, hogy számos hasonlóság mutatkozik akár az országos, akár a települési, de még a háztartások szintjén működő energiarendszerek terén is. Bizonyos területenkénti vagy épületenkénti, illetve finanszírozási korlátokat figyelembe véve ma már egy háztartásban is dönthetünk arról, hogy:

- milyen energiamixet választunk – így például milyen mértékben próbálunk például megújuló energiaforrásokat igénybe venni;
- milyen mértékben kívánunk az országos (pl. földgáz) vagy települési (pl. távhő) hálózatra támaszkodni – illetve milyen energiatárolási megoldásokat (pl. használati meleg víz tárolására szolgáló bojlert, tömegkályhát) alkalmazunk;
- milyen hatékonysági lépéseket igyekszünk megvalósítani;

- milyen mértékben élünk a mértékletesség, a takarékos energiafelhasználás lehetőségeivel.

A fentiek szerint tehát sok szempontból igenis lehetőségünk van felelős energiafelhasználásra törekedni. Nyilván nem minden esetben egyformák a lehetőségek, így például egy lakótelepi lakás esetében ezek bizonyosan szerényebbek, mint egy családi ház vonatkozásában, de ez semmiképpen nem jelenti azt, hogy egy panelben élő hátradőlhetne, és ne volna teendője. Sőt, talán még nagyobb hatással is lehet a rendszer működésére, hiszen lakótársait befolyásolva lényegesen nagyobb eredményeket érhet el, mint egyedül. De akár arra is van lehetőség, hogy a korlátokat felismerve olyan lakhatási megoldást keressen, ahol több lehetőség kínálkozik a saját energetikai elképzelései megvalósítására.

Abban a tekintetben sem egyformák a lehetőségek, hogy a hőenergia, a villamos áram vagy a közlekedés területét vesszük példának: a lehetőségek a felsorolásnak megfelelő sorrendben egyre szerényebbek, de **ma már akár teljes körűen megvalósítható a 100%-os megújuló energia részarány**. Ennek alapvetően kétféle módja van: szigetüzemű vagy villamos hálózatra csatlakozó megoldás. Egyes hazai szakértők egyenesen kárhoztatják azokat, akik ez utóbbi megoldást választják, mondván, hogy „*visszaélnek az energiarendszerre való rákapcsolódás lehetőségével és így a többi energiafogyasztón élősködnek*" (hiszen energiatárolási kapacitást spórolnak meg háztartási szinten).

Ezzel az érveléssel talán a félrevezetés és bűntudatkeltés lehet a célja az ellenérdekelt**,** nagy energiatermelőket, tőkés társaságokat kiszolgáló szakembereknek? Hiszen a 21. századi energiarendszer működési logikáját ismerve **még egy ország szintjén sem törekszünk teljes önellátásra, sőt az országok közötti együttműködés szerepe egyre hangsúlyosabbá válik** – és ezt senki nem tekinti elítélendőnek, sőt, az **európai Energia Unióban** való tevékeny szerepvállalás kifejezetten előremutató cél és nemes feladat. A 21. században az energiarendszerre való kapcsolódás, az azzal való kommunikáció, energiacsere éppen úgy logikus és helyénvaló lépés a háztartások szintjén, mint a települések vagy országok esetében! A 21. században a cél az együttműködés, a szinergiák kínálta lehetőségek minél teljesebb kihasználása annak érdekében, hogy **a lehető legkisebb környezeti terheléssel és a lehető legolcsóbban működtethető energiarendszert** hozzuk létre.

Felhasznált és ajánlott irodalom:

Aden, N. (2016): The Roads to Decoupling: 21 Countries Are Reducing Carbon Emissions While Growing GDP. World Resource Institute. http://www.wri.org/blog/2016/04/roads-decoupling-21-countries-are-reducing-carbon-emissions-while-growing-gdp

Connolly, D. – Lund, H. – Mathiesen, B. V. – Leahy, M. (2009). A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. Applied Energy, 87(4), 1059-1082. doi: 10.1016/j.apenergy.2009.09.026

EC (2015): COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT IMPACT ASSESSMENT Accompanying the document Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council setting a framework for energy efficiency labelling and repealing Directive 2010/30/EU. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=SWD:2015:0139:FIN

Fleischer, T. 1990. Energia igényességi pályák: nemzetközi összehasonlítás. Energiagazdálkodás, 31(6), 233-239.

KSH (2016): Összevont primer energiahordozó-mérleg, Nemzetgazdaság összesen. http://statinfo.ksh.hu/

Lund, H. (2006): Large-scale integration of optimal combinations of PV, wind and wave power into the electricity supply. In: Renewable Energy, Volume 31, Issue 4, April pp. 503-515. https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.04.008

Munkácsy B. et al. (2011). Erre van előre! Egy fenntartható energiarendszer keretei Magyarországon – Vision 2040 Hungary 1.0. Szigetszentmiklós: Környezeti Nevelési Hálózat Országos Egyesület.

Munkácsy, B. (2014). A fenntartható energiagazdálkodás felé vezető út: Erre van előre! – Vision 2040 Hungary 2.0. Budapest: ELTE TTK, Környezet- és Tájföldrajzi Tanszék, Környezeti Nevelési Hálózat Országos Egyesület.

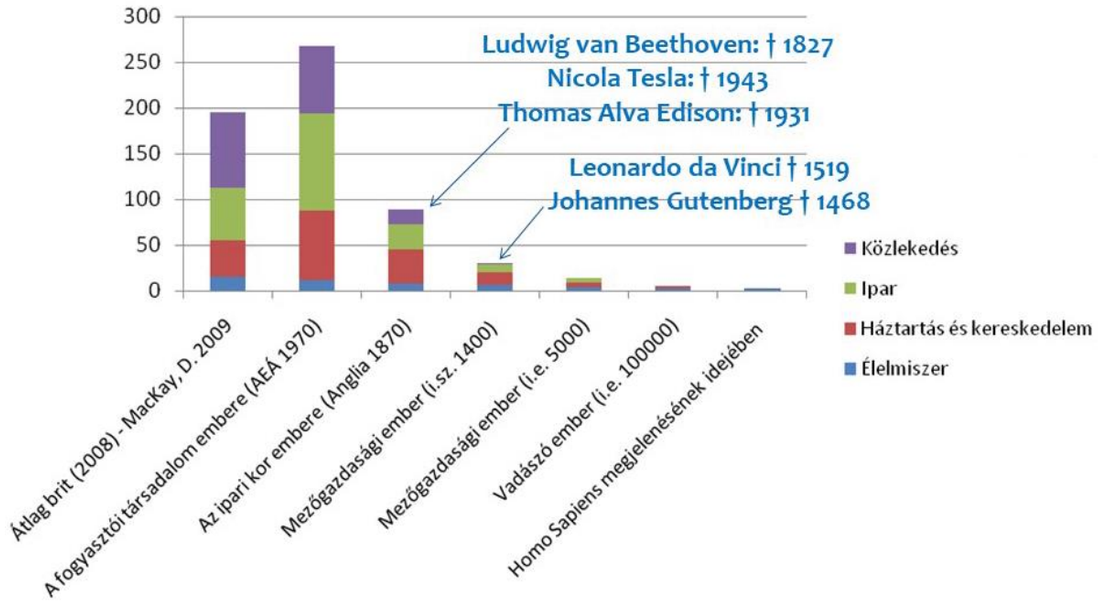
Nørgård, J. (1998): Sustainable Energy Future - Nordic Perspective; Keynote at workshop "Sustainable and Peaceful Energy Future in Asia", 28. - 30. September 1998, Seoul (kézirat)

Sørensen, B. (1975): A plan is outlined according to which solar and wind energy would supply Denmark's needs by the year 2050. Science. 189 (4199): 255–260. doi:10.1126/science.189.4199.255

Az emberi tényező az energiagazdálkodásban: energiatudatosság és energiatakarékosság

Ennek a témakörben a felvezetésében szükség áttekinteni néhány lényeges szempontot, így például az **energiaszegénység** problematikáját vagy a **fejlettség** fogalmát. Napjainkban a világ népességének negyede él villamos áram nélkül, igen alacsony általános energiafelhasználással, amit újabban szokás energiaszegénységként is értelmezni. Ugyanakkor látnunk kell, hogy elektromosság nélkül is lehet teljes értékű életet élni, sok embertársunknak, különösen a természeti népeknek, nincs is szüksége efféle szolgáltatásra. És vajon kétségbe vonható-e a „fejlettsége" azon elődeinknek – sikeres művészeknek, tudósoknak –, akik eredményeiket a villamosítás kora előtt érték el. Ugyanez a megközelítés a térben vizsgálva is érvényes. A hideg éghajlatú területeken élők érthető okokból lényegesen több energiát fogyasztanak, mint a melegebb vidékek lakói, de ez valóban azt jelenti, hogy „fejlettebbek" is? Az Olaszországban élők 32 MWh/fő éves energiafogyasztással csak fele annyira volnának fejlettek, mint Oroszország lakói a 60 MWh/fő fogyasztással?

Leszögezhetjük tehát, hogy az igénybe vett energiaszolgáltatások mennyisége, mint indikátor, semmiképpen nem írja le sem a társadalom, sem az egyének fejlettségét! Annak tükrében pedig még inkább elgondolkodtató egy efféle feltevés, hogy **az egyre nagyobb energiafogyasztás és az ezzel együtt járó növekvő környezetterhelés, vagyis végeredményben a környezeti összeomlás felé való határozottan gyorsuló menetelésünk még véletlenül sem tekinthető fejlődésnek, tehát pozitív irányú minőségi változásnak!**



53. ábra. A Homo sapiens energiafogyasztásának változása a történelem folyamán (1000 Kcal/fő/nap)

Ugyanígy lényeges további alapfogalmak tisztázása, hiszen tapasztalataink szerint sok energetikai szakértő számára sem teljesen világos, hogy **mi a különbség a takarékosság és a hatékonyság javítása között**. Ennek megvilágításához Sólyom László köztársasági elnök úrnak azt a beszédét hívjuk segítségül, amely az Energia – Másképp konferencia keretében hangzott el 2009 áprilisában a Magyar Tudományos Akadémián: „*Számos, önmagában igaz kijelentést tehetünk az energiatermelés és -felhasználás jövőjéről, de ezeket mindig be kell ágyazni a természeti, gazdasági és emberi tényezők, feltételek, lehetőségek és érdekek összefüggéseibe, ahol tehát kompromisszumokra és kiegyezésekre kényszerülünk. A komplexitás mellett azt is figyelembe kell venni, hogy annak a bizonyosan helyes kiinduló tételnek, hogy ti. a felhasznált energia mennyiségét csökkentenünk kell, a szintén nyilvánvaló megoldásai módjai:* ***az energiahatékonyság és a takarékosság, minőségileg különböznek****.*

Az energiahatékonyság növelése ugyanis nem igényli az eddigi értékrend és alapvető meggyőződések megváltoztatását – nem igényli az alapvető „zöld” szemléletváltást. A hatékony technológia a növekvésorientált gazdaságnak is érdeke, éppígy az alacsony energiafogyasztás túlsúlya. Az energiahatékonyság természetesen alapvető a mi zöld gondolkodásmódunkban is. De akkor az ilyen technológiák használatát nemcsak a termelésben kell pl. az államnak ösztönöznie, hanem ugyanannyira a fogyasztásban is. ***Ma jellemzően a hatékony termelés és a pazarló fogyasztás áll párban***” (kiemelések M.B.).

A fenti idézetben érzékletessé válik a két megoldás közötti különbség. A szövegrészlet arra is felhívja a figyelmet, hogy önmagában a hatékonyság növelésével nem fogunk eljutni a kívánt eredményhez (lásd később: Jevons paradoxon), vagyis az erre irányuló intézkedések csak abban az esetben érik el céljukat, ha mindeközben az emberi tényező kapcsán is sikerül szemléletváltást elérni. Például hiába állnak rendelkezésünkre az energiahatékony technológiák (mint például a megtévesztő elnevezésű „energiatakarékos” világítótestek – amik helyes megnevezése ezek szerint inkább „energiahatékony”) ha az emberek nem vásárolják vagy rosszul használják ezeket.

54. ábra. Teljes zűrzavar az internetről származó üzenetben. A kompakt fénycső ugyanis nem izzó és nem is takarékos – a fénycső inkább hatékony (bár ez is relatív, hiszen elérhetők ennél hatékonyabb világítótestek is). Takarékos pedig a felhasználó lehet.

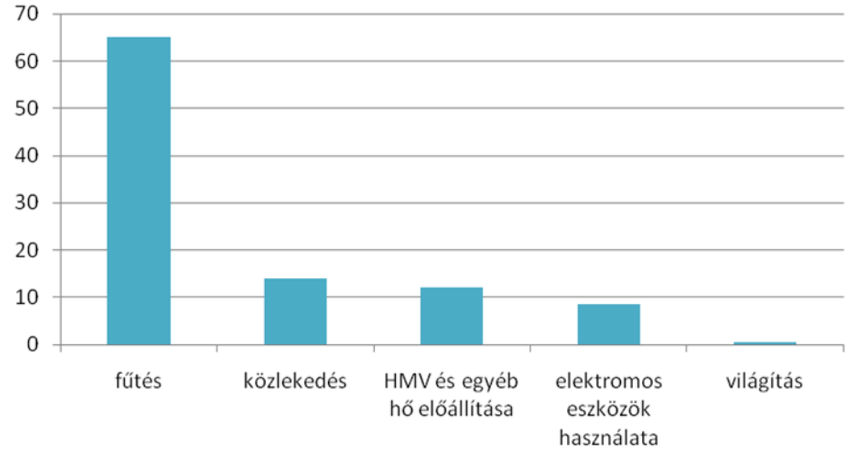
Szükségesek tehát az **alapvető ismeretek**, amelyek alapján a fogyasztó felelősen tud döntéseket hozni. De ha megvásárolja és használja is a család az efféle berendezéseket, még akkor sem feltétlenül beszélhetünk energiatakarékosságról. Sajnos jellemző, hogy a kisebb fogyasztásra való hivatkozással a lámpát feleslegesen bekapcsolva hagyják, de az is, hogy nem megfelelő lámpatestbe helyezik be, így a fénynek csak kis része hasznosul: gondoljunk például azokra a lámpabúrákra, amelyek üvegburkolata szinte átlátszatlan, így a szükségeshez képest kétszeres-háromszoros teljesítményű lámpát kell ezekben alkalmazni. A fogyasztó mellett tehát felmerül a gyártók és tervezők felelőssége is.

55. ábra. A lámpabúra is erősen befolyásolja a szükséges fényteljesítményt és így a villamosenergia-fogyasztást

Ugyanez természetesen nagyobb léptékben is igaz. Számtalan esetben terveznek és engedélyeznek olyan épületeket, amelyek a kor divatirányzatainak megfelelnek ugyan, de évtizedeken keresztül energiafaló létesítményként okoznak súlyos anyagi terhet az üzembentartó családoknak, intézményeknek – a környezeti terhelésről már nem is beszélve.

Az emberi tényező láthatóan olyan sarokköve az energiagazdálkodásnak, amit óriási hiba volna figyelmen kívül hagyni. A háztartások példáján keresztül azt is célszerű bemutatni, hogy a beavatkozási pontok, hangsúlyok meghatározása is kulcsfontosságú az eredményesség szempontjából. A 57. ábra alapján nyilvánvaló, hogy a legtöbb teendőnk az épületeink fűtése kapcsán van, ezért az alábbiakban ebből a nézőpontból világítunk rá az energiatakarékosságban rejlő lehetőségekre.

56. ábra. A tervezők által megálmodott tetőablakok miatt tavasztól őszig a könyvtárhelyiség túlmelegszik, ezért az intenzív (és energiafaló) légkondicionálás ellenére a dolgozók napernyők alatt kénytelenek dolgozni az ELTE Lágymányosi Kampuszán



57. ábra. A magyar háztartások energiafogyasztásának arányai a felhasználás egyes területein (az elfogyasztott energia %-ában)

Általános értékrend

Ahogyan a 26. ábra is utal rá, a felhasznált energia mennyisége szoros összefüggésben van az életmódunkkal és az igényeinkkel. A fűtés esetében ez sok ponton tetten érhető. Meghatározó például **lakások mérete**, hiszen nyilvánvaló, hogy az egyre növekvő lakásméretek nagyobb hőteljesítményű fűtőberendezéseket igényelnek. Fontos **az épület külső-belső struktúrája**, így például az épület és az egyes helyiségek tájolása (lásd a passzív napenergia hasznosítással foglalkozó fejezetet). Ugyancsak lényeges a **belső hőkomfort** szintjének meghatározása, aminek számítása meglehetősen bonyolult – és amit a munkahelyek esetében egyre inkább nemzetközi szabványok határoznak meg (ISO 7730). A **hőérzetet** számos tényező befolyásolja (így például a páratartalom, a légsebesség, a fizikai aktivitás mértéke és a ruházat), amire figyelemmel csökkenthető a felhasznált tüzelőanyagok mennyisége (lásd később: Cool Biz).

A lakóépületek esetében kevésbé szigorú a szabályozás, így akár kísérletezhetünk is, mindaddig, amíg a családi elvárások keretei között maradunk. A Cambridge Egyetem egyik neves fizika professzora például egyszerű eszközökkel 50-ről 13 kWh/nap-ra szorította vissza lakásának téli fűtési energiafelhasználását (MacKay, D. 2009). A változtatások egy része az épület hőszigetelését érintette (homlokzat és nyílászárók), tehát az energiahatékonyság javítását célozta, ugyanakkor néhány további, immár a takarékosság tárgykörébe tartozó lépés is történt. Az egyik a helyiségek téli mikroklímáját érintette: a professzor a szobák átlaghőmérsékletét 17 °C-ra szorította vissza. Ez első hallásra drasztikus lépésnek tűnik, ám minden csak viszonyítás kérdése. Összevetésképpen, a statisztikai adatok szerint, a brit háztartások helyiségeinek téli átlaghőmérséklete 1970-ben mindössze 13 °C volt (MacKay, D. 2009). De Móra Ferenc közismert története segítségével könnyen képet alkothatunk a 19-20. század fordulójának magyarországi viszonyairól is: *„Akárhogy fűtöttük a búbost, a malomszoba ablaka egész télen át ki nem engedett. S az a befagyott ablak volt az én palatáblám, édesanyám gyűszűs ujja rajta a palavessző.”* Természetesen nem az a cél, hogy újra ilyen körülmények között éljünk, ám az, hogy tudjuk, hogy hol tartottunk alig 100 esztendővel ezelőtt, az mai igényeink újragondolása során viszonyítási ponttal azért szolgálhat.

Nagyobb odafigyelés

A cambridge-i professzor által alkalmazott másik végtelenül egyszerű lépés az energiafogyasztás figyelemmel kísérése, így a mérőórák gyakoribb leolvasása, az adatok rendszeres rögzítése, esetleg egyszerű elemzése. A kutatók egybevágó tapasztalata, hogy az évenkénti leolvasásról a havonkénti leolvasásra és elszámolásra való áttérés már önmagában meglepően nagy, akár 10-20% körüli fogyasztáscsökkentést eredményezhet, hiszen az energiafogyasztásunk mértékével való szembesülésre sokkal gyakrabban kerül sor. Természetesen a heti vagy napi leolvasás, esetleg kifejezetten ezt a célt szolgáló fogyasztásmérő berendezések használata, további támpontokat jelent a takarékosság felé vezető úton. E célt szolgálja a gépjárművek fedélzeti számítógépe által kínált lehetőség is, amely mutatja a jármű fogyasztását (58. ábra).

58. ábra. A hibrid üzemű Toyota Prius műszerfalán a főképernyőn kérhet tájékoztatást a gépjárművezető az elmúlt fél óra fogyasztási adatairól, 5 perces bontásban (Fotó: Munkácsy B.)

Persze az energiával való takarékoskodás lehetőségei ennél jóval szélesebb körűek, lényegében életünk szinte minden mozzanatára kiterjednek. Csak egy kis odafigyelést igényel például a hűtőszekrény jégmentesítése, az égve felejtett lámpák lekapcsolása, vagy a konnektorban hagyott telefontöltők áramtalanítása, illetve a készenléti üzemmód (standby) alkalmazása helyett a készülékek teljes kikapcsolása.

Az odafigyelés más szempontból is lényeges, ahogyan erre William Stanley Jevons már 1865-ben felhívta a figyelmet, amikor „A szénkérdés” című könyvében leírta az ökológiai közgazdaságtan egyik legismertebb felismerését, amelyet azóta **Jevons-paradoxon**ként ismerünk. Azt figyelte meg, hogy miközben az ipari szénfelhasználás egyre hatékonyabbá vált – ezáltal egységnyi szénből több termék előállítása vált lehetővé –, nem csökkent annak felhasználása, mint az várható lett volna, hanem jelentősen növekedett. Ennek a jelenségnek több oka van, de ezek közül leglényegesebb, hogy a hatékonyabb szénfelhasználás az egységnyi termékre jutó szén költségét csökkentette, ami végeredményben árcsökkenést eredményezett. A jelenség számos területen napjainkban is megfigyelhető, így például hiába javult az elmúlt évtizedek során a belsőégésű motorok hatásfoka, ha eközben a járművek mérete, össztömege és a megtett kilométerek száma is intenzív növekedést mutat és végeredményben nagyobb üzemanyagfogyasztást eredményez.

59. ábra. Az újabb modell éppen dupla tömegű

A Jevons-paradoxon szoros összefüggésben van az ún. **bumeráng hatással (rebound effect)**, vagyis azzal a jelenséggel, amikor a hatékonyság növelése révén elért megtakarítás áttételesen olyan többlet energiafogyasztást és környezetterhelést gerjeszt, ami esetleg meg is haladja az eredeti megtakarításokat. Például: ha az épület-hőszigetelés révén megtakarított pénzből tengerentúli utazásra költünk, ezáltal olyan mértékű közlekedési eredetű légszennyezéshez járulunk hozzá, ami nagyobb, mint a hőszigetelés révén elért emissziócsökkenés. Lényegesen kedvezőbb a helyzet, ha a megspórolt összeget további energiahatékonysági beruházásokba fektetjük vagy egyszerűen csak több időt szánunk emberi kapcsolatainkra, családunkra vagy a kikapcsolódásra: *„Szigetelje lakását és pihenjen egy-két héttel tovább”* (Nørgaard, J. S., 1998).

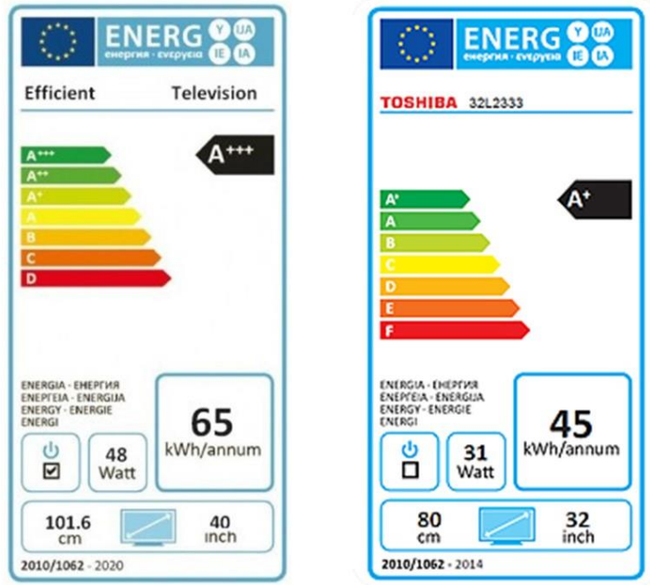
Naprakész ismeretek

A fogyasztói döntések befolyásolása alapvetően két módon lehetséges: a) **belső kényszer** kialakításával; b) **külső kényszer** (főként jogi és gazdasági szabályozás) alkalmazásával. A **belső kényszer** tekintetében meghatározó az **oktatás-nevelés** feladata, de a jövőben sokkal nagyobb szerepet kell szánni az egyéb **véleményformáló technikáknak, médiumoknak** is. Ez utóbbiak a nap 24 órájában alakítják világról alkotott képünket, jelenleg, a fogyasztásra való felhívásokkal, éppen a káros irányba. Ma szinte elvárás, hogy az ember minél nagyobb autóval közlekedjen, a tengerentúlra járjon nyaralni és telelni, hatalmas televízióval, hűtőszekrénnyel szerelje fel háztartását. Az átlagemberek kényszeresen igyekeznek ezeknek az elvárásoknak megfelelni – miközben fel sem fogják, hogy ez az út a környezeti válságok felé vezet, hiszen mindez **egyre több energiahordozó** felhasználásával és ezzel együtt egyre nagyobb környezetterheléssel jár. Aggasztó, hogy mindez **a jelenleg domináns fogyasztói társadalomnak egyenesen lételeme, hajtóereje**. A folyamat hátterében a profitorientált cégek érdekei állnak: ezek vásárolnak műsoridőt, a műsorhoz a saját érdekeiket képviselő szakértőt, sőt egyre gyakrabban akár magát a médiumot (televíziós csatornát, újságot, internetes híroldalt) is, így igyekezvén formálni gondolkodásmódunkat, világképünket. A növekedésorientált fogyasztói társadalomban kevés esély van ennek megváltoztatására – de ugyanígy kevés esély van a nyilvánvaló következmények elkerülésére is.

Ugyanakkor ez a probléma akár lehetőségként is értelmezhető. Egy jól működő rendszerben az oktatás és a média, valamint a kommunikáció egyéb szereplőinek összehangolt tevékenysége által olyan mértékű szemléletváltás érhető el, amely egyfajta belső kényszert

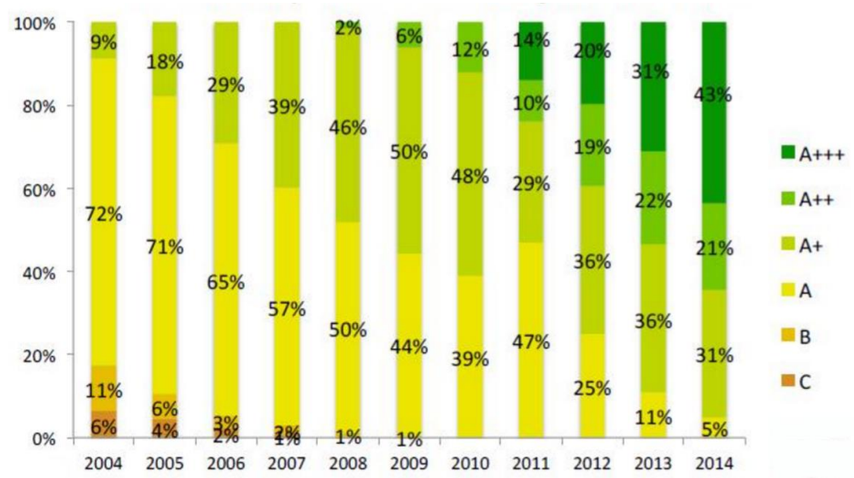
alakít ki, és ami végeredményben viselkedési mintázatunk megváltozását, így jelenlegi fogyasztásunk mértékének megváltozását eredményezi. Mivel nem rendelkezhet minden fogyasztó kellő mélységű és frissességű ismeretekkel a műszaki területen, ezért a fogyasztói döntéseknél igen hasznos támogatást jelent az Európai Uniónak az **energiahatékonyság növelését célzó szabályozási** tevékenysége (ecodesign legistlation) és ehhez kapcsolódóan azon törekvése, hogy kereskedelmi korlátozást vezessen be a rossz hatékonyságú eszközökre (például az izzólámpák, vagy nagy teljesítményű porszívók betiltása), illetve, hogy az elektromos berendezéseket a **címkézés** segítségével összehasonlíthatóvá tegye. Ez esetben kicsit nehézkes elválasztani egymástól a műszaki és az emberi tényezőt, de vélhetően világos, hogy maga a műszaki eszközök a különféle szintű hatékonyságot, mint műszaki paramétert jeleníti meg, a vásárlói döntés pedig az emberi tényező, amelyben szerepet játszanak rövid és hosszú távú szempontok. **A címkézés révén ez esetben a rövid távú szempont (fogyasztói ár) mellett a hosszú távú szempontot (éves energiafogyasztás és annak költsége) igyekszik a jogszabályalkotó a vásárló figyelmébe ajánlani.**

Az elektronikai cikkek gyártóinak és kereskedőinek egy egységesített rendszer segítségével kell közölnie azokat az adatokat, amelyek készülékeik energiafelhasználására vonatkoznak. A folyamatosan változó és szigorodó elvárások jelenleg terméktípusonként minden esetben 7 hatékonysági kategóriát különböztetnek meg – sajnos egyes gyártók nyomására a betűjelzéseket illetően termékcsoportonként eltérések alakultak ki. Így jelenleg **kevésbé lényeges, hogy a termékek milyen betűkóddal vannak jelölve**, és annak kiderítése sem egyszerű, hogy egy adott termékcsoportok (mondjuk a hűtőszekrények) esetében mely betűjelzések vannak érvényben. Tehát c**sak a betűkódokat figyelve** (pl. A+), de a címkén megadott – standardizált fogyasztási mintázattal kalkulált – **éves fogyasztási adatokat figyelmen kívül hagyva, könnyen téves következtetésekre juthatunk**, rossz vásárlási döntéseket hozhatunk. A vásárlási döntésnél ezért **a címkéken feltüntetett kWh-ban megadott várható éves villamosenergia-fogyasztás lehet az egyik legfontosabb mérlegelendő szempont.** A közismert betűjelzés (pl. A+) azért is megtévesztő lehet, mert sok termék esetében méretkategóriánként változó az értékelési rendszer. A nagyobb televízióra, hűtőszekrényre tehát más fogyasztási kategóriák és betűkódok vonatkoznak, mint a kisebbekre, így akár az is előfordulhat, hogy nagyobb éves áramfogyasztás mellett egy nagyobb készülék jobb betűjelzést kap, mint a kisebb méretű és kisebb fogyasztású (Waechter, S et al. 2015).

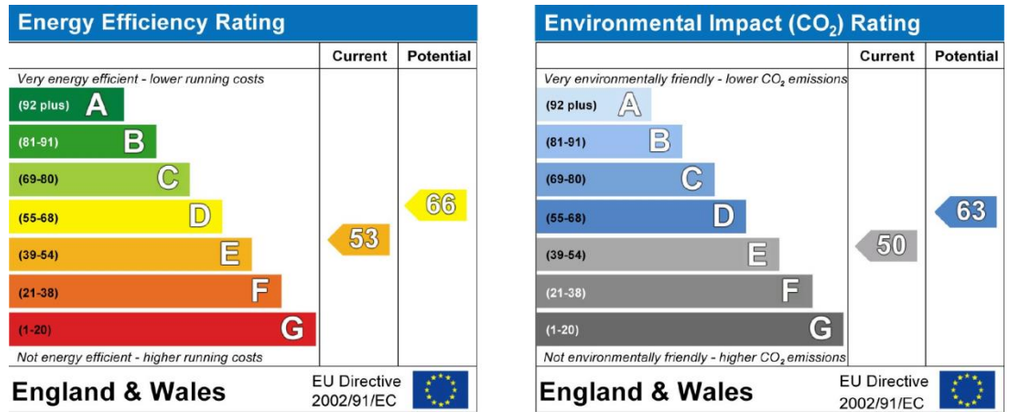


60. ábra. A betűjelzés megtévesztő lehet

Ezen zűrzavaros állapot ellenére igen látványos az átrendeződés a fogyasztásban, a hatékony berendezések látható versenyelőnybe kerültek. Például a mosógépek vonatkozásában az elmúlt 10 évben az B-C kategóriás eszközök teljesen kikoptak a forgalomból, és ma a legtöbb eladás az A+++ energiahatékonyságú berendezéseknél mutatkozik (61. ábra).



61. ábra. Az EU energiahatékonysággal kapcsolatos tájékoztatási programjának (lásd címkézés) eredménye a mosógépek piacán 2004-2014 között (EC 2015)



62. ábra. Ilyen energiahatékonysági címkét 2012-től hazánkban is kötelezően kell(ene) alkalmazni a lakások vásárlásánál, bérbe adásánál – emberi tényezőként értelmezhető, hogy nálunk a szabályozás lazaságai miatt, nem működik az eredeti elképzelésnek megfelelően a rendszer (http://www.jetsongreen.com/)

Az elektronikai eszközök kapcsán elért sikerek okán hasonló rendszert számos más területre, így a gépjárművekre, gumiabroncsokra és az épületekre is kidolgoztak (62. ábra), ám ezek közül nem mindegyikre igaz, hogy hazai bevezetése és alkalmazása mindenben megfelel az európai uniós elvárásoknak.

Külső kényszert, vagyis a jogi és gazdasági szabályozás eszközrendszerét alkalmazva igen komoly eredményeket érhetünk/érhetnénk el. Így például nyilvánvaló lehetőség rejlik az adó- és járulékrendszer átalakításában. Látnunk kell, hogy a jelenleg dominánsan alkalmazott energiaforrások – és általában a természeti erőforrások – árának csökkentése a fogyasztás növekedését eredményezi (lásd Jevons-paradoxon), és egyszerre akadályozza mind a megújuló energiaforrásokra való áttérést, mind az energiahatékony megoldások térnyerését (lásd rezsicsökkentés). Lényegesen szerencsésebb, és hosszú távon a társadalom egésze szempontjából gyümölcsöző megoldás volna az úgynevezett **ökoadórendszer** megteremtése. Ez – sok egyéb mellett – alapvetően kétféle változást jelentene: a) a korlátozottan rendelkezésre álló, környezetszennyező módon feldolgozható természeti erőforrások, illetve az ezekkel előállított energiaszolgáltatások **árának magasan tartását**; b) a környezetkímélő, energiahatékony technológiák adótartalmának és a munkára kivetett különféle járulékok mértékének **jelentős csökkentését**, és ezáltal a fogyasztás környezetközpontúvá tételét.

De a külső kényszer témakörébe tartozik például a japán kormány által 2005-ben bevezetett **öltözködési és viselkedési szabály** (Cool Biz), amely állami hivatalokban a nyári időszakban kifejezetten tiltja a zakó, mellény vagy nyakkendő használatát, és általában könnyű viseletet ír elő az alkalmazottak számára – ugyanakkor megtiltja a légkondicionáló berendezések 28 °C-nál alacsonyabb értékre állítását. A program meglepően eredményes, hiszen ezzel az egyszerű módszerrel mintegy évi 1,5 millió tonna szén-dioxid kibocsátását sikerült megakadályozni a szigetországban (ez az ország éves karbon-kibocsátásának kb. 0,1%-a). 2011-ben a fukushimai atomerőmű-baleset következményeként a szigetországban leállították az össze atomerőművet, így ebben a programban is további szigorításokat vezettek be (Super Cool Biz), így például javasolták a minél korábbi munkakezdést, valamint a hatékony árnyékolók alkalmazását. A sikereknek köszönhetően 2015 telén elindult a Warm Biz program is, amely a fűtési szezonban maximum 20 °C beltéri hőmérsékletet ír elő, ezzel párhuzamosan elvárásként fogalmazza meg a meleg ruha viselését és meleg ételek, italok fogyasztását az állami hivatalokban.

63. ábra. Junichiro Koizumi miniszterelnök is a Cool Biz elvárásainak megfelelően öltözködött (http://www.taipeitimes.com)

Felhasznált és ajánlott irodalom

Dave, S. (2010): Life Cycle Assessment of Transportation Options for Commuters. 16 p. http://www.seeds4green.org/sites/default/files/Pietzo_LCAwhitepaper.pdf

Diesendorf, M. (2016): Dispelling the nuclear baseload myth: nothing renewables can't do better. http://energypost.eu/dispelling-nuclear-baseload-myth-nothing-renewables-cant-better/

EC (2015): COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT IMPACT ASSESSMENT Accompanying the document Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council setting a framework for energy efficiency labelling and repealing Directive 2010/30/EU. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=SWD:2015:0139:FIN

KSH (2016): Villamosenergia-mérleg (1990–), internetes adatbázis. https://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_qe002.html

Nørgaard, J. (1998): Sustainable Energy Future - Nordic Perspective; Keynote at workshop "Sustainable and Peaceful Energy Future in Asia", 28. - 30. September 1998, Seoul (kézirat)

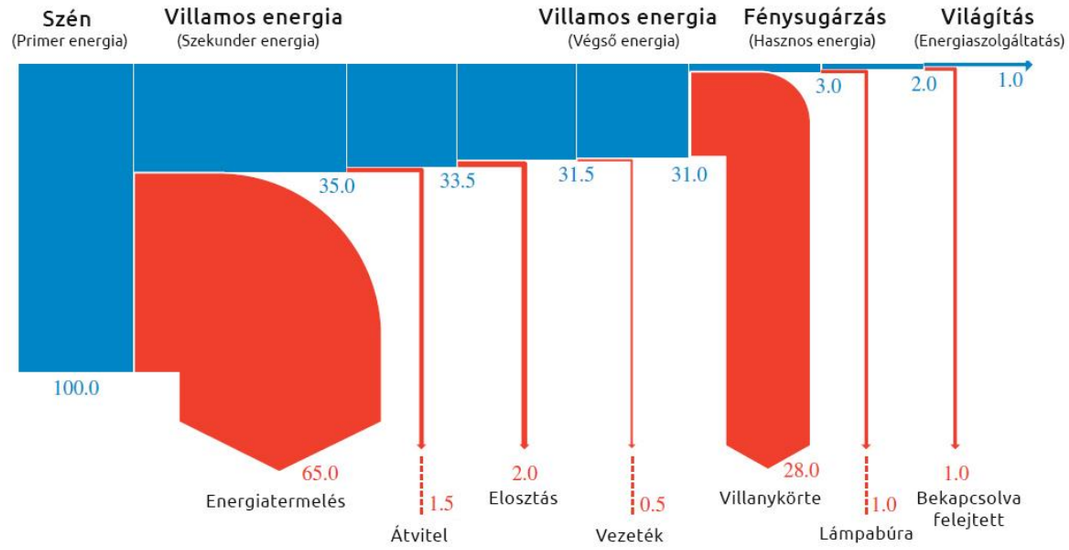
Nørgaard, J. (2006): Electrical Appliances and other Equipment. The conference "Using energy and materials more efficiently: a precondition for sustainable development", Seoul, Korea, 21-22. September 2006.

NREL (2016): Estimating Renewable Energy Economic Potential in the United States: Methodology and Initial Results. 127 p. http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/64503.pdf

Waechter, S – Sütterlin, B. – Siegrist, M. (2015): The misleading effect of energy efficiency information on perceived energy friendliness of electric goods. In.: Journal of Cleaner Production, Volume 93, pp 193-202.

A hatékonyság az energiagazdálkodásban és energiatervezésben

Bevezetésként leszögezhetjük, hogy **a teljes energialánc, vagyis a kitermelés az átalakítási és szállítási folyamatok, majd a fogyasztási lépés veszteségeivel számítható 1-2%-os energetikai hatékonyság nem elfogadható a 21. században**. A lehetőségek feltárása a **hatékonyság** növelésének szempontjából kulcsfontosságú. Az efféle elemzések kiindulási pontja lehet a Római Klub 1997-ben megjelent **Négyes tényező** című tanulmánya (Weizsäcker, E. U. − Lovins, A. B. – Lovins, L. H.), amely az elsők között rávilágított rá a hatékonyság növelésében rejlő globális léptékű lehetőségekre. A szerzők szerint rendelkezésünkre állnak azok a módszerek, amelyekkel az erőforrás-felhasználás hatékonysága megnégyszerezhető – és nem mellékes következményként a jólét megkétszerezését, valamint a természeti környezetre gyakorolt hatások felére csökkentését is feltételezik. A szerzők 50 példát sorakoztatnak fel a különböző területeken alkalmazható módszerekre, ezek közül 20 kifejezetten az energiagazdálkodás témakörét érinti.



64. ábra. Energiaveszteségek az energialánc mentén a világítás példáján

Ennél is tovább merészkedett néhány kutató, amikor megalapították a **10-es Tényező Intézet**et, melynek álláspontja szerint fogyasztáscsökkentés leginkább úgy érhető el, ha változatunk a fogyasztói szokásainkon, és emellett alkalmazzuk a különféle hatékonyságnövelési intézkedéseket. Különösen előremutató, hogy a kutatók nem csak elméleti síkon vizsgálódnak, hanem az eredmények gyakorlati megvalósítása terén is aktívan dolgoznak, konkrét projekteket támogatnak és valósítanak meg (lásd Solanova projekt, Dunaújváros).

Általánosságban az (energia)hatékonyság kapcsán egy tágabb értelmezés tűnik szerencsésnek, amelyben **az energialánc összes állomásánál** − az elsődleges energiahordozótól egészen a jólétről alkotott képzetünkig – beszélhetünk egyfajta hatékonyságról. A következőkben végighaladunk a lánc mentén és röviden felvázoljuk az egyes lépésekhez kapcsolódó hatékonysági vonatkozásokat.

A legelső lépés a **kitermelés**, valamint az ez után következő további **feldolgozási** és **előkészítési** fázisok, de ide kapcsolódnak a kitermelésnek és az átalakításnak azok az **előzményei** és **következményei**, melyek energia-befektetést tesznek szükségessé (pl. geológiai kutatás, bányanyitás, kimerült bányák rekultivációja, a környezetet szennyező kibocsátások megakadályozása, semlegesítése). Ezek a pontok mind egy-egy beavatkozási lehetőséget kínálnak. Ugyanakkor nem szűkíthetjük le ezt az állomást csak a fosszilis energiaforrások vagy az uránérc bányászatára (pl. lásd korábban: stripping ratio) és feldolgozására, hiszen a megújuló energiaforrások egy részénél ugyancsak értelmezhető ez a probléma (pl. lásd napelemek teljesítménynövekedése egységnyi felületre vonatkozóan). Sőt, a bioüzemanyagok kapcsán kifejezetten ez a leginkább sarkalatos, hiszen az alapanyagok előállítása és feldolgozása túlzottan sok energiát emészt fel. Itt például a hatékonyság javítása kulcskérdés, amiben előrelépést az új alapanyag-termelési módszerekből kiinduló második és harmadik generációs bioüzemanyagok megjelenésétől várhatunk. Kérdés, hogy mire ezek fejlesztése versenyképes terméket eredményez, addigra a közlekedésben szükség lesz-e még egyáltalán az efféle hajtóanyagokra – ebben a pillanatban úgy néz ki, hogy az akkumulátoros és hidrogénes elektromos autók gyors fejlődése miatt az új generációs üzemanyagok nem lesznek hosszú életűek. Ugyanakkor a fejlesztések vélhetően mégsem hiábavalók, mert a jövőben a vegyipar egyes ágai potenciális vevőként jelenhetnek meg a bioüzemanyagok piacán.

A következő mozzanat, amikor az elsődleges energiahordozóból másodlagos energiahordozót hozunk létre, miközben energetikai értelemben veszteségek keletkeznek. Itt a hatékonyságot, illetve az értékesíthető másodlagos energiaforrás mennyiségét egyrészt az **átalakítás eszköze**, illetve – főként a megújuló energiaforrások esetében – a **helyszín**, tájolás befolyásolja (pl. napelemek esetében). Ugyancsak lényeges a fogyasztás helye és léptéke is, hiszen a fogyasztás helyéhez közel megvalósuló kis léptékű kogeneráció (kapcsolt hő- és áramtermelés) lényegesen hatékonyabb energetikai megoldást fog eredményezni, mint a nagyerőművekkel jellemezhető rendszerek esetében elérhető. A közeljövőben akár jelentős átalakulásokat is eredményezhet az energiapiacon az a körülmény, hogy kogeneráció ma már háztartási léptékben is elképzelhető.

