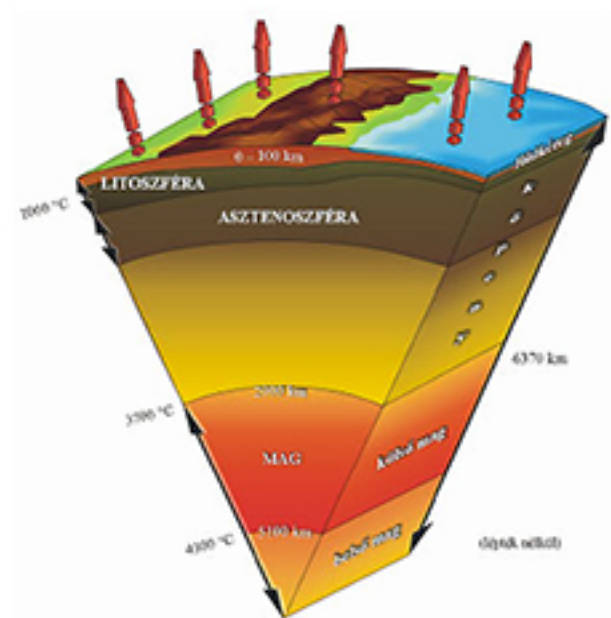




MEGÚJULÓ ENERGIAFORRÁSOK

BARTHOLY JUDIT
BREUER HAJNALKA
PIECZKA ILDIKÓ
PONGRÁCZ RITA
RADICS KORNÉLIA

Megújuló energiaforrások

**Bartholy Judit
Breuer Hajnalka
Pieczka Ildikó
Pongrácz Rita
Radics Kornélia**

Megújuló energiaforrások

írta Bartholy Judit, Breuer Hajnalka, Pieczka Ildikó, Pongrác Rita, és Radics Kornélia

szerkesztő: Pieczka Ildikó

Szerzői jog © 2013 Eötvös Loránd Tudományegyetem

E könyv kutatási és oktatási célokra szabadon használható. Bármilyen formában való sokszorosítása a jogtulajdonos írásos engedélyéhez kötött.

Készült a TÁMOP-4.1.2.A/1-11/1-2011-0073 számú, „E-learning természettudományos tartalomfejlesztés az ELTE TTK-n” című projekt keretében. Konzorciumvezető: Eötvös Loránd Tudományegyetem, konzorciumi tagok: ELTE TTK Hallgatói Alapítvány, ITStudy Hungary Számítástechnikai Oktató- és Kutatóközpont Kft.

Nemzeti Fejlesztési Ügynökség
www.ujjszechenyiterv.gov.hu
06 40 638 638



A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.