A fentieken túl a **szállítás** veszteségeivel is számolni kell, amelyek nyilvánvalóan egy központosított rendszerben nagyságrendekkel nagyobbak, mint a helyi termelés esetében. Az bizonyos, hogy a centralizált magyar villamosenergia-rendszer is komoly fejlesztésre szorul, mert a veszteség sajnos tetemes (az önfogyasztás, a hálózati- és transzformátor-veszteség az országosan megtermelt villamos energia pontosan 20%-át tette ki 2015-ben [KSH 2016]).

Az ezt követő lépésben a másodlagos energiaforrások felhasználásával **energiaszolgáltatásokat** hozunk létre (mint például télen egy meleg szoba, nyáron egy hideg hűtőszekrény, éjszaka egy adott élettér megvilágítása vagy egy zenemű lejátszása). Ebben különféle eszközök vannak segítségünkre, amelyek egyfajta energiaátalakítási hatásfokkal működnek. Így például az optimális szobahőmérsékletet többféle módon is elérhetjük – akár a felhasznált energiaforrásokra (földgáz, tűzifa, környezeti hő), akár az eszközök, technikai megoldások széles tárházára (kazán, tömegkályha, hőszivattyú) gondolunk.

Az energiaszolgáltatásokat biztosító különféle eszközök energiafelhasználása kiteheti egy ország villamosenergia-fogyasztásának akár a felét is (Nørgaard, J. 2006). Ez első hallásra feltétlenül aggasztó, azonban ugyanakkor azt is jelenti, hogy ezen berendezések számottevő lehetőséget kínálnak az energiahatékonyság javítására, a felhasznált energia mennyiségének csökkentésére.

Az energetikai hatékonyság növelésének különleges jelentősége van az **épületállomány** tekintetében, hiszen ehhez az EU a teljes energiafogyasztásnak ~35-40%-a kapcsolódik. Az Energia Klub számításai szerint jelentős különbségek vannak a különböző épülettípusok között. A **családi házak** esetében **400-500 kWh/(m^2*év)** energiafogyasztás adódott, hiszen ezek az épületek a legtöbb esetben hőszigetelés nélkül épültek, ezért az indokoltnál jóval nagyobb a hőveszteségük. Ilyen típusú épületekben él a népesség 66%-a, ráadásul egy háztartásra vetítve ezek a legnagyobb alapterületű ingatlanjaink is. A **tégla építésű társasházaknál** 200-300, míg a **panelépületeknél** 200 kWh/(m^2*év) körüli energiafogyasztási értékeket kaptak (Fülöp O. 2011). Nemzetközi összevetésben ezekkel az adatokkal nem állunk túl jól: európai átlagként egy 1980 előtt épült átlagos ház 300, a legújabb épületenergetikai szabványoknak megfelelő épület 90, míg a passzív házak **15 kWh/(m^2*év)** energiafogyasztással működnek (Kirby, A. 2008). Az adatokból világosan kiolvasható, hogy a energiahatékonyság növelésének igen jelentős terepe az épületállomány, a családi házak esetében igen könnyen csökkenthető akár tízedére a felhasznált tüzelőanyag mennyisége.

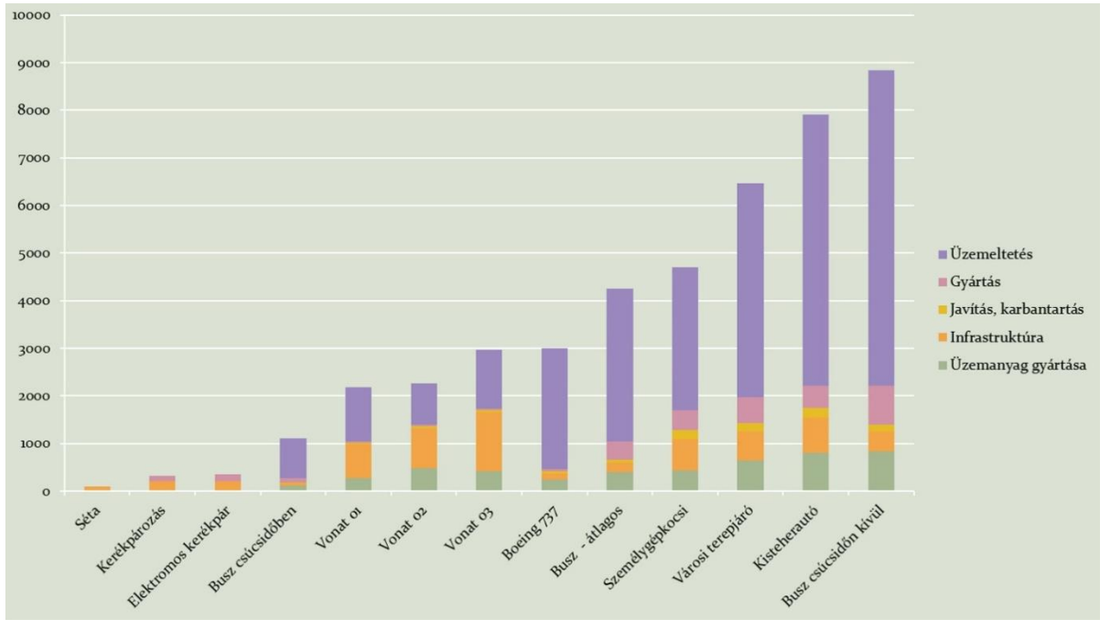
Az épületállomány másik jelentős szegmensét a házgyári panelépületek képviselik. Hogy ezen a téren milyen hatékonyságjavító lehetőségek rejlenek, abban a dunaújvárosi Solanova projekt ad támpontot. A 2003 januárjában kezdődő program keretében **egy hét emeletes házgyári technológiával épült panel lakóház komplex energetikai felújítására** került sor. A 2006-ig tartó felújítás gyökeresen megváltoztatta a lakók addigi életkörülményeit, mára egy sokkal élhetőbb, a modern elvárásoknak megfelelő épületet tudhatnak magukénak. Időközben az is kiderült, hogy a lakások energetikai felújítása esetén nem elegendő a technikai feltételek megteremtése, hiszen egy ház energiafogyasztásának alakulásában nagyon sok múlik a lakók szokásain, magatartásán.

A felújítást meghatározó **célkitűzései** közül az **első** a lakók igényeinek való megfelelés volt. Ezért a felújítás ideje alatt folyamatosan folyt a lakosok véleményének kutatása, a bekövetkező változások nyomon követése. A gyűjtött adatokból egyértelműen kiderül, hogy a felújítás a kívánt eredményt hozta, a lakosok 97%-a elégedett a felújítás eredményével.

Második célkitűzésként az optimális hatékonysági mutatók elérését határozták meg. Az építőiparban már alkalmazott műszaki megoldásokkal, így például a nagy vastagságú (16 cm) homlokzati és tető (30 cm) hőszigetelő rendszerrel, a speciális háromrétegű nyílászárókkal, a nagy hatékonyságú hőcserélőkkel és a jól szabályozható fűtési megoldások alkalmazásával a felújítás utáni első évben 82%-os, a második évben **91%-os csökkenést sikerült elérni az energiafogyasztásban** (Hermelink, A. 2007). A lakások fűtésienergia-felhasználása az eredeti 230-280-ról az elhelyezkedés függvényében **15-45 kWh/(m2*év)**-ra csökkent, ami nemzetközi szinten is figyelemre érdemes.

A Budapest III. kerületében az 1970-ben megépült „FALUHÁZ” energetikai megújítását célzó projekt technológiai megoldásai jóval visszafogottabbnak tekinthetők. Az épület a 10 cm vastagságú külső hőszigetelésnek, a kétrétegű üvegezéssel ellátott új ablakoknak és egyéb változtatásoknak köszönhetően átlagosan **120 kWh/(m^2*év)** hőigénnyel bír.

A bemutatott projektek egyik legfőbb tanulsága az, hogy minden körülmények között kerülendők a **szuboptimális megoldások**. Ezeket olyan beruházásokként definiálhatjuk, amelyek némi energia- és költségmegtakarítást eredményeznek ugyan, ám a kis többletráfordítással elérhető lehetőségekhez képest végül mégis magas energiafogyasztást eredményeznek a következő felújításig, vagyis további hosszú évtizedekre (Feiler J. – Ürge-Vorsatz D. 2010). Sajnos a gyakorlatban – minden épülettípus esetében – szinte kizárólagosan ezekkel a „félmegoldásokkal” találkozhatunk, s a Solanovához hasonlóan eredményes nagyberuházás csak kis számban valósult meg hazánkban.

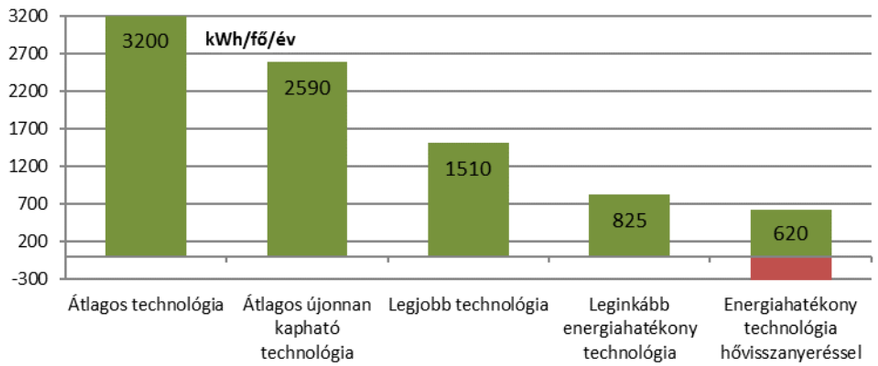


65. ábra. Különféle közlekedési lehetőségek energiafelhasználása a teljes életciklusra vetítve (kJ/utasmérföld) (Dave, S. 2010 alapján szerk: Munkácsy B.)

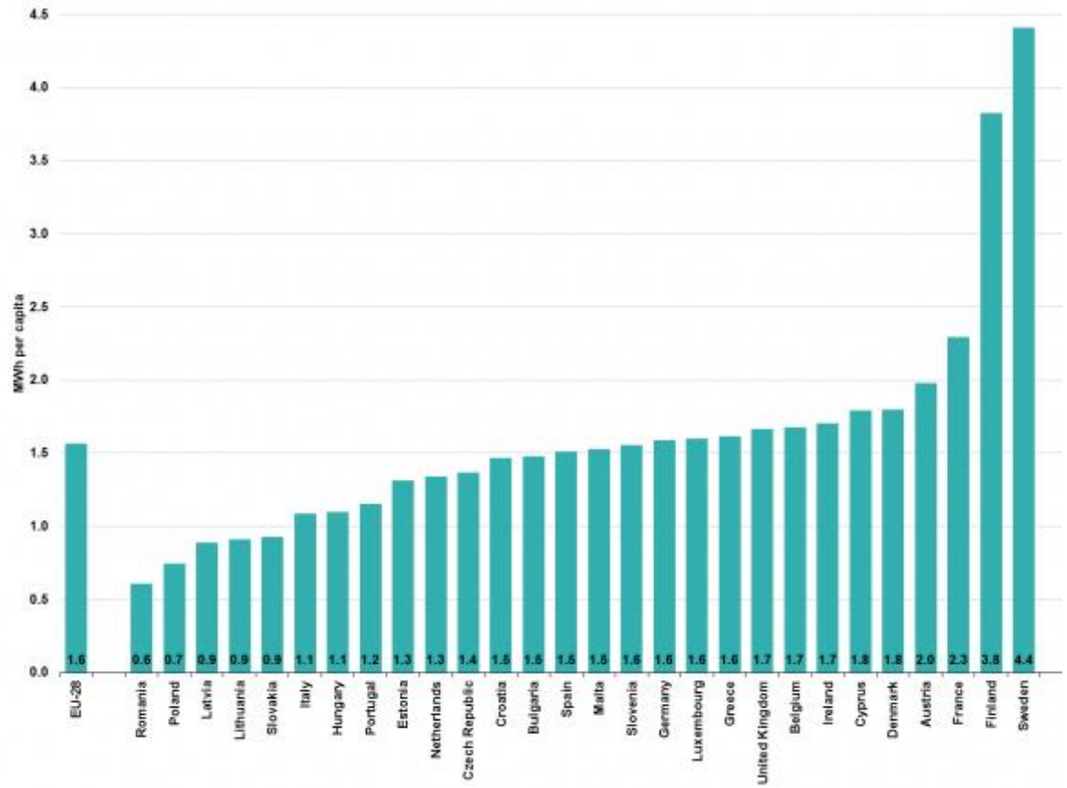
Az épületekben használt eszközök terén is jelentős előrelépés történt az elmúlt évtizedekben. A technológiai fejlődés eredményeként nem csak kisebb fogyasztású, de más szempontból is korszerűbb berendezések válnak elérhetővé. Elég csak a közelmúlt rossz felbontású katódsugár-csöves televízióira vagy monitorjaira gondolni, amelyeket ma már sorra váltanak fel az **LED képernyők** (Light-Emitting Diode, vagyis fényt kibocsátó dióda). És míg a régi monitorok kb. 60-75 W-os, addig a hasonló méretű, de újabb technológiát képviselő síkképernyős társaik már csak kb. 20-25 W-os teljesítményfelvételűek, miközben a

szemet kevésbé bántó, tűéles képet rajzolnak. Az energiahatékonyság terén lényegesen többet léptek előre a világítástechnológiában, hiszen a legjobb hatékonyságú **LED-es fényforrások** (sokszor még szakmai körökben is tévesen ledes „izzó") segítségével ma tízszer hatékonyabban világíthatunk. A néhány éve még domináns izzólámpa esetében az egységnyi villamos teljesítményhez tartozó fényáram **12 lumen/W** volt, a kompakt fénycsöveknél ez 44-48 körüli érték, míg a mai ledes világítótestek esetében **115-120 lumen/W**. Ráadásul az újfajta eszközök élettartama is lényegesen hosszabb, mint az elődöké, mindemellett a ledeknél már sikerült a fénycsövek esetében igen problémás higany felhasználását is mellőzni.

Az egyes elektromos eszközök teljesítménye külön-külön nem tűnik számottevőnek. Többek között ez is az oka annak, hogy a háztartások nem szentelnek kellő figyelmet az energiafogyasztás csökkentésére. Azonban, ha végiggondoljuk, elemezzük az egyes fogyasztók, mint például a mosógép, a televízió vagy a folyamatos üzemben dolgozó hűtőszekrény, vagy a bekapcsolva hagyott modem és set-top-box napi, heti áramfogyasztását, akkor magyarázatot találunk a jelentős energiaköltségeinkre.



66. ábra. A hatékonyságban rejlő potenciálok a villamosenergia-fogyasztás terén – az átlagos dán háztartásban használatos elektromos készülékre együttesen (Nørgaard, J. 1998 alapján szerk: Munkácsy B.)



67. ábra. A háztartások egy főre jutó villamosenergia-fogyasztása az Európai Unió országaiban 2015-ben (Eurostat 2018)

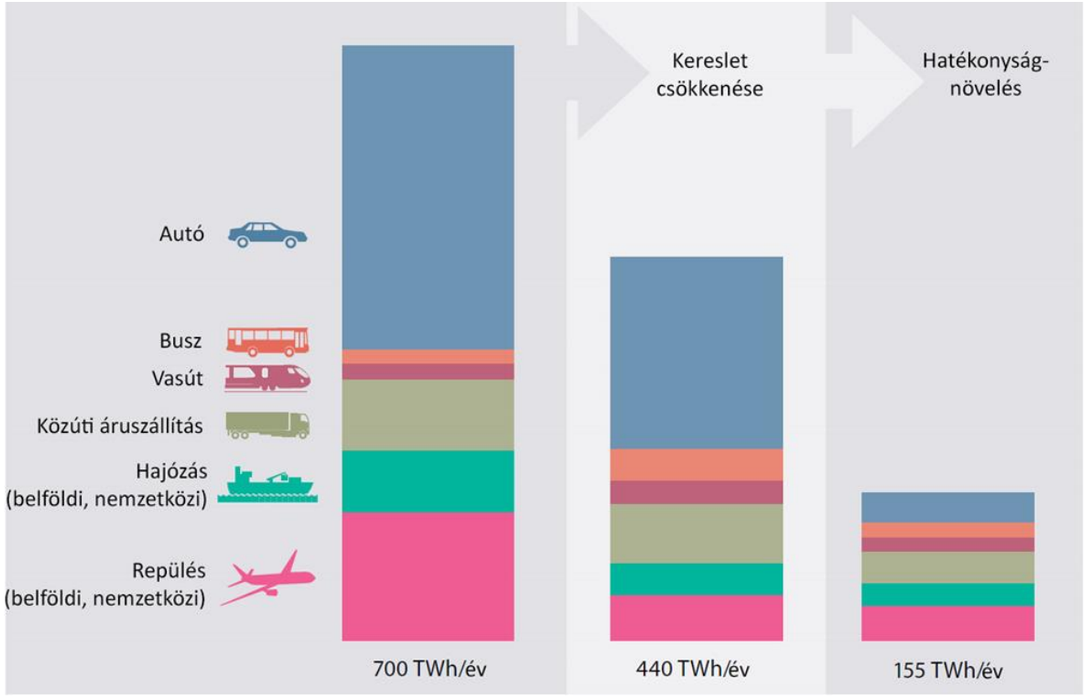
Az átlagos magyar fogyasztó 1100 kWh/év villamos áramot fogyaszt (67. ábra). A tapasztalatok tükrében az energiahatékony és takarékos háztartásban élők ennek a harmadával beérik. Ezt figyelembe véve már egy egészen kis teljesítményű (1-1,5 kW) napelemes rendszer is teljes értékű megoldást jelenthet egy akár 2-3 fős család számára.

A közlekedés a másik kulcsterülete a hatékonyság növelésének. Közlekedni sokféle eszközzel tudunk, és az egyes megoldások energiafelhasználása között nagyságrendnyi különbség is lehet. Lényeges szempont még a **felhasznált energiamennyiség teljes életciklusra való kiszámítása**, és többféle üzemmódban történő vizsgálata, ami sokkal pontosabb, árnyaltabb képet ad a különféle lehetőségekről (65. ábra) és ami a **terület- és településfejlesztők, valamint közlekedésszervezők** munkájához kellene támpontként szolgáljon. Az oszlopdiagram különösen lényeges üzenete a közösségi közlekedés kihasználtságára vonatkozik, amennyiben árnyalja azt az általánosítást, miszerint az **autóbusz-használat** általában energiahatékony, környezetkímélő fogyasztói magatartás. Jól látható, hogy ez csak akkor igaz, ha az autóbuszok kihasználtsága megfelelő, ám abban az esetben, ha csak néhány ember veszi igénybe a 15-20 tonnás eszközt, a végeredmény inkább riasztó. A közlekedésszervezők feladata tehát cseppet sem egyszerű, hiszen a szállítási tevékenységet optimalizálni szükséges a kellően vonzó járatsűrűség, és a hatékony energiafelhasználás szempontjából egyaránt. A diagram ugyancsak figyelemre méltó üzenete a **kerékpározás** igen alacsony energiafelhasználása, ami az üzemeltetést tekintve lényegében kibocsátásmentes (terhelés főként az infrastruktúra kialakítása és a gyártás során jelentkezik) és jól hozzájárul a mindennapi testmozgáshoz.

A személygépjárművek vonatkozásában az elektromos meghajtásra való áttérés jelentene áttörést, hiszen – magát a gépjárművet tekintve a rendszerhatárnak (tank-to-wheel) – a villanymotorok alkalmazása **55-80%-os hatásfok** elérését teszi lehetővé, szemben a belsőégésű motorok maximum 18-22%-os értékével (EABEV 2008). A hazai villamosenergia-rendszerben a fajlagos, nettó villamosenergia-termelésre számított szén-dioxid-kibocsátás 320 g/kWh (MAVIR 2013). Az elektromos autók 0,10-0,15 kWh/km energiafelhasználásával számolva ez napjainkban kb. **32-48 g CO_2/km** kibocsátást jelent, ami jóval az EU jelenlegi elvárása (2020-ra 95 g CO_2/km) alatti érték. Ráadásul ahogyan egyre nagyobb részarányt ér el a megújuló erőforrásoknak az áramtermelésbe történő integrálása, úgy csökken lépésről lépésre ez az érték.

A villamos áram tehát a közlekedési szektor leginkább meghatározó energiahordozója lehet a jövőben. A hatékonyság növelése mellett egy másik fontos érv, hogy az elektromos autók üzembe állításával megkönnyíthető a megújuló energiaforrások villamosenergia-hálózatba integrálása, hiszen az akkumulátorok töltési időpontja – tekintve, hogy a járművek naponta átlagosan 23 órán keresztül állnak – az energiarendszer igényei szerint jól időzíthető. Az ezt kihasználó **V2G-koncepció (vehicle-to-grid)** szerint az akkumulátoros autók szükség esetén villamos áramot biztosíthatnak a hálózatnak, nyilvánvalóan megfelelő díjazásért cserébe. E szerint a jövőben az autó nem egy költséges közlekedési eszköz lehet, hanem energiatárolási eszköz, és ennek köszönhetően egyfajta új bevételteremtési lehetőség. Ugyanakkor könnyen lehet, hogy a V2G megoldás elterjedésére csak korlátozott mértékben számíthatunk, mivel a jelenlegi akkumulátor-technológiát figyelembe véve ez jelentősen rövidítené a várhatóan továbbra is drága energiatároló egységek életidejét.

A fenti, közlekedéssel kapcsolatos okfejtés kapcsán fontos kiemelni, hogy valódi megoldás csak multidiszciplináris megközelítéssel érhető el. Itt elsősorban az energiahatékonyság fokozásának és a takarékosságnak a kombinációjára (súlycsökkentés; alacsony gördülési ellenállású gumiabroncsok; aerodinamikai fejlesztések) és az **új hajtásláncok** elterjedésére kell gondolni, de lényeges szerepet kell szánni a **közlekedési szokások átalakításának**, így például a közös autóhasználatnak, a közösségi közlekedésnek, valamint a gyaloglás és kerékpározás térnyerésének. Lényeges kiemelni, hogy a közlekedési kibocsátások csökkentési lehetőségei nem csak közvetlenül a közlekedési szektorhoz kapcsolódnak, hiszen igen fontosak például a **településfejlesztéssel** kapcsolatos beavatkozások, amelyek révén radikálisan csökkenthető maga a közlekedési aktivitás (68. ábra).



68. ábra. A brit közlekedési szektor energiafogyasztásának csökkentési lehetősége és ennek komponensei (Allen, P. 2013 alapján Kovács K.)

Felhasznált és ajánlott irodalom

Allen, P. [szerk.] (2013): Zero Carbon Britain – Rethinking the Future. Centre for Alternative Technology. 214 p.

EABEV (2008): Energy consumption, CO2 emissions and other considerations related to Battery Electric Vehicles. European Association for Battery Electric Vehicles. 21 p.

http://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/consultations/doc/2009_03_27_future_of_transport/20090408_eabev_%28scientific_study%29.pdf

Eurostat (2018): Households consumption of electricity per capita, MWh per capita, 2015 http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Households_consumption_of_electricity_per_capita,_MWh_per_capita,_2015_new.png

Feiler J. – Ürge-Vorsatz D. (2010): Hosszú távú (2050) kibocsátás csökkentési célok Magyarország vonatkozásában. 47 p.

Fülöp O. (2011): NegaJoule 2020 - A magyar lakóépületekben rejlő energiamegtakarítási lehetőségek. Energia Klub Szakpolitikai Intézet és Módszertani Központ. 25 p.

Hermelink, A. (2007): SOLANOVA– Symbiosis for Sustainability. – Konferencia előadás: European Forum on Eco-Innovation, Brussels, June, 2007.

Kirby, A. (2008): Kick the Habit. A UN Guide to Climate Neutrality. UNEP, 202 p.

KSH (2018): 3.8.2. Villamosenergia-mérleg (1990–) http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_qe002.html

MAVIR (2013): A Magyar Villamosenergia-rendszer közép- és hosszútávú forrásoldali kapacitásfejlesztése. Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító ZRt. 94 p.

Nørgaard, J. (1998): Sustainable Energy Future - Nordic Perspective. Keynote at workshop „Sustainable and Peaceful Energy Future in Asia", 28-30. September 1998, Seoul

Nørgaard, J. (2006): Electrical Appliances and other Equipment. the Conference “Using energy and materials more efficiently: a precondition for sustainable development”, Seoul, Korea, 21-22. September 2006.

Weizsäcker, E. U. – Lovins, A. B. – Lovins, L. H. (1997): Factor four: doubling wealth - halving resource use. Allen & Unwin. 322 p.

A megújuló energiaforrások

A **megújuló energiaforrás** olyan közeg, természeti jelenség, melyből a társadalom és a gazdaság céljaira energia nyerhető ki, miközben **a forrás újratermelődése meghaladja a felhasználás mértékét** – felhasználhatóságuk mértéke tehát korlátozott, ezt a korlátot átlépve ezek az erőforrások is csak ideig-óráig állnak rendelkezésre. Amely esetben egészen nyilvánvaló a korlátosság, ott egyes szakértők a **feltételesen megújuló energiaforrás** kifejezést használják – ilyen lehet például a biomassza, a geotermia.

A megújuló energiaforrások döntő többsége a napenergiára vezethető vissza. Kivételt csupán a radioaktív bomlásból nyerhető geotermikus eredetű környezeti hő, valamint az apály és dagály váltakozásának mozgási energiája jelent. A különféle alkalmazások rendszerbe foglalása sokféleképpen történhet, az alábbi csak egy leegyszerűsített megközelítés, amely arra mégis alkalmas, hogy rávilágítson: a megújuló energiaforrások nagyon sokfélék, a felhasználásukra kidolgozott különféle műszaki megoldások még ennél is lényegesen sokszínűbbek. Egy-egy energiaforrás esetében akár százával jöttek létre különféle alkalmazások, amelyekre igaz, hogy sok tekintetben remekül kiegészítik egymást. Éppen ezért a megújuló energiaforrások külön-külön történő vizsgálata (pl. mennyi napelem kellene ahhoz, hogy az ország villamosenergia-igényét ellássuk) nem tekinthető szakmai szempontból elfogadható megközelítéseknek, vagyis az efféle kérdésfeltevés már önmagában hibás.

A megújuló energiaforrások kapcsán ki kell térni arra is, hogy akadnak bizonytalanságok a tekintetben, hogy vajon **mik tartoznak ebbe a körbe**. Bizonyos szakértői csoportok például ide sorolják a **kommunális hulladékokat** is, arra való hivatkozással, hogy ezek folyamatosan és nagy mennyiségben keletkeznek. Ugyanakkor le kell szögezni, hogy – amellett, hogy égetésük jelentős légszennyezést eredményez – az efféle „termikus hasznosítás” hulladékgazdálkodási szempontból is kifejezetten káros, hiszen egy költséges hulladékégetőmű megépítését követően folyamatosan és nagy mennyiségben lesz szükség a „hasznosítandó” hulladékra, ami viszont nem egyeztethető össze a **hulladékkeletkezés megelőzésének alapelvével**. Ugyanakkor az égetésnek vannak kedvezőtlen energetikai következményei is, hiszen ezáltal maga az anyag és az abba – a gyártási folyamatok során – „beépített energia” veszik el a gazdaság számára. Így **az égetéses hulladékártalmatlanítás környezetgazdálkodási szempontból nem tekinthető elfogadható megoldásnak**.

A geotermikus energia megújulása ellen hat amikor a hévizek kitermelése és felhasználása után elmarad a visszasajtolás. A **biomassza esetében pedig történhet** olyan mértékű felhasználás, ami meghaladja az adott élőhelyen újratermelődő mennyiséget. Ezen példák jól világítanak rá arra, hogy nem minden megújuló energia alapú alkalmazás fogadható el a **környezeti fenntarthatóság** szempontjából.

2. táblázat. A megújuló energiaforrások típusai és különféle alkalmazási lehetőségei (szerk: Munkácsy B.)

Energiaforrás	Főtípus	Altípus	Eszköz (példa)
Nap	Passzív	Direkt	Nem szükséges eszköz
		Indirekt	Minimális gépészet (ventilátor)
	Aktív	Fototermikus	Napkollektoros-rendszer, naptűzhely, aszaló
		Fotovillamos	Napelemes-rendszer
		Hibrid	Kollektor-napelem hibrid alkalmazás
		Termovillamos	Elnyelőtornyos naperőmű
	Környezeti hő	Aerotermikus	Hőszivattyú
		Hidrotermikus	Hőszivattyú
		Talajhő	Hőszivattyú
Szél	Áramtermelés		Szélerőmű
	Mechanikai munka		Szélmalom
	Mozgási energia		Vitorláshajó
Biomassza	Hulladék alapú		Biogáz erőmű
	Főtermék alapú		Fatüzelésű fűtőmű
Víz	Folyóvízi	Tározós	Üzemvízcsatornás vízerőmű
		Víztározás nélküli	Átfolyó rendszerű vízerőmű
	Tengeri	Ár-apály	Árapály erőmű
		Tengeráramlat	Tengeráramlat erőmű
		Hullámzás	Hullámerőmű
Radioaktív bomlás	Környezeti hő	Geotermikus	Erőmű, fűtőmű

Napenergia

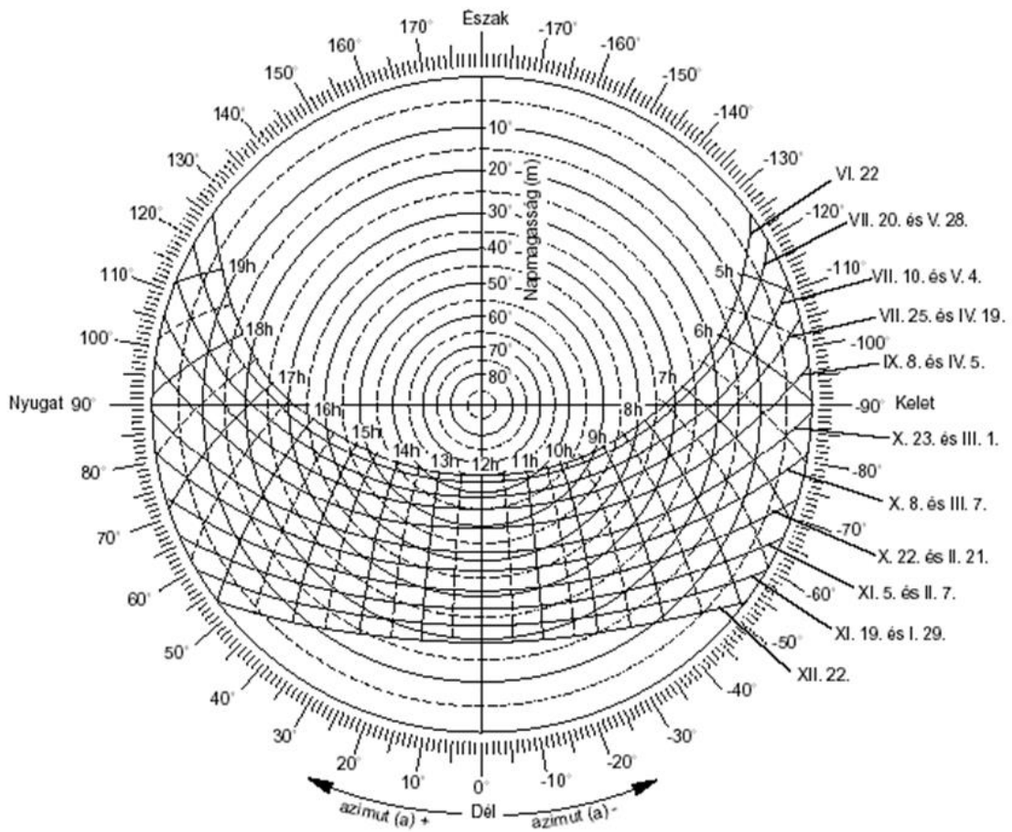
A napenergiában rejlő lehetőségek kapcsán alapvetően 3 jelentősebb alkalmazási terület jöhet szóba hazánkban: a) a napenergia **passzív** hasznosítása kínálja a legegyszerűbb, sőt akár ingyenes megoldásokat, míg az **aktív** megoldások közül b) a **napkollektoros** hőenergia-termelés és c) **napelemes** áramtermelés terjedtek el, amelyek ma már megfizethető, egyre inkább egy átlagos család számára is elérhető technológiák.

A napenergia hasznosításának lényege a természeti adottságokhoz való alkalmazkodás, ez esetben **a Nap járásának figyelembe vétele a települések és az épületek tervezésénél**. A Budapestre vonatkozó (de egész Magyarországra bátran alkalmazható) **nappályadiagram** (69. ábra) alapján az alábbi következtetésekre juthatunk:

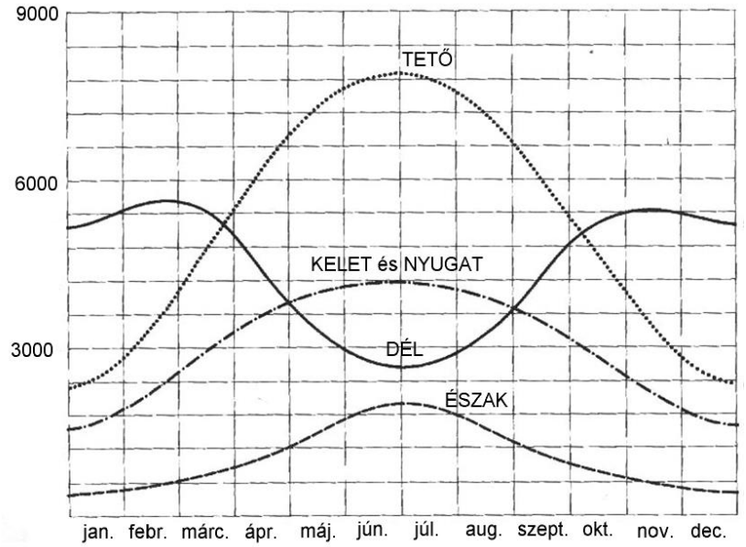
- A közhiedelemmel ellentétben a Nap általában nem keleten kel és nem nyugaton nyugszik le (ilyen évente csak kétszer, napéjegyenlőség idején történik). A téli félév során DK-i, a nyári félévben ÉK-i irányban kel; a téli félév során DNy-i irányban, a nyári félév során ÉNy-i irányban nyugszik. Ebből az következik, hogy
  - a **téli** félévben jelentős besugárzásra sem keletről, sem nyugatról nem számíthatunk, így az erre tájolt ablakokon keresztül folyamatos hőveszteséggel kell számolni;
  - a **nyári** félévben viszont mind a keleti, mind a nyugati oldal intenzív sugárzásnak van kitéve, így az arra néző ablakok – árnyékolás nélkül – a helyiségek túlmelegedését okozzák.
- **A Nap decemberben mintegy 8, júniusban 16 órán keresztül tartózkodik a horizont felett**. Így a **téli** félévben sok hőnyereségre nem számíthatunk, a **nyári** félévben viszont az épület lényegesen nagyobb hőterhelésnek van kitéve. A különbséget növeli, hogy a téli félévben a felhőzöttség és a ködös időszakok gyakrabban jelentkeznek.

A téli félévben a Nap pályája és delelési magassága is alacsonyabb, ami azt eredményezi, hogy a) a napsugárzásnak sokkal vastagabb levegőrétegen kell keresztüljutnia, így intenzitása csekélyebb; b) az épületbe a déli oldalon a tető alatt könnyebben bejut a napsugárzás.

A nyári félévben a nappálya, így a delelési pont is magasabb, a) ezáltal a sugárzás intenzívebb; b) az épületbe való bejutást a tető túlnyúlásával könnyen megakadályozhatjuk, így igen hatékonyan védhetjük az épületet a túlmelegedéstől.



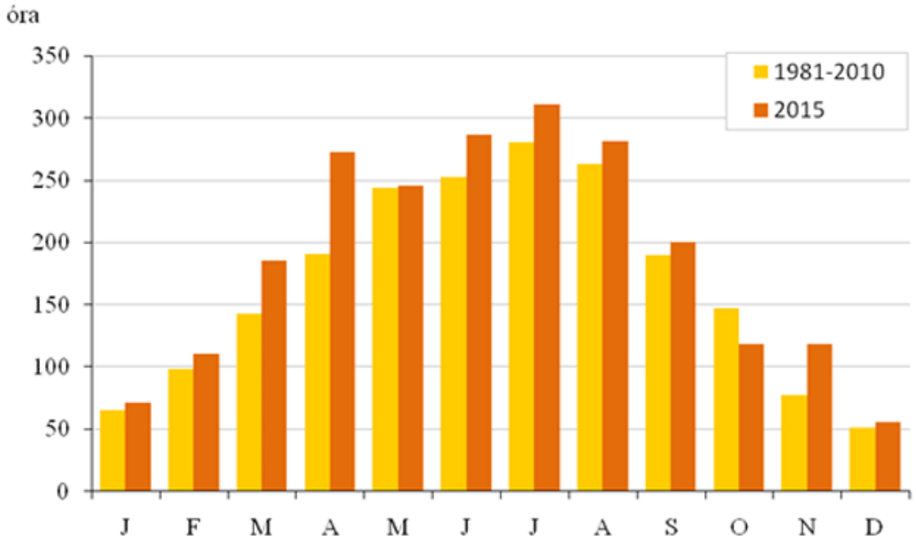
69. ábra. A Budapest térségében érvényes nappályadiagram (Forrás: Barótfi I. 2000)



*70. ábra. Az épület egyes felületeire beérkező napenergia mennyiségének változása az év folyamán Magyarországon (Wh/[nap*m^2]) (Bengtson, H. 2010 alapján szerk: Munkácsy B.)*

A kép további pontosításához szükségünk van a besugárzás néhány egyéb lényeges jellemzőjére. Ezek közül az első a **napállandó**, amely megadja, hogy átlagos Föld–Nap távolság esetén, a légkör felső határán, a sugárzásra merőleges 1 m^2-nyi felületre mennyi teljesítmény esik. Értéke 1370 átlagosan W/m^2. Még lényegesebb az az energia, amely el is éri a Föld felszínét, közvetlenül és közvetve, szórt fény formájában. Ennek az úgynevezett **globálsugárzásnak** magyarországi értéke **a déli órákban átlagos napsütés esetén** a téli félévben 250-600 W/m^2, a nyári félévben 600-1000 W/m^2 átlagosan. Lényeges szélsőérték a téli szórt sugárzásra jellemző 50 W/m^2, illetve **az éves átlagos érték, ami ~700 W/m^2**. További lényeges tényező a **napsütéses órák száma**, amely hazánkban átlagosan évi 1900–2000 óra körüli, és amelynek 75%-a nyáron jelentkezik (71. ábra). A fentiekből következően a besugárzott napenergia mennyisége hazánkban egy átlagos évben **~1100- 1300 kWh/m^2**.

Az összehasonlítás kedvéért érdemes megemlíteni, hogy ugyanezen jellemző Észak-Európában 1000-1200, míg Dél-Európában akár 2000-2200 kWh/m^{2}is lehet évente.



71. ábra. A napsütéses órák havi összegei 2015-ben és 1981-2010 közötti átlagban (met.hu)

Az egyes évek adatai között jelentős különbségek is lehetnek. Ebből a szempontból igen figyelemre méltó és elgondolkodtató az utóbbi évek, így például a 2015. év adatsora. Ennek segítségével jól érzékeltethető az éghajlatváltozás, hiszen a 30 éves átlaghoz képest, ebben az esztendőben **23%-kal több napsütéses óránk volt éves viszonylatban** – az adatok október kivételével minden hónapban nagyobb értéket mutattak. Bármilyen furcsa is az állítás, de a számos szempontból aggodalomra okot adó éghajlatváltozás a napenergia-hasznosítás szempontból mindenképpen előnyös, hiszen így lényegesen több áramot és hőt képesek termelni a kollektorok és napelemek, kevesebb fosszilis energiaforrás felhasználására van szükség, tovább csökken az üvegházhatású gázok kibocsátása.

A passzív napenergia-hasznosítás

Mindenekelőtt tisztázni szükséges, hogy a **passzív napenergia-hasznosítás** és a **passzív házak** nem ugyanazt jelentik. Az előbbi a napenergia hasznosításának egyik módja, az utóbbi viszont arra utal, hogy egy adott épületben a hőveszteségek minimalizálásával és a belső hőnyereségek maximalizálásával szinte egyáltalán nincs szükség aktív fűtésre. A vonatkozó szabvány szerint például a téli félévben a fűtési igény nem haladhatja meg éves szinten a 15 kWh/m² értéket, a nyári félévben ugyanez az érték a hűtési igényekre igaz. A **napenergia passzív hasznosítása tehát nem feltétlenül jelent hatékony hőenergia-felhasználást**. Inkább csak logikus végeredmény egy környezettudatos, a napenergia alkalmazására fókuszáló tervezés esetében egy, az átlagosnál jobb hőszigetelésű épület.

A passzív napenergia-hasznosítás elsősorban építészeti megoldásokat jelent, amelyek révén az épületszerkezetet tesszük alkalmassá az üvegházhatás kihasználása révén a napenergia begyűjtésére és tárolására. **A passzív napenergia hasznosítás lényege** az, hogy maga az épület alkalmas legyen a hőenergia a) befogadására; b) tárolására; majd szükség esetén c) leadására. Ha a fenti három folyamat egy térben történik, abban az esetben **direkt hasznosítás**ról beszélünk. Ennek alapvető jellemzői a letisztult, egyszerű formaterv és az, hogy nem igényel plusz költséget, csupán átgondolt tervezést.

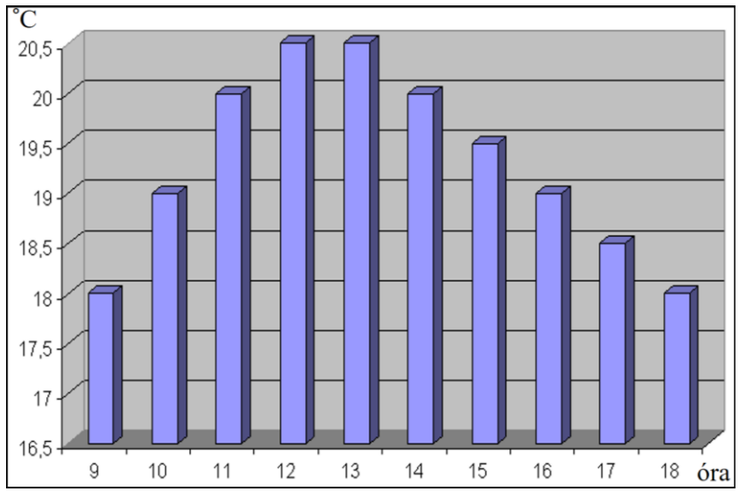
Amikor a fenti folyamatok térben elkülönítve történnek, azt **indirekt hasznosítás**nak nevezzük. Ez esetben az építés kapcsán többletkiadásokkal is számolni lehet, hiszen ki kell alakítani az építészeti és gépészeti feltételeit annak, hogy a déli oldalon csapdázott napenergia mennyiségét megnöveljük, majd a hőenergiát az épület egy másik részébe (például az aljzatban kialakított járatrendszerben egy ventilátorral az épület északi felébe) juttassuk, majd ott a felhasználásig tároljuk.

Az alábbiakban elsősorban a direkt hasznosításra alkalmas épület fő jellemzőit foglaljuk össze:

- Kelet-nyugati tengelyű épület – nagy, dél felé néző felülettel;
- Optimális méretezésű, többségében dél felé tájolt ablakfelületek a napsugárzás befogadására – a többi égtáj felé csak minimális ablakfelület a téli hőveszteség minimalizálása érdekében;

- Jelentős hőtároló tömeg (alapesetben maga az épületszerkezet, például a [vályog]falazat vagy a padlózat);
- Pufferzónás alaprajz: dél felé néző értékes lakóterek, észak felé fűtetlen pufferzóna a ritkábban használt vagy kevésbé értékes helyiségekkel (pl. garázs);
- Déli lejtőre építés (védettebb északi oldal, rövidebb árnyékok délről);
- Homlokzaton legalább 60 cm-rel túlnyúló tetőfelület az árnyékolás érdekében – általában is komoly külső árnyékolás (pl. zsalúzia, délről lombhullató növények);
- Társított szerkezetek (pl. hőszigetelt zsalugáter) a téli hővédelem érdekében.

A fentiek révén érhető el, hogy a téli időszakban a lehető legtöbb, míg a nyári időszakban a lehető legkevesebb energia érkezzen be az épületbe.



72. ábra. A passzív napenergia-hasznosítás elvei szerint épített családi ház dél felé tájolt helyiségei belső hőmérsékletének változása egy napfényes januári napon, 9 és 18 óra között, +3-5 °C közötti külső hőmérsékletnél, hagyományos fűtés nélkül (szerk. Munkácsy B.)

Az épületek egyik legkritikusabb része az ablak, az **üvegfelület**, amely télen általában jelentős hőveszteség forrása, ugyanakkor napos időben az épület energiabevételének kulcsa. Komoly kihívást jelent az a törvényszerűség, hogy minél kisebb egy ablak hővezetése, annál kisebb a fényáteresztő-képessége is. Éppen ezért a méretezésnél észszerű kompromisszumra kell törekedni: a déli oldalra sem érdemes túlméretezett ablakokat tervezni, mert a téli időszakban a hőveszteség ezeken keresztül is érvényesül – tekintve, hogy ilyenkor akár heteken keresztül sem számíthatunk direkt besugárzásra, ezáltal hőnyereségre. A speciális és drága hőszigetelő üvegezés mellett (esetleg helyett) célszerű az ablakfelületeket hőszigetelő elemekkel (pl. spaletta) tovább védeni, amelyek rögzítése, elhelyezése ugyancsak felületet igényelhet (ráadásul azt is figyelembe kell venni, hogy adott esetben ezek ne nyíljanak egymásra). Különösen emeletes házak esetében a hővédelemre és az árnyékolásra egyaránt megoldást jelenthet a külső redőny vagy az olyan háromrétegű ablakok használata is, ahol a külső üvegréteg mögött beépített árnyékoló is van (73. ábra).

73. ábra. Háromrétegű üvegezés beépített redőnyös árnyékolással (tofa.hu)

A **helyiségek** elrendezésénél azt kell figyelembe venni, hogy a jól felmelegedő déli oldalra az olyan fontosabb helyiségek kerüljenek, mint a nappali, a konyha, az étkező, a gyerekszoba. Az északi oldalon az úgynevezett pufferzóna található (lépcsőház, garázs, gardrób), amelynek nincs fűtése, így 12–15 °C-os hőmérsékletével egyfajta hővédelmet jelent az értékesebb, déli tájolású helyiségek számára. A hővédelem szempontjából lényeges az egyszerű formavilág, az épület felületének minimalizálása. Ebben a tekintetben a félgömb alakú épület volna ideális, de ennek megépítésére nem könnyű felkészült mesterembereket találni.

74. ábra. Passzív napenergia-hasznosítás indirekt megoldással –Dyssekilde, Dánia (fotó: Munkácsy B)

A következő lényeges tényező a **hőtároló tömeg**, amelynek segítségével az épület képes néhány órán vagy akár egy-két napon keresztül a hőenergiával gazdálkodni. Ezzel összefüggésben kiemelten fontos – mint egyre inkább más épületek esetében is – a megfelelő hőszigetelés.

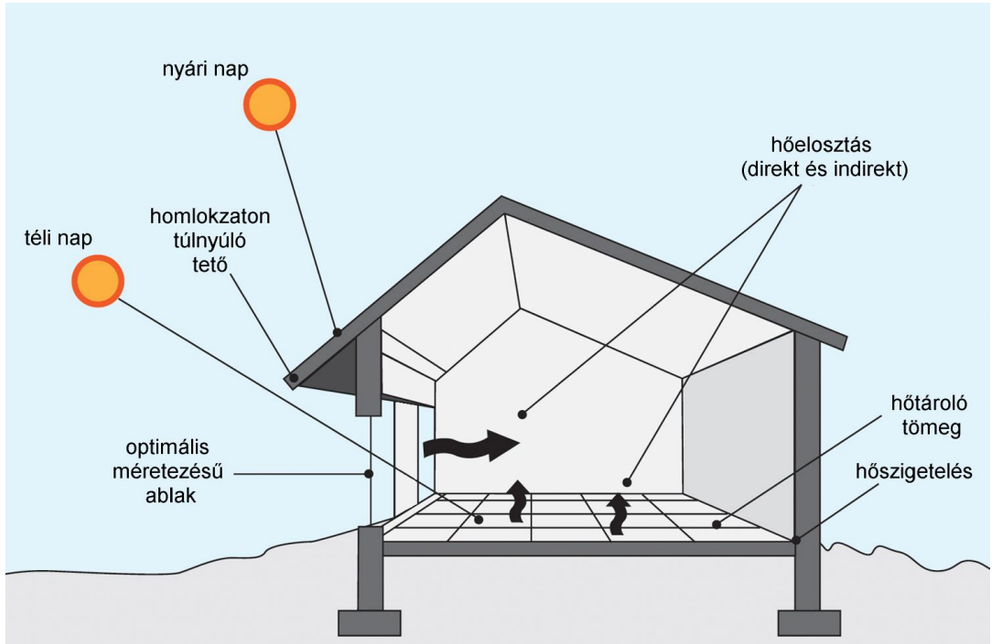
A nyári időszakban a hővédelem kulcsa az **árnyékolás**. Mint láttuk, ebben alapvető szerepe van a tetőnek, amelynek a déli oldalon legalább 60-80 cm-rel kell a homlokzat síkjához képest túlnyúlnia. Az árnyékolásban segítenek a nyílászárókon elhelyezett „társított berendezések” (spaletta, zsalugáter). Emeletes épületek esetében a korábbiakban említettek szerint kiemelkedő fontosságú a redőny és a **zsalúzia**. Ez utóbbi működési elve azonos a reluxáéval, de masszívabb, kivitele az időjárás viszontagságainak ellenálló. Lamellái tetszőleges szögbe forgatva kirekesztik a vakító napfényt, de a szórt fény, esetleg a friss levegő bejutását is lehetővé teszik. A zsalúzia működése – igény esetén – érzékelők és villanymotorok segítségével akár teljesen automatizálható.

75. ábra. Zsalúzia, az árnyékolás egyik leghatékonyabb eszköze

A hővédelemben lényeges szerepet tölthetnek be a **kert fái** is. A lombhullató fákat az épület délkeleti és délnyugati oldalán kell elültetni, hogy nyáron a középmagasról érkező napsugarakat árnyékolják, télen viszont – a lombozat hiányában – ne akadályozzák a besugárzást.

Végeredményben az állapítható meg, hogy egy épület **fűtési energiafelhasználása** a plusz beruházási forrást lényegében nem igénylő, egyszerűbb passzív direkt szoláris rendszerekkel 10-15%-kal, míg üvegezett naptérrel, télikerttel rendelkező indirekt rendszerekkel 25-35%-kal csökkenthető (Farkas I. 2010). Legalább ennyire lényeges, hogy az efféle épületek **nyáron aktív hűtést nem igényelnek**! passzív hűtési megoldásokkal (nappal árnyékolás, éjszaka szellőztetés) magyarországi körülmények között 25 °C fölé nem emelkedik lakótér belső hőmérséklete – de átlagosan 21-23 °C.

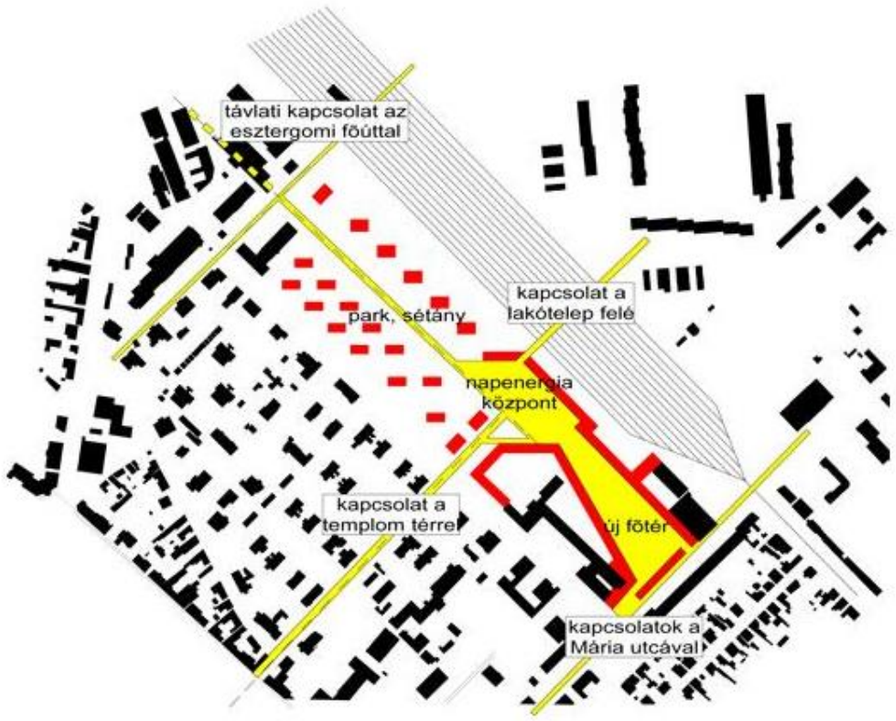
Ugyanakkor látni kell, hogy a már meglévő épületek utólagos passzív napenergia hasznosításra való alkalmassá tétele az esetek többségében nem megoldható, hiszen az épületek tájolását megváltoztatni nem lehetséges. Például egy nyugat-keleti tengellyel rendelkező, **észak felé tájolt épület esetében** csak meglehetősen nagy átalakításokkal volna megvalósítható az épület dél felé történő megnyitása – ha egyáltalán, hiszen a nyílászárók áthelyezése önmagában még nem elegendő, a helyiségek rendjét is meg kell változtatni, falakat megszüntetni, újakat építeni (mindez ráadásul a helyi építési szabályzatba is ütközhet). Ilyen esetben – ha nincs nagyobb árnyékoló tereptárgy a közelben – lényegesen egyszerűbb és igen gyorsan megtérülő beruházást jelent az aktív hasznosítás, vagyis ez esetben leginkább **levegős napkollektorok elhelyezése a zárt, déli homlokzaton**. Csak részleges megoldások jöhetnek számításba, ha az épület észak-déli tengelyű (döntően kelet vagy nyugat felé néző ablakokkal), hiszen ilyen esetben nem tudunk eleget tenni a passzív napenergia-hasznosítás egyik alapfeltételének, az épület dél felé történő megnyitásának, hiszen csak minimális déli falfelületünk áll rendelkezésre.



76. ábra. A passzív napenergia-hasznosítás elvi vázlata

A fentiek alapján világos, hogy a passzív napenergia-hasznosítás feltétele a korszerű, napenergia-hasznosítási lehetőségekre is figyelemmel történő településtervezés**.** Mivel **a településtervezés évszázados léptékben határozza meg a napenergia hasznosításának feltételeit**, ezáltal a háztartások, és gazdálkodók által okozott környezeti terhelés mértékét és az energiaköltségeket, így az érintett szakemberek és döntéshozók felelőssége igen jelentős. Ennek ellenére energiatudatos településtervezésre (solar urban planning) sajnos ritkán találunk még nemzetközi példát is (de ilyen többek között Gelsenkirchen vagy a POLIS projekt települései). Arra pedig még ritkábban van precedens, hogy egy ilyen filozófia alapján készített terv ténylegesen meg is valósuljon. Így egyelőre elakadt Dorog város egyik felhagyott ipari területét érintő elképzelés megvalósítása is, amely egy új lakó és kereskedelmi funkcióval rendelkező városrész elképzelését vázolta fel. Ugyan 2009-ben a

tervpályázaton a munka első díjat kapott, de a figyelemre méltó koncepcióból (77. ábra) mindeddig semmi nem valósult meg.



77. ábra. Dorog belső ipari területének átalakítására kiírt tervpályázat győztes munkája, amely a napenergia passzív és aktív hasznosítását helyezné előtérbe. Balázs Attila koncepciója, 2009.

Általánosságban elmondható, hogy a passzív napenergia-hasznosítás céljainak a déli kitettségű lejtőn található építési telkek felelnek meg leginkább, ahol a településrendezési terv ide vonatkozó térképlapján megjelenő házhelyek kelet-nyugat hossztengelyű, dél felé tekintő épületek kialakítását teszik lehetővé. Az északi lejtőkön lehetőség szerint más funkciókat – pl. közpark, sporttelep, ipari övezet, temető – kell támogatni.

Az aktív napenergia-hasznosítás

Ebben a fejezetben a hőenergia-termelésre szolgáló fototermikus és a villamos energia előállítására alkalmas fotovillamos rendszerek, valamint a kettő kombinációját megtestesítő hibrid megoldások alkalmazási lehetőségeit mutatjuk be. A termovillamos alkalmazások elsősorban szubtrópusi-trópusi területekre jellemzők, hazai megjelenésük nem várható.

Fototermikus napenergia-hasznosítás

A legrégebbi és legegyszerűbb módja a napenergia hasznosításának a hőenergia előállítása. A fototermikus megoldások erre – sok egyéb (pl. naptűzhely) mellett – két kézenfekvő lehetőséget kínálnak, a levegős és a folyadékos napkollektorokat.

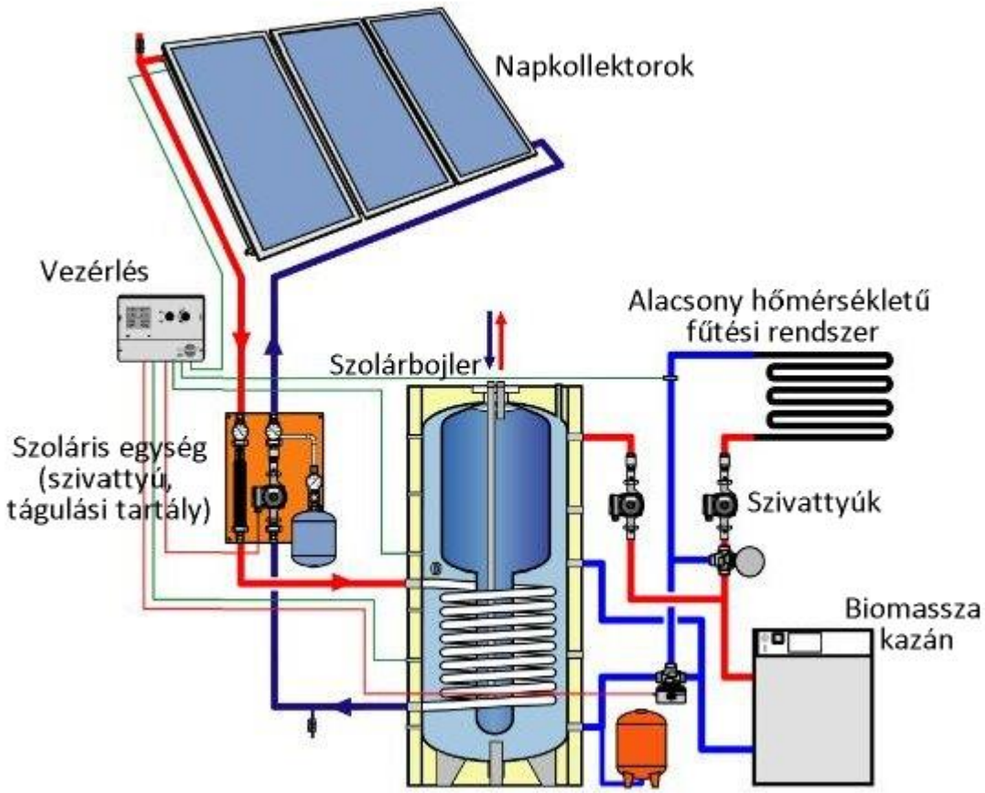
Levegős kollektorok

Az akár házilagosan is elkészíthető **levegős napkollektorok** (házilagos kivitelezésben általában „sörkollektor”) főként az átmeneti, tavaszi-őszi időszakban jelentenek hozzájárulást a nem megfelelően tájolt épületek fűtési energiafelhasználásához – jól tájolt épületek esetében a passzív napenergia hasznosítás egyfelől már önmagában jelentékeny mennyiségű hőenergiát biztosít, másodsorban pedig a nagy méretű üvegfelületek miatt ilyen esetben csak igen kevés hely marad a levegős kollektorok felszerelésére. Elhelyezésükre a tetőtéri helyiségek esetében a tető is alkalmas, de általában a függőleges falfelületre szokás ezeket rögzíteni (sokemeletes épületek esetén a levegős kollektorok elhelyezése általában nem megoldható, tekintve a felszerelés és karbantartás nehézségeit.) A levegős kollektorok esetében a várható energiahozam a fűtési időszakban mintegy 200-210 kWh/m^2 – vagyis egy átlagos méretű berendezést feltételezve 800-1000 kWh/fűtési szezon –, ugyanakkor a rendszer ventilátorának működése 15-20 kWh/fűtési szezon villamos energiát igényel. Ez utóbbit célszerű ugyancsak napenergiával – napelem segítségével – fedezni, hiszen így lényegében egy olyan önszabályozó rendszert kapunk, amely nem igényel külön vezérlést.

78. ábra. Légkollektorral felszerelt épület (http://www.greenbuildingadvisor.com)

Folyadékos napkollektor

A **folyadékos napkollektor rendszerek** kapcsán igen sokféle technikai megoldást használnak, most csak a leggyakoribbat, a **síkkollektorral** szerelt, kétkörös, keringetőszivattyús rendszer működését vegyük górcső alá. Ezek a berendezések a **direkt napsütést** képesek hasznosítani, ezáltal **használati meleg vizet** termelni. Ez azt jelenti, hogy a rövidebb nappalokkal, ködös, felhős idővel jellemezhető téli félévben ezek a berendezések érdemben nem dolgoznak, vagyis feltétlenül kiegészítő fűtési megoldást igényelnek. **Az éves energia-hozam tekintetében 600 kWh/(m^2*év)-es energiahozammal számolhatunk, ennek mintegy 70%-a a nyári időszakra esik.**

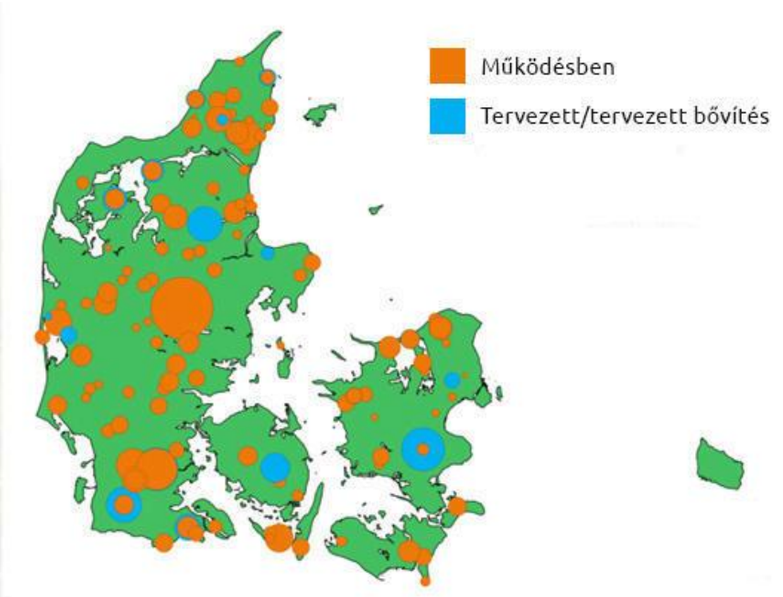


79. ábra. Tipikus napkollektoros rendszer biomassza fűtéssel kombinálva, hazai éghajlati viszonyokra (szerk.: Munkácsy B.)

A kollektor mellett a rendszer fontos része a keletkező használati meleg vizet (HMV) 2-3 napig tárolni képes 150–300 literes **szolárbojler** (79. ábra**)**. Az tárolóeszközbe több hőcserélőt (vagy elektromos fűtőegységet) építenek bele, így – egy másik energiahordozó, például biomassza felhasználásával – elhúzódó rossz idő esetén is megoldható a vízmelegítés. A mi éghajlatunkon a hideg tél miatt alapesetben fagyálló tulajdonságú hőhordozóra van szükség (kivéve az ún. drain-back rendszereket), ezt melegíti fel a napsugárzás. Melegebb éghajlatú területeken lehetőség van olyan berendezések üzemeltetésére is, amelyekben nincs szükség fagyálló tulajdonságú folyadékra, ezért ott a kollektorok közvetlenül a használati célra szánt vizet melegítik, így az egész rendszer lényegesen egyszerűbb, teljes mértékben nélkülözheti a nálunk szükséges elektronikus vezérlést és keringetést. **A világon értékesített napkollektoros rendszerek ~90%-a ilyen egyszerűbb felépítésű, egykörös változat**.

A teljesség kedvéért jelezni szükséges, hogy létezik egy kevésbé elterjedt változata is a napkollektoroknak, amely a napsugarakat napkövető rendszerű **parabolatükör** segítségével, fókuszálva állítja elő a szükséges meleg vizet.

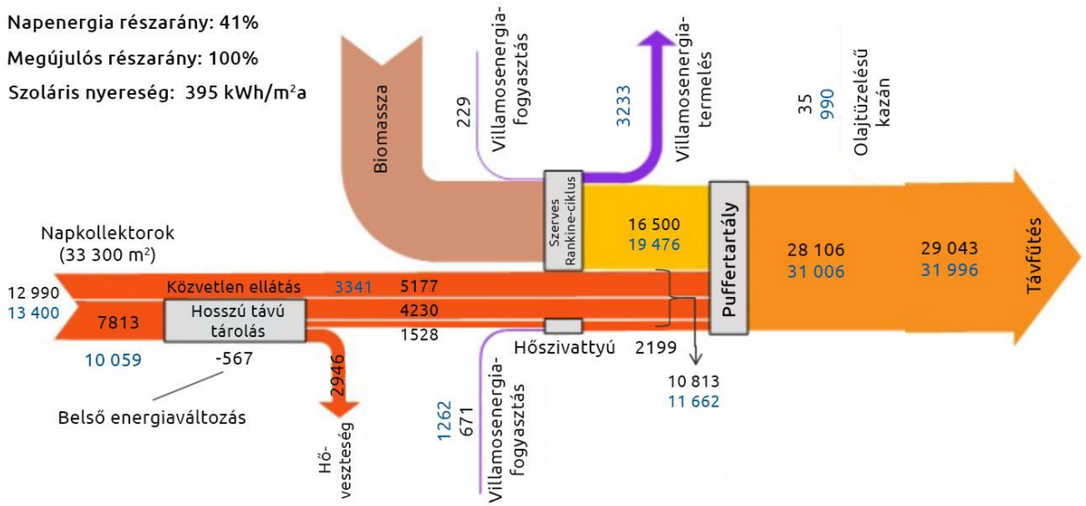
Ha **fűtésre** is használni kívánjuk a folyadékos napkollektorokat, akkor jóval nagyobb felületre van szükségünk. Így két problémával kell számolnunk: **a fűtési szezonban hőenergia nagy mennyiségben történő és hosszú távú tárolásának kihívásával** (tekintve, hogy télen akár hetekig csak gyenge, szórt fény áll rendelkezésre, amikor a napkollektor nem működik) és azzal, hogy **nyáron olyan mennyiségben keletkezik meleg víz, hogy annak értelmes felhasználása már akadályokba ütközik** – hacsak nincsen egy nagy úszómedencénk, aminek a vizét ezáltal temperálhatjuk. Egy másik megoldás, ha a kollektorok segítségével a talajt melegítjük, majd a hőt (akár hónapokkal később) talajkollektoros hőszivattyú révén használjuk fel.



80. ábra. Napkollektoros távfűtési rendszerek Dániában (http://www.folkecenter.net/gb/news/world/solarheating-for-districtheating)

A fenti megoldások igazán nagyban, **távfűtéses rendszerben,** érdekes módon leginkább a kedvezőtlen besugárzási adottságú Németországban és Dániában épültek ki. **Dániában 1988-ban adták át az első jelentős rendszert, ma már az ilyen alkalmazások száma száznál is több, a beépített kollektor felület pedig meghaladja az 1,3 millió m^2-t**. 2016-ban **Silkeborg** térségében helyezték üzembe azt a fűtőművet, ami jelenleg a világ legnagyobb ilyen műszaki létesítménye (a korábbi listavezető csak fele ekkora létesítmény, ám ugyancsak dániai). A 43 ezer fős dán középváros lakosságát kiszolgáló, 156 700 m^2-nyi, mintegy húsz focipálya felületű “napkollektor erdő” látványa kapcsán leginkább az a kérdés merül fel, hogy miképpen lehetett volna egy hasonló létesítményt építeni barnamezős beruházásban, értékes termőterületek feláldozása nélkül. Mindazonáltal, maga a technológia igazán kifinomultnak és korszerűnek számít. A rendszer hőteljesítményét az őszi és tavaszi időszakban hőszivattyúkkal növelik. Kedvezőtlen időjárás esetén egy óriási hőtároló tartály gondoskodik az állandó szolgáltatásról. Nyáron lényegében kizárólag ez a rendszer állítja elő

Silkeborg háztartásainak használati meleg vizét. Viszont éves átlagban a napkollektorok a hőtermelésnek csak a 20-25%-át adják, mert ebbe a rendszerbe nem építettek szezonális hőtárolót. A hőenergia nagyobb részét egyelőre gázüzemű turbina biztosítja. Az előzetes megtérülési számítások szerint ma Dániában az efféle, meglehetősen komplex fűtési megoldások termelik legolcsóbban a lakossági célú hőenergiát – a silkeborgi rendszer például 20%-kal termel gazdaságosabban, mint az eredeti, kizárólag földgáz-alapú szolgáltatás. A továbblépés iránya a szezonális hőtárolás megoldása és a földgáz kiváltása lehet – hiszen Dániában már ilyen paraméterekkel működő napkollektoros rendszerek is vannak, ráadásul ezek is lépésről lépésre fejlődtek, és jutottak el a jelenlegi technológiai szintre, pl. Marstal városában.



81. ábra. Szezonális tározású napkollektoros távfűtési rendszer energiafolyam ábrája (http://www.solarthermalworld.org/sites/gstec/files/news/file/2016-10-03/schmidt_solites.pdf)

82. ábra. A világ legnagyobb napkollektoros távfűtési rendszere a dániai Silkeborgban (http://dk.arcon-sunmark.com)

Fotovillamos hasznosítás

A **fotovillamos rendszerek** napjainkra lettek igazán versenyképesek, ám a napelemek működésének alapelvét – a fotovillamos effektust – *Becquerel*, francia fizikus már 1839-ben felfedezte. Az első, valóban használható, már elfogadható hatékonysággal villamos energiát termelő berendezéseket azonban csak az 1950-es években alkották meg. A napelemeket a magas költségek miatt eleinte szinte kizárólag az űrkutatásban alkalmazták (a földinél kedvezőbb besugárzásnak kitett űrállomások energiaellátására), majd az 1970-es évektől

egyre szélesebb körű polgári alkalmazásai is elterjedtek, napjainkban pedig már – a szélerőművek mellett – évről évre a legnagyobb összteljesítményben a villamosenergia-rendszerbe épülő megoldás az EU-ban (2015-ben 6,9 GW új kapacitás).

83. ábra. A tetőbe integrált napelemes (Building Integrated Photovoltaic) alkalmazás a berlini főpályaudvaron. (fotó: Munkácsy B.)

A fotovillamos rendszerek közvetlenül képesek villamos áramot termelni – akár szórt fényben, felhős időben is. A technikai megoldások sokasága közül a leggyakoribb az elektromos hálózatra termelő **szilícium alapú** fotovillamos rendszer, de számos egyéb alapanyag van már most is használatban (pl. indium, gallium), illetve jelenik meg a közeljövőben (pl. perovszkit ásvány, $CaTiO_3$). Különösen érdekes fejleménye a közelmúltnak az **organikus napelemek** kereskedelmi forgalomba kerülése. Ezzel olyan technológia került elérhető közelségbe, ami a gyártás és hulladékhasznosítás kapcsán jelent előrelépést az eddigi megoldásokhoz képest. Az organikus napelemek a természetes fotozintézist utánozzák, csak a zöld klorofil helyett jellemzően vöröses festékréteg nyeli el a fotonokat és generál elektromos feszültséget.

3. táblázat: A jelenleg kapható legfontosabb napelem típusok és legfőbb jellemzőik

Napelem típusa	Hatékonyság (%)	Élettartam (év)
Szilícium alapú monokristályos	17-24	25-35(-45)
Szilícium alapú polikristályos	15-20	23-27
Amorf szilícium vékonyfilm (a-Si)	8-13	14-17
Réz-indium-gallium-diszelenid vékonyfilm (CIGS)[4]	7-15	10-15
Kadmium-tellurid vékonyfilm (CdTe)	10-15	10-15
Organikus (OPV)	7-8	3-5

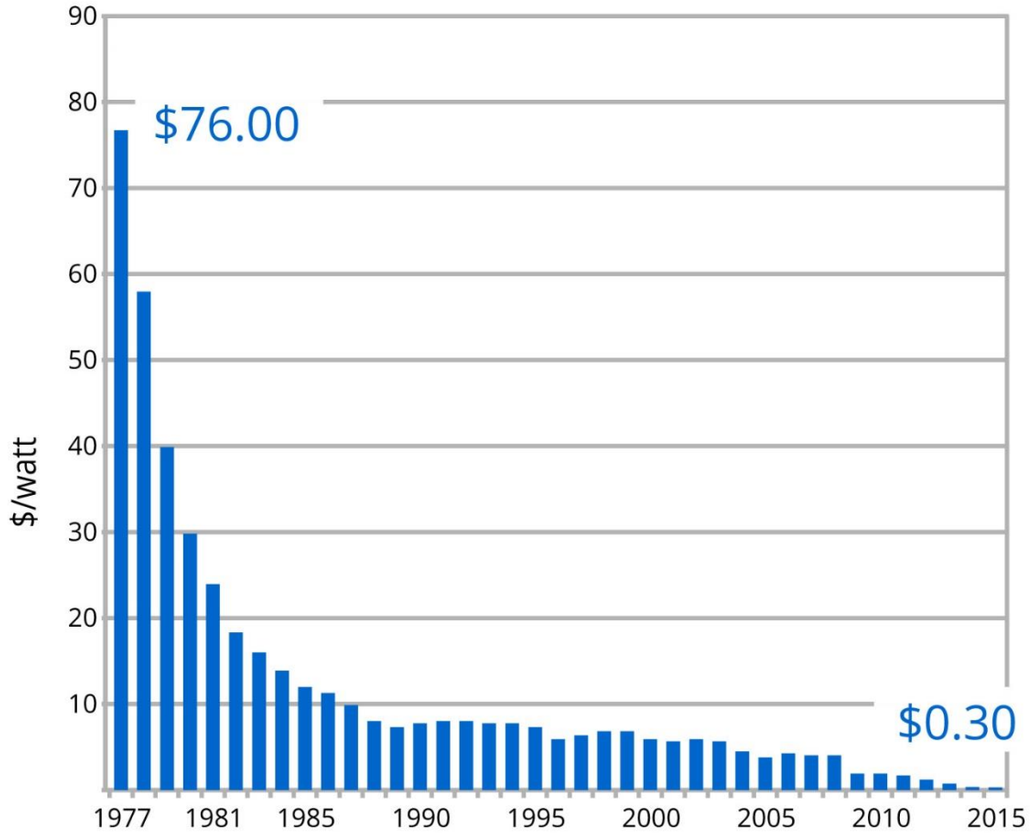
A napelemes rendszerek egyik legfőbb jellemzője, hogy megtermelt villamos energia mennyisége hónapról hónapra változik, és van egy jellegzetes napi termelési görbe is. Akárcsak a napkollektorok esetében, itt is déltájban termelődik a legtöbb áram és a legintenzívebb napsütésű nyári időszak kínálja a legnagyobb hozamot (85. ábra). A jelenleg legelterjedtebb szilícium alapú napelemekkel átlagosan **5,5-6 m²/kW** egységnyi felületre eső teljesítménnyel és hazánkban mintegy **1100 kWh/kW megtermelt átlagos villamosenergia-mennyiséggel számolhatunk évente**, ami 12-13%-os kapacitásfaktort jelent[5]. Ugyanez a mutató a statisztikák alapján az Egyesült Királyságban 9%, Németországban 10%, míg Portugáliában és Spanyolországban 20-30% körüli érték.

[4] A vékonyréteg napelemek, elsősorban a napjainkban felfutó **CIGS** technológia, jobban tűrik a túlmelegedést, így a trópusi területeken kisebb veszteséggel termelnek, mint a szilícium alapú napelemek.

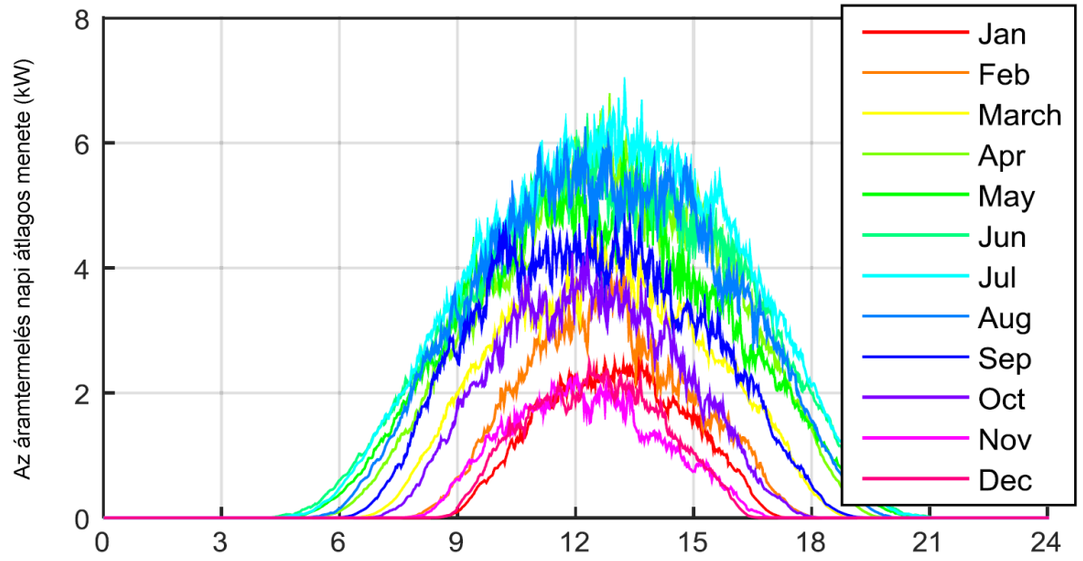
[5] Az alábbi honlapon található kalkulátor segítségével nagy pontossággal becsülhető szinte bármely napelemes rendszer hozama: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php

A fenti ismeretek segítségével vizsgálható, hogy az a régebben sokat vitatott kérdés, hogy a napelemek gyártásához felhasznált energia vajon megtérül-e a működtetési fázisban. Ennek a kérésnek a megválaszolására szolgál a teljes életciklusra számított EROI (lásd a fizikai alapismeretekkel foglalkozó fejezetben), ami a napelem esetében nyilvánvalóan a földrajzi, besugárzási adottságok függvényében alakul, természetesen technológiánként is más-más értéket adva. A legjobb mutatók az organikus és a vékonyfilmes alkalmazásoknál adódnak, az utóbbi esetékben egy dél-európai helyszínen akár 1 év alatti energetikai megtérülésről lehet beszélni. Viszont ugyanez a mutató akár 3,5 év lehet, de akkor már egy kevésbé jó adottságú észak-európai terület és a monokristályos napelem a vizsgálódás tárgya. Összegezve kijelenthető, hogy a mai napelemek, a mai gyártási technológiával, megfelelő tájolás mellett minden esetben képesek sokszorosan visszatermelni a gyártás, szállítás során befektetett energiát.

Az elmúlt évtizedek rohamos árzuhanásának eredményeként a napelemes rendszerek ma az áramtermelés egyik legalacsonyabb költségű megoldását kínálják (86. ábra). A termelt áram sokrétűen felhasználható, így a konkurens napkollektorok az elmúlt években a legtöbb térségben erősen háttérbe szorultak (kivétel jelent a korábban bemutatott dán példa, ahol valóban jelentős napkollektoros beruházások valósulnak meg a távfűtéses rendszerek energiaellátására).

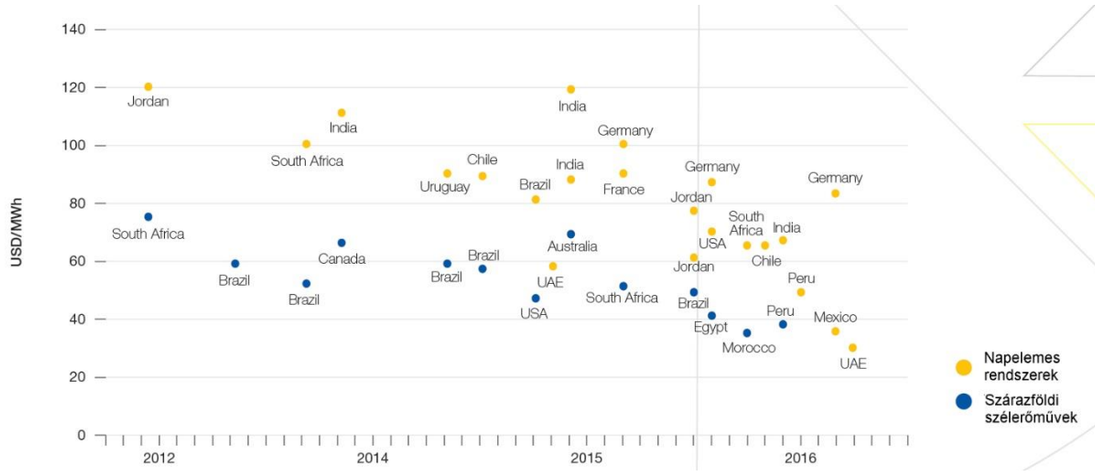


84. ábra. Szilícium alapú napelem árak változása
(https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Price_history_of_silicon_PV_cells_since_1977.svg)



85. ábra. Egy hollandiai 10 kW-os napelemrendszer napi átlagos teljesítményváltozása havi összehasonlításban (Chandra Mouli, G. R. et al. 2016)

A fotovillamos rendszerek kialakításának alapvetően háromféle megközelítése lehetséges: a) szigetüzem; b) hálózatra kapcsolt üzem; c) az előző kettő előnyeit ötvöző vegyes üzem. Az ezredfordulóig nagyobb szerepe volt a **szigetüzemű** alkalmazásoknak, amelyek a villamos hálózattól távol eső helyeken valósultak meg, ahol más megoldás nem tette lehetővé az elektromos áramhoz való hozzáférést (pl. tanyák, vadászházak, magashegyi turistaszállások). Az ezredforduló környékén a napelemes rendszerek ára már olyan mértékben lecsökkent, hogy gazdaságilag is racionális döntéssé lépett elő akár a villamos hálózat közelében, arra **rácsatlakozva** is a napelemes-rendszerek telepítése. Az elmúlt években újabb fordulat következett be, amennyiben az **akkumulátoros energiatárolás** ára ért el olyan alacsony értéket, amelynél újra szigetüzemű alkalmazásokban lehet gondolkodni – akár a villamos hálózat közvetlen szomszédságában is, ráadásul választható módon, akár teljes, akár részleges függetlenséget biztosítva a központi hálózattól. Ez a lehetőség a rugalmas árképzés, a smart grid, a V2G (vehicle-to-grid, lásd korábban) megoldások együttes alkalmazásával akár már középtávon, 5-10 éves távlatban, futótűzszerű gyorsasággal terjedhet a gazdagabb országokban.



86. ábra. A napelemes és szélerőműves rendszerek árváltozása földrajzi kitekintésben az egységnyi áramtermelésre vetítve (USD/MWh) – ezek napjaink legolcsóbb technológiái közé tartoznak az áramtermelésben (Schmela, M. 2016)

Az árzuhanás és a technológiai fejlődés másik következménye a napelemekkel kapcsolatos területi tervezés újragondolásának irányába mutat. A napelemeket egészen a közelmúltig törvényszerűen ideális tájolással a déli irányba igyekeztek beállítani, hiszen ezzel lehetett elérni az egységköltségre eső legnagyobb bevételt. Ennek speciális módja a napkövetés (87. ábra), amely valóban optimális megoldás a besugárzás szempontjából, ám jelentős gépészeti többletköltséget jelent mind a telepítés, mind az üzemeltetés során. Ez a – különben látványos és érdekes – megoldás a napelemek árának zuhanásával egyre inkább háttérbe szorul.

87. ábra. Napkövető rendszer, Újszilvás (http://www.utikalauz.hu/print.php?id=1474)

88. ábra. Napelemes rendszer déli tájolással (fotó: Munkácsy B)

A fix telepítésű rendszerek esetében a déli tájolás volt a leginkább kézenfekvő (88. ábra). Azonban mindkét eddig tárgyalt esetben probléma volt, hogy az árnyékolás miatt jelentős felületek maradtak kihasználatlanul. Ennek a területhasználati kihívásnak a megoldására elsősorban az állattartással alakult ki egyfajta kooperáció. A gyakorlatban leginkább juhokat terelnek az efféle területekre, amivel egyfelől a kaszálás költségei is csökkenthetők, másfelől megvalósul ezeknek a területeknek a komplex hasznosítása (89. ábra).

89. ábra. A napelemekkel borított terület komplex hasznosítása, Egyesült Királyság, Crocadon Farm, Halwell (http://www.lightsource-re.ie/news/land-diversification-project-could-graze-sheep-and-produce-solar/)

Az elmúlt 2-3 év fejleménye, hogy a zöld vagy barnamezős telepítésű, nagyobb teljesítményű napelem rendszerek esetében gazdaságilag racionálisabb döntésnek tűnik a napelemek nyugati és keleti tájolása (90. ábra), mert így 75%-kal nagyobb napelemfelület, vagyis ~75%-kal nagyobb teljesítmény kerül egységnyi területre. A kedvezőtlenebb (nem déli) tájolásból fakadó alacsonyabb termelést figyelembe véve a nagyobb rendszerteljesítmény miatt ezzel a megoldással összességében 40-45%-kal nagyobb energiahozam érhető el egységnyi területen. Ugyanakkor ennek az új tendenciának kétségkívül komoly hátránya, hogy ezáltal az értékes termőterületek lényegében teljesen hasznosítatlanul maradnak, zöldfelületek vesznek el (90. ábra).

90. ábra. Napelemes rendszer keletre és nyugatra tájolt napelem-felületekkel, Tibolddaróc (fotó: Munkácsy B.).

Éppen ezért a fenntartható energiatervezésben elsősorban a **már meglévő infrastruktúrához közvetlenül kapcsolható** fejlesztési lehetőségeket kell elsősorban figyelembe venni, ezáltal a napelemes rendszerek nem szorítanak ki más értékes tevékenységeket, nem vesznek el termőterületet. Ráadásul semmi nem is indokolja, hogy a zöldterületeket így hasznosítsuk, hiszen az épületek tetőfelületei, valamint a vasútvonalak és autópályák menti területek önmagukban is igen jelentős lehetőséget jelentenek. A lakott területek közelében húzódó közlekedési pályák jelentik ebből a szempontból az optimális lehetőséget, mert a) egyfelől közel vannak a fogyasztókhoz, így egészen kevés veszteséggel megoldható a villamos energia szállítása; b) a napelemes rendszere révén megoldható a lakott területek zajvédelme.