Tartalom

1. Az emberiség energiafelhasználásának története	1
1.1. A szélenergia hasznosításának rövid története	3
1.1.1. Az első szélmalomok	3
1.1.2. A szélmalomok elterjedésének kezdetei	4
1.1.3. A horizontális és vertikális malomok széleskörű elterjedése	5
1.1.4. Szélgenerátorok, melyek elektromos áramot termelnek	6
1.1.5. Magyarországi szélmalomok története	8
2. Erőforrásaink, készleteink, fenntartható fejlődés, a megújuló energiaforrásokban rejlő potenciál becslése	9
2.1. Napenergia	11
2.2. Szélenergia	12
2.3. Vízi energia, óceánok	14
2.4. Geotermikus energia	17
2.5. Biomassza	19
3. Napenergia	23
3.1. A sugárzási energia a Földön	23
3.2. Technológia	24
4. Szélenergia	28
4.1. A szélenergia hasznosításának elméleti alapjai	28
4.1.1. A rendelkezésre álló és a kinyerhető szélteljesítmény becslése	28
4.1.2. A teljesítménytényező	29
4.1.3. A nyomatéktényező és a gyorsjárási tényező	30
4.1.4. A teljesítménygörbe	30
4.1.5. Az energiatermelés becslése	31
4.2. Szélenergia-hasznosítás a nagyvilágban	32
4.3. A szélenergia hasznosításának lehetőségei hazánkban	33
4.3.1. A hazai szélenergia-kutatás legfontosabb mozzanatai	34
4.3.2. Hazánk szélklímája	36
4.3.3. A szélmező modellezése	39
4.3.4. Problémák és kilátások	40
5. Vízenenergia	43
5.1. Energiatermelés a szárazföldi vizekből	43
5.2. Energiatermelés az óceánok vizéből	48
6. A geotermikus energia	50
6.1. Hasznosíthatóságának elmélete	51
6.2. Technológia	52
6.3. Fejlődéstörténet	58
6.4. Világpotenciál	59
6.4.1. Közvetlen hőhasznosítás	59
6.4.2. Villamosenergia-termelés	62
6.4.3. Mesterségesen kifejlesztett földhőrendszer (EGS)	63
6.5. Magyarország geotermikus energia-hasznosítása	64
7. Bioenergia	66
7.1. Biomassza alapanyagok	66
7.2. Konverziós folyamatok	68
7.2.1. Mechanikai átalakítás	68
7.2.2. Termokémiai átalakítás	69
7.2.3. Biokémiai átalakítás	70
7.2.4. Bioüzemanyagok	71
7.2.5. Konverziós technikák ipari elterjedése	78
7.3. A biomassza közvetlen hasznosításának technológiái	79
7.3.1. Biomassza-hő technológiák	79
7.3.2. Kogeneráció	85
7.3.3. Bioüzemek	86
7.4. A biomassza hasznosításának története	86

7.5. Magyarország biomassza energia hasznosítása	89
8. Az energia- és környezetpolitika nemzetközi összefüggései	90
8.1. Nemzetközi egyezmények	91
8.2. Az Európai Unió energiafelhasználása	93
9. A megújuló energiaforrásokban rejlő potenciál becslése Magyarországra	96
9.1. Vízipenergia	96
9.2. Szélenergia	97
9.3. Geotermikus energia	97
9.4. Napenergia	98
9.5. Hőszivattyúk	98
9.6. Biomassza	98
9.7. Biogáz	98
9.8. Bioüzemanyag	99
10. Fenntarthatóság	100
10.1. Az emberiség energiaigényének növekedése	100
10.2. A fenntarthatóság fogalma	101
10.2.1. Az ENSZ álláspontja	101
10.2.2. Közgazdaságtani közelítés	102
10.2.3. Környezetpolitikai közelítés	103
10.3. Fenntarthatósági indikátorok	103
10.3.1 A fenntartható fejlődés indikátorainak elvi követelményei	103
10.3.2 Főbb indikátorok	104
10.3.3. Indikátorok módszertana	110
10.4. Lépések a fenntarthatóság irányába	114
A. Függelék	116
Fontosabb fizikai mennyiségek, mértékegységek, összefüggések, jelölések	116
A jegyzetben előforduló szervezetek rövidítései	116
Fogalomtár	117
11. Felhasznált irodalom	119

1. fejezet - Az emberiség energiafelhasználásának története

Az emberiség energiafelhasználása az elmúlt évszázadok során jelentősen növekedett. Az energiaellátás minden igényt kielégítő biztosítása azonban napjainkban jelentős környezetterhelést eredményez. A fenntartható fejlődés érdekében mindezekből következően alapvető társadalmi célkitűzésként fogalmazódik meg a primer energiahordozók felhasználásának, valamint a környezetterhelés csökkentése. A folyamatos gazdasági növekedést, valamint a környezetünkre gyakorolt pusztító hatások mérséklését jelenlegi tudásunk szerint csupán az egy főre jutó energiafelhasználás jelentős mértékű csökkentésével és a megújuló energiaforrások egyre nagyobb arányú felhasználásával érhetjük el.