91. ábra. Az autópálya fölött kialakított napelemes rendszer Hösbach (Németország) térségében (http://www.oksolar.com/media/commercial-building-rooftop-solar-power-system.html)

Ez utóbbinak két módja is lehetséges: az első esetben egyszerű **zajvédő falak** építése történhet (amelyre már most is számos példa van Németország és Ausztria területén), a második esetben az egész pálya egy **mesterségesen kialakított alagút**ba kerül (91. ábra), ezáltal még határozottabban elválasztva a két területhasználati funkciót. Mindkét megoldás alkalmazhatóságának szempontjából jelentős technológiai fejlemény a **mindkét oldalán fényérzékeny felületű napelemek megjelenése** (92. ábra), ahol az albedó függvényében többlet energiahozammal számolhatunk. A jelenlegi alkalmazások 30%-os albedónál (pl. füves terület) ~17%-os, míg 80% albedónál (pl. fehérre festett mesterséges felületek esetében) ~29%-os többlet villamos energia termelését teszik lehetővé.

92. ábra. Kétoldalas napelem a müncheni Intersolar 2016 kiállításon (fotó: Munkácsy B.)

A napelemes megoldások esetében kulcskérdés az árnyékoló hatások kivédése. Ennek oka, hogy alapesetben a napelemtáblákban található cellák és maguk a táblák is sorba vannak kapcsolva, ami a gyakorlatban azt jelenti, hogy egyetlen napelemtábla 5%-os árnyékolása a teljes rendszer ~90%-os teljesítménycsökkenését okozza, mert mindig a leggyengébb láncszemhez igazodik a többi modul teljesítménye. Műszaki megoldás természetesen van a helyzet kezelésére, de ez jelentősen megdrágítja a beruházást, ezért általában nem alkalmazzák. Különösen problémás a kelet és nyugat felé tájolt rendszerek esete, mert ezeknél nagyobb árnyékvetéssel kell számolni.

93. ábra. A települési környezetben megjelenő napelemek és az oda nem való fafajok konfliktusa: a keleti oldalon még a magas iskolaépület tetején lévő napelemek is szinte folyamatosan árnyékban vannak (fotó: Munkácsy B.)

További gyakorlati jelentőségű probléma, hogy az árnyékolás miatt kieső villamos áram sok esetben nem is okoz fejtörést az üzemeltetőnek, mert a) esetleg nincs róla tudomása, hiszen

például az oktatási intézmények központosítása miatt az iskolák nem is kapnak ilyen gazdasági jellegű visszajelzést (több konkrét eset van erre az országban); b) nem is szempont a megtérülés, mert a beruházás pályázati támogatásból valósult meg, így az üzemeltető nem is érdekelt a szakszerű telepítésben és működtetésben.

Tényleges megoldás lehet a napelemek és a "nem települési környezetbe való fák" ilyen konfliktusára az érintett fák visszavágása vagy cseréje. Számos kisebb-nagyobb kutatóintézet foglalkozik ugyanis **kifejezetten települési környezetbe való (szárazságot, szennyezett levegőt jobban tűrő), alacsony növésű, ám terebélyes lombkoronájú fajták nemesítésével**, célszerű volna az ott felhalmozott innovációt és tudást felhasználva települési környezetben ezek ültetését preferálni. A gyakorlatban az önkormányzati vezetők a népszerűségvesztés kockázatát látják az öreg fák cseréjében, így a tapasztalat szerint inkább nem foglalkoznak a problémával.

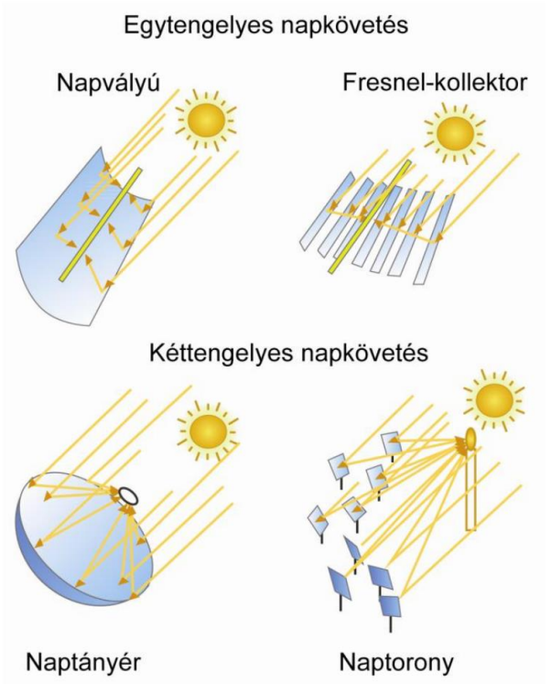
Egy másik kihívás az elkoszolódás, ami helyi túlmelegedést, és úgynevezett „hot-spot" kialakulását eredményezi a napelemtáblán, ami viszonylag rövid időn belül a cellák repedését okozza! Különösen ott van szükség ennek orvoslására, ahol a madarak nagyobb számban fordulnak elő (lásd madárürülék okozta hot-spot), illetve a napelemek dőlésszöge kisebb, így esőzések idején az öntisztulás nem történik meg.

Termovillamos áramtermelés

A villamos energia előállítása nemcsak napelemekkel, hanem hőenergia-alapú, úgynevezett **termovillamos** (Concentrated Solar Power, CSP) megoldásokkal is történhet. Ezek kiindulási pontja, hogy **a napsugárzást fókuszálva több száz °C-os hőmérsékletet állítanak elő**. Második lépésben hagyományos módon **folyadékot forralnak**, majd egy **gőzturbina segítségével elektromos áramot termelnek**. Ezek a megoldások a **naptorony** (solar power tower), **napvályú** (solar trough), és a **Fresnel-kollektor**. Egy egészen más irány, ha az ún. **Stirling-motor** (külső hőbevezetésű hőerőgép) segítségével alakítják a hőt villamos árammá **naptányérok** (solar dish) alkalmazásával. A rendszereket az alapján is csoportosíthatjuk, hogy a **napkövetés** hány tengely segítségével történik – **két tengely esetében teljes napkövetés** valósul meg (naptányér, naptorony), míg **egy tengely esetében csak részleges** (napvályú, Fresnel-kollektor) (94. ábra).

A koncentráló technológiák előnyei a napelemes megoldásokhoz képest az alábbiak:

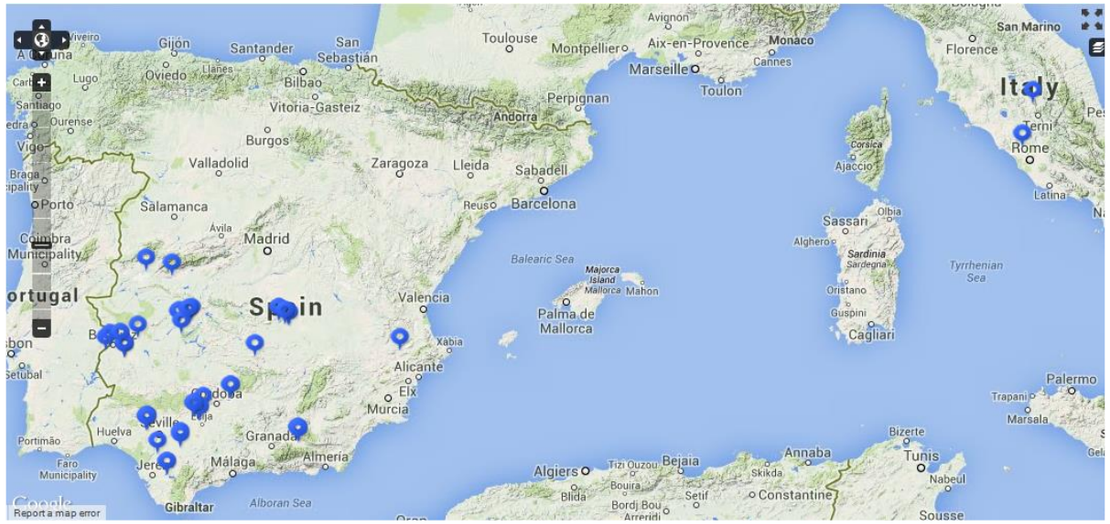
- Kevés nehezen hozzáférhető alapanyag felhasználása;
- Kevésbé sérülékeny műszaki megoldás (pl. kevésbé érzékeny az elkoszolódásra);
- Forró övezetben is jól alkalmazható, mert nem gond a túlmelegedés.



94. ábra. Termovillamos naperőművek műszaki megoldásainak vázlatos áttekintése (WEC 2007. alapján)

Az egységnyi területre jutó teljesítmény szempontjából a sík tükrökből épített Fresnel-kollektoros megoldás tűnik a leginkább hatékonynak, hiszen egységnyi területre jutó áramtermelésben eléri a fotovillamos rendszerek mutatóját, míg a napvályú ennek kétharmadát, a naptorony és a Stirling-motoros parabolatükör ennek felét biztosítja. A termovillamos rendszerek leginkább a **trópusi-szubtrópusi térség** számára kínálnak gazdaságos áramtermelési lehetőséget (95. ábra). A világon a legnagyobb termovillamos teljesítmény Spanyolországban épült ki (~2400 MW), ami lényegében megegyezett a világ összes többi országának összesített CSP teljesítményével 2016-ban! A napelemekkel összevetve: a jelenleg működő napelemes rendszerek összteljesítménye körülbelül ötvenszer akkora, mint az összes termovillamos berendezés együttes teljesítménye.

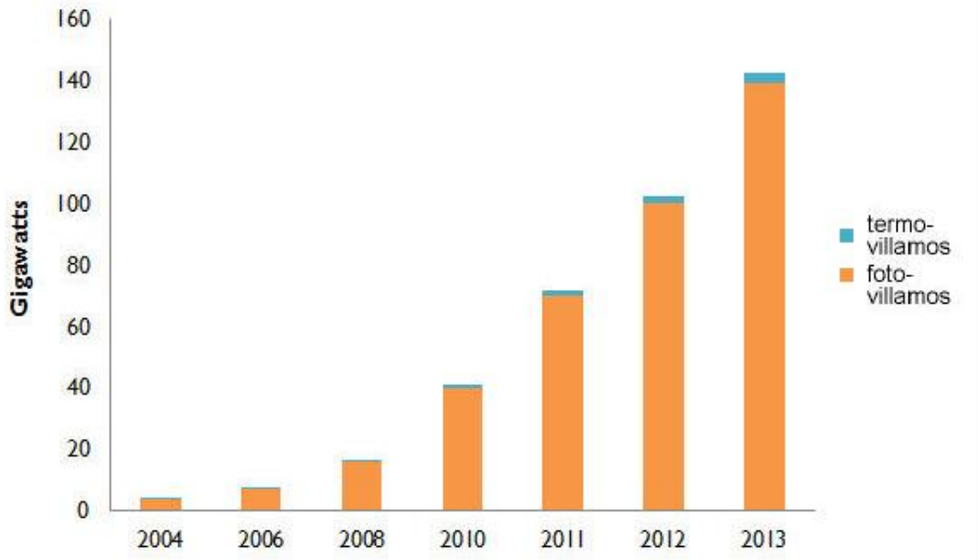
95. ábra. A világon jelenleg működő 64 darab napvályús termovillamos rendszer földrajzi elhelyezkedése (www.cspworld.org)



96. ábra. A napvályús technológia áramtermelő berendezései Európában (www. cspworld.org)

A különféle fókuszáló termovillamos megoldások elterjedtsége gyorsan változik. Általában bővülés történik, ám a naptányérok alkalmazásánál a próbaprojektek nem bizonyultak eredményesnek, ezért ebben a szegmensben csökkent a gépek száma. Összességében a globális helyzetkép az alábbiak szerint alakult 2015 végén:

- Napvályú: 64 berendezés;
- Elnyelőtorony: 35 berendezés;
- Fresnel-kollektor: 8 berendezés;
- Naptányér Stirling-motorral: 1 berendezés.



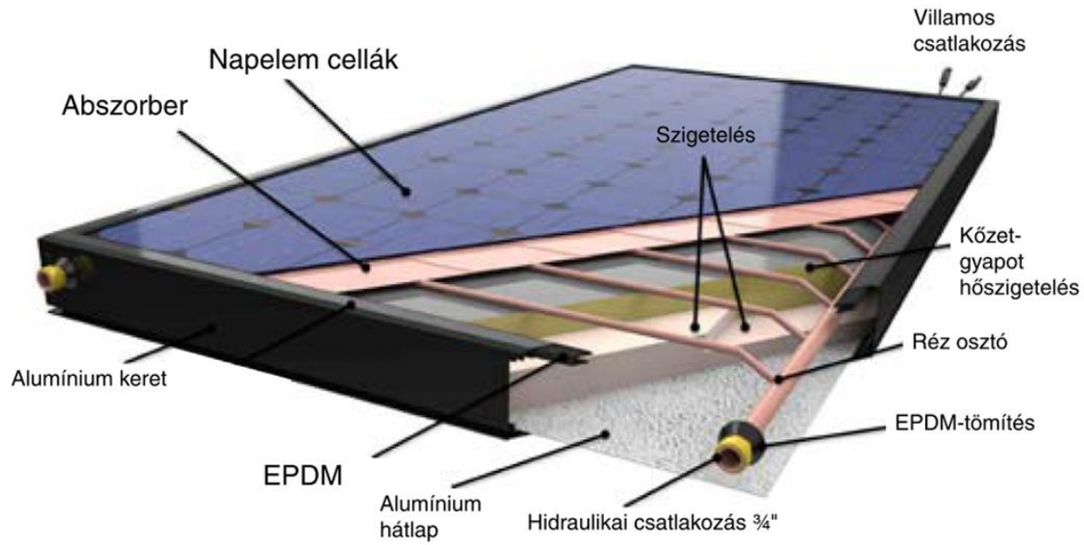
*97. ábra. A termovillamos és fotovillamos teljesítmény növekedése a világban – 2015-re a fotovillamos kapacitás elérte a **227 GW**, a termovillamos megközelítette az **5 GW** villamos teljesítményt (http://vitalsigns.worldwatch.org/vs-trend/solar-power-installations-jump-new-annual-total)*

A termovillamos megoldások elterjedését felgyorsíthatja az a 2011-ben megjelent technológiai fejlesztés, amely a **hő tárolása** révén lehetővé teszi a felhőátvonulásos időszakokban is az egyenletes áramtermelést. Sőt, a jelenlegi rendszerek akár az éjszakai órákban is képesek az áramellátás biztosítására. Az első ilyen rendszert Spanyolországban üzemelték be, az alábbi technikai paraméterekkel rendelkezik:

- névleges teljesítmény: 20 MW (a közeljövőben várhatóan 100 MW-os nagyságrend);
- hőtárolás olvadt só (400-500 °C) formájában;
- napsütés hiányában 15 órás folyamatos üzem;
- éves áramtermelés: 80 GWh/év, ami 45%-os kapacitásfaktort jelent.

Hibrid napenergia hasznosítás

A napenergia hasznosítás egyik kevéssé ismert területe **a napkollektoroknak a napelemekkel történő házasítása, a hibridkollektor (PV/T)** (98. ábra). Ennek a megoldásnak a segítségével adott felületről egyszerre nyerhető hő és villamos energia, ez utóbbi akár 15-20%-kal nagyobb mennyiségben, hiszen a megoldás alapötlete a túlmelegedő napelem-felület visszahűtésével az áramtermelés fokozása (hiszen a hagyományos szilícium alapú napelemek hatásfoka 0,2-0,4%-kal csökken 1 °C hőmérséklet-emelkedésnél). A műszaki megoldás elterjedésével főként a lakossági szektorban számolhatunk, hiszen ott egyszerre jelentkezik hő- és villamosenergia-igény. Alkalmazásuk korlátja a **nagy mennyiségben keletkező meleg víz vagy meleg levegő**, ugyanis ezt nyári időszakban nem könnyű észszerű módon felhasználni, szállítása pedig csak korlátozott távolságban gazdaságos.



98. ábra. Folyadékos napkollektor és napelem kombinációja (ezermester.hu)

A biomassza energetikai hasznosítása

A hőenergia termelésében hosszú évszázadokon át a biomassza felhasználása volt egyeduralkodó. Még mindig meghatározó szerepet játszik a Föld egyes szegény térségeiben, ugyanakkor a gazdag országokban is újra egyre nagyobb jelentőségre tesz szert – hála a nagy hatékonyságú és tiszta égést biztosító faelgázosításnak, a kényelmes pellet- és aprítéktüzelésnek, valamint a biogázas alkalmazások és bioüzemanyagok terjedésének. A fentiekből következően a biomassza energetikai hasznosítása kapcsán az igen sokszínű felhasználási lehetőségekre kell asszociálnunk: ez a megújuló energiaforrás az energetika minden területén (hő- és villamosenergia, valamint közlekedési energiafelhasználás) rendelkezésünkre áll. Egy másik kulcsfontosságú általános jellemzője, hogy időjárástól függetlenül hozzáférhető, hiszen **tulajdonképpen a napenergia elraktározott formájáról van szó**. Ennek a tulajdonságnak a jövőben lesz igen nagy jelentősége, amikor a különféle időjárásfüggő megoldások (naperőművek, szélerőművek) villamos hálózatba illesztése – a várhatóan hatalmas kapacitás miatt − a jelenleginél komolyabb rendszerirányítási kihívást jelent majd.

A megújuló energiaforrások közül a biomassza az egyik, amelynek megítélése nem egységes. Sokan vannak, akik alkalmazását nem tekintik sem környezetkímélőnek, sem megújulónak, ami egyes konkrét projektek (például nagy teljesítményű biomassza-tüzelésű hőerőművek) esetében nehezen kérdőjelezhető meg. Általánosságban azonban ennél árnyaltabb megközelítésre van szükség, amire a magyarázat a biomassza-tüzelőanyagok és a felhasználásukra létrehozott technológiák sokféleségében rejlik.

Tipizálásuk többféleképpen történhet. A környezeti szempontból legfontosabb csoportosítás szerint megkülönböztethetjük **a) a hulladékalapú és b) az energetikai célra termesztett biomasszát**, illetve ezek felhasználását. A **hulladék bázisú** biomassza hasznosítása − az előnyös hulladékgazdálkodási vonatkozásai okán − igen fontos irány. Ugyanakkor tény, hogy ma még a bioenergia nagy részét nem a hulladékok ártalmatlanítása során nyerik ki, hanem a kifejezetten az **energetika céljaira erőforrást termelő erdő- és mezőgazdálkodás** termékeiből. Ennek vannak előnyei, hiszen alternatívát nyújt a gazdálkodóknak az Európai Unióban jelentkező mezőgazdasági-élelmiszeripari túltermelés kapcsán. Egyes nehezebben értékesíthető élelmiszeripari termékek termesztése helyett, részben át lehet állni energetikai növények termesztésére, aminek lakosságmegtartó és vidékfejlesztő hatása van – és ez kontinensünk számos vidéki térségében egyre határozottabban felértékelődő szempont. Ugyanakkor a területi korlátok feszültségeket generálhatnak: a bioüzemanyagok részarányának növelésére komoly célokat írt elő az EU, így elképzelhető, hogy néhol számolni kell a termesztésben az egyes agrártermékek között területi feszültségekkel is.

A problémakör azonban ennél nyilvánvalóan bonyolultabb, hiszen az **energetikai önrendelkezés**, mint cél, minden ország számára kétségkívül stratégiai fontosságú (kellene legyen) – ebben pedig a biomassza, hazai erőforrásként, hasznos segítséget ad. Ráadásul nem csak mennyiségi, hanem minőségi értelemben is, hiszen számos formában jól tárolható (akár napi ciklusban, akár szezonálisan), a felhasználása pedig több alkalmazás esetében is jól igazítható a rendszer pillanatnyi igényeihez – a termelő egységek gyorsan, akár néhány másodperc alatt fel- és leszabályozhatók (pl. gázmotorok).

Mindazonáltal **az ültetvényes jellegű, monokultúrára és intenzív energia- és vegyszerhasználatra építő jelenlegi gazdálkodási mód hosszú távon nem fenntartható, az erre támaszkodó energiarendszer bizonyosan tévút**. A talaj minősége és termőképessége szempontjából az is aggasztó, hogy a legtöbb esetben a **szerves anyag** túlzottan nagy részét viszik el a termőterületről. Így ezek a megoldások csak ideiglenesen jelenthetnek elfogadható alternatívát a fosszilis vagy nukleáris alapú technológiákkal szemben – leginkább addig, amíg a hatékonysági intézkedések révén és a többi megújuló alapú technológia fejlődésével ezeket már középtávon sikerül kiváltani.

A biomassza, mint energiaforrás, a **halmazállapot szerinti csoportosítás**ban:

- szilárd biomassza
  - a fenntartható gazdálkodásból származó (tartamos erdőgazdálkodás termékei és a mezőgazdálkodás melléktermékei);
  - az energetikai ültetvényekből származó;
- folyékony biomassza (kifejezetten energetikai célú monokultúrás ültetvényeken);
- biogáz (jó esetben mezőgazdasági, élelmiszeripari és kommunális eredetű szerves hulladékok feldolgozásával).

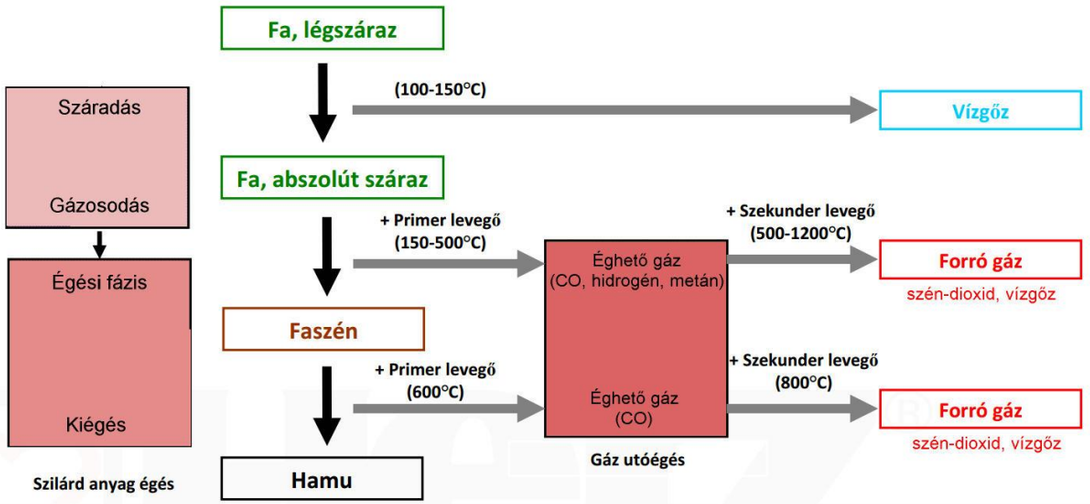
Amint az már az eddigiekből is látható, a biomassza igen sokrétűen, sokféle technológiával, szinte minden léptékben – a tenyérnyi eszközöktől a GW-os léptékig –, az energetika minden szegmensében felhasználható. A környezeti fenntarthatóság nézőpontjából alapelvként ez esetben is a lépték fontosságát kell hangsúlyozni, ugyanis például a hőerőművek esetében nehezen képzelhető el 10 MW-os villamos teljesítmény fölött a kapcsolódó hőteljesítmény (20-25 MW_{th}) értelmes hasznosítása (lásd: kogeneráció), enélkül pedig csak igen alacsony rendszerhatékonyság érhető el, tehát az erőforrás pazarlása következik be. Ugyanez igaz a közlekedésben is. Ráadásul bioüzemanyagot használni önmagában nem tekinthető környezetvédelmi szempontból elfogadható iránynak, ha túlzottan nagy tömegű autók (városi „terepjárók") meghajtásáról, vagy indokolatlan szállításról, utazásról van szó.

99. ábra. Nagy hatékonyságú kogenerációs minialkalmazás (http://www.bioliteenergy.com)

Szilárd biomassza

A szilárd biomassza hagyományos felhasználási módja alapesetben a **tűzifa** égetését jelenti. A fatüzelés 3 alaplépésben történik: 1) fa hevítése és a nedvesség elpárologtatása; 2) fagáz felszabadulása és égése; 3) faszén égése. A felhasználás igen sokrétű lehet mind méretben, léptékben, mind pedig a technológia tekintetében. **A környezeti fenntarthatóság és a gazdaságosság szempontjából** az alábbi elvek figyelembe vétele lényeges:

- a tűzifa származási helye **legfeljebb 30-40 km** távolságban;
- hagyományos technológiáknál (háztartási alkalmazásoknál) **csak száraz fa** használható (20% alatti nedvességtartalommal);
- a fahasábok vastagsága maximum 5-10 cm lehet (a minél nagyobb reakciófelület érdekében);
- a **faelgázosítás** keretében törekedni kell az égés során keletkező fagáz minél teljesebb felhasználására, ennek érdekében **kétszer kell levegőt adagolni** a folyamathoz: az első lépésben a **primer levegő** adagolásával **fagáz** keletkezik (1 kg fa és 1,5 m^3 levegő felhasználásával 2,5 m^3 fagáz). **1 kg fából nyert fagáz fűtőértéke 3,1-3,6 kWh**. A fagáz égetése alapesetben **szekunder levegő** adagolásával történik, de ipari alkalmazásoknál a levegő helyett segédgázként vízgőzt, vagy szén-dioxidot alkalmazva mind a fűtőérték, mind átalakítás hatékonysága növelhető (akár 95%-os tüzeléstechnikai hatásfokra). A fagáznak a következő alkotói vannak:
  - ~50% N_2
  - ~27% CO
  - ~14% H_2
  - ~4% CO_2
  - ~3% CH_4
- a jó minőségű égés eredményeként **gyorsan felszabaduló hőenergia tárolásáról** mindenképpen gondoskodni kell. Alapesetben ennek egyik módja egy nagyobb méretű forróvíztartály, ahol minimum 1000 liter 80 °C-os víz tárolása történik; másik módja, amikor maga a kályhatest végzi a hőtárolást (cserépkályha, tömegkályha – 1500-3000 kg **samott** tégla akár 200-300 °C-ra felmelegítve). Ipari léptékű rendszereknél egyre gyakrabban kerül sor sóoldatos **fázisváltó tárolók** alkalmazására (így a halmazállapotváltásból fakadó többlet tárolási kapacitással is számolni lehet).

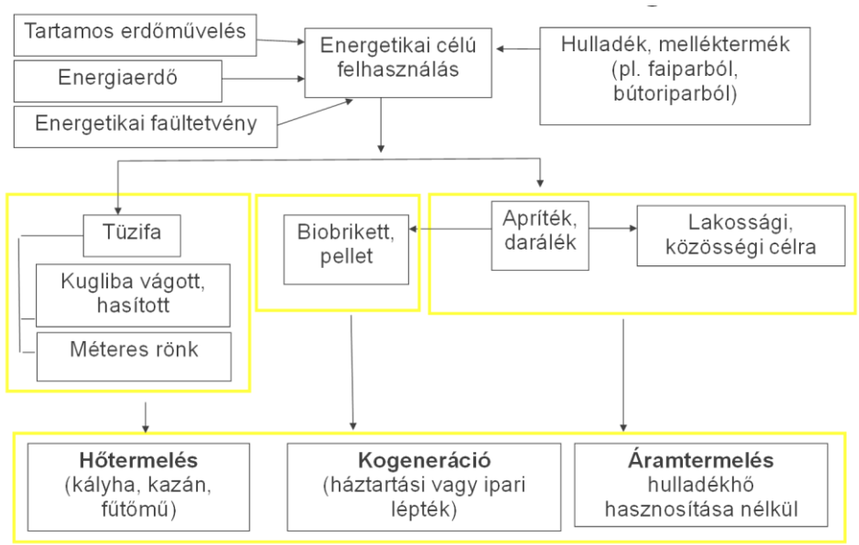


100. ábra. A faelgázosítás folyamatábrája (szerk. Munkácsy B.)

A tűzifa esetében a **lényeges szempont nem a fafaj, hanem a tüzelőanyag nedvességtartalma**. Frissen kivágott, 50% körüli nedvességtartalom esetében az fában elraktározott energia jó része **a víz párologtatására fordítódik** (bár erősen tartja magát az a nézet, hogy ez az akácra nem érvényes, az vizesen is jól égethető, de a fizika törvényei alól az akác éppen úgy nem kivétel, mint a többi fafaj). Általánosságban kijelenthető, hogy míg a friss tűzifa fűtőértéke 2 kWh/kg, az **egy-két évig jól szellőző helyen, felhasogatva pihentetett légszárazé 4-4,5 kWh/kg** is lehet.

101. ábra. A pellet: 1 kWh energia egy tenyérnyi csomagban – a kereskedelmi forgalomban nem ilyen 0,2 kg-os, hanem jellemzően 15 kg-os zsákokban kapható

A fatüzelés korunkban egyre gyakrabban valamiféle jobban feldolgozott, energiaigényesebb gyártási folyamatban előállított másodlagos energiahordozó (brikett, pellet) égetését jelenti. Ennek legfőbb előnye, hogy megvalósítható az automatizált égetés, így akár heteken keresztül emberi beavatkozás nélkül képes a rendszer a fogyasztók igényeinek pontos követésével a szükséges hőenergiát biztosítani. Hátránya a tüzelőanyag előállításának magasabb energiaigénye, ami egy-egy projekt esetében az energetikai megtérülés szempontjából feltétlenül a teljes életciklusra vizsgálandó.



102. ábra. A szilárd biomassza (tűzifa) felhasználásának energialánca az ellátási fázisig (szerk. Munkácsy B.)

A 102. ábra különféle megoldásainak fenntarthatósági szempontú megítélése nagyban függ a fenti folyamatok energiaigényétől. Ennek megítélése alapos életciklus-elemzést igényel, ahol a biomassza megtermelésének, a különféle szállítási és feldolgozási folyamatoknak, majd az energetikai hasznosítás energetikai mutatóinak a segítségével válnak összehasonlíthatóvá a különféle megoldások. A tanszékünkön végzett számítások eredményei alapján következtetésként összegezhető, hogy elengedhetetlen:

- a gazdálkodás energiaigényének minimalizálása (a hagyományos erdőművelés előtérbe helyezése az energiaigényesebb energiaerdőkkel, vagy méginkább energetikai faültetvényekkel szemben);
- a beszállítási távolság minimalizálása;
- a feldolgozási tevékenységek minimalizálása (pl. a pellet helyett apríték, vagy lehetőség szerint hasábfa használatával);
- a hasznosítás hatékonyságának maximalizálása (pl. kogenerációval vagy trigenerációval).

103. ábra. A faelgázosítás elvén működő kogenerációs erőmű (2 MW_p + 4,5 MW_{th}) Güssingben, amely igény szerint a fából szintetikus bioüzemanyagot és biogázt (Synthetic Natural Gas) is előállít. Figyeljünk a léptékre! (http://wiki.peaproject.eu/)

A **háztartási léptékű felhasználás** lényegében a fűtési és HMV-termelési célú alkalmazásokra terjed ki. Ma már ezen a téren is az eszközök óriási tárháza áll rendelkezésre, de alapvetően három megoldás kínálkozik:

a) az egyedi fűtőberendezések, amelyek „low-tech” lehetőséget kínálnak egy-két szoba fűtésére (pl. „folytonégő” kandallókályha, cserépkályha, tömegkályha);

b) a központi fűtéses megoldások, amelyek lényegesen bonyolultabbak, de egy osztott alaprajzú lakást is képesek kifűteni (faelgázosító kazánok, pelletkazánok, szalmabálás kazán);
c) ezek kombinációja (vízteres kandallók; a legújabb, hazai fejlesztésű hőcserélős tömegkazánok).

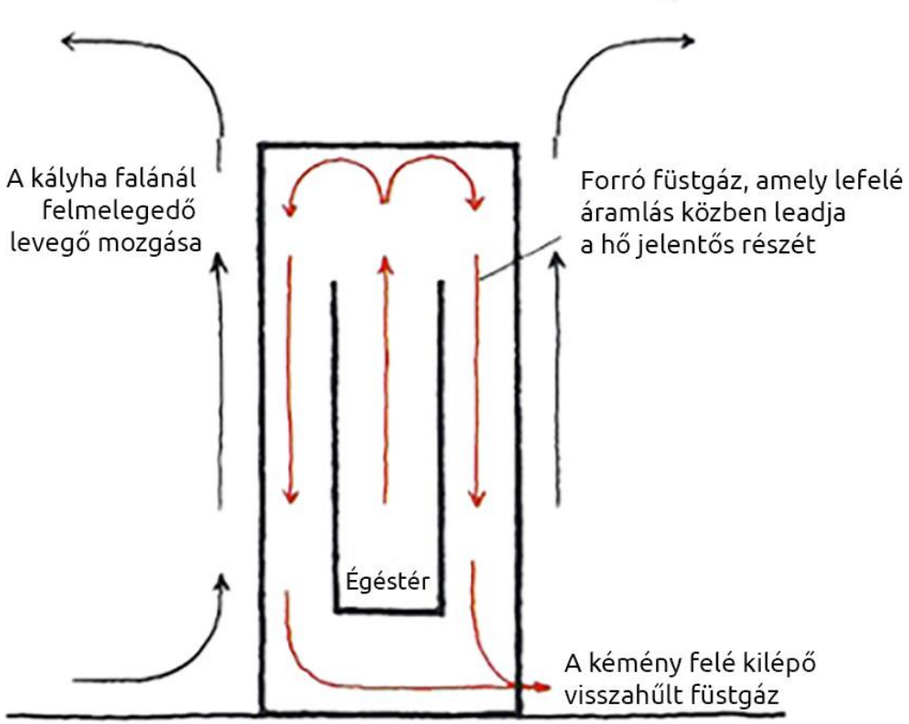
A másodlagos levegő adagolásával és száraz, 20% alatti nedvességtartalmú tüzelőanyag felhasználásával a háztartási fatüzelés hatásfoka is elérheti a 85-90%-ot. Ez esetben is fontos feladat a hirtelen felszabaduló nagy mennyiségű hőenergia tárolásának megoldása. Ennek hazánkban az egyik kevéssé ismert módját képviseli a **tömegkályha**.

104. ábra. Használati meleg víz készítésére is alkalmas tömegkályha (fotó: Munkácsy B.)

A tömegkályha

Az észak-európai fűtési kultúrában az első évezred végétől, a rönkházak megjelenésével tűntek fel az első hőtároló funkcióval rendelkező kőből rakott tűzhelyek, melyeket később sütési, főzési célra használható boltozatos tűztérrel láttak el. Ezt a megoldást használta a legtöbb család egészen a 19. század közepéig. Időközben – a 15-16. században – a fa, mint energiaforrás a növekvő háztartási és ipari felhasználás következtében Európa egyre több térségében kezdett hiánycikké válni, és ez takarékosabb kályhák fejlesztésére ösztönözte a kontinens lakóit. Például a cserépkályhákba járatokat építettek, és ezzel sikerült a kályhák hatékonyságát jelentősen javítani. Svédországban és Finnországban a függőleges füstjáratok különböző variációit alkalmazták sikeresen, míg Közép- és Kelet-Európában inkább a vízszintes járatokat használták, és használják napjainkig szívesebben.

Északon a sokjáratú kályhák szerkezetét tovább finomították azáltal, hogy az égéstérben felfelé áramló gázokat több párhuzamosan lefelé vezetett járat segítségével a **padlószinten vezették a kéménybe**. Ezzel megszűnt a felső kéménycsatlakozásnál a kályha hőmozgásából adódó feszültség, amely korábban a csatlakozás repedéséhez, töréséhez vezetett, nem ritkán tüzet okozva. A megoldás az „**ellenáramlású**” (Contraflow) jelzővel írható le, hiszen a kályha belső oldalain lefelé áramló gázok a padlószint felé közelednek, miközben fokozatosan hűlnek, míg a kályha külső felületén a helyiség lassan felmelegedő levegője felfelé áramlik. A kályha bármely magasságában hasonló a hőmérséklet-különbség a felfelé áramló, melegedő levegő és a kályha lefelé hűlő felülete között, így csak egy lassabb **konvekciós** áramlás alakul ki, sokkal inkább a szerencsésebb **sugárzásos hőleadás dominál**. Az eredendően svéd fejlesztésű „ellenáramlású” rendszer Finnországban is gyorsan elterjedt. Mivel a finnek a fatüzeléssel az olcsó olaj korszakában sem hagytak fel, olyan értékes szakmai hagyományokat őriztek meg, amikhez aztán a hetvenes években kezdődő olajhiánytól kezdve mind többen térhettek vissza. Napjainkban évente mintegy 20 000 kályhát és több ezer sütőt, tűzhelyet **építenek** az országban, ezáltal inkább a helyi tudást és mesterembereket támogatják, mint a nagy tőkés társaságokat.



105. ábra. A tömegkályha felépítése

A mai, korszerű tömegkályha három fő részből áll: a belső magból, melynek anyaga samott, a leszálló füstjáratból, és a burkolatból – utóbbiak anyaga általában kisméretű tégla. Tömege 2,5-4,5 tonna közötti, amely lehetővé teszi a rövid fűtési ciklus hőjének mintegy 12-36 órás, lassú, egyenletes, elnyújtott leadását. Ennél lényegesen nagyobb, különleges darabok is léteznek, Dánia legnagyobb tömegkályhája a Nordic Folkecenterben, 14 tonnás.

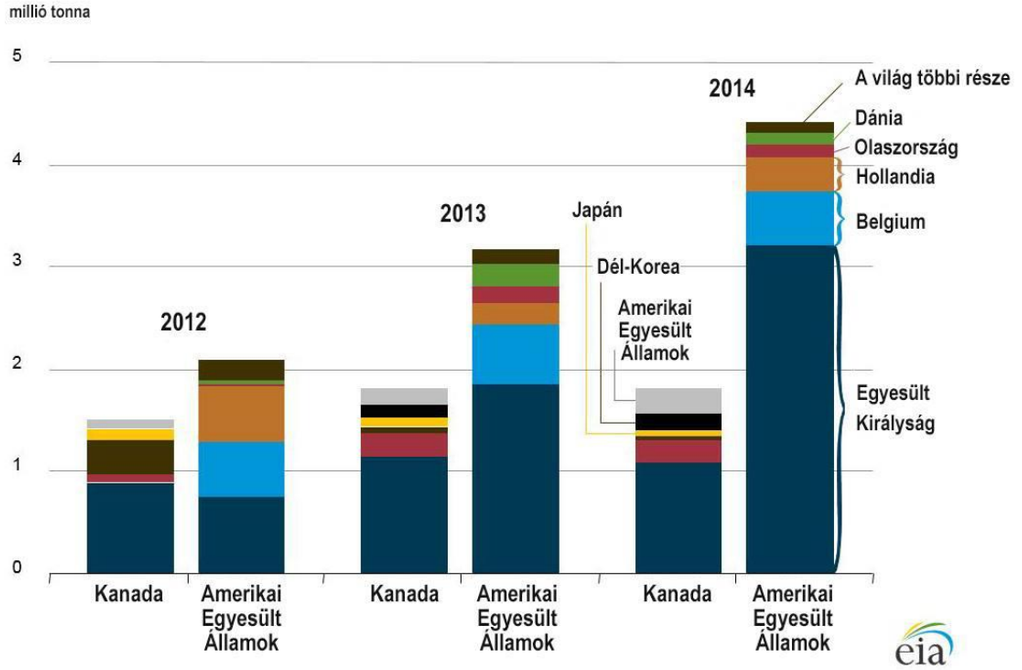
A meleg vizet is előállító tömegkályha napi egyszeri begyújtással – a fűtés mellett – 100-150 liter 35-55 °C-os melegvizet készít (az eltüzelt fa mennyiségének függvényében), vagyis teljes mértékben képes kielégíteni egy átlagos család napi melegvíz-igényét is. Lényeges megemlíteni, hogy a berendezés működéséhez nincs szükség gépészetre, így csökkenti kiszolgáltatottságunkat és anyagi terheinket egyaránt. Ez a megoldás optimális kiegészítője a passzív napenergia használatnak és a napkollektoros vízmelegítő berendezéseknek egyaránt, hiszen a kályhával csak akkor kell fűteni, amikor a napsugárzás nem biztosít kellő mennyiségű hőenergiát a passzív fűtés és a HMV-rendszer számára.

A pellet tüzelés

Alternatív, és az eszköz szintjén kiemelkedő hatékonyságú és kényelmes megoldást jelentenek a pelletes fűtőberendezések, ahol a tüzelőanyag pontos adagolása révén van mód a keletkező hő mennyiségének szabályozására. A pellet alkalmazása azonban oly mértékben felfutott, és az eredendően hulladék fűrészporból, kisüzemi körülmények között gyártott tüzelőanyagra olyan hatalmas az igény, hogy azt az eredeti módon már nem tudják kielégíteni. A mennyiségi igények fedezését ezért napjainkban – hatalmas szálfák ledarálásával, majd golyócskákba történő újrapréselésével – rengeteg energia felhasználásával oldja meg az ipar. Ennek eredményeként a teljes életciklusban az EROI értéke meglehetősen alacsony lesz (lásd energetikai megtérülés), így ez a műszaki megoldás már nem tekinthető fenntarthatónak.

106. ábra. A pellet tüzeléssel megoldható a kályha és a kazán funkció látványos kombinálása (http://www.tuvie.com)

Az pedig még kevésbé, hogy az így előállított pelletet interkontinentális utaztatás után alacsony hatékonysággal, centralizált erőművekben használjuk, el, mint ahogyan az az Egyesült Királyság legnagyobb hőerőműve, a **Drax** esetében történik. Itt három darab 650 MW-os erőművi blokkot, összesen 1950 MW (vagyis a paksi atomerőművel összevethető) villamos teljesítményt alakítottak át szénről pellet tüzelésre, de – mivel ekkora mennyiségű pellet a közelben nem érhető el – az évi 7 millió tonnányi alapanyagot az Amerikai Egyesült Államokból, 6000 km-es tengeri úton szállítják be. **Egyes számítások szerint ezzel a széntüzelésről biomassza-tüzelésre történő átállás nemcsak, hogy nem eredményezett karbonkibocsátás-csökkenést, de 10-15%-os növekedés következett be.**



107. ábra. A kanadai és egyesült államokbeli pellet export felfutása (EIA 2016 alapján szerk.: Kovács K.)

Folyékony biomassza-üzemanyag

A folyékony biomassza-származékok alapanyaga alapesetben nagyüzemi növénytermesztésből származó biomassza, pontosabban annak csak egy része, általában a termése, magja. Közismert felhasználási területük a közlekedés. A leginkább Európában elterjedt biodízel magas olajtartalmú növények (olajpálma, szója, repce) magjából sajtolt, majd általában tovább feldolgozott, adalékolt termék. A főleg Brazíliában és az Amerikai

Egyesült Államokban alkalmazott bioetanol esetében magas cukor tartalmú (pl. cukornád) vagy magas keményítő tartalmú növények (kukorica, búza, burgonya) jelentik az alapanyagot. A folyékony bioüzemanyagok ma már tüzelőanyagot biztosítanak háztartási vagy ipari léptékű energetikai megoldások számára is.

Az elmúlt évtized európai tapasztalatai alapján térségünkben a bioüzemanyag-alkalmazások terén az alábbi kihívásokra kell választ találni:

- a mérsékelt övezetben termeszthető növényfajokkal és fajtákkal nem érhető el akkora hozam, ami az üzemanyag-gyártásban a közlekedés jelenlegi igényeit fedezni volna képes. Emellett a fogyasztás indokolatlanul és elfogadhatatlanul nagy, ráadásul az elektromos közlekedés térhódításával a belsőégésű motorral szerelt járművek számos területen már középtávon háttérbe fognak szorulni;

- a gazdag országok egy része a bio-üzemanyagokat vagy ezek alapanyagait főként trópusi országokból szerzi be, ugyanis az ezek előállítására leginkább alkalmas növényi alapanyagok (cukornád és pálmaolaj) ott termeszthetők leggazdaságosabban – azonban ez egyfelől a természetes vegetáció drasztikus pusztításával járhat, másfelől az interkontinentális szállítmányozás miatt többlet energiát igényel és szennyezést generál;

- egy-egy szokatlan időjárású évben a Föld egyes térségeiben a bioüzemanyagok alapanyagai az élelmiszernövények konkurensévé váltak, így növekvő élelmiszerárakat eredményeztek;

A fentiek nyomán valóságos hadjárat indult a bioüzemanyagok felhasználása ellen. A támadás egyik frontja, amely különben valós problémára hívta fel a figyelmet, a bioüzemanyagok előállításának energiamérlegét vette célba. A kritikusok azt kifogásolták, hogy az iparszerű gazdálkodás és a tengerentúlról történő szállítás sok esetben azzal összevethető fosszilis energiát emészt fel, mint amennyi végeredményben a bioüzemanyagok felhasználása során kinyerhető. A fentiek tükrében helyes törekvés, hogy minden ország igyekezzen saját forrásból – és ne mások kárára – előteremteni a közlekedési szektor számára szükséges energiát. Ennek azonban csak egyik lehetséges módja a bioüzemanyagok előállítása. Ezen a téren viszont valóban lényeges volna hatékonyabb és környezetkímélőbb agrotechnológiai megoldások alkalmazása.

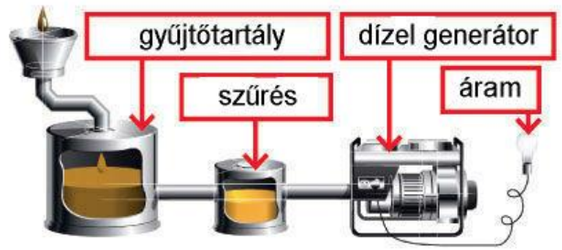
A másik fronton az éhínség fő okozójaként, sőt egyenesen tömeggyilkosként állították be a bioüzemanyagokat. Az igazi probléma ez esetben nyilvánvalóan nem a bioüzemanyagok használata, hanem a minden eddigi mértéket meghaladó közlekedési teljesítmény, pontosabban ennek energiaigénye és környezetterhelése. Számos oknyomozó beszámoló leplezte le, hogy a bioüzemanyagokat lejáratő dezinformációs kampány hátterében az ellenérdekelt olajipari és élelmiszeripari ágazat lobbija áll. Időközben kutatók is igazolták, hogy a bioüzemanyagok termelésével nem magyarázható az élelmiszeráraknak egy-egy kirívó esetben tapasztalt elszabadulása, illetve annak mértéke.

A jelenlegi bioüzemanyagok eddigi karrierje tehát nem volt felhőtlen. Ebben hozhat némi változást a **cellulózalapú, második generációs** bioüzemanyagok megjelenése. Ezek mezőgazdasági vagy erdőgazdasági **melléktermékekre** támaszkodó, tehát a jelenlegi élelmiszertermeléssel nem konkuráló megoldások, néhány országban már kereskedelmi forgalomban is elérhetők.

Elindult a **harmadik generációs** bioüzemanyagok fejlesztése is, melyeket alacsonyabb rendű szervezetekből vagy magasabb rendű vízinövényekből állítanak majd elő. Ezekre azért érdemes különös figyelmet fordítani, mert a kutatások fő célja kifejezetten az élelmiszertermeléssel való konkurencia háttérbe szorítása, illetve ezen megoldásokkal akár a CO_2 megkötése.

108. ábra. A második generációs üzemanyagok reklámplakátja Svédországban 2013-ban (http://www.preem.se/)

Lényeges, hogy **a folyékony bioüzemanyagok segítségével akár kogenerációs áram- és hőtermelés is elképzelhető** – ez esetben is igen lényeges azonban a tüzelőanyag származása, hiszen például **trópusi eredetű pálmaolajjal üzemeltetett rendszerek környezeti teljesítménye lényegesen rosszabb, mint a hulladékalapú éttermi zsírok, olajok felhasználásáé.**



109. ábra. Az éttermi eredetű növényolaj tüzelésére kidolgozott technológia vázlata

Biogáz

A **biogáz** szerves anyagok anaerob erjedése során képződő, energetikai célokra használható légnemű anyag, melynek termelését a helyben keletkező szerves hulladékok (pl. trágya, kaszálék vagy élelmiszeripari hulladék) vagy energetikai céllal termesztett növények (Európában leginkább a kukorica) alapozzák meg. Napjainkban még ritka, ám kifejezetten előremutató megközelítés a háztartási hulladékok, ételmaradékok szelektív gyűjtése, majd biogázüzemben való feldolgozása. Az ellenkező pólus a biogáz-gyártás céljából termesztett növények intenzív, monokultúrás termesztése, amely környezeti szempontból nem elfogadható.

110. ábra. Az ételhulladékok szelektív gyűjtése sikeresen működik Svédországban (fotó: Munkácsy B.)

A folyamat első lépésében a bemenő anyagok optimális **szubsztrátumkeverékét** hozzák létre (pl. **optimális nedvességtartalom, szén-nitrogén arány, pH figyelembe vételével**), majd anaerob környezetben tevékenykedő baktériumtörzsek élettevékenységei révén **kofermentáció** (együttrothasztás) során **biogázt** termelnek, amely főként **metán** (50-75%) és **szén-dioxid** (25-50%) keveréke, de emellett számos egyéb alkotórészt is tartalmaz. Tisztítással fűtőértéke javítható, akár a földgázzal egyenértékűvé tehető (**biometán**). Igen lényeges továbbá, hogy a biogáz előállításának különféle **iszapszerű termékei** – fázisszétválasztást és főképp például szalmával való **együttkomposztálást** követően – kiválóan alkalmazhatók a **talajerő javítására**.

A folyamat, vagyis a szerves anyagok anaerob rothadása és metántartalmú gáz keletkezése **spontán is lezajlik**. A **földgáz** keletkezése például ilyen természeti jelenség. Ugyanez lényegesen gyorsabban, de még mindig spontán történik a hulladéklerakó telepeken, ahol 6-8 méteres hulladékréteg alatt már kedvező körülmények alakulhatnak ki a szerves anyagok rothadásához. A keletkező **depóniagáz** összetétele nem ideális (metántartalma csak 30-50%), de energetikai célokra némi tisztítást követően már felhasználható.

A célzott biogáztermelésre szolgáló üzemekben alapesetben **mezofil (25-35 °C)** baktériumtörzsek segítségével történik a lebontás. A folyamat időtartama elsősorban a szubsztrátum jellegétől függ:

- Lassan bomló, magas rosttartalmú növényi anyagok: minimum 35-40 nap;
- Almos trágyák és hígtrágyák: 20-25 nap;
- Konzervipari vagy alkoholgyártásból származó már részben feldolgozott anyagok: 15-20 nap.

Magasabb hőmérsékleten, **termofil (45-70 °C)** baktériumtörzsek közreműködésével ez felgyorsítható, és nagyobb arányban keletkezik metán is, sőt, akár vágóhídi vagy ehhez hasonló hulladékok feldolgozására is lehetőség nyílik (mert a patogén kórokozókat a magas hőmérséklet elpusztítja) – viszont így a folyamat jelentős többlet hőenergiát igényel.

Mivel a biogáz kiemelkedően sokrétűen, kifejezetten kis léptékű berendezésekben ideálisan használható (áramfejlesztés, hőtermelés, közlekedési üzemanyag), ezért a jövő decentralizált energiatermelésének kulcsszereplője lehet.

A megtermelt biogáz hasznosításának fő irányai:

- közvetlen gázkazánban történő elégetéssel hőtermelés;
- mikro léptékű gázturbinában (<200 kW) áramtermelés;
- gázmotorban vagy tüzelőanyag-cellában kogenerációs hő- és áramtermelés;
- közlekedési eszközökben üzemanyagként;
- a meglévő földgázhálózatba betáplálva lakossági vagy ipari célokra.

111. ábra. Biogázüzem részlete (fotó: Munkácsy B.)

A technológia legfontosabb erényei, hogy

- kisléptékű (néhány MW_p), így kogenerációval meglehetősen **jó energetikai rendszerhatásfok** érhető el;
- az **alapanyagok tárolása** akár hosszú hetekre is könnyen megoldható;
- a keletkező **gázok tárolási lehetősége** révén az áramtermelés időben a rendszer igényeihez igazítható, ezáltal az időjárástól függő technológiák rendszerbe integrálását támogatja.

A szélenergia a 21. században

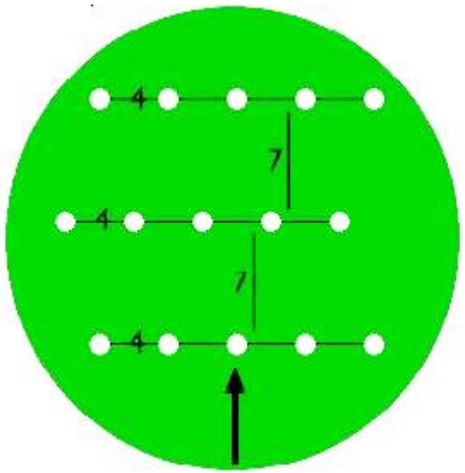
A szél energetikai hasznosítása meglehetősen széles körű, sokféle megoldás tartozik ide akár már a kerti ruhaszárítástól kezdve a vitorlás hajók, a szélkerekes vízszivattyúk és malmok alkalmazásán át egészen a villamos áramot előállító szélturbinákig. Az áramtermelésre szolgáló első berendezést Charles F. Brush építtette 1887–88 között az Amerikai Egyesült Államokban. A 12 kW-os gépezet **rotorátmérője** (lapáthossz*2) 17 m, a **lapátok száma** 144 volt. Ezzel szemben a napjainkban használatos szélturbinák teljesítménye 8000 kW-ig terjed, rotorátmérőjük 100-180 méter, míg a lapátok száma jellemzően háromra csökkent.

A szélből kinyerhető energiát, a **fajlagos szélteljesítményt** az $\mathbf{E_{kin} = ½\rho A v^3}$ alakban írhatjuk fel, ahol „ρ" a közeg (jelen esetben a levegő) sűrűségét; „*A*" a lapátok által súrolt felületet; „*v*" a szél sebességét jelenti. A fenti képletből következő törvényszerűség, hogy a tér azon pontján, ahol az átlagos **szélsebesség kétszerese** a másik helyen mért átlagos szélsebességnek, ugyanazzal a géptípussal **nyolcszor annyi villamos energia termelhető**. Ez ad magyarázatot a technológia sajátos fejlődésére, ami egyértelműen arra irányult, hogy a gépek egyre kedvezőbb szélklíma alatt, vagyis **egyre magasabban és egyre nagyobb lapátokkal** dolgozhassanak.

A szél sebességét a felszín felé közeledve egyre nagyobb mértékben fékezi a felszín érdessége és az egyedi tereptárgyak széláramlást befolyásoló, szélárnyékoló hatása. A szélfarmokon az egyedi terepakadályok közül a szomszédos szélturbinák a legfontosabbak. Az angol nyelvű szakirodalom alapján a berendezések egymást árnyékoló, illetve turbulens légáramlás keltő zavaró hatását **park hatásnak** (park effect**)** nevezzük. A hatás az erőművek leadott teljesítményét jelentősen képes befolyásolni, ezért nagyobb, 5-9 rotorátmérőnyi távolságot (akár 1,5 km-t) szükséges tartani egy-egy szomszédos szélturbina között (112. ábra). Ez már elegendő ahhoz, hogy a zavaró hatások elhanyagolható mértékűek legyenek. Attól azonban semmiképpen sem kell tartani, hogy a szélerőművek nagyobb csoportjai esetleg teljes szélcsendet idéznének elő – merthogy ilyen érveléssel is akadályoztak már meg szélerőmű-telepítést Magyarországon…

A fent már említett **turbulencia** jelenségének azért van komoly szerepe, mert a szélerőművek élettartamát kedvezőtlenül befolyásolják. Ez a jelenség a szárazföldi (onshore) turbinák

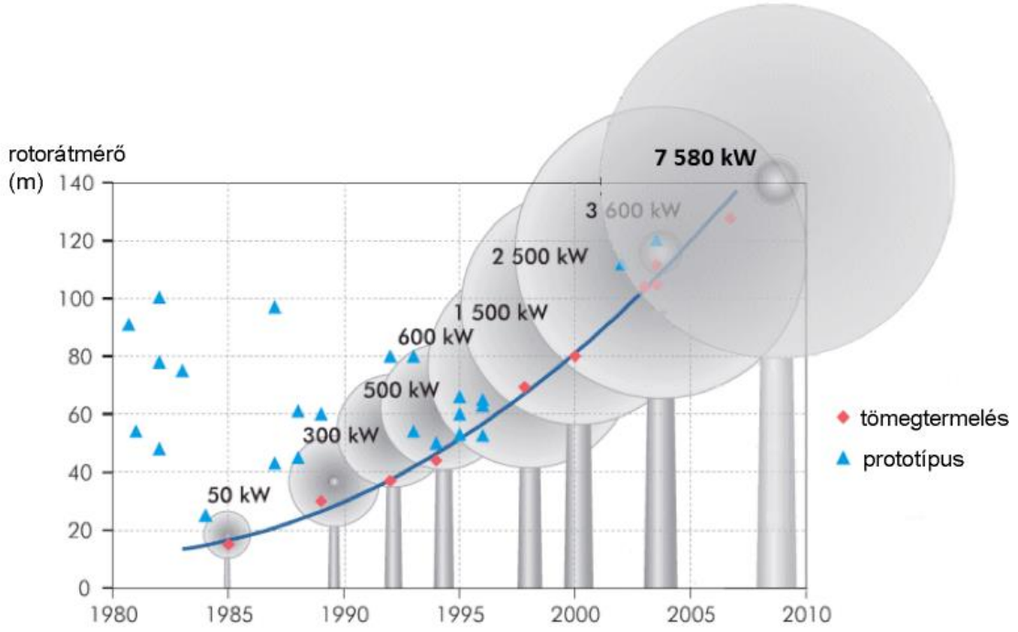
esetében lényegesen fontosabb tényező, mint a tengerbe történő (offshore) telepítések esetében.



112. ábra. A park hatás csökkentésére a szélerőművek között célszerű jelentős távolságot tartani. A gyártók a rotorátmérő (lapáthossz x 2) 4-7-szeresével számolnak az uralkodó szélirány függvényében

A szélerőművek méreteinek növekedése és a szélfarmok megjelenése a tájképi hatások felerősödését eredményezte, amelyek több téma köré csoportosíthatók:

- a teljesítmény fokozása a méretek növekedésével járt – a mai szélturbinák meglehetősen domináns elemei a tájnak, hiszen **oszlopmagasságuk** eléri, sőt a legtöbb esetben meghaladja a 100 métert, ráadásul ezen túlmenően kell figyelembe venni a **lapátokat** (60-90 m);
- ezzel összefüggésben megváltozott a szélturbina-alkalmazások térbeli rendje is. A korábban jellemzően a tengerparti területekre szorítkozó technológia az utóbbi 15-20 esztendőben a **kontinensek belső területein** is elterjedt – ahol magasabb oszlopmagasságú turbinákkal, hosszabb lapátokkal lehet valamelyest kompenzálni a kisebb szélsebességet, a terep egyenetlenségeit és a növényzet, illetve a tereptárgyak zavaró hatását (érdesség);
- részben a gazdaságossági, részben éppen a tájvédelmi megfontolások előtérbe kerülésével egyre inkább általánossá váltak a **szélfarmok**, ahol már turbinák csoportjaival kell számolnunk – így földrajzi értelemben kevesebb helyre koncentrálódik a kapacitás. Különösen igaz ez a tengeri selfterületekre, ahol a magasabb beruházási költségek gyorsabb megtérülése érdekében a szárazföldön megszokotthoz képest több turbina telepítése a gyakorlat.



113. ábra. A szélerőművek fő jellemzőinek (teljesítmény, rotorátmérő) változása 1980 és 2010 között (viszonyítási alapként szolgálhat egy 10 emeletes lakóház, amely nagyságrendileg 30 m magas).

A szélturbina tehát központi, meglehetősen szembetűnő elemként jelenik meg a tájban. Minden olyan törekvés, ami a turbinák elrejtését, takarását célozza, összeegyeztethetetlen magával a technológiával[6].

Érthető tehát a turbinagyártónak az a törekvése, hogy a lehetőségekhez képest elősegítsék berendezéseik jobb tájba illesztését, melynek érdekében a legtöbb cég formatervező- vagy építészirodákkal dolgozik együtt (114. ábra). Azonban el kell fogadni, hogy mindez csak kis mértékben segíti a szélerőművek tájba illesztését és társadalmi elfogadását. Jogos az a felvetés, hogy tájképi értékek védelmében bizonyos területeken ne legyen engedélyezhető szélerőművek telepítése. Ugyanakkor az is tény, hogy a tájképvédelem sok esetben hazánk olyan ipari területeire is kiterjed, ahol ez nehezen indokolható, így például Komárom-Esztergom megye keleti része (Dorog-Esztergom térsége) szinte teljes egészében **a megyei vagy az országos tájképvédelmi terület** övezetébe tartozik.

*114. ábra. A **Foster & Partners** építésziroda az Enercon (bal oldali kép, www.fosterandpartners.com), az autógyártásban érdekelt **F. Porsche Design Center** pedig a Dewind (jobb oldali kép, http://de.dewindco.com) számára készített formaterveket*

[6] Az első hazai szélerőmű telepítésénél (Inota- Várpalota térségében) az illetékes Balaton-felvidéki Nemzeti Park Igazgatóság tájvédelmi szempontokra hivatkozva csak a tervezettnél alacsonyabb oszlopmagassággal engedélyezte a beruházást. Az építési engedélyben az is szerepel, hogy a szélerőművet úgy kell elhelyezni, hogy az ne zavarja a táj képét*: „A tervezett telepítési helyet amennyire lehetséges a domb déli oldalán lejjebb, ill. délebbre kell kijelölni, hogy a hőerőmű meglévő épületei minél jobban takarják a turbinát. Amennyiben ennek technikai akadálya van, ill. a szélviszonyok miatt nem lehetséges az alacsonyabbra telepítés, akkor erre vonatkozóan megoldás lehet, ha a kijelölt helyen a műszaki leírás szerint változtatható szélerőmű magasságot csökkentik. Tájképvédelmi szempontból szükséges, hogy a torony, ill. a turbina lapát legfelső magassága ne haladja meg a meglévő hűtőtornyok legnagyobb magasságát."* A következmény a hazai átlaghoz képest kb. 50%-os kapacitás faktor.

115. ábra. A tengeri szélerőművek esetében láthatóan kevesebb pénz és figyelem jut a formatervezésre (www.offshorewindindustry.com/)

A **természeti értékek védelme** megköveteli, hogy a szélerőműveket csak olyan területeken alkalmazzuk, ahol nem veszélyeztetik a madárvilágot és nem tesznek tönkre tájképi értékeket vagy jó minőségű termőterületeket. Ugyanakkor szélerőművek, szélfarmok a tájrehabilitáció részeként is épülhetnek. Az ember néhol hatalmas átalakításokat végzett a természetben, a legdrasztikusabb ilyen beavatkozások a külszíni bányák térségei, ahol gyakran több km^2 területű tájsebek alakultak ki, melyek kezelése komoly feladat elé állítja a tájtervezéssel foglalkozó szakembereket. Európa egyik jellegzetes bányaövezete a németországi Alsó-Lausitz, ahol az évtizedek során megyényi területet alakítottak át a bányászati tevékenység révén. Az utóbbi időben azonban a bányák jelentős része bezárt, és – az átgondolt tervezési munka eredményeként – hasznosításuk kapcsán a mezőgazdasági, erdőgazdasági és rekreációs célú rekultiváció (11. ábra) mellett már megjelentek a nagy területigényű szélfarmok is.

A telepítésnél lényeges szempont a zajhatás és a rotorok okozta zavaró villódzás minimalizálása, mindemellett figyelembe kell venni a **villamos hálózatra való csatlakozás** lehetőségét, illetve térbeli korlátait is.

A fentiek és számos egyéb, jogszabályokban is megjelenő szempont figyelembe vételével egy-egy átlagos ország esetében átlagosan ~10% körül terület áll rendelkezésre szélerőművek telepítésére. Ezzel szemben Magyarországon 2016-ban hozott jogszabályok lényegében megtiltják további szélerőművek telepítését (137. ábra). **A kialakult helyzet az európai fejlődési tendenciák és a hazai nemzetstratégiai megfontolások tükrében egyaránt megkérdőjelezhető.**

A szélerőművek és a centralizált energiarendszer

A szélerőművek a 20. században még egyértelműen a decentralizált megoldások közé tartoztak. Telepítésükkel erősödött az energiademokrácia, hiszen helyi közösségek jöttek létre, amelyek termelőként kapcsolódhattak be az energiarendszerbe. Ez a modell még nagyobb szélerőműfarmok esetében is működőképesnek bizonyult, amire példa lehet a koppenhágai kikötő 40 MW-os Middelgrunden szélfarmja, amely felerészben egy 8650 tagot számláló helyi közösség tulajdonában van. Azonban a méret- és teljesítménynövekedés a beruházási költségek növekedését is jelenti. A jelenleg legnagyobbnak számító dán szélfarm már 400 MW-os (Anholt offshore szélfarm), amely már messze meghaladja a közösségi finanszírozás felső keretét. A szélenergia tehát ma már meghatározóan a nagy tőkés társaságok felségterületéhez tartozik. Háttérbe szorult az a megközelítés, amelyben erre a technológiára, mint potenciális **közösségi alapú területfejlesztési eszközre** tekintettünk, amely révén maximalizálni lehetett a társadalmi, gazdasági és környezeti hasznokat.

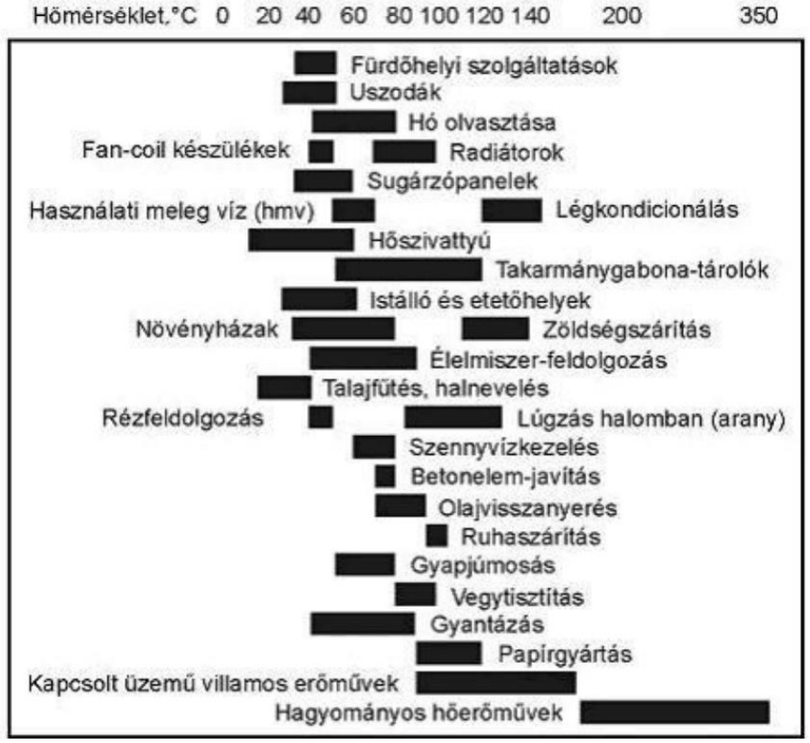
Emellett a szélturbinák és szélfarmok méretnövekedésével a villamosenergia-rendszerhez való csatlakozás és az azzal való együttműködés is egyre kényesebb műszaki feladat. A 100 MW-nál **nagyobb összeteljesítményű szélerőmű-parkok megjelenésével eltűnik a decentralizált megoldások számos előnye**. Egy-egy berendezés műszaki meghibásodása

továbbra sem fog komoly zavarokat okozni az energiaellátásban, viszont a transzformátor-alállomások műszaki hibája az egész szélfarm termelésből való kiesését jelenti, ami már komolyabb rendszerirányítási kihívásokat jelenthet.

A környezeti hő

Ebben a fejezetben több, egymáshoz sok tekintetben közel álló, igen gyorsan fejlődő szakterület bemutatása a cél. Az itt tárgyalt megoldások közül legismertebb a **geotermikus energia,** ami a Föld mélyében található radioaktív izotópok bomlásából, közvetve pedig a magmás és tektonikai folyamatokból származó, **néhány száz vagy pár ezer méteres mélységből nyert hőenergia**. Ugyanakkor a környezeti hő forrása alapján felsorolhatjuk még a **hidrotermikus** és **légtermikus** energia felhasználását is (lásd: Európai Parlament és a Tanács 2009/28/EK irányelve), sőt a **talajhő** hasznosítását is – mindezek forrása meghatározóan a **napenergia**!

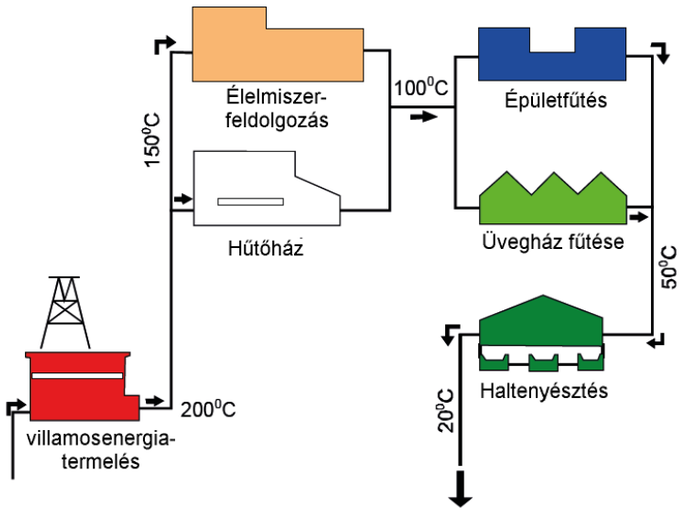
A **geotermikus energia** a kőzeteken keresztül vezetéssel és sugárzással, valamint a kőzetek pórusaiban áramló fluidum segítségével hőáramlás útján folyamatosan a Föld felszíne felé áramlik. Az így jelentkező hőenergiát kétféleképpen lehet hasznosítani. Alapesetben **kitermelő kutak** segítségével felhozzák a fluidumot a felszínre és **fűtésre, valamint használati meleg víz** előállításra használják – alacsonyabb hőmérséklet esetén ehhez **hőszivattyút** is igénybe vesznek. A hosszú távú energianyerés érdekében elengedhetetlen, hogy a lehűlt folyadékot **visszasajtoló kutak** segítségével visszajuttassák a kitermelési mélységbe – még akkor is, ha ez az üzemeltető rövid távú haszonszerzési elképzeléseivel ez nem egyeztethető össze. További lehetőséget kínál, ha a kitermelés eredményeképpen kellően magas hőmérsékletű (> 120-150 °C) fluidum kerül a felszínre, ez esetben **villamos erőművek** üzemeltetésére is lehetőség van. Az efféle rendszerek élettartama általában ~50-100 esztendő, attól függően, hogy milyen gyorsan hűl vissza a megcsapolt geológiai réteg. Ezt követően néhány évtized várakozási időre van szükség annak érdekében, hogy újra hőt lehessen onnan kinyerni.



116. ábra. A komplex hőhasznosítás lehetőségeit, kapcsolódási pontjait bemutató Lindal-diagram (www.geothermal-energy.org)

A geotermikus hasznosítás kulcsa az, hogy a költségesen felszínre hozott hőenergiát hatékonyan, a legtöbb hőlépcső kihasználásával vegyük igénybe. A legjobban megtervezett hazai rendszereknél is 5-6 különböző alkalmazás használja fel az egyre alacsonyabb hőmérsékletű meleg vizet. Szélesebb értelemben azonban beszélhetünk nemcsak a hőnek, hanem a vízzel együtt feltörő metángáznak, valamint a vízben levő ásványi sóknak, sőt magának a termálvíznek a felhasználásáról is. Sajnos a gyakorlat azt igazolja, hogy a nem

kellően szigorú szabályozási környezet okán a hosszú távú szempontok nem érvényesülnek és az egycélú hasznosítás is lehet rentábilis.

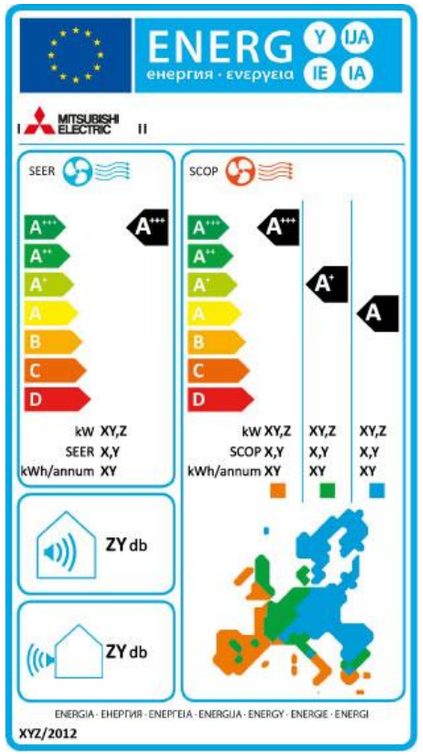


117. ábra. Példa a geotermikus hő komplex hasznosítására (www.geothermal-energy.org)

A felszínhez közeli hőkészletek (azaz **talajhő**), valamint a aero- vagy **légtermikus**, illetve **hidrotermikus** energia esetében **hőszivattyúk** segítségével nyerhető ki a hőenergia. Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796–1832) francia fizikus és matematikus 1824-ben írta le a később róla elnevezett ideális termodinamikai körfolyamatot, amely a hőszivattyúk működésének alapját jelenti. Maga a berendezés a hűtőszekrényéhez hasonló, azzal a különbséggel, hogy míg a hűtőszekrény esetében a belső teret hűtjük és a hőenergiát a külső térbe juttatjuk a gép hátsó részén elhelyezett hőcserélő hűtőpanel segítségével, addig a hőszivattyú esetében éppen fordítva tesszük: a külső térből származó hőt igyekszünk a belső térben felhasználni. Ahhoz, hogy a rendszer folyamatosan akár 60-65 °C-os hőmérsékletű vizet tudjon biztosítani, igen nagy mennyiségű vízből vagy levegőből kell hőenergiát elvonni, amelyhez nagy teljesítményű ventilátorok, szivattyúk és kompresszorok szükségesek, így a rendszer jelentős mennyiségű villamos energiát használ fel, igaz, még több hőt termel. Az elfogyasztott villamos energia és a keletkező hőenergia arányát a rendszer **„jósági fokaként" (COP = Coefficient of Performance)** határozzák meg. A gyakorlatban a **„szezonális jósági fok" (SCOP = Seasonal Coefficient Of Performance)** nyújt még eligazodást, amely természetesen földrajzi térségenként változó (118. ábra). **Napjainkban ez utóbbi érték a legegyszerűbb gépek esetében** (ezek légkondicionáló berendezések, vagy más nézőpontból **hűtési célra optimalizált levegő-levegős hőszivattyúk**) **a COP már 3-4; vagyis 1 egység villamos energia felhasználásával 3-4 egységnyi hőenergiát nyerünk.** Ennél jobb értékeket érnek el a rohamosan fejlődő, kifejezetten fűtésre optimalizált berendezések.

A 2010-et megelőző időszakban a földhőszondás, és talajkollektoros megoldások domináltak, azonban az elmúlt néhány évben a környezeti levegő hőjét megcsapolni képes **levegős (air-source) hőszivattyúk** olyan ütemű fejlődést értek el, hogy mára az egyik leggyorsabban terjedő megújulós technológiát jelentik (ebben szerepet játszik az is, hogy nyáron légkondicionáló berendezésként is üzemeltethetők). Ezek a berendezések ma már háromféle kivitelben készülnek: a) meleg levegőt; b) meleg vizet; c) mindkettőt képesek a hőenergia igény fedezésére biztosítani.

Földrajzi értelemben sokkal korlátozottabban használható, de energetikailag még a korábbiaknál is kedvezőbb műszaki megoldást jelent, ha a hőt valamilyen **ipari vagy háztartási folyamatból származó „hulladék" hőenergiából** nyerjük. A kommunális szennyvíz hőmérséklete általában 10-20 °C közötti, az ipari szennyvíz ennél is melegebb lehet. Ennek köszönhetően a **COP általában 5-8** közötti érték. A teljesítmény felső mérethatárát a rendelkezésre álló szennyvíz mennyisége határozza meg, amely legfeljebb 300 méteres távolságban kell elérhető legyen. A legnagyobb hozamok a belvárosi területeken, lakótelepek környezetében találhatók, illetve a szennyvíztelepek és -átemelők közelében. A hőszivattyúzással akár nagyobb kereskedelmi egységek, illetve irodaházak teljes hőellátását (hűtés-fűtés) biztosítani lehet. Ilyenre is egyre több példa akad, akár Magyarországon is: a MOM Park, a Honvéd Kórház, a Szegedi Tudományegyetem egyes épületei.



118. ábra. Az inverteres légkondicionáló berendezések hőszivattyú üzemmódban is tudnak dolgozni. Az SCOP érték térségenként mutatja be a készülék hatékonyságát (http://www.my-ecodesign.de/en/)

A hőszivattyúk alkalmazásával kapcsolatban is felmerül **a környezeti fenntarthatóság** kérdése. Ennek megítélése azonban nem egyszerű, hiszen ezt végeredményben leginkább az befolyásolja, hogy a működtetésükhöz szükséges **villamos energia milyen forrásból származik**. Norvégiában és Svédországban például az olcsó és tiszta üzemű vízenergia biztosítja az áram jó részét, így ott a hőszivattyúk környezeti szempontból feltétlenül pozitív elbírálás alá esnek. Ezzel szemben Franciaországban, ahol ugyancsak igen nagy számú ilyen berendezés működik, ám atomerőművekkel a háttérben, ez a környezeti teljesítmény már megkérdőjelezhető.

A vízenergia

A vízenergia hasznosításának két alapesetét különböztetjük meg: a tengeri és a folyóvízi alkalmazásokat. A **tengervíz** mozgásainak (árapály, hullámzás, tengeráramlat) energetikai hasznosítása egyelőre nem számottevő, sőt, a várható fejlődés figyelembe vételével néhány évtizedes távlatban is csak 5% alatti részaránnyal számolnak a legjobb adottságú országokban. Mivel nálunk ezek a megoldások nem jöhetnek számításba, ezért ezek bemutatásától el is tekintünk.

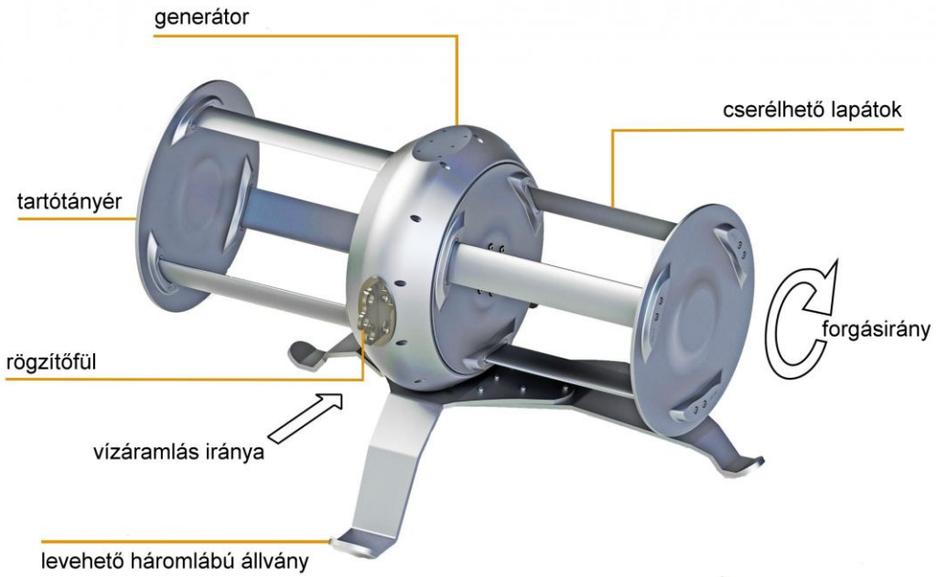
A **folyóvizek** energetikai hasznosítása sok évszázados múltra tekint vissza, ám megítélése korábban és napjainkban ugyancsak több szempontból a vitatható kategóriába tartozik. Kérdéses az, hogy

a) a vízerőművek milyen szerepet tölthetnek be az energiarendszerben, hiszen amíg a csapadékos térségekben egész évben megbízhatóan képesek áramot termelni, addig a szárazabb vidékeken a kihasználtságot erősen behatárolhatja az időleges csapadékhiány – ráadásul **az éghajlatváltozás korában ez egy komoly bizonytalansági tényező** egy efféle nagyberuházás esetében.
b) Kis esés esetén nagy teljesítmény leginkább **duzzasztás** révén érhető el, ami **jelentős párolgási veszteséggel jár** (ami szárazabb térségekben megkérdőjelezi az efféle megoldások célszerűségét).

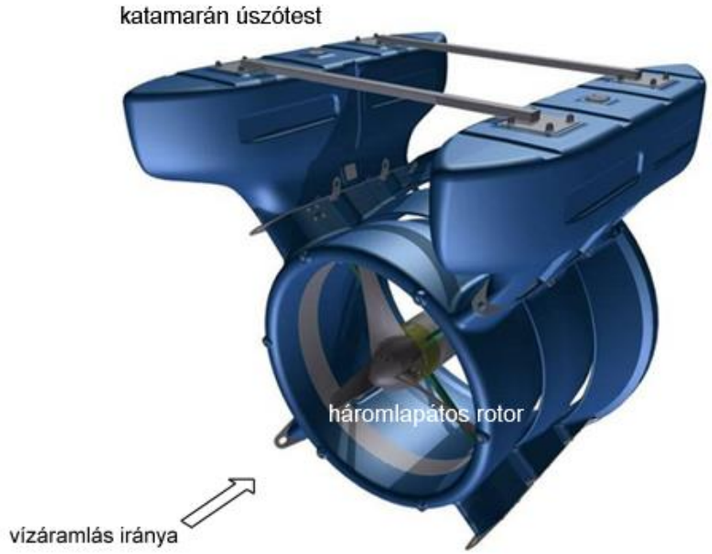
A fentiekre hivatkozással a folyóvizekre épített vízerőművek akkor felelnek meg **a környezeti fenntarthatóság** elvárásainak, ha csapadékos és nagy relief energiájú térségekben épülnek, ráadásul **legfeljebb 10 MW**, vagy nagyon kedvező körülmények között (sok csapadék, nagy esés) **néhányszor 10 MW** teljesítményt képviselnek.

A számításba vehető legfontosabb technológiák az alábbiak:

- **Duzzasztós** vízerőmű – 10 MW körüli teljesítmény esetén még jelenthetnek környezetileg is fenntartható megoldást;
- **Átáramlásos rendszerű** kisvízerőművek – ezek igen változatos teljesítményben és egyre változatosabb műszaki megoldásokat felvonultatva jelennek meg a piacon.



119. ábra. 500 W teljesítményű átáramlásos rendszerű minivízerőmű (http://idenergie.ca/)



120. ábra. 5000 W teljesítményű átáramlásos rendszerű minivízerőmű (www.beampowerenergy.com/)

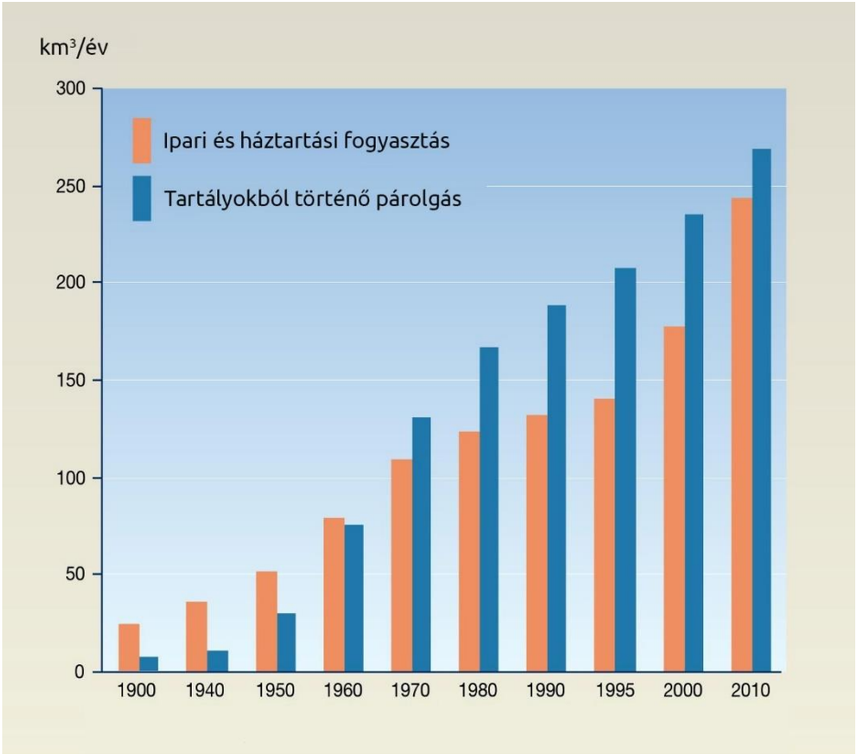
Sok szakmai dokumentum a szivattyús-tározós rendszereket is megemlíti ilyen felsorolásokban, azonban ezeket nem tekinthetjük erőműveknek, hiszen valójában nem termelik, hanem felhasználják az energiát. Eredendően a hosszabb időtávú energiatárolás célját szolgálták, viszont napjainkban lényegében folyamatos üzemben dolgoznak és egyre határozottabban a villamosenergia-rendszer szabályozását, a kínálat és kereslet közötti rések kitöltését segítik.

A vízerőművek kapcsán számos pozitív jellemzőt kell megemlíteni:

- Nagy vízerőművekre számos kiforrott technológia létezik (a kiserőműveknél [1 MW alatt] egyelőre inkább jellemző az útkeresés);
- Támogatják más megújulós technológiák rendszerbe illesztését, mert áramtermelésük páratlan rugalmassággal változtatható a termelés és fogyasztás függvényében;
- Élettartamuk hosszú, akár 50-100 év;
- Üzemeltetési költségei általában alacsonyak.

A teljes életciklus elemzések szerint a vízerőműveknek az alábbi környezeti kockázatai lehetnek:

- a duzzasztások nagy és sok esetben értékes természeti területek és kultúrtájak **elöntését** eredményezik – extrém példa a brazíliai Balbina vízerőmű (250 MW), amelynek létrehozása megyényi terület, 2360 km^2 őslakos indiánok által lakott élőhely elöntésével járt (Komárom-Esztergom megye területe csak 2264 km^2);
- **biológiai átjárhatóságuk sok esetben nehézkes** (esetenként jelentős halpusztulást okoznak), így hozzájárulnak **a vízi élőhelyek fragmentálódásához**;
- megváltoztatják a folyóvizek **ökológiai paramétereit** (sebesség, hordalékszállítás, hőmérséklet, oldott oxigén tartalom), így a flóra és fauna átalakulását eredményezik;
- trópusi területen a felduzzasztott tavak igen jelentős metántermelők – egyes kutatók szerint az emberiség **metánkibocsátásának** 23%-a kapcsolódik ide, ezzel minden más tevékenységünket megelőzve, így az üvegházhatás további fokozásában igen jelentős szerepet játszva;
- a felduzzasztott nagy vízfelületek **párolgása** igen jelentős lehet, ami az alvízi területek vízellátásában komoly nehézségeket eredményezhet.