Megújuló energiaforrásnak nevezzük a természeti folyamatok során folyamatosan rendelkezésre álló vagy újratermelődő energiaforrásokat: a nap-, a szél-, a vízi energiát, valamint a biomasszából nyert és a geotermikus energiát. A felsoroltak közül a nap- és a szélenergia kimeríthetetlennek tekinthető, a többi pedig földrajzi adottságoktól függően áll rendelkezésre. A megújuló energiaforrások közé sorolhatnánk például a Föld érdeinek felhasználását is. Sajnos az ember helytelenül, túlzott mértékben pusztította a faállományt, nem gondoskodva annak utánpótlásáról. Így a fával való fűtés már nem sorolható szigorú értelemben véve a megújuló energiaforrások használatához.

Nem véletlen, hogy az emberiség fejlődése során a korai ember a trópusi éghajlati övben jelent meg, hiszen energiaellátásának biztosítása itt nem jelentett gondot számára. Amint őseink az egykori Afrika területéről más kontinensek irányába vándoroltak, a táplálékon kívül már az energiáról is gondoskodniuk kellett. Hiszen egy ember életben maradásához szükséges minimális energia egyenértékű azzal a táplálékmennyiséggel, mellyel még képes minimális munkavégzésre úgy, hogy közben testsúlya nem csökken. Ez a minimum függ a környezet hőmérsékletétől. A létszükségleten túli munka végzéséhez ennél lényegesen több energiára van szükség, ami még több táplálék bevitelével vagy a szervezetben tárolt energia felhasználásával fedezhető. A bevitt energiafluxus egy vadászó, gyűjtögető társadalomban élő emberre vonatkozóan tehát a táplálékban lévő energia és a környezetből felvett hőenergia összege, amely erősen függ az öltözködési szokásoktól. A kibocsátott energia fluxusa pedig a hőenergiából, a szerves anyagok forgalmából és a munkára fordított energiából tevődik össze.

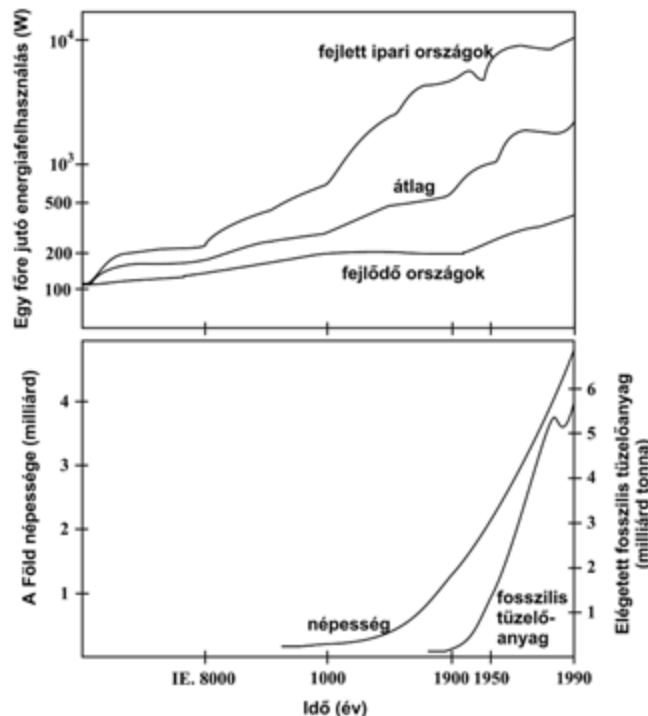
Az emberiség fejlődésének kezdeti szakaszában a felszabadítható, kiaknázható hőmennyiséget a növények által megkötött napsugárzás biztosította. Az energia hasznosításával kapcsolatban a következő két lépés a vadállatok háziasítása és a földművelés volt. Ezek már előrevetítették a nagy életformaváltást, a letelepedést, mely során az ember a vadászó, gyűjtögető életmódról a mezőgazdaságon alapuló társadalomra tért át. Noha a több tízezer évvel ezelőtti időkből is fennmaradtak viszonylag fejlett társadalmak emlékei, a mezőgazdasági termelés kialakulásához mégis az éghajlat stabilitására volt szükség (Sørensen, 2000). Ez a stabilitás a legutolsó jégkorszak elmúltával köszöntött be, kb. 11.000 évvel ezelőtt. Hatására megindult az emberiség lélekszámának fokozatos növekedése, mely magával vonta az egyre nagyobb települések megjelenését is. Mindkét folyamat valójában az energiaigény növekedéséhez vezetett. Szükség volt tehát más energiaforrások hasznosítására is.