121. ábra. A víztározókból való párolgás alakulása az ipari és háztartási vízfogyasztással összevetésben

Felhasznált és ajánlott irodalom:

Barótfi I.: Környezettechnika, Mezőgazda Kiadó, 2000.

Bengtson, H.: Estimating Passive Solar Heating System Performance. http://www.brighthub.com/environment/renewable-energy/articles/70764.aspx, 2010.

Chandra Mouli, G.R. - Bauer, P. – Zeman, M. (2016): System design for a solar powered electric vehicle charging station for workplaces. in Applied Energy 168:434-443.

EIA (2016): International Energy Outlook 2016. US Energy Information Administration. https://www.eia.gov/forecasts/ieo/electricity.cfm

IGA (2004): What is geothermal energy. International Geothermal Association. https://www.geothermal-energy.org/print/what_is_geothermal_energy.html

Schmela. M. (2016): 800 MW PV Capacity in Dubai To Be Developed By Masdar, FRV And Gransolar Group. http://taiyangnews.info/markets/dewa-selects-masdar-consortium/

WEC 2007 Survey of Energy Resources. World Energy Council, 600 p., 2007.

Az energiatárolás

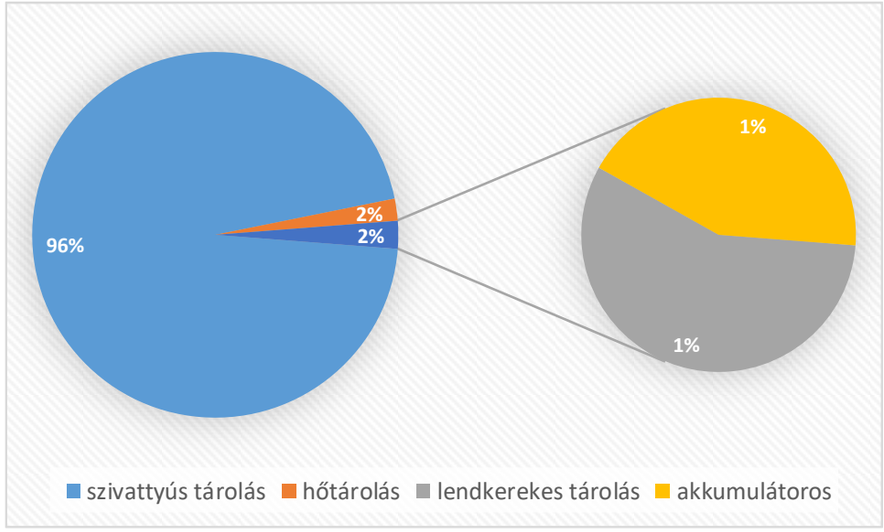
Az energiatárolás régóta fontos szerepe tölt be a villamosenergia-rendszer stabilitásának, megbízható működésének biztosításában. Ugyanakkor az időjárástól függő villamosenergia-termelés felfutásával – a korábban említett sok egyéb beavatkozási lehetőség mellett – a villamos energia tárolásának fontossága is egyre gyakrabban merül fel a megoldási lehetőségek között. Ennek kapcsán azonban számos kihívásra kell választ találni:

- az energiatárolás **veszteséges** folyamat – a veszteség mértéke a szivattyús tárolás esetében 20-30%, a jelenleg felfutó technológiák esetében (pl. sűrített levegő, akkumulátor) még nagyobb is lehet, ezért sok szakértő álláspontja szerint a villamos energia esetében a tárolás csak végszükség esetén jöhet számításba;
- a tárolásnak komoly **költségei** lehetnek – ez különösen az akkumulátoros tárolás esetében merül fel problémaként;
- a tárolás **erőforrásgazdálkodási és környezeti problémák**at szülhet – itt szokás a lítium vagy ólom alapú akkumulátorokra utalni, ahol az elsődleges nyersanyag már csak igen korlátozott mértékben érhető el.

Ugyanakkor az is jól látható, hogy a jelenlegi technológiai fejlesztések éppen ezeknek a problémáknak a kiküszöbölését célozzák. A hatalmas befektetések és szellemi kapacitás figyelembe vételével nem kizárható, hogy akár már középtávon sikerül mindhárom területen áttörést elérni, ami a villamos energia tárolása kapcsán gyökeres változást eredményezhet.

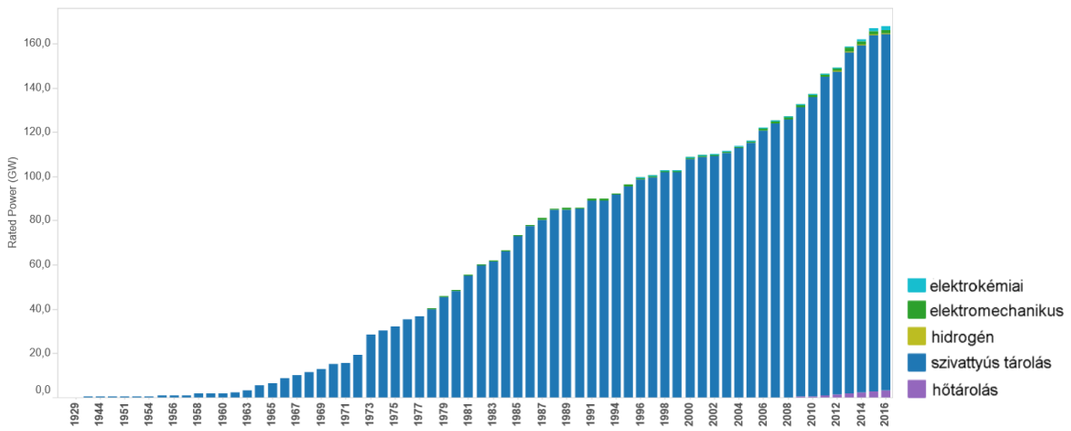
Az energia tárolása sokféleképpen lehetséges, az alábbi felsorolásban csak azok szerepelnek, amelyek többé-kevésbé kiforrott műszaki megoldások:

- mechanikus
  - szivattyús tárolás (Pumped Hydro Storage)
  - sűrített levegős tárolás (Compressed Air Energy Storage)
  - lendkerekes tárolás (Flywheel Energy Storage System)
- elektro-kémiai
  - hidrogén vagy ebből szintetizált metán tárolása (Power-to-Gas; P2G)
  - akkumulátoros energiatárolás (Battery Energy Storage System)
- elektromos
  - szuperkondenzátor
- termikus
  - meleg víz
  - samott (fő alapanyaga az agyag)
  - olvadt só



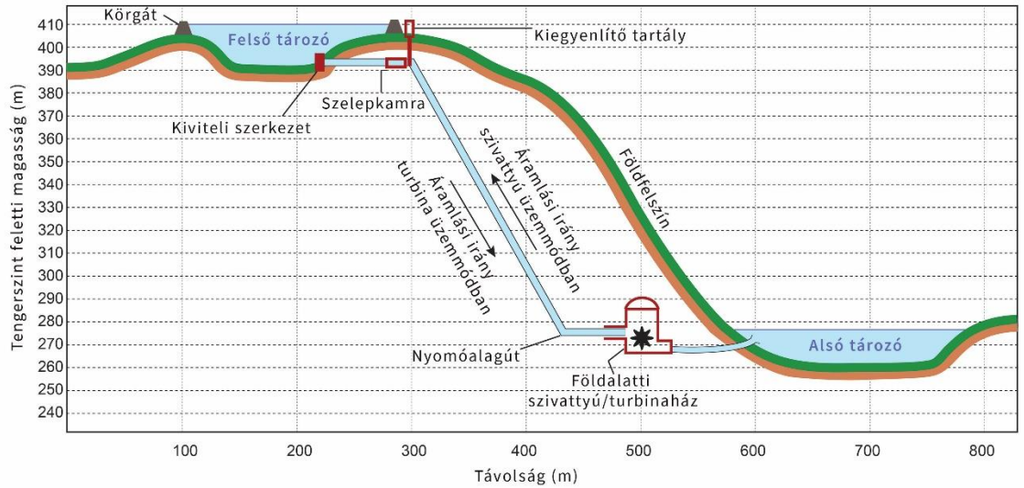
122. ábra. A különféle műszaki megoldások aránya az energiatárolásban 2015-ben (DOE 2016 alapján szerk.: Munkácsy B.)

Az energia tárolásánál három lényeges tényezőt kell figyelembe venni: a) a **teljesítményt**, amivel a rendszer számára villamos áramot vagy hőt képes rendelkezésre bocsátani; b) a **tárolási kapacitást**, ami az elraktározott energia mennyiségére utal; c) a tárolás **időtartamát**, ami a tizedmásodperces léptéktől a szezonálisig terjed.



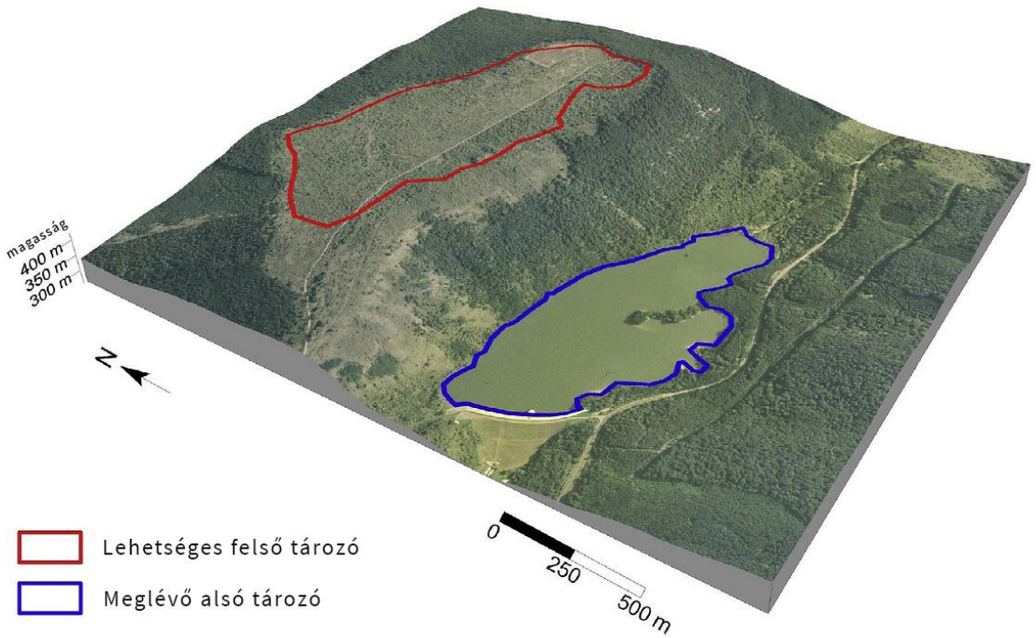
123. ábra. A villamos energia tárolási teljesítményének változása (GW-ban) 1929-2016 között (DOE 2016)

A különféle megoldások közül – ha a teljesítményt vesszük számításba – a **szivattyús villamosenergia-tárolás (SZET)** határozott dominanciája figyelhető meg (96%), ezt követi a hőtárolás, majd az akkumulátoros technológia. A SZET-rendszerek együttes energiatárolási teljesítménye a működő 316 egység esetében ma már 160 GW-os értéket ér el (**510 MW/projekt**), és – elsősorban az európai projekteknek köszönhetően – mostanában is évente 2000-4000 MW-tal gyarapodik.



124. ábra. Egy tipikus szivattyús energiatároló (SZET) műszaki vázlata (Soha T. et al 2017 alapján szerk.: Kovács K.)

A **szivattyús energiatárolás** lényege a víz helyzeti energiájának felhasználása. A rendszer központi elemei a két, eltérő magasságú víztest (mely lehet akár természetes is), illetve az azokat összekötő csővezeték(ek), valamint a közbetelepített szivattyú(k)/turbinaház(ak). A működés lényege, hogy az energiarendszer működési igényeinek és lehetőségeinek függvényében, a víztömeget villamos energia felhasználásával felszivattyúzzák (ilyenkor a rendszer energiafogyasztó), majd igény esetén a vizet leengedik és egy turbina segítségével áramtermelésre használják. A jellemző **betárolási teljesítmény** általában 100 MW és 1000 MW között változik, míg **termelési** időszakban akár az 500-3000 MW-os teljesítmény is elérhető. Lényeges mutató a mozgósítható **energiamennyiség** (tárolási kapacitás), ami egy-egy projekt esetében általában GWh-os léptékben mérhető.

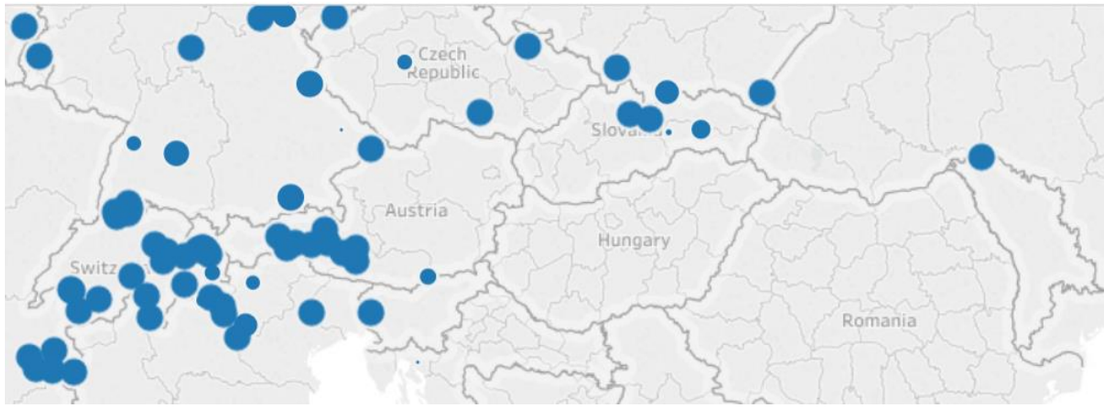


125. ábra. A 124. ábra szivattyús energiatárolója a térképen (Soha T. et al 2017 alapján szerk.: Kovács K.)

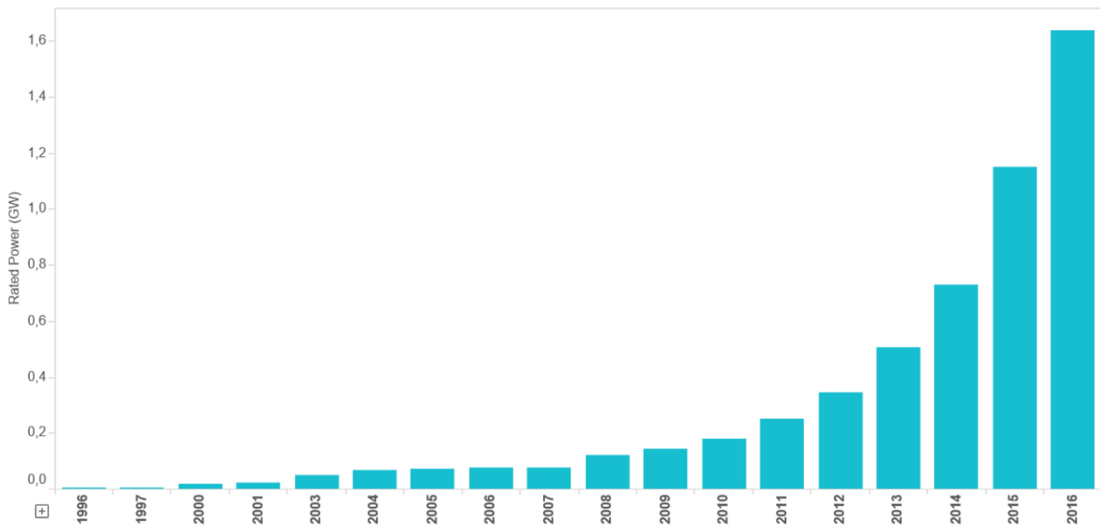
Ez a műszaki megoldás a centralizált energiarendszerben elsősorban olyan területeken valósult meg, ahol a nagy szintkülönbség és viszonylag nagy mennyiségű víz együttes jelenléte adott volt. Kontinensünk esetében a szivattyús tárolási teljesítmények a Pireneusi-félszigeten és az Alpok térségében igazán jelentősek. **Hazánkban** tehát a világviszonylatban tömegesen alkalmazott, **nagy teljesítményű szivattyús energiatároláshoz nem adottak a földrajzi feltételek** – ahol esetleg műszakilag megvalósítható volna (Dunakanyar térsége), ott védett természeti területek jöttek létre, amelyek nem tesznek lehetővé efféle műszaki beavatkozásokat.

A jelenlegi, decentralizálás irányába mutató tendencia felhívta a figyelmet a tárolás decentralizálásának lehetőségére is. Tanszéki vizsgálódásaink eredményei (Soha T. et al 2017) alapján kijelenthető, hogy a szivattyús energiatárolásra hazánkban is adottak a lehetőségek, ám inkább kisebb (50-60 MWh), decentralizált tárolók létrehozása tűnik kivitelezhetőnek. Különösen előremutató megoldásnak volna felhagyott bányatérségek rekultivációja keretében ilyen energiatárolási kapacitásokat kialakítani, hiszen a felmérések szerint ebben is jelentős potenciál van.

126. ábra. A szivattyús energiatárolás globális földrajzi képe (DOE 2016)



127. ábra. A szivattyús energiatárolás működő projektjei térségünkben (DOE 2016)

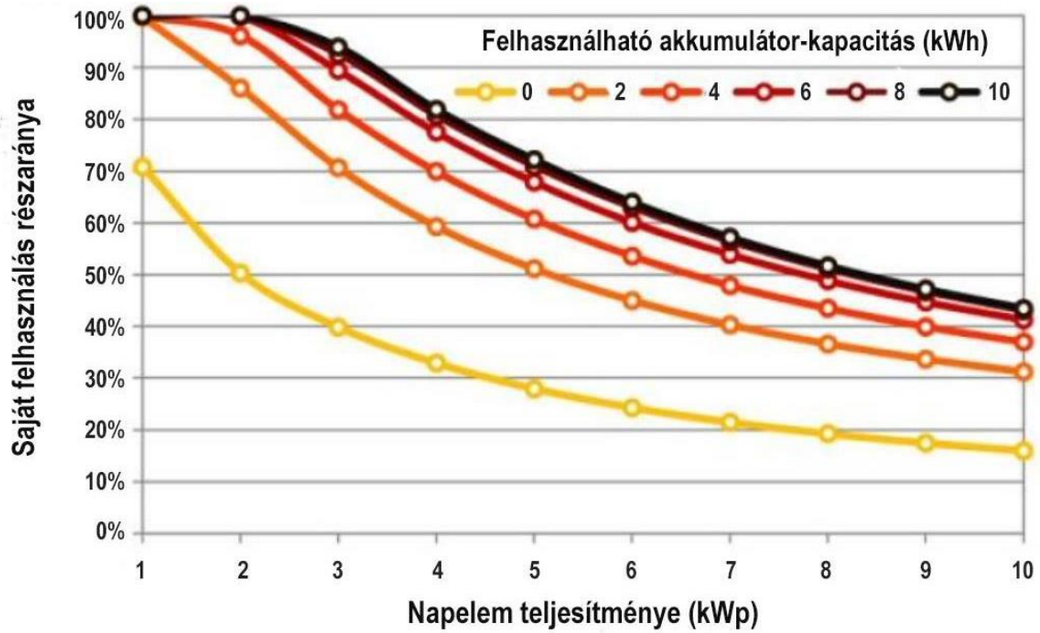


128. ábra. Az akkumulátoros energiatárolás teljesítményének alakulása 1996-2016 között (DOE 2016)

Egészen máshogyan fest a kép, ha nem a tárolási teljesítmény, hanem a **számosság** tekintetében vizsgálódunk. Ebből a szempontból az **akkumulátoros tárolás** vezet és a növekedés is ebben a szegmensben a leggyorsabb (128. ábra). Jelenleg csaknem 700 **ipari léptékű** létesítményt tartanak nyilván, 1,64 GW összteljesítménnyel (**2,3 MW/projekt** – v.ö. 510 MW/projekt a SZET esetében). Ezek jelentős része hagyományos méretű konténerekben van elhelyezve, általában 1 MW-os teljesítménnyel. A legnagyobb rendszereket az Amerikai Egyesült Államokban és főleg Japánban építették ki. Itt a teljesítmény 20-30 MW körüli, de Kaliforniában kiépítés alatt áll egy 100 MW-os létesítmény is (400 MWh villamos energia tárolását lehetővé téve).

Immár cégek százai fejlesztenek **háztartási szintű** berendezéseket is, így a különféle műszaki megoldások óriási tárháza áll rendelkezésre – ráadásul ebben a szektorban a fejlődésnek még csak az elején tartanak. Az igazi áttörést a V2G (vehicle-to-grid) technológia sikere jelentené, ami a közlekedés és az energiatárolás területén egyszerre kínálna forradalmian új lehetőségeket.

Németországban – élve a támogatatott finanszírozási lehetőséggel – a 2015-ben értékesített háztartási napelemes rendszerek 41%-ához már akkumulátoros tárolási kapacitást is beépítettek. Ennek célja, hogy a csúcsfogyasztási időszakban csökkentse az áramigényt, illetve növelje a saját háztartási napelemes-rendszer által megtermelt áram saját felhasználását (129. ábra). Ez a kötelező átvételi árak zuhanása miatt ma Németországban egyre inkább racionális lépésnek tűnik.

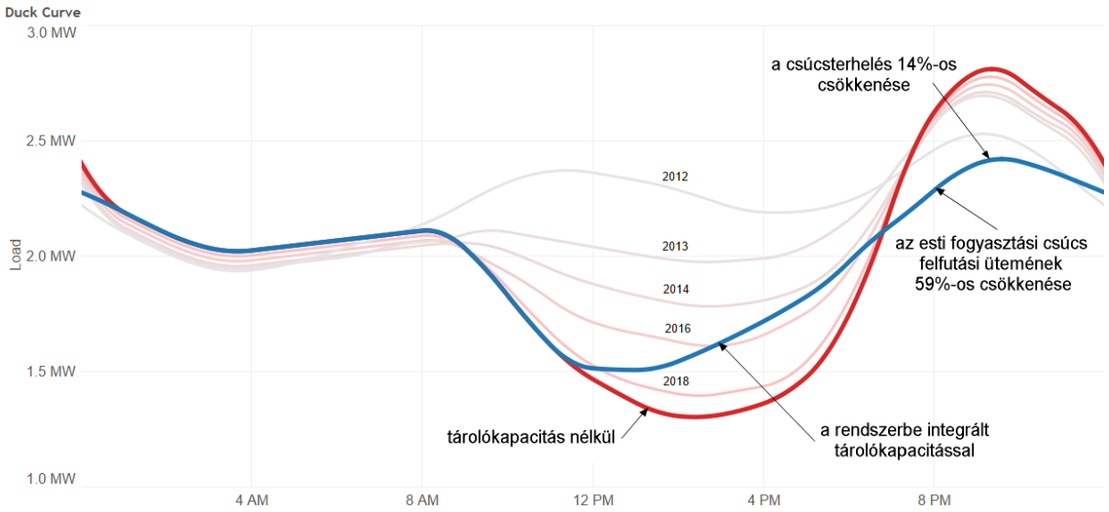


129. ábra. Egy 4700 kWh/év fogyasztású háztartás esetében az önellátás mértéke az ábrán látható módon alakul a beépíthető napelem-teljesítmény és az akkumulátor kapacitása függvényében

130. ábra. Az ipari léptékű akkumulátoros energiatárolás földrajzi képe (DOE 2016)

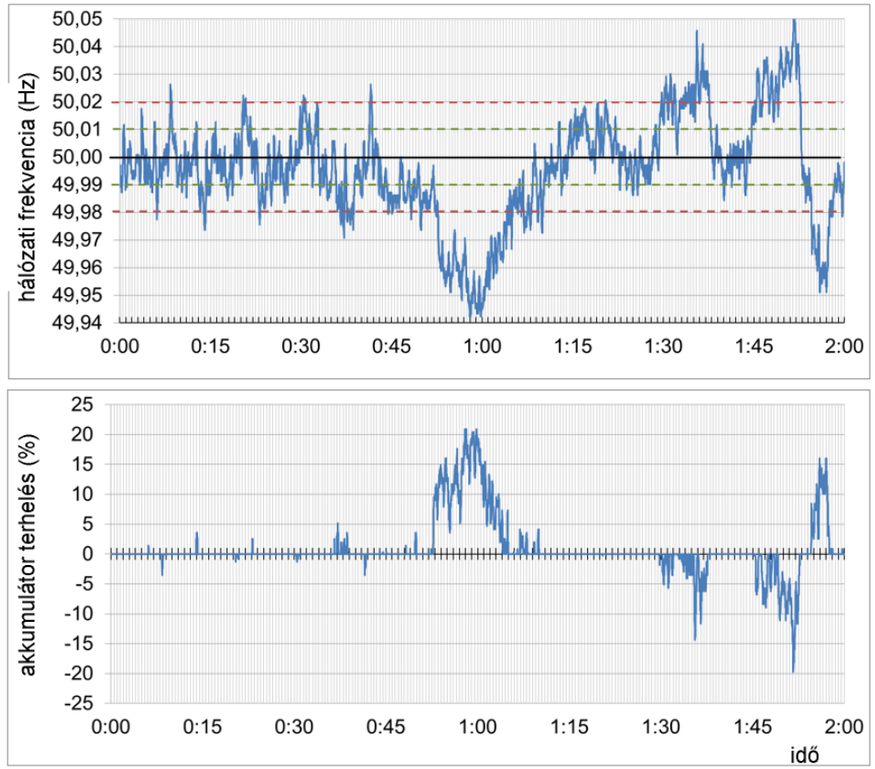
Világosan látszik, hogy az energiatárolásnak **minőségében, mennyiségében** és **funkciójában** is jelentős átalakulása történik. A napenergia térnyerése kapcsán például megfigyelhető, hogy ahol ezek az eszközök széles körben elterjedtek, ott a szolgáltatók megszokott terhelési görbéjét alaposan megváltoztatták: a napközbeni fogyasztás egyre nagyobb részét képesek a napelemek fedezni, ugyanakkor az esti csúcsfogyasztás felfutása is egyre gyorsabban jelentkezik (duck curve, lásd 131. ábra). A szolgáltatók az ilyen gyors igénynövekedésre egyre nehezebben tudnak a hagyományos eszközrendszerük segítségével megoldást találni. Az efféle kihívás feloldására leginkább az akkumulátoros energiatárolás kínál kézenfekvő megoldást, akár a háztartásokba telepítve (lásd Tesla Powerwall és ezernyi versenytársa).

.



131. ábra. A háztartási léptékű napelemek hatása a szolgáltatók terhelési görbéjére – energiatárolással és anélkül (Munson, K. 2015)

A funkció szempontjából kitapintható változás a villamosenergia-rendszer pillanatnyi igényeihez való, az eddigieknél is határozottabb, folyamatos alkalmazkodás irányába mutat. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy az akkumulátorok lényegében primer és szekunder szabályozási feladatokat vesznek át, hiszen a tárolás és kisütés egyre inkább **egészen rövid ciklusokban** történik a nap folyamán (132. ábra). Ezzel kiegészül az az imént bemutatott feladat (duck curve), amire naponta 1-2 betárolási és kisütési ciklus volt jellemző (összefüggésben például a napi fogyasztási mintázat és az ebből fakadó völgyidőszaki és csúcsidőszaki árak alakulásával).



132. ábra. Az akkumulátorok a primer (frekvencia)szabályozásban is egyre fontosabb szerephez jutnak (Magnor, D. 2015)

Felhasznált és ajánlott irodalom

BP (2016): BP Statistical Review of World Energy, June 2016. 48 p. https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf

DOE (2016): DOE Global Energy Storage Database. United States Department of Energy http://www.energystorageexchange.org/projects/data_visualization

Magnor, D. (2015): Stationary Battery Storage Systems - Technology Overview, Cost Calculation and Application Examples. Institute for Power Electronics and Electrical Drives

Mathiesen, B. V. et al. (2015): Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions. In: Applied Energy 145 (2015) 139–154

Munson, K. (2015): Integrated Energy Storage: An Answer to Addressing the Duck Curve? http://www.renewableenergyworld.com/articles/2015/04/integrated-energy-storage-an-answer-to-addressing-the-duck-curve.html

Soha T. – Munkácsy B. Harmat Á. – Csontos Cs. – Horváth G. – Tamás L. – Csüllög G. – Daróczi H. – Sáfián F. – Szabó M. (2017): GIS-based assessment of the opportunities for small-scale pumped hydro energy storage in middle-mountain areas focusing on artificial landscape features. In: Energy 141 (2017) 1363-1373

Az energiatervezés alapelemei – a potenciálok felmérése

A fenntartható energiatervezés fontos eleme a különféle potenciálok becslése, számítása:

a) megújuló energiaforrások potenciáljai;
b) hatékonyságban rejlő potenciál;
c) takarékosságban rejlő potenciál;
d) energiatárolás potenciáljai;
e) külpiaci lehetőségekben rejlő lehetőségek, így például a határkereszteő vezetékek és egyéb szállítási lehetőségek kapacitásában rejlő potenciálok.

A **megújuló energiaforrások** esetében a helyzetet bonyolítja, hogy igen sokféle potenciálról lehet beszélni (134. ábra). Sajnos még magas szintű szakmai anyagokban, így például a *Stratégia a magyarországi megújuló energiaforrások felhasználásának növelésére 2008 – 2020*, vagy a *Nemzeti Energiastratégia 2030* c. stratégiai tervezési dokumentumokban is előforduló szakmai hiányosság, hogy az ott szereplő adatok esetében a szerzők egyszerűen csak „potenciált" említenek (133. ábra), így nem tudni, hogy a sok, egymástól nagy mértékben eltérő potenciál közül melyikről van szó.

Megújuló energiaforrás	Potenciál (PJ)
Napenergia	1838
Vízenergia	14,4
Geotermia	63,5
Biomassza	203-328
Szélenergia	532,8
Összesen	**2600-2700**

133. ábra. A Nemzeti Energiastratégia 2030 című tervezési dokumentum táblázata a megújulóenergia-potenciálokról – annak megjelölése nélkül, hogy vajon melyik potenciálról van szó.

A kutatási gyakorlatban a megújuló energiaforrások potenciáljainak széles tárháza használatos, ezeket foglalja össze a 134. ábra. Ugyanakkor ez sem tartalmaz minden olyan potenciáltípust, ami a szakirodalomban előfordul. A fentieken túl vizsgálódás tárgya lehet az egymást lényegében lefedő „megvalósíthatósági potenciál" és „program potenciál", valamint a környezeti terhelésre fókuszáló „fenntartható potenciál"; de sok tanulmányban említik a „társadalmi-gazdasági" vagy az „elméleti potenciál" fogalmát is. Az energiatervezésben ezek közül több is fontos szerepet tölt be, hiszen ezek írják le azt a keretrendszert, amiben a tervezés során egyáltalán gondolkodni érdemes, ezzel is rávilágítva az erőforrások korlátosságára, az energiafogyasztás csökkentésének szükségességére az adott földrajzi térben.

134. ábra. A különféle megújulóenergia-potenciálok a világ egyik legjelentősebb szakmai kutatóintézete, a National Renewable Energy Laboratory szerint (NREL 2016 alapján szerk.: Munkácsy B.)

Itt kell megemlíteni, hogy a **térinformatika** eszközrendszere ma, a decentralizált energiatermelés világában már nélkülözhetetlen eleme (kellene legyen) a potenciálok meghatározásának. Sajnos minderről a hazai hivatalos koncepciók készítésénél nem vesznek tudomást, így a mai napig olyan számítások alapján folyik a nemzeti szintű energiatervezés, amelyek a tudományosság szempontjából évtizedek óta meghaladottak.

A geográfiai ismeretek és a térbeliség fontosságára hívják fel a figyelmet azok a tanulmányok, amelyekben a különféle területkategóriák közötti **átfedések figyelmen kívül hagyásával** kapott eredmény a nemzetközi szakirodalomban jellemző értékektől igen nagy eltérést mutat (135. ábra). A szélenergia potenciált bemutató cikk szöveges részében például az alábbi gondolat olvasható: *„A fent említett tételek között vannak kisebb-nagyobb átfedések. Ezeket nagyjából kiegyenlíthetik a figyelembe nem vett repülőterek és környezetük, a telekommunikációs okok miatt tiltott területek és a magányos épületek…*" (Hunyár M. 2004; Tóth P. et al. 2011). A térinformatikai eszközök éppen az ilyen problémák megoldására szolgálnak, így érthetővé válik, hogy az energetikai képzéssel és kutatással foglalkozó élvonalbeli intézmények miért foglalkoztatnak geográfusokat, térinformatikusokat a munkacsoportok fontos tagjaként.

A szélerőművek létesítésétől kizárt területek

Megnevezés	Tiltott terület [km^2]
Települések belterülete	6650
Vízfelületek	1753
Védett területek	8573
Kertek, szőlők, gyümölcsösök	2880
Erdők	17468
Vasútvonalak	3949
Közutak	2205
Nagy- és középfeszültségű távvezetékek	15419
400 m feletti és erős lejtésű terepek	1860
Összesen	60 758 km^2
Az ország területének	65,3%

135. ábra. Az MTA Energetikai Bizottsága által mai napig elfogadott potenciálszámítás egyszerű összeadásra épül, nélkülözi a térinformatikai megoldásokat (Hunyár M. 2004)

A hazai helyzetet tovább rontja, hogy számos korábban készített hatósági anyag és kutatási dokumentáció azért is torz képet fest a valódi lehetőségről, mert nem vett figyelembe, vagy rosszul értelmezett a szélturbina-telepítést befolyásoló néhány szempontot. A műszaki végzettségű szerzők számára a legnagyobb kihívást a **táj- és természetvédelem különféle kategóriáinak alkalmazása** okozta, emiatt számos korlátozó tényezőt egyáltalán nem, vagy rosszul vettek számításba. A 135. ábra tipikus példáját mutatja ennek, amikor egyszerűen „védett területek" megnevezés szerepel a kategóriák között. A pontos vizsgálatok során ezt legalább két vonatkozásban szükséges alaposabban vizsgálni: a) a **térségi szintek** szempontjából (helyi, megyei, országos, európai); b) a **védelem jellege** szerint (pl. tájképvédelem, természetvédelem, kulturális örökség védelme, agrár-környezetvédelem, talajvédelem stb.). Egyes megyékben a **tájképvédelmi szempontból kiemelten kezelendő területek** önmagukban is igen kiterjedtek. Csongrád megyében például a megyei és országos szintű tervezési dokumentumok alapján 76,8%-nyi területet fednek le, ami legalábbis megkérdőjelezhető.

Szempontok a megújulóenergia-potenciálok számításához

A potenciálok számítása kapcsán több lehetőség kínálkozik: a) a számításba vehető **terület/felület;** b) a **teljesítmény**; c) az **energiamennyiség** meghatározása. Az esetek többségében első lépésben a térbeli információk feldolgozása a feladat, majd ez alapján a műszaki paraméterek figyelembe vételével a teljesítmény meghatározása következik, és csak egy ezt követő lépésben lehet az energiamennyiséget becsülni.

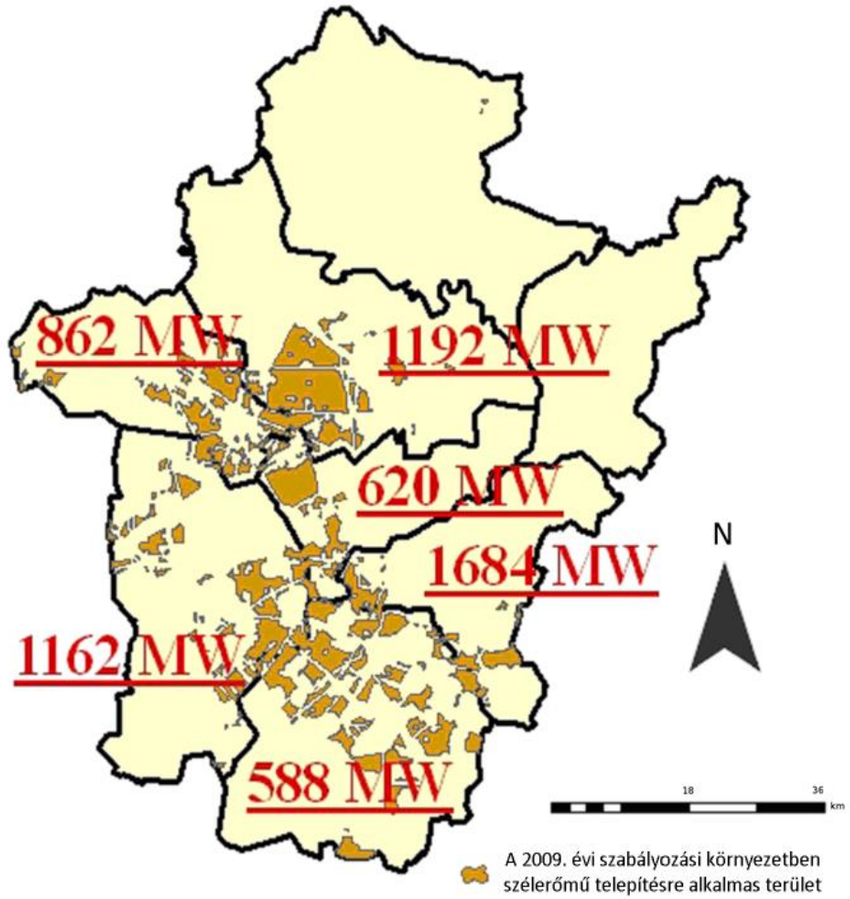
Azért lényeges itt a becslés kifejezés használata, mert **számos tényező alakul folyamatosan**, ami az eredményeinket befolyásolja, így törvényszerű, hogy a számításokat időről-időre pontosítani szükséges a változások fényében. Ezek többek között az alábbi területekre vonatkozhatnak:

- a jogszabályi környezet;
- a telepítés szempontjából lényeges adottságok és korlátok;
- az alkalmazott eszközök műszaki fejlődésével a fő paraméterek változása.

A műszaki potenciál számítása

A **műszaki potenciálok** számításának lépéseit a szélenergia példáján keresztül kezdjük bemutatni:

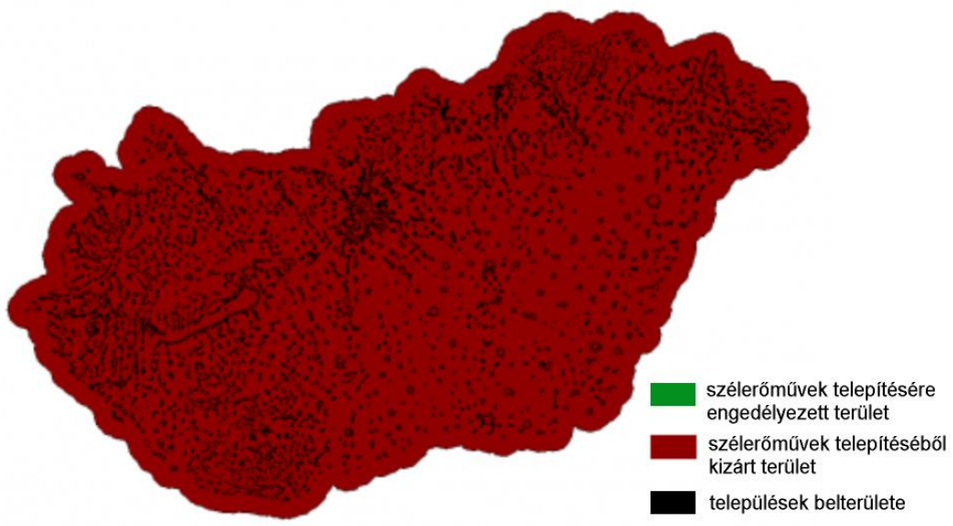
1. lépés: az alfejezetünk elején leírt sorrend értelmében az első lépés a számításba vehető **terület** számítása. Ebben az egyik kiindulási pont az, hogy az aktuális jogszabályok mekkora területre szorítják vissza az egyes megoldások, például a szélturbinák telepíthetőségét. Emellett csak további szigorítások alkalmazására van lehetőség, így például a napenergia esetében a zöldmezős területek kizárására.



136. ábra. A műszaki szélenergia-potenciál meghatározását célzó térinformatikai elemzés eredménye Békés megyére: az összterület 8,6%-án ~6100 MW a műszaki potenciál (Tóta A. 2009)

A szélenergia esetében a telepítésből kizárt területek listáját egyfelől a **Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium Természetvédelmi Hivatala**, másfelől az **Országos Lakás és Építésügyi Hivatal** által kiadott tájékoztatók tartalmazták. Az ezekben felsorolt kizáró tényezők

térinformatikai feldolgozásával és térképi megjelenítésével, illetve indokolt esetben pufferzónák alkalmazásával igen pontosan meg lehetett határozni egy-egy térség vagy az ország egészére vonatkozóan a rendelkezésre álló terület nagyságát (Munkácsy B. 2010). Igen lényeges tényező, hogy a jogszabályok időről-időre változnak, ráadásul teljesen kiszámíthatatlan módon. Ez néhány esetben akár gyökeres változásokat is eredményezhet a potenciálok tekintetében – mint a szélenergia esetében a **277/2016 (IX. 15.) Kormányrendelet** megalkotása és elfogadása. A jogszabály 1. paragrafusa alapján: „Beépítésre szánt területen és beépítésre szánt terület határától számított 12 000 méteren belül - a háztartási méretű kiserőműnek számító szélerőmű kivételével - szélerőmű, szélerőmű park nem helyezhető el.”



*137. ábra. A 2016. évi, szélerőmű-telepítéseket érintő jogszabályváltozás utáni helyzet a településel és beépítésre szánt területek köré húzott **12 km-es pufferzónával** (Sáfián F. 2016 alapján)*

2. lépés: a jogszabályok alapján rendelkezésre álló, illetve általunk felállított egyéb szempontok (pl. környezeti fenntarthatóság) szerint tovább szűkített **terület figyelembe vételével, alapvető műszaki paraméterek ismeretében** lehetőség van a **potenciális teljesítmények** kiszámítására. A továbbiakban a napenergia aktív hasznosítása szempontjából folytatjuk a potenciálszámítások bemutatását. Ez esetben azzal a szigorú feltétellel éltünk, hogy a zöldmezős területeket kizárva, kizárólag a meglévő infrastruktúra által kínált lehetőségeket, felületeket vesszük figyelembe (lásd 4. táblázat). Ezeket részben térinformatikai elemzés (lásd 138. ábra), részben a rendelkezésre álló statisztikai adatbázisok, illetve az ezeket feldolgozó szakcikkek segítségével határozhatjuk meg.

138. ábra. Ortofotó alapú térinformatikai elemzés, amely Esztergom belvárosában mutatja az aktív napenergia-hasznosítás szempontjából alkalmasnak ítélt, délies tájolású tetőfelületeket (Munkácsy B. et al. 2008)

A fenti ábra remekül érzékelteti, hogy a településszerkezet milyen lényeges szempont a napenergia hasznosításánál. Ugyanakkor ez esetben is érvényesül az előző pontban jelzett probléma: ha a **szabályozási környezet** ezt megakadályozza, mit ahogyan Esztergom esetében is erősen korlátozza, néhol tiltja a helyi építési szabályzat a napelemek telepítését, akkor a legjobb adottságok ellenére a lehetőség kihasználatlanul marad – amíg egy más szemléletű, új döntéshozói csoport meg nem változtatja a jogszabályt.

A **műszaki lehetőségek fejlődése** azonban ugyancsak befolyásolja az eredményt. A napelemek esetében részben az árcsökkenés, részben pedig olyan új napelemek kifejlesztése, amelyeknél kevésbé lényeges szempont a besugárzás iránya (vagyis nem szükséges azokat dél felé tájolni) azt eredményezi, hogy a korábbi vizsgálatokat újra el kell végezni, ezúttal már a keleti és a nyugati felületekre is figyelemmel.

4. táblázat. A napenergia hasznosítására alkalmas felületek (Kaboldy E. 2005; Pálfy M. 2004 nyomán kiegészítve és frissítve Munkácsy B. 2011)

	kedvezően beépíthető (km^2)	elvileg beépíthető (km^2)	2050-ben elvileg beépíthető (km^2)
panel épület	0,50	1,7	1,7
egyéb lakóépület	30,00	63	75,94
mezőgazdasági épület	6,08	13,5	17,55
oktatási épület	1,23	2,74	3,56
önkormányzati épület	1,46	3,25	4,23
épületek összesen	**39,27**	**84,19**	**102,98**
vasútvonalak	56,00	112,00	123,20
autópályák	1,05	2,32	4,64
autóparkoló	4,00	4,00	4,00
mindösszesen	**100,32**	**202,51**	**234,82**

A következő lépésben az adott műszaki területen, jelen esetben az aktív napenergia-hasznosítás területén jellemző paramétereket kell a térbeliségre, jelen esetben az alkalmas tájolású felületre vonatkozó információkkal összekapcsolni. A technológia jelenlegi állásánál két irányba folytathatjuk a vizsgálódást: a) a **hagyományos megoldások** figyelembe vételével külön-külön számolni a napelem (áramtermelés) és a napkollektorok (hőtermelés) potenciális teljesítményét – ezzel újabb kérdést generálva, miszerint a rendelkezésre álló felületet milyen alapon osztjuk meg a hő- és az áramtermelés között; b) a **kogenerációs hibrid kollektorok** figyelembe vételével számolunk, aminek előnye, hogy az előző pontban kreált problémát ezáltal elkerüljük, hiszen a rendelkezésre álló felületen a hibrid kollektorokkal mind a hő- mind a villamos energiát előállíthatjuk.

3. lépés: Az **energiamennyiség** számításához az alábbi ismeretekre van szükség:

a) előző lépésben kiszámolt teljesítmények;
b) az adott technológia egységnyi teljesítményével (vagy egységnyi felületről) megtermelhető villamos áram és hőenergia-mennyiség (ez az adat sokéves átlagok alapján rendelkezésre áll, ugyanakkor a valóságban nyilván évről-évre változik az időjárás, ez esetben a napsütéses órák száma és az sugárzásintenzitás eredményeképpen) (71. ábra).

A **szélenergia** esetében is ezt a számítási módszert tekinthetjük kiindulási alapnak. Elvileg ennél lényegesen bonyolultabb megközelítés is lehetséges, amelyben a térségenként, tájanként eltérő átlagos szélsebességet is igyekszünk figyelembe venni. Az alábbi számítási hibalehetőségek miatt azonban ezt mégis elvetjük:

- az országos potenciál számításához nem szükséges olyan pontosság, mint a beruházási döntés megalapozásához – az utóbbi esetben valóban kulcskérdés, hogy a tervezett beruházás leendő helyszínén, lehetőség szerint a lapátok tervezett magasságában (akár több magasságban is), legalább egy éven keresztül történjenek nagy pontosságú szélsebesség-mérések;
- meteorológiai szélmérés csak néhány kitüntetett ponton folyik, az ezekről származó adatokat felhasználva különféle számításokra és számítógépes modellezésre van szükség ahhoz, hogy horizontális és vertikális vonatkozásban is használható

eredményeket kapjunk – ezen kalkulációk és modellezések nyilvánvalóan bizonytalansági tényezőt jelentenek;
- az átlagos szélsebesség tekintetében évről-évre jelentős különbségek adódhatnak még országos szinten is, kisebb térségekre vonatkozóan pedig ezek az eltérések kifejezetten jelentősek is lehetnek;
- a kinyerhető villamos energiát a szélerőművek típusa is erősen befolyásolja, ami további komoly bizonytalansági tényező (hiszen a piacon elérhető modellek közül nem mindegy, hogy melyik típus paramétereivel számolunk).

A fentiek okán a gyakorlatban célszerűbb **a működő szélerőműpark éves kapacitásfaktor-adatainak felhasználásával** végezni a kinyerhető energiamennyiségre vonatkozó számításokat. Még jobb volna ezt kisebb térségekre bontva végezni, de a gyakorlatban az adatokhoz való hozzáférés kifejezetten nehézkes (némely esetben még a hivatalos szervezetek, hatóságok közpénzen összegyűjtött és feldolgozott adataihoz, térbeli információihoz sem lehet hozzáférni, ami nyilvánvalóan jogsértés, lásd Aarhusi Egyezmény[7]).

A **biomassza** esetében lényegesen bonyolultabb módszertanra van szükség, aminek lényege, hogy a térségben energetikai célra számításba vehető, és fenntartható módon megtermelhető biomassza produkció mértékét feltérképezzük.

A biomassza potenciáljainak meghatározásánál az adott területen élők élelmiszerszükségletének megtermeléséhez szükséges területet is be kell határolni, és csak az ezen felül maradó területekre lehet energetikai célú növénytermesztéssel számolni. Tovább csökkentik a rendelkezésre álló teret a védett természeti területek, amelyeket – ha nem is feltétlenül zárják ki, de – erősen korlátozhatják a lehetőségeket. Sok területen ugyanis az élőhelyvédelmi szempontok szigorú betartása mellett, a védett területek is szóba jöhetnek, mint energetikai célú biomassza források.

Fontos befolyásoló a talaj állapota, illetve az a tény, hogy a termőterületről folyamatosan elhordott biomassza kikerül a terület anyagáramlásából, ezáltal zavarok támadhatnak a szén, a nitrogén és a többi anyag természetes körforgásában, ezért igen lényeges a **humuszmérleg vizsgálata**. A talajok szerves szén- és nitrogén-tartalmának szintjét vetésforgó- és trágyázási kísérletek során vizsgálják, így meghatározhatók az egyes növényfajok vagy akár fajták humusz-visszajuttatási paraméterei, ami alapján az egyes növényfajokat humuszfogyasztó (pl. pillangósvirágúak, takarmányfű) vagy humuszgyarapító (pl. cukorrépa, silókukorica) kategóriákba sorolhatjuk. A keletkező melléktermékekhez (pl.: szalma, répalevél) és a szerves trágyákhoz (pl.: szilárd trágya, szarvasmarha trágya, szennyvíziszap) szintén **visszajuttatási koefficiensek** rendelhetők. A növényfajták speciális koefficienseit a rájuk jellemző talajtakarási és talajművelési mód és időtartam, illetve a tarló- és gyökérmaradványokból visszamaradó szalmahozam mennyisége és minősége határozza meg. A szerves trágyák koefficienseit a forrásuk (pl.: állatfaj, az életkor stb.), érési fokozatuk és szárazanyagtartalmuk alapján különböztetjük meg (Harmat Á. et al. 2016).

További nehézséget jelent, hogy az adott földrajzi térre számított tömegű és igen változatos összetételű biomassza, igen sokféle műszaki megoldással hasznosítható. Felhasználható a hőtermelésben és a villamosáram-termelésben egyaránt, de egy jelentős része akár közlekedési célra is.

A **környezeti hő** esetében a potenciál részben a vizsgált térség geotermikus adottságaival írható le. Másfelől ezen a ponton a hőszivattyúzás potenciálja is számításba jön, ám ezt lényegében lehetetlen pontosan meghatározni, ugyanis

- a környezeti hőmennyiség lényegében kimeríthetetlen energiaforrást jelent;
- a valódi korlátot a megújuló alapú villamos áram mennyisége jelenti, de kérdés, hogy az elérhető mennyiségből vajon mennyi villamos áramot kell más célokra fordítani, és mennyit vehetünk figyelembe a hőszivattyúk üzemeltetéséhez;
- kérdéses még, hogy milyen jósági fokot (COP vagy SCOP) veszünk figyelembe, hiszen ez igen nagy mértékben változik a környezeti hőforrás hőmérséklete és az ezt megcsapoló technológia függvényében.

[7] Az Aarhusi Egyezmény egy 1998 júniusában a dániai Aarhusban elfogadott, környezeti ügyekben az információhoz való hozzáférésről, a nyilvánosságnak a döntéshozatalban történő részvételéről és az igazságszolgáltatáshoz való jog biztosításáról szóló megállapodás. Magyarország 1998-ban aláírta majd 2001-ben ratifikálta.

A **vízenergia** potenciáljai kapcsán meghatározó kérdés, hogy milyen domborzati viszonyok és vízhozamadatok jellemzők a vizsgált földrajzi térségben. A sík vidéki folyókon létesülő, nagy (több 10 MW) teljesítményű erőművek drasztikus beavatkozást jelentenek a vízi és folyóparti ökoszisztémába, megváltoztatják a természetes folyódinamikát, ezért az ilyen típusú vízerőművek nem képezik a fentartható potenciál részét. Ilyen adottságok között az áramtermelés kizárólag kis léptékű megoldásokkal bővíthető, így például:

- a meglévő duzzasztók vízerőművé alakításával;
- hőerőművi hűtővizek mozgási energiájának hasznosításával;
- kis- és törpeerőművek építésével a kisebb vízfolyásokra;
    - vízfelszínen elhelyezett, a hajómalmok elvén működő kis erőművek;
    - mederfenéki átáramlásos turbinák (119. ábra és 120. ábra);
- meglévő vízerőművek bővítésével, rekonstrukciójával.

Fenti esetekben az **esés** és a **vízhozam** ismeretében számolható a potenciál – esetleg azt is figyelembe véve, hogy a vízhozam nem csak egy egyéves időszak során változik, hanem az éghajlat változásával szélsőségesebbé válva az egyes évek adatai is egyre nagyobb mértékben különbözhetnek.

A jogszabályi környezet változása

Amint a szélenergia hazai és a napenergia esztergomi példáján keresztül világosan látható, **a döntéshozók (és a munkájukat segítő szakértők) felelőssége óriási**, hiszen meghatározó szerepet játszanak az egyes műszaki megoldások térnyerése vagy visszaszorítása terén. Ugyanakkor a jogszabályok nincsenek kőbe vésve, azokat folyamatosan lehet csiszolni, sőt szükséges is – igazodva a körülmények folytonos változásához, esetünkben a környezetállapot egyre aggasztóbb romlásához (lásd éghajlatváltozás, szmog). Ebből következően a potenciálszámításokat a jogszabályváltozásokat követően időről-időre célszerű újra elvégezni.

A telepítés szempontjából lényeges adottságok és korlátok változása

Az energiatervezési feladatok esetében nem csak arra vagyunk kíváncsiak, hogy pillanatnyilag milyenek a lehetőségek, hanem arra is, hogy több évtizedes időtávlatban, vagyis mondjuk 2030-2050-ig (ami például energiatervezési dokumentum céldátuma) milyen változásokkal kell számolnunk. Például a napenergia esetében lényeges környezeti fenntarthatósági szempont, hogy csak a meglévő épületállomány (háztetők) és infrastruktúra (vonalas létesítmények) által kínált felületeket vesszük számításba, értékes zöldmezős területeket nem. Ez viszont azt jelenti, hogy a rendelkezésre álló felület számításánál figyelembe kell venni a tervezett létesítményeket is, amelyek néhány évtizedek múltán akár jelentős új lehetőségeket is kínálhatnak (pl. új autópálya-szakaszok, új építésű lakónegyedek). A vonalas infrastruktúra jövője kapcsán a 2005-ben elfogadott, 2050-ig szóló **Országos Fejlesztéspolitikai Koncepció** gondolatait emelhetjük ki, amelyben az is megfogalmazódik, hogy a „*korszerű gyorsforgalmi út- és vasúthálózat a sugaras szerkezetet oldó keresztirányú útvonalakkal egészül ki*”. Igazán pontos adatok minderre még nincsenek, így **becslésekre** kell hagyatkoznunk. Például a vasút esetében – tekintve, hogy a hálózat hossza európai léptékben nincs lemaradásban − 10%-os pályaszakasz-bővüléssel (a jelenlegi 8000 km helyett 8800 km-rel) számolhatunk. A gyorsforgalmi úthálózat esetében − ismerve az elmúlt 20-25 esztendő kormányzati elképzeléseit és tevékenységét, valamint azt a tényt, hogy a hálózat hossza a mostani nyugat-európai átlag kétharmada – akár 100%-os bővüléssel is számolunk 2050-ig. Ezt támasztja alá az elmúlt néhány év növekedési tendenciája: a hálózathossz 5 év leforgása alatt csaknem 150 km-rel gyarapodott: 1344 km-ről (2011) 1480 km-re (2016) nőtt. Ez tehát a potenciál szempontjából azt jelenti, hogy lényegesen nagyobb lesz a napelemek telepítésére alkalmas felület például zajvédő falak formájában, mint napjainkban.

139. ábra. 2800 m2-nyi napelem = egy kilométer hosszú útszakasz Tourouvre-au-Perch (Franciaország) (https://materia.nl/article/wattway-solar-road-clean-energy-normandy/)

Az alkalmazott eszközök műszaki paramétereinek változása

A műszaki lehetőségek ugyancsak jelentősen változnak. Ezen változások egyre része valamilyen pontossággal előre jelezhető, más változások azonban hirtelen következnek be. Példaként említhető a levegős hőszivattyúk tökéletesedése, a szélturbinák méretének növekedése vagy a közelmúltban a kétoldalas napelemek megjelenése. Ezek mind olyan változások, amelyek egy határ után a korábbi kalkulációk újraszámolását igénylik. A **kétoldalas napelemekkel** például lehetőség nyílik arra, hogy olyan lehetőségeket is figyelembe vegyünk, amelyekkel korábban nem számoltunk – így például az észak-déli tengelyű vonalas infrastruktúra elemeit (pl. M6 autópálya zajvédelme napelemekkel). De ekkora időtávlatban az sincs teljesen kizárva, hogy maguk az útfelületek termelnek majd villamos energiát (az első ilyen útszakaszokat már átadták) (139. ábra).

Társadalmi-gazdasági potenciál számítása

Az iménti kalkuláció csak a műszaki szempontokat és a jogszabályi környezetet mérlegeli, ám figyelmen kívül hagyja azokat a korlátokat, amelyeket a társadalom tűrőképessége vagy a gazdaság korlátozott teherbírása jelent egy adott földrajzi térben. Éppen ezért szükséges az előzőekre figyelemmel további számításokat is elvégezni a társadalmi-gazdasági potenciál meghatározása érdekében. Ennek kiindulási pontja az a vélhetően nem nagyon túlzó megállapítás, hogy a más földrajzi térségekben **már megvalósult kapacitásbővítések** alapján következtethetünk az érintett társadalom tűrőképességére, a gazdaság teljesítőképességére. A módszer kiindulási pontja tehát egy olyan kiemelkedő teljesítményű ország vagy országrész, amely az adott technológia (pl. szélenergia, napenergia) kapcsán világviszonylatban is a legjelentősebb eredményeket tudja felmutatni. Figyelembe kell venni, hogy a példaország a természeti adottságok tekintetében se legyen teljesen eltérő – vagyis például a napenergia potenciál számításánál nem szerencsés Magyarországot egy trópusi országgal összehasonlítani.

A nemzetközi adatsorok elemzése és összevetése során tehát a már megvalósult, működő kapacitások **területi** (pl. kW/km^2) és **lakossági** (pl. MW/1 000 fő) fajlagos adatsorait használhatjuk fel és alkalmazhatjuk hazai viszonyokra. Természetesen arra is lehetőség van, hogy indokolt esetben a kapott eredményeket a gazdaság teljesítményével (GDP-vel) is korrigáljuk.

A szélenergia kapcsán összehasonlítási alapot jelenthetnek például Németország keleti tartományai, amelyek világviszonylatban is kiemelkedő szélerő-kapacitással, csaknem 16 000 MW-tal rendelkeznek (5. táblázat).

5. táblázat. A szélerőművek és a terület néhány alapadata Németország keleti tartományaiban 2016-ban

Tartomány	Beépített szélenergia teljesítmény 2016-ig (MW)	Részesedése a teljes villamosenergia-fogyasztásban (%)	Népesség (fő)	Terület (km^2)
Szász-Anhalt	4 593	60,9	2 389 859	20 446
Mecklenburg-Elő-Pomeránia	2 845	83,4	1 652 000	23 179
Brandenburg	5 876	61,4	2 522 493	29 478
Türingia	1 225	18,7	2 278 136	16 172
Szászország	1 158	9,7	4 192 700	18 415
Berlin	10	0,1	3 431 700	892
Összesen	**15 707**		**16 466 888**	**108 582**
Fajlagos			0,95 kW/fő	144,7 kW/km^2

Mivel a kelet-német tartományokban lényegében 2000-től vett lendületet a szélerőművek telepítése, így mondhatjuk, hogy a fenti fajlagosokkal (0,95 kW/fő, illetve 144,7 kW/m^2) jellemezhető géppark ~15 év alatt épült ki. Ezeknek az adatoknak a felhasználásával Magyarország esetében is előre lehet tekinteni 15 esztendőt. Eszerint 2015 és 2030 között 0,95 kW/fő x 10 millió fő = 9 500 000 kW, vagyis **9 500 MW** szélturbina-teljesítményt volna képes kiépíteni (pontosabban a társadalom elviselni), **ha nem tenne sem többet, sem kevesebbet, mint a kelet-német tartományok**. A területre vetített fajlagos alapján 144,7 kW/km^2 x 93 030 km^2 ≅ 13 461 440 kW, vagyis kb. **13 460 MW** teljesítmény adódik. A két eredmény alapján valahol ebben a zónában, tehát **nagyjából 9500-13 500 MW körül lehet a hazánk tényleges, 2030-ra elérhető társadalmi-gazdasági szélerőmű-potenciálja**. Ezt elvileg a gazdaság teljesítményével (GDP-vel) is korrigálhatnánk, de ez nem tűnik indokoltnak, hiszen a szélerőmű-projektek megvalósítása piaci alapon, befektetők közreműködésével (jobb esetben szövetkezeti formában) történnek, így az adott ország vagy térség gazdasági teljesítménye a kapacitás bővülésének ütemét nem nagyon befolyásolja. Annál inkább a szabályozási környezet, ami – ahogyan korábban láttuk – jelenleg hazánk esetében kifejezetten korlátozó.

A fentiekben összegzett, vagy ahhoz hasonló megoldással elvégezhető a társadalmi-gazdasági potenciálok számolása a többi energiaforrásra is.

A fogyasztás csökkentésében és az energiatárolásban rejlő lehetőségek és potenciálok számítása

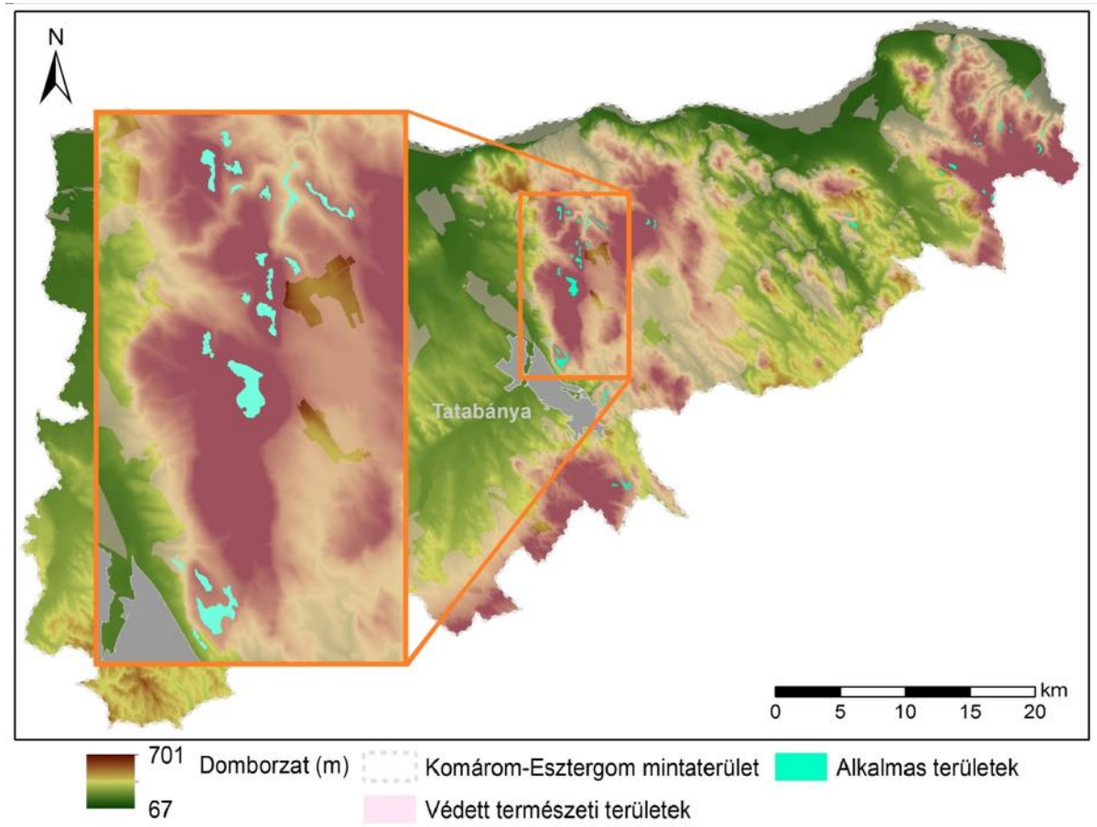
A megújuló energiaforrások potenciáljainak meghatározásán túl az is fontos kérdés, hogy vajon a **fogyasztáscsökkentés** terén milyen lehetőségeink vannak. A potenciálok számítása ez esetben már sokkal nehézkesebb, hiszen amíg a termelés esetében csak néhány energiaforrásra szükséges elemzéseket végezni, addig **a fogyasztás tekintetében számtalan különféle technológia** áttekintése, felmérése szükséges. Ha csak az épületenergetika vagy a személyközlekedés hatékonyságnövelésében rejlő lehetőségeket vesszük példának, az már önmagában komoly kihívás. Figyelembe kell venni ugyanis, hogy csak a személygépjárműveknek milyen sokféle főtípusa van például a *meghajtás* tekintetében (dízelüzem, benzinüzem, hibridüzem, konnektoros hibrid üzem, akkumulátoros elektromos meghajtás, hidrogénüzemű elektromos meghajtás). Mindezt árnyalja a gépjármű néhány lényeges mutatója, így például az *önsúlya*, valamint az is, hogy *hány fő utazik* az adott járműben (igen érzékletesen látszik ez egy korábbi fejezetben: 65. ábra).

A fogyasztási oldal technológiáinál is bonyolultabb az **emberi tényezőben rejlő potenciál** becslése. Az egyetlen valamennyire kalkulálható komponens az árak emelkedésére vagy csökkenésére bekövetkező fogyasztásváltozás. Azonban az oktatás, szemléletformálás tényleges hatásainak behatárolása csak korlátozott mértékben lehetséges. Ráadásul számos egyéb tényező is módosítja a végeredményt, így például a Jevons-paraxon vagy a bumeráng hatás (rebound effect).

Az energiarendszer tervezése szempontjából igen lényeges az **energiatárolás** lehetőségeinek feltérképezése is, az ebben rejlő potenciálok behatárolása. Ezt két tényező nehezíti, egyfelől a különféle tárolási technológiák rohamos fejlődése, amely lényegében évről évre írja újra a lehetőségeket, másfelől a korábban soha nem látott technológiai sokszínűség, melynek

eklatáns példája az akkumulátoros tárolás, ahol tízes nagyságrendű különféle megoldás kutatás-fejlesztése folyik rohamtempóban. Az energiatárolás kulcskérdései a) a tárolási veszteség, aminek csökkentése fontos feladat; b) a tárolás teljes életciklusra számított környezeti hatásainak minimalizálása. Ugyanakkor a technikai potenciálok meghatározása ezen a téren is lényeges kérdés, mert ez választ ad a megújuló energiaforrások rendszer illesztésének lehetséges mértékére. Ennek bizonyos technológiák esetében térinformatikai megközelítése is lehetséges, ilyen a szivattyús energiatárolás.

Magyarországi adottságok között leginkább a **kisléptékű szivattyús energiatárolás** tűnik az egyik reális alternatívának (140. ábra). A távérzékeléses adatokon alapuló elemzéssel lehetőség van nem csak a domborzati adottságokból fakadó lehetőségek feltérképezésére, de akár a meglévő víztározók és tájsebek (például bányagödrök) által kínált víztárolási opciók feltárására, sőt, akár különféle **potenciálok számítására is**. Az egyes paraméterek változtatásával, mint például a tározók közti minimális magasságkülönbség, a vízkivételi- és villamos hálózatra való csatlakozási lehetőségtől való távolság, a medencék mélysége és az egyes védett természeti területek közelségének maximális értékei, **különböző modellváltozatok készíthetők**.



140. ábra. Lehetséges víztározó-helyszínek egy Komárom-Esztergom megyére irányuló szivattyús víztározási potenciál-vizsgálatban. A kivágat által kitakart területen a modellezés nem hozott eredményt (Soha T. et al. 2016)

Felhasznált és ajánlott irodalom

Harmat Á. - Munkácsy B. — Szabó M .— Csüllög G. — Horváth G. — Tamás L. — Budai E. (2016): A szilárd biomassza fenntartható energetikai potenciálja egy Bükkaljai mintaterületen. In.: VIII. Magyar Földrajzi Konferencia előadásai, In Press

Hunyár M. (2004): A szélenergia potenciál hasznosítását korlátozó tényezők Magyarországon, Magyar Energetika, No. 4, pp. 3-10

Kaboldy E. (2005): A napenergia aktív hőhasznosításának hazai potenciálja. in Energiagazdálkodás, 46. 1. pp. 19-23.

KSH (2016): Villamosenergia-mérleg (1990–), internetes adatbázis. https://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_qe002.html

Munkácsy B. – Borzsák S. – Egri Cs. (2008): Megújuló energia megújuló határvidék: Megújuló energiaforrásokban rejlő potenciális lehetőségek az Ister-Granum Eurorégió magyarországi területén és Komárom-Esztergom megye teljes területén. Hajdúböszörmény: Zöld Kör, 2008. 49 p.

Munkácsy B. (2010): A területi tervezés szorításában - A szélenergia-hasznosítás hazai lehetőségei. in: Területfejlesztés és Innováció 4. 2. pp. 20-27.

Munkácsy B. (2011): A napenergia. In: Erre van előre! Egy fenntartható energiarendszer keretei Magyarországon - Vision 2040 Hungary 1.2

NREL (2016): Estimating Renewable Energy Economic Potential in the United States: Methodology and Initial Results. 127 p. http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/64503.pdf

Pálfy M. (2004): Magyarország szoláris fotovillamos energetikai potenciálja. in Energiagazdálkodás, 45. 6. pp. 7-10.

Sáfián F. (2016): Szabad, csak nem lehet. http://www.energiaklub.hu/blog/szabad-csak-nem-lehet

Soha Tamás, Munkácsy Béla, Csüllög Gábor, Harmat Ádám, Csontos Csaba, Tamás László, Szabó Mária, Horváth Gergely (2016): A decentralizált szivattyús energiatárolás lehetőségeinek GIS-alapú vizsgálata középhegységi környezetben, hazai mintaterületek alapján. TERÜLETFEJLESZTÉS ÉS INNOVÁCIÓ 11:(2) pp. 3-16.

Tóta A. (2009): A szélenergia-termelés lehetőségei Dél-Alföld megyéiben. Diplomamunka, ELTE TTK, 79 p.

Tóth P. – Bulla M. – Nagy G. (2011): Energetika. A szélenergia hasznosítása. http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0021_Energetika/ch04s03.html

A megújuló energiaforrások rendszerbe integrálása

Ahogyan azt korábban kifejtettük, az energiarendszer decentralizációja, az időjárásfüggő technológiák elterjedése komolyan próbára teszi a rendszerirányítást, és az energiatervezési szakértők felkészültségét egyaránt. A nemzetközi szinten elfogadott álláspont szerint egy átlagos állapotban lévő villamosenergia-rendszer, különösebb fejlesztések nélkül, a teljes áramtermelésnek mintegy 20%-os arányában volna képes például szélerőműveket befogadni a rendszerbe (a hazai érték nagyságrendileg 1%). Ugyanakkor **a tudomány mai állása szerint jól működő rendszerben akár a 100% megújuló energiaforrás részarány is elérhető**, de ez esetben már átfogó beavatkozásokra van szükség, amelynek elemei:

a) az **energiafogyasztás időbeli és mennyiségi befolyásolása** -– például az elektromos üzemű, hőtárolásra képes hőszivattyús rendszerek üzemeltetése olyankor, amikor sok villamos energia áll rendelkezésre;
b) **szinergiákon alapuló rendszerszintű megoldások** – amelyek messze túlmutatnak akár a villamosenergia-rendszeren, akár a hőenergia-rendszeren;
c) az **energiamix optimalizálása** – az energiatermelés szempontjából kedvezőtlen időszakok (éjszaka, felhős, szélcsendes idő) esetére **időjárástól független alkalmazások** – például a biogáz-technológia viszonylag jelentős részaránya;
d) **az időjárástól függő termelés térbeli kiterjesztése minél nagyobb területre** – annak érdekében, hogy minél kisebb problémát okozzanak a kis földrajzi területre jellemző időjárási állapotok (leegyszerűsítve: olyan nem fordulhat elő, hogy az egész kontinensen egyszerre áll el a szél);
e) az **energiarendszerek összekapcsolása** – országon belül és azon kívül is (export és import);
f) a megújuló alapú villamos energia **átalakítása** (általában hőenergiává), **felhasználása** (pl. fűtésre), **tárolása** (pl. használati meleg víz formájában).

Az alábbiakban a fent röviden vázolt beavatkozási pontokat mutatjuk be röviden.

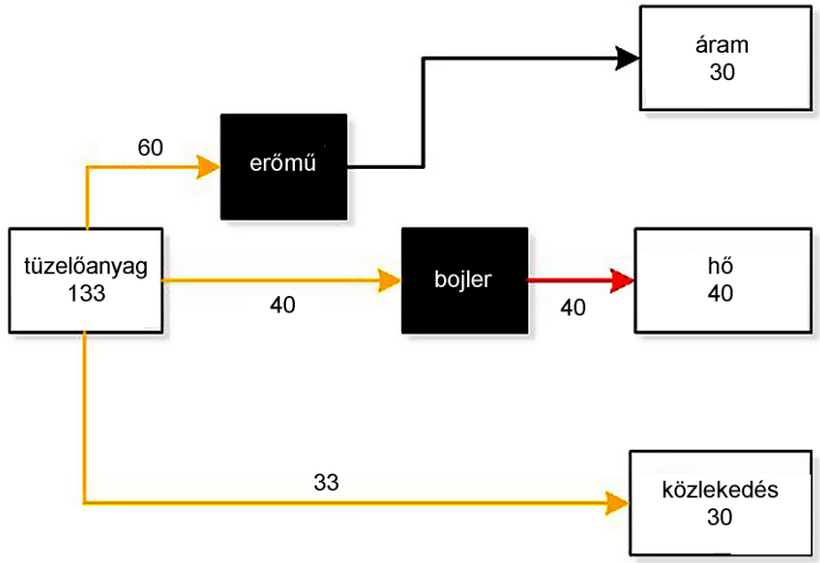
A fogyasztás befolyásolása

Ebben az összefüggésben két lehetőség merül fel: a) a fogyasztás **mennyiségének** csökkentése, amely nélkül – mint ahogyan ez korábbi fejezetekből már kiderült – semmiféle értelemben nem beszélhetünk fenntarthatóságról; b) a fogyasztás **időbeliségének** igazítása a megújuló energiaforrások pillanatnyi kínálatához. Az előbbi megoldás elsősorban gazdasági eszközökkel mozdítható előre. Az utóbbi megoldás kulcsa a korábban már vázolt rugalmas árképzés, amely akár óránként többször változó fogyasztói árakat jelent, a pillanatnyi és várható kereslet-kínálat függvényében.

Szinergiákon alapuló megoldások

A hagyományos energiarendszerben **az energiagazdálkodás három fő területe egymástól lényegében elválasztva működött** (141. ábra), ami számos egyéb probléma mellett sok veszteséget jelentett – és jelent ma is, azokban az országokban, ahol nem tudtak továbblépni a 20. századi centralizált megoldásokon. Az alábbi elemzés az ebből való kiutat mutatja be a kezdeti és a célállapot bemutatásával (Mathiesen, B.V. et al. 2015). Az első lépésben a modellben szereplő rendszer elemei nem voltak egymással érdemi kapcsolatban (141. ábra):

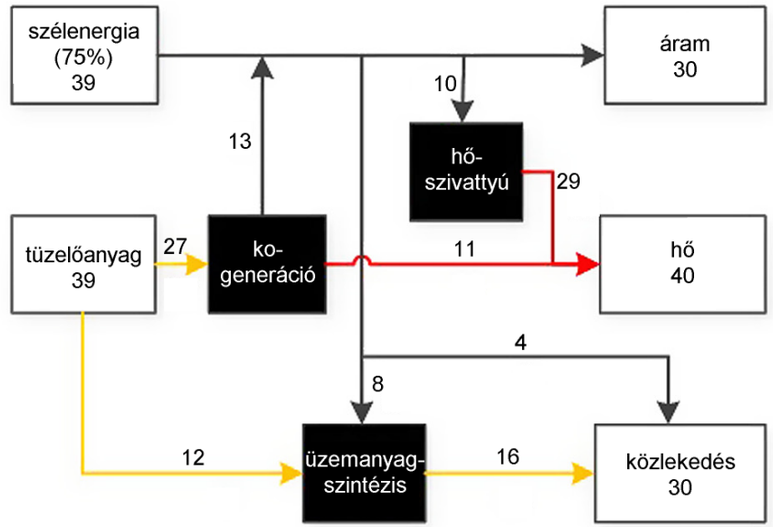
- elválasztott áram- és hőtermelés (centralizált rendszerben hőerőművekkel);
- egyedi olaj- és földgázfűtési megoldások;
- az előzőektől függetlenül működő közlekedési rendszer.



141. ábra. A 20. századi hagyományos energiarendszer működése – a számok egységnyi energiamennyiségre utalnak (Mathiesen, B.V. et al. 2015)

A célállapot, vagyis az optimális megoldás bemutatásánál az energiaszolgáltatások oldalán ugyanazt az energiamennyiséget kapjuk, amit a 141. ábra esetében, ám egy igazán komplex megközelítés eredményeként lényegesen kevesebb, a kiindulási állapotban látható **133 helyett csak 39 egységnyi** tüzelőanyag felhasználásával, lásd 142. ábra (Mathiesen, B.V. et al. 2015). Ehhez az eredményhez az alábbi beavatkozásokra van szükség:

- a kezelhetőnek tekintett maximális szélenergia-részarány elérése, ami Dániában 75% körüli érték lehet (a tényleges mutató 2015-ben már 42% volt). Ennek érdekében össze kell kapcsolni az energiarendszer egyes elemeit (például akkumulátoros elektromos autók rendszerbe állítása révén), energiatárolási megoldásokat és „elektroüzemanyagokat” kell alkalmazni – ez utóbbiak elektromos áram segítségével, CO_2 felhasználásával készülnek (lásd Oláh György „metanol-gazdasága”);
- az elválasztott áram- és hőtermelés (esetleg hidegenergia-termelés) helyett kogeneráció vagy trigeneráció alkalmazása;
- ugyancsak az áram- és hőtermelés összekapcsolása, és a környezeti hő alkalmazása hőszivattyúk segítségével (ezáltal COP3 érhető el – ami meglehetősen visszafogott értéknek tűnik);
- az egyedi fűtési megoldások helyett a távfűtés kiterjesztése – a GIS-alapú elemzések szerint ez Dániában akár 63-73%-os arányban is észszerű és költségkímélő megoldás lehet, miközben már jelenleg is 50%-os a részaránya;
- általában az egyéni megoldások helyett a közösségi megoldások alkalmazása (pl. közlekedés).

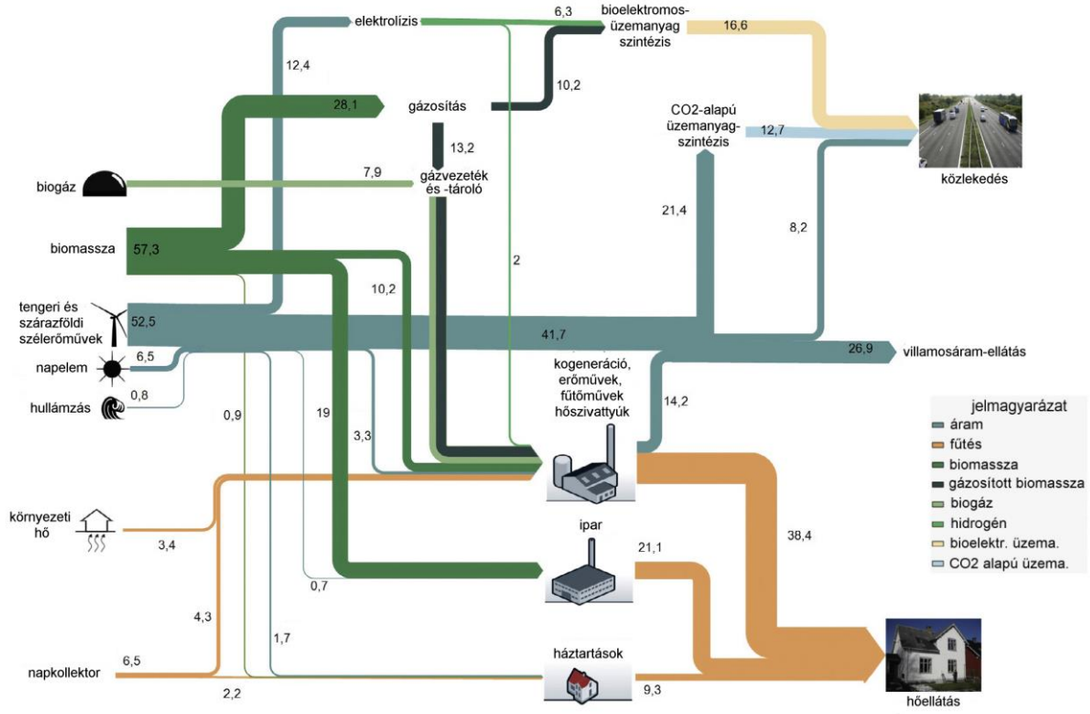


142. ábra. Hipotetikus intelligens energiarendszer 75%-os szélenergia részaránnyal és elektroüzemanyagokkal (Mathiesen, B.V. et al. 2015)

Optimális energiamix

A forrásszerkezet optimalizálása kulcskérdés a szél- és napenergiában szegény időszakok szempontjából. A legújabb szoftveres modellvizsgálatok alapján egy optimalizált intelligens rendszerben (smart grid system) **50% körüli biomassza-részarány elegendő az energiarendszer biztonságos működtetéséhez** (143. ábra) – hozzátéve, hogy ez esetben nem csak az áramtermelésről, hanem a teljes energiarendszerben betöltött szerepről beszélünk. Ekkora rugalmasan működő és gyorsan reagáló kapacitás révén állítható össze egy működő energiarendszer, akár egy igen jelentős szélerőmű-kapacitást feltételezve is (Mathiesen, B. V. 2015). A fenti szimuláció (Coherent Energy and Environmental System Analysis, CEESA) a dániai adottságok figyelembe vételével készült, ahol a tengeri és szárazföldi szélerőművek a) az átlagosnál nagyobb kapacitásfaktorral működnek; b) az átlagosnál magasabb részarányt mutatnak. Igen lényeges, hogy minden ország esetében szükség van ilyen elemzésekre, mert az adottságok és lehetőségek mindenhol más-más arányokat engednek meg, illetve tesznek lehetővé.

Érdekes adalék, hogy a szoftveres elemzés szerint a dániai adottságokkal számolva – szélsőséges esetben, a rendszer kínálta minden megoldást a lehetőségek határáig igénybe véve – az **áramtermelésnek akár 75%-a is fedezhető szélerőművekkel** (éves szinten), csak a maradék 25% esetében kell bizonyosan más megoldásokat találni.

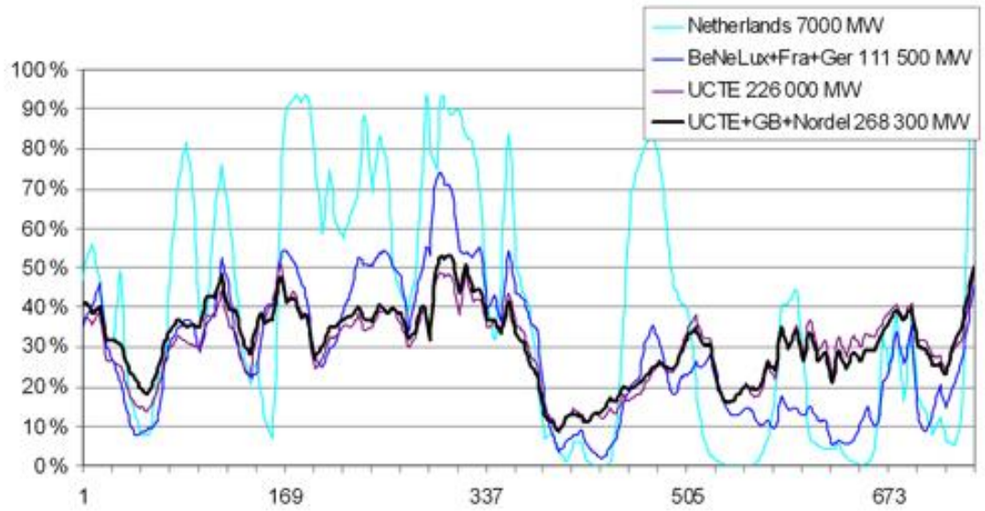


143. ábra. A CEESA 2050 energiaforgatókönyv energiafolyam-ábrája – a diagramban szereplő számok mértékegysége TWh (Mathiesen, B.V. et al. 2015)

Az időjárástól függő termelés térbeli kiterjesztése minél nagyobb területre

Jelentősen javítja a szélerőművek rendszerintegrációját a turbinák átgondolt elhelyezése is. A földrajzilag minél elszórtabb telepítés számottevően kisimítja a szélerőműpark teljesítményingadozásait. A valós szélsebesség-adatokkal végzett számítógépes modellezés eredménye (144. ábra) világosan érzékelteti, hogy a 2020-ra előrejelzett kapacitással a Hollandia területén várhatóan működő szélturbinák komoly teljesítményingadozást mutatnak. Ugyanakkor minél nagyobb földrajzi területre végezzük el a szimulációt, a görbe annál inkább kisimul. A fenti törvényszerűség tükrében a hazai helyzet, amikor a szélerőmű-

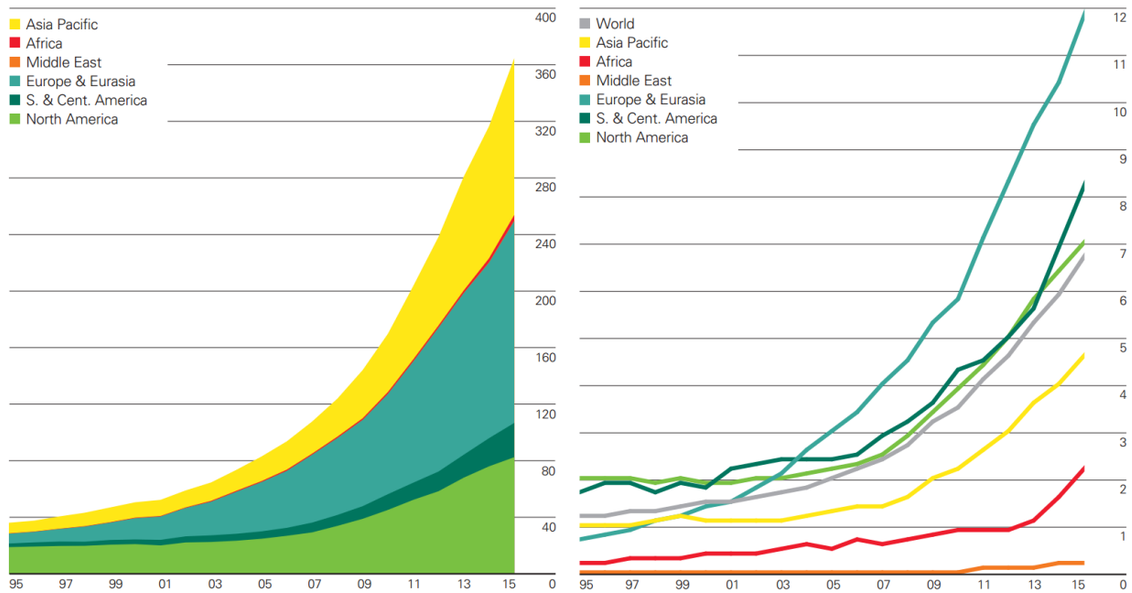
kapacitás 95%-a az ország ÉNy-i térségében koncentrálódik, semmiképpen nem tekinthető szerencsésnek.