Fontos megjegyezni, hogy az energiafelhasználásban igen nagy különbségek jelentkeztek már ekkor is a különböző társadalmak, illetve egyazon közösség különböző tagjai között. Afrika és Ázsia egyes részein még napjainkban is ugyanannyi energiát fordítanak munkára, mint a Neolitikum idején, s még mindig a tűzifát használják a legfontosabb energiaforrásként.

Őseink az áramló levegő energiájának kiaknázási lehetőségeit is viszonylag korán felfedezték. A szél energiájának felhasználása kb. 9000 évvel ezelőtt a Földközi-tengeren történő hajózással kezdődött, ahol kb. 4000 évvel ezelőtt a kereskedelem jelentős fejlődésnek indult. A szélenergia részaránya azonban – az összes felhasznált energia hányadában – még ezekben a fejlettebb régiókban sem haladta meg a néhány százalékot. Sőt a mozgási energiát hasznosító vízi- és szélmalmok sem képviseltek jelentős részesedést. Mégis kétségtelenül nélkülözhetetlen energiaforrásnak tekinthetjük mind a vízi-, mind a szélmalmokot, hiszen a gőzgép feltalálásáig a fizikai munka kiváltásának kizárólagos eszközei voltak.

Csak sokkal később, a XVIII. században, az ipari forradalom révén vált az ember képessé arra, hogy saját fizikai erejét messze meghaladó munkát végezzen az újonnan felfedezett gőzgépek segítségével, gyárak létesítésével. Az energiafelhasználás még a növekvő iparosodás ellenére sem öltött akkora méreteket, mint a XX. században, amikor

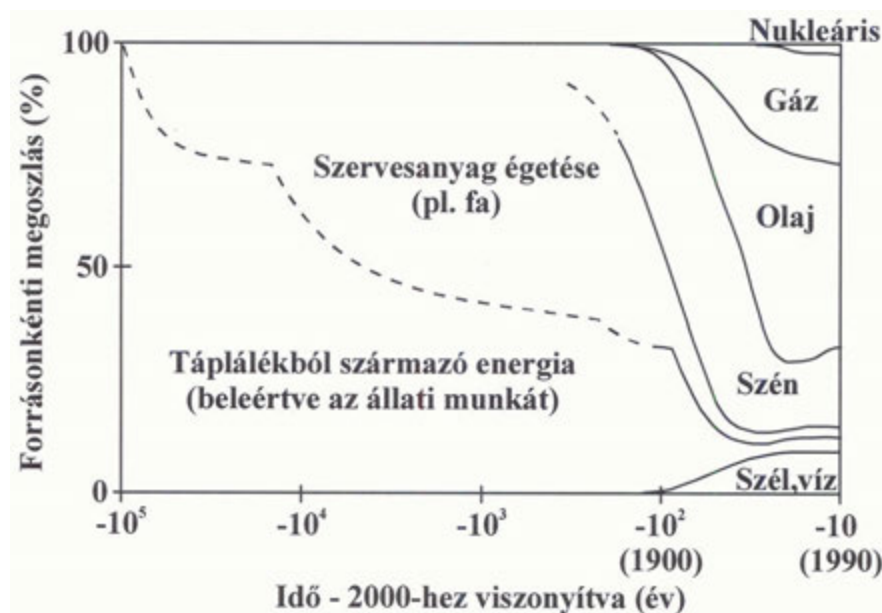
az olcsónak számító fosszilis tüzelőanyagok – a szén, a földgáz és a kőolaj – hasznosítása ugrásszerű növekedésnek indult. Így egyrészt az emberek függetleníteni tudták magukat az időjárás változékonyságától, másrészt kis helyen nagymennyiségű energia felszabadítása vált lehetővé. A világ néhány országa a fejlődő technikára alapozva magas gazdasági fejlettséget ért el, s ennek megfelelő életformát alakított ki. Ennek következtében energiafelhasználásban jelentősen eltávolodott a még fejlődő országoktól (1.1. ábra).



1.1. ábra: A népesség, az egy főre jutó átlagos energia- és fosszilis tüzelőanyag-felhasználás időbeli változása (Sørensen, 2000 nyomán)

Látható tehát, hogy az elmúlt évszázadok során nemcsak a Föld lakóinak száma nőtt robbanásszerűen, hanem ezzel párhuzamosan az egy főre jutó energiafogyasztás (1.1. ábra) és a légkörbe juttatott szennyező anyagok mennyisége is nagy ütemben emelkedett (Sørensen, 2000). Ahogy azt említettük, a felhasznált energia kezdetben csupán az elfogyasztott táplálékból származott. Kb. százezer évvel ezelőtt az ember szolgálatába állította a tüzet. Ettől az időponttól kezdve látható a különbség a legfejlettebb és a legelmaradottabb társadalmak energiafelhasználása között. A következő ugrás kb. tizenegyezer évvel ezelőtt történt. Ekkor szűnt meg a vándorló életmód, s az emberek letelepedésével megindult a települések szerveződése, építése. Az utolsó ezer év során (főként éghajlati okok miatt) a népesség a magasabb földrajzi szélességek felé terjeszkedett, növelve ezzel a fűtésre fordított energiát, így az egy főre jutó energiafelhasználást is. Az elmúlt száz év energiaigényes életmódja is jól követhető az 1.1. ábrán. Az emberiség óriási energiákat fordít ipari komplexumok működtetésére, belső terek fűtésére, hűtésére, közlekedésre, szállításra és közvilágításra.

Az 1.2. ábra az emberiség által hasznosított különböző energiaforrások részarányát mutatja az elmúlt százezer évre vonatkozóan (Sørensen, 2000). Jól látható a táplálékból származó energia arányának folyamatos csökkenése, valamint a XX. század elejétől kezdődően a nem megújuló fosszilis tüzelőanyagok térhódítása, melyek részaránya napjainkban eléri a 80%-ot. Az emberiség történetéhez képest tehát elhanyagolhatóan rövid idő alatt alakult ki a nem megújuló energiaforrásoktól való jelentős függés. Ezen túlmenően, rövid időn belül másfél nagyságrenddel nőtt az egy főre jutó energiafelhasználás is.



1.2. ábra: A felhasznált energia forrásonkénti megoszlása az elmúlt százezer évben (Sørensen, 2000 nyomán)

A továbbiakban a különféle típusú megújuló energiaforrások közül kiemeltük a szélenergiát, s a szerteágazó felhasználási lehetőségekre és a hosszú történetre való tekintettel ezt fejtjük ki részletesebben. A többi energiaforrás fejlődéstörténetét az adott ágazat bemutatásával foglalkozó fejezetben ismertetjük.

1.1. A szélenergia hasznosításának rövid története

A szélenergia hasznosítása nem volt ismeretlen a régmúlt időkben sem. Amióta az ember hajót épít, azóta használja az áramló levegő erejét. A XX. századot megelőző időszakban a megújuló energiaforrások döntő szerepet játszottak a gazdasági életben. A középkorban és az újkor elején a szélmalmok szerepe kiemelkedő fontosságú volt a mezőgazdaság és az ipar területén. Így a szélenergia felhasználásának története egyben az energiakonverziós eljárások fejlődéstörténete is.