144. ábra. A szélerőművek teljesítményének szimulációja a 2000. decemberi szélsebességadatok felhasználásával a 2020-ra előrejelzett szélerőművi kapacitásadatok felhasználásával (EWEA, http://www.wind-energy-the-facts.org/)

Az energiarendszerek összekapcsolása

Az előző pontban felvázolt törvényszerűség már önmagában ráirányítja a figyelmet a nemzeti energiarendszerek összekapcsolásának fontosságára. Tehát a jövőben az efféle összeköttetések erősítése elkerülhetetlen, a villamosenergia-hálózat tekintetében pedig inkább olyan belső szerkezeti átalakulások várhatók, amelyek a kisebb működési hálózati elemek (mikrogrid) elterjedése és ezek szoros együttműködése felé mutatnak. Mindemellett felértékelődni látszanak azok a kapcsolatok, amelyek révén a villamos energia szállítása nagyobb mennyiségben is megoldható – legyenek ezek országhatárokon átnyúló (pl. a Kárpát-medence egészét érintő), vagy akár országon belüli (pl. Németország északi és déli térségei közötti) hálózati elemek. Ezek révén – a kereslet és kínálat függvényében nyilvánvalóan akár értékesíteni, akár vásárolni is lehet.

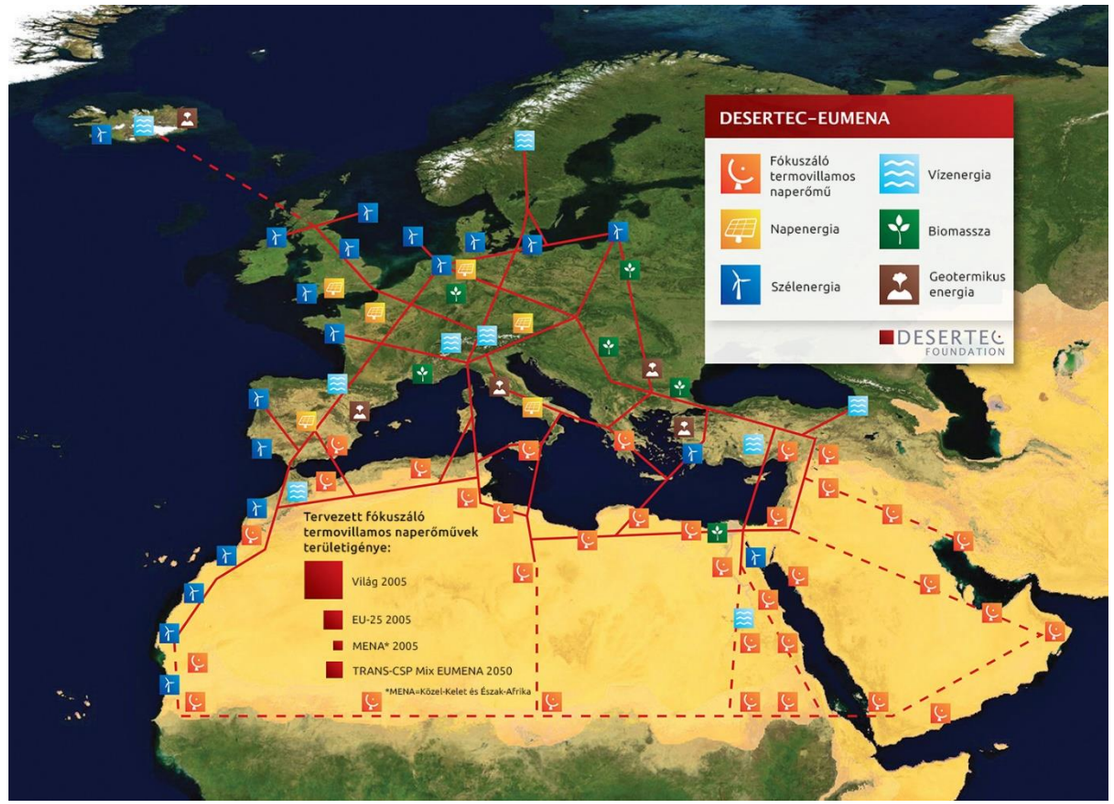


145. ábra. A megújuló energiaforrásokból nyert energia mennyisége (millió t olajegyenérték) és az áramtermelésben való részesedése (%) térségenként a BP szerint (2016)

Ebben a témakörben az egyik leggyakoribb felvetés az afrikai **Szahara** térségében 2009-ben elindított **DESERTEC program**. Ennek kiindulási pontja az a felismerés, hogy a szinte lakatlan észak-afrikai térség 6 óra alatt annyi besugárzást kap, amennyi elegendő volna az egész emberiség egy éves energiaigényének fedezésére. Az elképzelés szerint a térségben rendelkezésre álló hatalmas mennyiségű napenergiát elsősorban fókuszáló termovillamos erőművekkel kellene villamos energiává alakítani, de számos egyéb kedvező lehetőséget (pl.

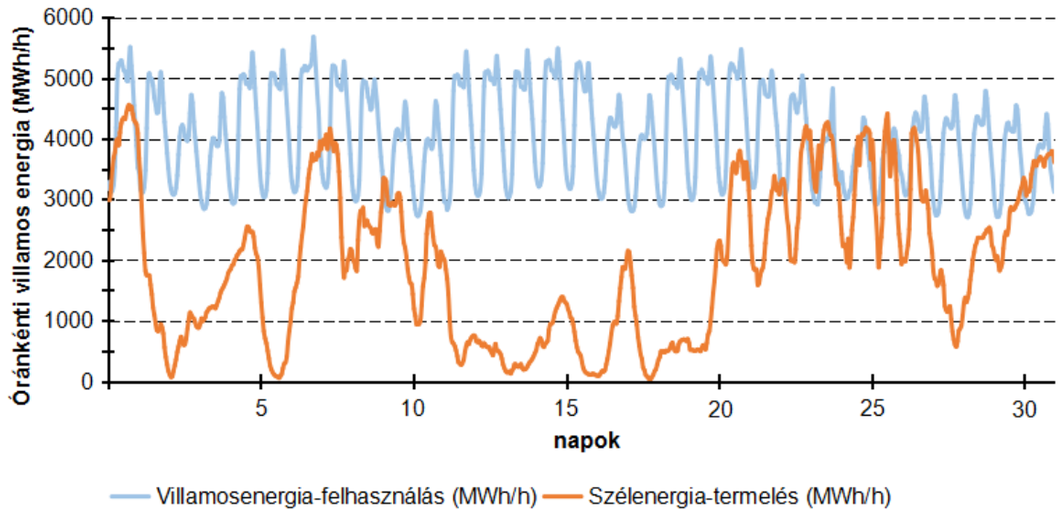
szélerőműveket az Atlanti-óceán mentén) is fel lehetne használni, hogy Európa energiaéhségét csillapítani lehessen (146. ábra). A kontinentális energiarendszerek összekapcsolására, a nagy távolságú szállításra a HVDC technológiát (42. ábra) szándékoztak alkalmazni. A felvetés kapcsán rendszeresen megfogalmazódtak politikai jellegű kritikák, amelyek Európa esetleges kiszolgáltatottságára hívták fel a figyelmet, és a 2011-es Arab-tavasz eseményeinek következményeként az elképzelés végképp háttérbe szorulni látszik.

Ehhez hasonló elképzelés az Északi-tengeri Szélerőmű Csomópont (North Sea Wind Power Hub), ami a 2017-ben publikált koncepció szerint egy 100 000 MW-os (vagyis 50 Paksi Atomerőmű teljesítményével megegyező) offshore szélerőmű park volna, ami négy ország energiarendszerét kapcsolná össze. A projekt hátterében a holland, a dán és a német villamosenergia-rendszer irányítók állnak, sőt az elképzelés szerint az Egyesült Királyság is csatlakozna a projekthez, de további csatlakozókat is szívesen fogadnak. A hálózat középpontjában, a sekély vízű (15-35 méter mély) Dogger-pad térségében egy 6 km^2-es mesterséges sziget építését is tervezik, ami otthont adna a központi infrastruktúra, így például a transzformátor-állomás számára. A megvalósítás a szándéknyilatkozatok aláírásával lényegében megindult.



146. ábra. A DESERTEC program - a piros négyzetek mutatják az energiaellátás biztosításához szükséges területek nagyságát (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DESERTEC-Map_large.jpg)

Az egyik legnagyobb kihívás, amivel napjaink leggyorsabb ütemben terjedő megújuló energiaforrásainak, így a szél- és napenergiának szembe kell nézniük, az termelésük időjárástól való függősége. Ez a napi ritmus szerint változó fogyasztási igények és a többi termelővel való nehézkes együttműködés szempontjából egyre nagyobb rendszerirányítási kihívásokat jelent. Látványosan érzékeltetik a problémát szélenergia-termelés és áramfogyasztás változásának dániai adatsorai (2. ábra). Ott a rendelkezésre álló szélturbina-kapacitás 2016-ban meghaladta az 5240 MW-ot (IRENA 2017), ami lényegében a nettó villamosenergia-igénnyel vethető össze, hiszen a téli csúcsigény 5500-6000 MW közötti, a nyári 4500 MW körüli teljesítményigényt jelent (Energynet.dk 2017).



147. ábra. A dán villamosenergia-fogyasztás és a szélerőművek termelése 2016 decemberében - MWh/h (ENERGYNET.DK 2017 adatai alapján)

Azokban a szeles időszakokban, amikor a termelés átlépi a fogyasztás mértékét (a 2. ábrán például karácsony környékén), a villamosenergia-rendszerben exportálható többletenergia keletkezik, ezzel szemben szélcsendes napokon a kieső termelés miatt hiány mutatkozik (a 2. ábrán december közepén).

További adalékok az energiagazdálkodás átalakításához

Az energiarendszer átalakításában rejlő kihívások

Az energiarendszer gyökeres átalakításával kapcsolatosan ma már nem az a kérdés, hogy megvalósítható-e, mert ebben a szakértők válasza határozott igen. Alapkérdésként sokkal inkább az merül fel, hogy a változtatások egy-egy ország vagy település esetében vajon mikorra valósíthatók meg, illetve az egyre élesebben kibontakozó természeti és társadalmi válsághelyzetben vajon mennyi ideje maradt minderre az emberiségnek.

Az átalakulás ugyanakkor számos gyakorlati kérdést is felvet:

- sikerül-e a **közgazdaságtani** gondolkodás radikális reformját elérni, ami nélkül az átmenet lényegesen lassabb (támogatások, adópolitika filozófiája, externáliák);
- rendelkezésre állnak-e a szükséges **természeti erőforrások** (pl. réz, kobalt, lítium);
- a használt elektronikai hulladékok visszagyűjtése és újrafeldolgozása, népszerűen a **városi bányászat** (urban mining), vajon milyen mértékben lesz képes az elsődleges erőforrások kiváltására – az egész folyamat szempontjából nagyon lényeges szabályozási lépés, hogy Európai Unió 2012-ben újraírta a már 10 éves E-hulladékokról szóló jogszabályát, mely szerint a tagállamokban 2016-tól el kellett érni az eladott elektromos készülékek 45%-ának visszagyűjtését és újrafeldolgozását. A tervek szerint ez 2019-ben 65%-ra, esetleg 85%-ra fog emelkedni;
- a **technológia fejlődése** milyen további, ma még nem sejthető lehetőségeket kínál az elkövetkező évtizedekben (termelés, elosztás, fogyasztás terén egyaránt);
- A folyamatosan decentralizálódó termelés révén az egyre nagyobb számú **prosumer** (olyan termelő, aki egyben fogyasztó is, ráadásul a választási ciklusokban szavazati joga van) milyen mértékű **politikai nyomást** képes gyakorolni a folyamatok irányát és az átalakulás gyorsaságát illetően;

A fentiek közül a geográfiához leginkább a 2. pont, vagyis a természeti erőforrások témaköre kapcsolódik, így az alábbiakban vázlatosan áttekintjük a lehetőségeket és korlátokat.

Acél

Az alapanyagok szűkössége szempontjából a vasérc rendelkezésre állása az egyik leglényegesebb elem, hiszen például egy modern **szélturbina** tömege – az alapozáshoz felhasznált anyagokat figyelmen kívül hagyva – 80%-ban acélból épül fel, ami óriási mennyiséget jelent egy átlagosan 3-400 tonnás szerkezetnél. Ez a tetemes mennyiség a toronyban, a gondolában, a turbina tengelyében és az alapzatban található. A **napenergia** hasznosítása terén a speciális rozsdamentes acél jelentősége kiemelkedő mind a tartószerkezetek, mind pedig a hőtároló rendszerek kialakításában.

Az acél fő nyersanyaga a vasérc, de gyártása folyamán elektromos áramra, illetve a konvencionális termelés során kokszra van szükség. A globális termelés 70%-át kitevő kemencés módszerrel egy tonna acél előállításához 770 kg kokszolható feketekőszén szükséges. A jelenlegi fogyasztást figyelembe véve a **vasérc még 25-30 éven át lesz gazdaságosan kitermelhető**, de ez az érték a közgazdasági tényezők változásának (így leginkább az árak változásának) függvényében akár 80 év is lehet.

Reményt keltő azonban, hogy a **hulladékvas feldolgozása igen nagy ütemben terjed**. Ennek előnye, hogy az acél újrafeldolgozásával közel 67%-os az energiamegtakarítás (Johnson, J. et al. 2006), éppen ezért lényeges, hogy az újrafeldolgozott acél részaránya tovább növekedjen a mai 37%-ról – reményt keltő, hogy az ipari nagyhatalmak az átlagnál lényegesen magasabb, 70% körüli mutatókat érnek el.

Alumínium

Az alumínium felhasználása a megújuló szektorban szinte mindenhol jelen van, de leginkább a **napenergia** hasznosításában domináns. A napelemek esetében a felhasznált alumínium mennyisége elérheti akár a 60 t/MW-ot, míg koncentráló naperőművekben akár a 130 t/MW-ot is (Bödeker, J. M. et al. 2010). A szélenergia terén az acél után ez a legnagyobb tömegben felhasznált anyag. A modern szélturbinák 50-100 tonnás gondolájának már több mint 65%-át az alumínium teszi ki, és szerepe a súlycsökkentés, illetve a hatékonyságnövelés miatt egyre növekszik az iparágban.

Az alumíniumgyártás alapját képező **bauxit** tartalékai bőségesek, ám decentralizáltan oszlanak el a Föld országai között. Napjaink évi világtermelésével számolva több mint 100 évre tűnnek elegendőnek a jelenleg gazdaságos kitermelésre alkalmas készletek. A világátlag alapján 1 tonna alumínium előállításához 5,2 tonna bauxit szükséges, melynek már a **bányászata és feldolgozása is hatalmas energiabefektetést kíván**, ugyanis mindehhez ~15,3 MWh/t elektromos áramra van szükség (OECD 2010).

Az **alumínium újrafeldolgozása** tehát legfőképp nem a készletek védelmének a szempontjából fontos, hanem a termék életciklusában domináló befektetett energia megtakarítása okán, mellyel ennek mintegy 92%-a spórolható meg (West, L. 2009). Leginkább ezzel hozható összefüggésbe, hogy az acél és a papír után a legnagyobb mennyiségben ennek a másodnyersanyagnak az újrafeldolgozása történik. Napjainkban az alumínium-hulladékoknak átlagosan mintegy 30%-át dolgozták fel újra, ám ez az arány egyes szektorokban lényegesen magasabb lehet, az autóiparban például 85-95% közötti.

*148. ábra. Az alumínium kapcsán Kolontár-Devecser-Somlóvásárhely (Ajka) térségében történt, tíz ember halálát okozó **vörösiszap-katasztrófa** is az eszünkbe kell jusson – a felelősök kilétére hivatalosan máig nem derült fény…*

Az addigieket összefoglalva: a vas- és acélgyártás, valamint az alumíniumkohászat esetében is **a feldolgozáshoz szükséges energia árától függ legnagyobb mértékben az ellátás biztonsága**, valamint a félkész termékek világpiaci ára is.

Réz

Felhasznált tömege szempontjából a réz csupán a harmadik helyet foglalja el a megújuló energiát hasznosító berendezések alapanyagai között, ugyanakkor mégis **az egyik legfontosabb nyersanyag**, **ugyanis az ezüst után a legjobb hő- és elektronvezetési képességekkel rendelkező fémünk**, ráadásul mind fizikailag, mind kémiailag viszonylag stabil, korrózióálló anyag. Alkalmazása elsősorban az **áram szállításánál** kulcsfontosságú, jelenleg kb. 70%-a kerül ilyen felhasználásra. Ezáltal alacsony szinten tarthatók a hálózati veszteségek, kisebb áramtermelő-kapacitást kell üzemeltetni, kevesebb energiaforrást kell felhasználni.

Gazdaságosan kitermelhető, ismert készlete ~720 millió tonna, ami a jelenlegi kitermelést (19 millió tonna/év) figyelembe véve még ~40 esztendőre tűnik elegendőnek.

A megújuló alapú energiatermelés rézfogyasztása jelentősen meghaladja a konvencionális áramtermelési módok rézfelhasználását. A szélturbinák rézfelhasználása egy brit tanulmány szárazföldi szélfarmok életciklus-elemzéseinek átlagai alapján 5,6 t/MW-ot tesz ki, ami – 3 MW teljesítménnyel kalkulálva – erőművenként átlagosan 16,8 tonnát jelent, emellett a gépek közti kábelezésre és az alállomáshoz való csatlakozáshoz további 10,9 tonnát használnak fel egy turbinára vetítve (Falconer, I. K. 2009).

149. ábra. A réz fő felhasználási területe a kábelek gyártása

Az igények növekedésére vezethető vissza, hogy az utóbbi 15 évben hatszorosára emelkedett a fém világpiaci ára, amely tendencia további folytatódása áremelkedést okozhat a megújuló energiák és általában a tiszta technológiák terén.

Reményre adhat okot az újrafeldolgozás, amivel közel 90%-os energiamegtakarítást érhetünk el az elsődlegesen kitermelt ércek felhasználásához viszonyítva (West, L. 2009). A 2010-es évek elején már 30%-ot is meghaladta az újrafeldolgozott réz aránya a késztermékekben, és ez az érték további növekedés elé néz. Ugyanekkor Európában már ma is 43%-ban az újrafeldolgozott rezet használja az ipar.

Egyre súlyosbodó probléma azonban a kábellopás, ami a működő infrastruktúra elemeit érinti igen hátrányosan. Az Amerikai Egyesült Államokban az ebből fakadó károk már elérik az 1 milliárd dollárt évente – sok esetben súlyos baleseteket is okozva.

150. ábra. A kábellopás Magyarországon is milliárdos károkat okoz évente, miközben az eladásból származó bevételek néhány ezer forintnyi értéket képviselnek

A réz esetében az alternatív források (tenger alatti bányászati módszerek), a helyettesítési törekvések és a réz növekvő újrahasznosítási aránya csak részben jelent megoldást a várható nehézségekre. Ha nem sikerül kiváltani, vagy lecsökkenteni a rézfelhasználást, akkor az a megújuló energiaforrások terjedését komolyan hátráltatni fogja.

Beton

A beton – a víz után – az emberiség által a második legnagyobb mennyiségben felhasznált anyag. Némileg a maitól eltérő összetételben már a római korban használták. Újkori alkalmazása csak 1800-tól vett lendületet, így viselkedéséről, időtállóságáról is csak ebben az időintervallumban vannak tényleges ismereteink.

Egy szélturbina kialakításához a legnagyobb mennyiségben felhasznált anyag a feszített beton**,** mely a fémszerkezet alapzatának kialakításához, és újabban az oszlopok gyártásához szükséges. Mennyiségét tekintve, egy 3 MW-os átlagos szárazföldi turbinánál 1100-1200 tonnát használnak fel belőle. A beton legfőbb alapanyagai a földrajzilag és mennyiségileg is széleskörűen rendelkezésre álló mészkő (mint cement alapanyag), a homok, illetve a sóder, melyek készleteinek kimerülésére a közeli jövőben nem kell számítani (Jacobson, M. Z. - Delucchi, M. A. 2010). A **cementgyártás ugyanakkor rendkívül energiaigényes folyamat**, ráadásul jelentős CO_2-emittáló ágazat is, ami világviszonylatban 5-7%-kal részesedik a kibocsátásból.

A hatalmas kezelendő mennyiség miatt az eddigieknél lényegesen nagyobb figyelmet kell fordítani a beton újrafeldolgozására. A jelenleg ismert műszaki megoldások nem teszik lehetővé a sokrétű alkalmazást, az apróra összetört beton egyelőre leginkább mélyedések feltöltésére, hulladéklerakótelepek fedésére, esetleg utak alapjában használható fel. Talán a legszerencsésebb új beton gyártásához adalékként felhasználni, ez esetben legfeljebb 20-30%-os részarány érhető el – nyilván elsősorban olyan kevéssé stratégiai alkalmazási területeken, ahol a minőség nem kiemelkedően fontos szempont (pl. járda).

151. ábra. A betonozott alap átlagosan 4-5 napig készül, átmérője 15-20 méter, betonigénye 800 m^3 (fpmccann.co.uk/)

Kompozit műanyagok

A nagyméretű modern **szélturbinák lapátjait** műgyantával megszilárdított **üvegszálas**, és egyre növekvő arányban **karbonszálas** anyagok építik fel, így egyre nagyobb, ellenállóbb, és könnyebb lapátokat képes előállítani az iparág.

Az üvegszál legfőbb alapanyaga az újrahasznosított üveg, illetve a szilícium-dioxid, ami a Föld második leggyakoribb vegyülete. A gyártáshoz szükséges energiabevitel jelentős, **55 MJ/kg**, ami az acél energiaigényének duplája. A másodnyersanyag-ellátás terén a jövőben nem várható akadály, a nagy energiaigény azonban lényeges tényező marad.

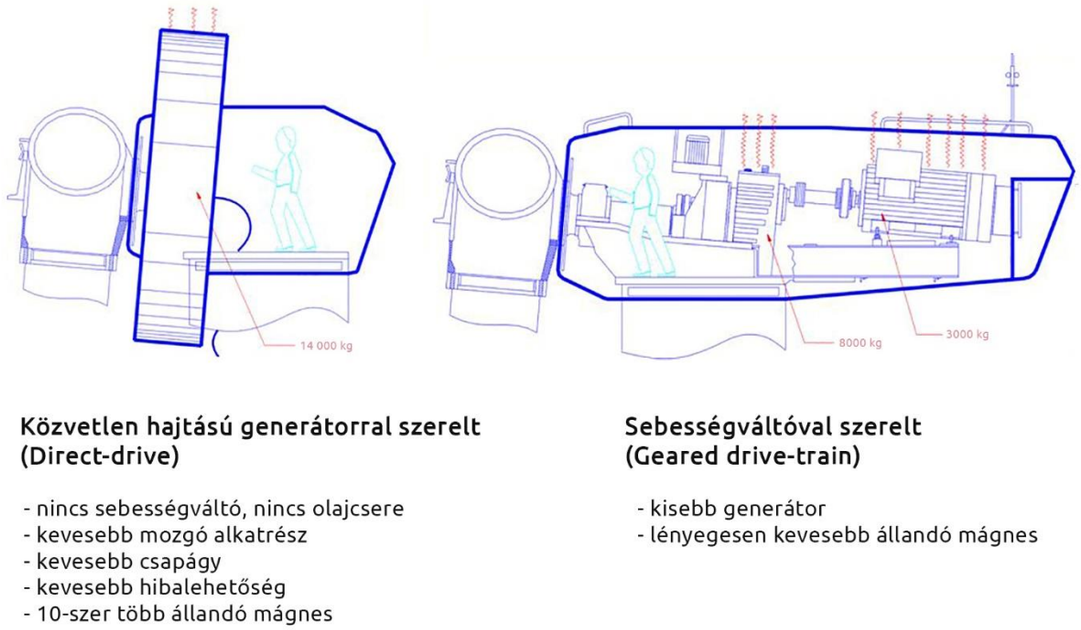
A **karbonszál** alapanyaga lehet szén és olajkátrány, illetve az elterjedtebb gyártástechnológiában propilén és ammónia. Ugyanakkor a gyártás folyamán több lépcsőben **órákon keresztül, akár 1000-2000 °C-ra is fel kell hevíteni a nyersanyagot, így a karbonszálas anyagok gyártási energiaigénye az üvegszálhoz képest 4-5-szörös**, 234 MJ/kg-os értéket mutat.

A fenti alapanyagok újrafeldolgozása mindig is problematikus feladat volt. Életciklus-analízisében 50% körüli újrafeldolgozási részaránnyal szokás kalkulálni – bár ezen a téren a kutatás nagy intenzitással folyik és a közeljövőben akár áttöréssel is számolhatunk.

*152. ábra. A **turbinalapátok** nem csak a felhasznált erőforrások szempontjából, de a szállítás nehézségei miatt is kulcsfontosságú elemei a szélerőműveknek (http://inhabitat.com/)*

Ritkaföldfém alapú állandó mágnesek: neodímium, diszprózium

A szélturbinák generátorában a legkisebb mennyiségben felhasznált, ám kiemelkedően fontos ritkaföldfémek, a **neodímium** és a **diszprózium**. Ezekből az anyagokból készülnek a legerősebb, legkönnyebb és legtartósabb mágnesek. Ezek felhasználásával a gépház lényegesen kisebb és könnyebb kialakítású, amely az egész szélturbina tömegének csökkentése szempontjából lényeges: egy 80-85 méter magas oszlopra támaszkodó, 3 MW teljesítményű ritkaföldfém generátorral felszerelt turbina esetében **közel 10 tonna acél, illetve jelentős mennyiségű beton felhasználása takarítható meg egy ferrit alapú mágnest tartalmazó generátorral felszerelt turbinához képest**. Ugyanakkor fontos azt is megjegyezni, hogy többféle kialakítású turbina-hajtásrendszer létezik, melyek közt akár két nagyságrendnyi eltérés is mutatkozhat a ritkaföldfémek felhasználásában. Az onshore turbinák körében a klasszikus váltódobozos (geared drive train) meghajtásrendszer dominál, ehhez egy átlagos 3 MW-os szélerőmű esetében összesen 82 kg neodímiumot és 7 kg diszpróziumot használnak fel. A állandó mágneses generátorral felszerelt **közvetlen meghajtású (direct drive) turbina kialakításához ennek 6-7-szeresét**, 600 kg/MW ritkaföldfémet is felhasználhat az iparág.



153. ábra. Fő szélerőmű-típusok néhány különbsége a felhasznált anyagmennyiség szempontjából

A **neodímium** a második leggyakoribb ritkaföldfém, így készleteit tekintve nem veszélyezteti kimerülés, csupán gazdasági, környezetvédelmi, és politikai szempontok okozhatnak ideiglenes szűkösséget (pl. Kína exportkvótái 2010-től). Az **ellátásbiztonság szempontjából a neodímiumot a legkritikusabb nyersanyagok közt tartják számon**, és ha 2015 után nem jelenik meg szignifikáns kínálat oldali bővülés, akkor erőteljesebb szűkösség léphet fel. A **diszprózium** teszi ki a permanens mágnesek kevesebb, mint 10 tömeg%-át, mely **az egyik legritkább a ritkaföldfémek közt**. Egyes szakértők szerint a mágnesek tartósságát és kiváló termikus tulajdonságait biztosító ötvözőelem ellátásában zavarokra számíthatunk, akár már a közeljövőben. Éppen ezért lényeges, hogy komoly fejlesztések történnek a

diszpróziummentes permanens mágnesek fejlesztésére, ráadásul nem más ritkaföldfémekre való átállással.

Ezzel párhuzamosan visszagyűjtésük és visszanyerésük is megkezdődött. 2012-től megindult a szélerőművek és az elektromos járművek permanens mágneseinek, továbbá az elektronikai berendezések akkumulátorainak feldolgozása. A Honda 2013-ban külön az akkumulátorok ritkaföldfémeit újrahasznosító üzemet létesített, amely a bevitt fémből 99%-os tisztaságban képes kinyerni az értékes másodnyersanyagot. A jövőben az alumíniumgyártás során keletkező melléktermék, a **vörösiszap** is jelentős forrásává válhat a ritkaföldfémeknek.

Ezüst

Fő felhasználója az elektronika, de jelentős az ékszerek formájában való felhasználás is. Az energetikai átmenet szempontjából lényeges, hogy a szilícium alapú napelemek gyártásánál jelentős mennyiségű, táblánként akár 20 gramm **ezüstre** is szükség van. Ennek köszönhető, hogy a világ ezüstfelhasználásának 10-12%-át jelenleg a napelemgyártók használják. Mivel a napelemes rendszerek több mint 90%-a szilícium alapú, így elterjedésük is hozzájárult az ezüstnek a közelmúltban tapasztalható 300%-os világpiaci áremelkedéséhez.

Az ezüstöt leggyakrabban a cink-, az ólom-, és az aranybányászat melléktermékeként termelik ki. Ha a műre való vagyont vesszük számításba (570 000 tonna), akkor a jelenlegi kitermeléssel (33 000 tonna/év, Zaripova, A. 2016) számolva csupán 17 évre elegendők a készletek. A szűkösségre átmeneti megoldást jelenthet az ezüst más ötvözetekkel való pótlása, illetve – a kevésbé hatékony vezető – rézzel való helyettesítése (bár ebből sem kimeríthetetlenek a lehetőségek). Visszagyűjtése és újrafeldolgozása még gyermekcipőben jár, a legfrissebb adatok szerint alig 15% (USGS 2016).

Lítium

Az energiaforradalom szempontjából jelenleg az egyik legfontosabb természeti erőforrás, ami annak köszönhető, hogy a könnyű, ám nagy kapacitású **akkumulátorok** gyártásának jelenleg ez a leggyakrabban alkalmazott alapanyaga (ugyanakkor a jelentős mennyiségben felhasznált **kobalt** is szűk keresztmetszetnek tűnik). A természetben leginkább lítiumsók formájában található, így hagyományosan ezt tartalmazó ásványvízforrásokból, sós medencékből és sólerakódásokból vonják ki. Energetikai szempontból érdekes kitermelési lehetőség a geotermikus kutakból származó ásványi anyagokból való kinyerés, ami nem csak a geotermia szempontjából látszik újabb bevételi forrásnak, de környezeti szempontból is előnyös. Korábban is sokrétű volt a felhasználása, de főként hőálló üvegek és kerámiák készítésére szolgált. A jelenlegi ~66e tonna/év mennyiségnek már nagyobb rész kerül az akkumulátorok és elemek gyártási folyamataiba. Ezen belül elsősorban az elektromos autózás a fő felhasználó (30%), ahol az igények várhatóan megsokszorozódnak (lásd Tesla Gigafactory). Leggyakoribb akkumulátor típusok: lítium–vas-foszfát ($LiFePO_4$); lítium-kobalt-dioxid ($LiCoO_2$). A becslések szerint gazdaságosan kitermelhető készlete 13 millió tonna, így a jelenlegi felhasználást feltételezve csaknem kétszáz évre elegendő (USGS 2016). Egyes kutatóműhelyek szerint a jelenlegi készletek akár 1 milliárd darab 40 kWh-s akkumulátorral szerelt elektromos autó legyártására is lehetőséget kínálnak.

Az Európai Unió – igen bölcsen – immár 10 éve irányelvben fogalmazta meg elvárásait az akkumulátoros energiatárolás környezeti kárainak csökkentése érdekében (2006/66/EC Akkumulátor Direktíva), majd néhány év múlva erőforrásgazdálkodási szempontból is lényeges új jogszabályt alkotott (493/2012 Bizottsági Rendelet), ami az újrafeldolgozás hatékonyságával kapcsolatos elvárásokat és szabályokat fogalmazott meg.

Időközben az ipar is reagált és feldolgozó üzemeket hozott létre az akkumulátorok **újrafeldolgozása** érdekében, leginkább a kobalt, a nikkel és a réz visszanyerése céljából. Az érintett autógyárak (pl. Toyota) igen hatékony visszagyűjtési rendszereket alakítottak ki annak érdekében, hogy a begyűjtési rátát akár 100%-ra növeljék.

Izgalmas megközelítés a visszagyűjtött akkumulátorok **újrahasználata** (reuse), amire a Nissan kínál példát. A projekt lényege az a felismerés, hogy a gépjárművekben már elhasználódott akkumulátorok a kevésbé megterhelő **háztartási villamosenergia-tárolásra** még sokáig alkalmasak, így napelemekkel rendszerbe kapcsolva még további 8-10 évig hasznos szolgálatot tehetnek.

Felhasznált és ajánlott irodalom:

Bödeker, J. M. – Bauer, M. – Pehnt, M. (2010): Aluminium and Renewable Energy Systems – Prospects for the Sustainable Generation of Electricity and Heat. 110 p.

ENERGINET.DK, 2017: Download of market data. URL http://energinet.dk/EN/El/Engrosmarked/Udtraek-af-markedsdata/Sider/default.aspx (accessed 2.9.17).

Falconer, I. K. (2009): Metals Required for the UK's Low Carbon Energy System: The case of copper usage in wind farms. 99 p.

Jacobson, M. Z. — Delucchi, M. A. (2010): Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. Department of Civil and Environmental Engineering. 26 p.

Johnson, J.– Reck, B.K.– Wang, T.– Graedel T. E. (2006): The energy benefit of stainless steel recycling. Program in Environmental Engineering. 12 p.

USGS (2016): http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity

West, L. (2009): The Benefits of Metal Recycling: Why Recycle Metal? http://environment.about.com/od/recycling/a/metal-recycling.htm

Zaripova, A. (2016): PV drives up global silver demand. PV Magazine. http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/pv-drives-up-global-silver-demand_100024459/#axzz4RDUmtBzD

A megtérülési számítások problematikája

Az energiaforradalom végrehajtásának legnagyobb kerékkötője korunk **ökonomizmusa** (hit/tévhit/meggyőződés?), amely szerint az egyes ember és a társadalom kiegyensúlyozott létezése az anyagi javak és anyagi jellegű szolgáltatások állandóan növekvő mennyiségét feltételezi. Ebben a megközelítésben az egyének élete és a társadalmak működése alapvetően gazdasági problémaként fogható fel. Ugyanakkor látni kell, hogy korunk mindenható tudománya, a **közgazdaságtan**, csak szerény mértékben támaszkodik olyan természeti törvényszerűségekre, amelyek alátámaszthatnák ezen terület tudományos alapvetésként elfogadott tételeit, így leginkább a növekedés elkerülhetetlen fontosságát.

A probléma leginkább abban rejlik, hogy a közgazdaságtan meghatározza, hogy mi „gazdaságos" és mi „gazdaságtalan". Ez pedig alapvetően befolyásolja az egyének, közösségek, kormányok döntéseit és cselekedeteit. Ugyanakkor **a gazdaságosság megítélésére irányuló megtérülési számítások számos tényezőt nem vesznek figyelembe, ezért törvényszerűen téves eredményeket szülnek, így rossz következtetésekre vezetnek**. Így az energetikai megtérülési számítások esetében például nem lehet, vagy nem szokás a számításoknál figyelembe venni az alábbiakat:

- A fogyasztói árakat befolyásoló politikai döntéseket
  - Pártpolitikai célú döntések (lásd rezsicsökkentés);
  - Szociálpolitikai célú döntések (lásd iparági támogatások alakulása [így földgázát-támogatás, szénbányászat], amelyek mértéke hazánkban is százmilliárd Ft nagyságrendű, így erősen befolyásolják, illetve befolyásolták az energiaszektorban uralkodó erőviszonyokat);
- Externális költségeket, amelyek végül a társadalom egészén csapódnak le, vagyis ezeket előbb-utóbb mindannyian megfizetni kényszerülünk;
- Az alternatív felhasználási lehetőségeket.

Ez utóbbi pont kapcsán tekinthetjük példának a napelemes beruházásokat, ahol a háztartási léptékű megoldásoknál a megtérülési számításokhoz a konnektoron keresztül hozzáférhető villamos energia árát tekintik összehasonlítási alapnak. Ám az így kapott eredménynél lényegesen jobb megtérülési mutatókat eredményez, ha a számítások során nem hagyjuk figyelmen kívül a) az elektromos közlekedést; b) a hőszivattyús hőenergiatermelést, mint a megtérülést alapvetően befolyásoló lehetőségeket. Az autózás esetében például az alábbi tényezőket célszerű figyelembe venni:

- a benzinkutaknál kapható üzemanyagok ára;
- az üzemanyag-fogyasztás adatai;
- a várható éves futásteljesítmény;
- az autók ára;
- a karbantartás költségeinek különbségei.

A (hőszivattyús) fűtés esetében pedig célszerű számításba venni a hőszigetelés fejlesztésében rejlő lehetőségeket, illetve a meglévő fűtési rendszer működtetésének tüzelőanyag-költségeit, illetve egyéb járulékos kiadásokat (pl. karbantartás), valamint azt is, hogy a hőszivattyús megoldásoknak a megtérülést erősen befolyásoló számtalan különféle műszaki megoldása létezik.

Az energiahatékonysági beruházásoknál általában megint csak a közvetlen következményekkel, a beruházásból fakadó kiadáscsökkenéssel szokás számolni, ám a valóságban az ingatlan értéke és használati komfortja is jelentős mértékben változik (lásd Solanova projekt) – így akár azonnali megtérülésről is beszélhetünk!

Láthatjuk, hogy a jelenleg alkalmazott megtérülési számítások a közgazdaságtan keretein belül is ingatag alapon állnak, ha pedig ezek kívül tekintünk, és az egész probléma **morális** alapjait feszegetjük, akkor még inkább elgondolkodtató következtetésekre juthatunk. Felmerül például az a kérdés, hogy milyen módon vesszük/vehetjük figyelembe a számításoknál például az éghajlatváltozás következményeit, vagyis például az ebből várhatóan fakadó társadalmi válságjelenségeket, népvándorlást, fegyveres konfliktusokat – magyarul a jövő generációk (tehát saját gyermekeink és unokáink) sorsát.

Közösségi energia és térbeliség

Energiarendszerünk decentralizálttá alakítása nem valósulhat meg a helyi közösségek bevonása nélkül, amelyek korunkban egyre inkább törekednek energetikailag részben vagy teljesen önellátóvá válni. A közösségi energetikai önellátásnak számos további pozitív hatása van, amelyek egy része lokálisan, másik része regionális, országos, vagy akár globális szinten jelentkezik.

Mindenekelőtt le kell szögezni, hogy ezek a fejlesztések hozzájárulnak az adott térségben az energetikai rendszer fejlődéséhez azáltal, hogy új kapacitásokat hoznak létre, így egyfelől javítják az energiabiztonságot, másfelől energiát biztosíthatnak a szolgáltató és akár a termelő szektor számára is. Erre példa az Egyesült Királyságban 2011-ben átadott 5 MW-os napelemes rendszer, a Westmill Solar Park, amely mögött egy szövetkezet és annak 1650 tagja áll, és amely a jelzett teljesítménnyel a térség energiagazdálkodásának jelentős tényezőjévé vált.

A megújulók esetében az energiaforrások általában helyi eredetűek, a helyi szereplőknek, gazdálkodóknak hoznak megtakarítást vagy profitot, ami így sokkal nagyobb arányban marad a közösség gazdasági körfolyamatok rendszerében, mint a külföldi eredetű energiaforrások esetében. A fenti jelenség tovagyűrűző gazdasági hatása igen jelentős mértékű is lehet, mint ahogyan az a burgenlandi Güssing (Németújvár) térségében az elmúlt években tapasztalható igaz, ott nem kizárólagosan közösségi alapon folyt a megújulós technológiák kapacitásfejlesztése.

A megújulós alkalmazások a legtöbb esetben lényegesen több munkahelyet teremtenek a korábbi centralizált megoldásokhoz képest, vagyis pozitívan befolyásolják az adott térség foglalkoztatottságát (NÉMETH K. et al. 2015; SHEIKH N. J. et al. 2016). Ez különösen lényeges szempont lehet azokban a korábban intenzív bányászat által érintett térségekben, ahol nagyszámú munkavállaló számára kell új munkalehetőségeket teremteni, és hatalmas területek rekultivációját kell megoldani (mint pl. a borsodi és nógrádi szénmedencékben).

A helyi lakosság érdekeltté válásával nő a megújuló energiaforrások externális hatásainak (így tájképi hatásának) elfogadottsága. A NIMBY („Not in my backyard”) effektus helyett a **„Welcome to my backyard”** megközelítés nyer teret, ami akár a helyi hivatali szervek engedélyezési hajlandóságát is pozitív irányba módosíthatja (WALKER G. 2008). A helyi lakosok bevonásával megerősödik a helyi közösségben a részvételi szándék, nő a közösségbe integrálódás mértéke, a közösséghez tartozás pedig egyfajta plusz örömforrás az érintettek számára. A közösségi energiatermelés és -felhasználás összetettségéből fakadóan a magasabb szintű, akár a gondolkodásmód megváltozását eredményező, ún. másodrendű tanuláson keresztül pedig a lakosok kognitív gondolkodása is fejlődik. Ha a közösség tagjai legalább nagy vonalakban ismerik az energiatermelés életciklusának különféle folyamatait, az a tapasztalatok szerint fokozza az energia- és környezettudatosságot, amelynek egyes kutatók szerint már globális hatása is megfigyelhető (KLEIN S. J. W. 2016).

További előny, hogy az az „úttörő” közösségi energiaprojektek során olyan tapasztalati tudás halmozódik fel, amely - ha azzal jól gazdálkodunk - növelheti a későbbi projektötletek sikerességét. A decentralizált villamosenergia-termeléssel és -tárolással a közösségek hozzájárulnak az egész villamosenergia-rendszer biztonságához (HAIN J. J.et al. 2005). Szélesebb körű elterjedésük pedig az egész megújuló-energetikai iparágra is hatással van: csökkenhet a beruházási költség, új innovációk valósulhatnak meg. Ezek a jelenségek katalizálhatják az energiapolitikában történő előremutató változásokat az energiademokrácia felé: új, kedvező jogszabályok, szabályozási eszközök, illetve támogatási források jelenhetnek meg. Összességében olyan folyamatok jelennének meg a közösségi energetikai megoldások széles körű elterjedésével, amelyek növelik a társadalom jólétét.