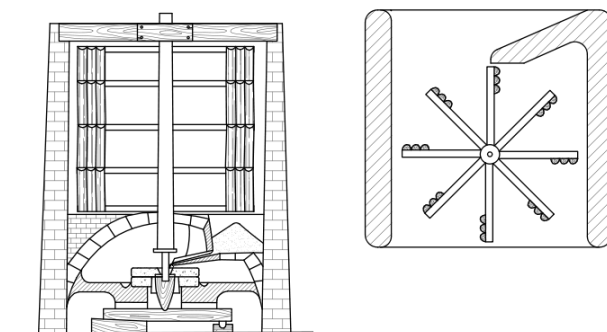
A vitorlával felszerelt hajók múltja a történelem előtti időkre nyúlik vissza. A Biblia Ó- és Újtestamentumában is gyakran jut jelentős, vagy akár mitikus szerep a szélnek, például Ézsaiás prófétát egy óriási forgószél viszi fel a mennybe, vagy Jónást egy pusztító szélvihar juttatja a cethal gyomrába. Több helyen a szél tulajdonságainak pontos leírását is megtaláljuk. Ha leülünk egy mezőn vagy egy parkban, s figyeljük a szél járását, megtapasztaljuk, hogy a szél iránya és ereje egy adott helyen pillanatról pillanatra változik, s egy kis térrészen belül is hol itt erősödik, hol ott gyengül. A szelet tárolni lehetetlen. A szélből szállítható, illetve tárolható energiát termelni évszázadokig megoldásra váró feladat volt az emberiség számára.

1.1.1. Az első szélmalmok

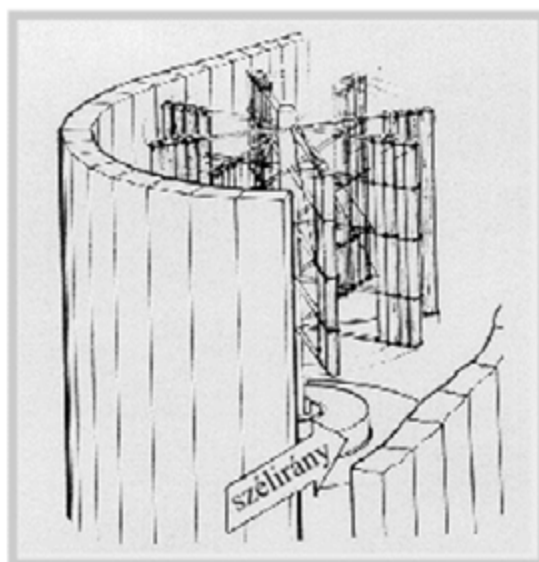
Elsőként feltehetően az ókori Egyiptomban fogták munkára a szelet, vitorlákkal hajtották a kishajókat a Nílus folyásával ellentétes irányba (Gipe, 1995). A széliránytól viszonylag független hajózás technikájának kifejlesztése a tengerparti népek, a föníciaiak, a görögök és a rómaiak érdeme (Riedel, 1985). Nem található azonban semmilyen bizonyíték arra, hogy akár az ókori görögöknél, akár a római birodalomban szélmalmokat használtak volna.

Az alexandriai Herotól származik az első írásos emlék ("Pneumatica" című könyvében, i.sz. 60-ban) a szélmalmok létezéséről (Hills, 1994). Az évszázadok során mechanikus szerkezetük, erőátviteli rendszerük alapján a szélmalmok két nagy csoportját fejlesztették ki: a – függőleges rotortengellyel rendelkező – horizontális, valamint a – vízszintes rotortengellyel rendelkező – vertikális típust.

A legősibb típusú horizontális malmok Perzsiából származnak (Hills, 1994). Sokuk még jelenleg is működik. Egy korai perzsa feljegyzés alapján “Umar ibn al-Khattab” második ortodox kalifa i.sz. 644-ben bekövetkezett erőszakos halálát épp egy szélmalom okozta, ugyanis a malom tervezője és tulajdonosa megölte a kalifát a malomra kivetett magas adó miatt. A horizontális, perzsa eredetű malmok működésének szerkezeti sémáját a 1.3. és az 1.4. ábrán tanulmányozhatjuk.



1.3. ábra: Ókori perzsa szélmalom szerkezeti vázrajza (forrás: Kaboldy, 2009 nyomán)



1.4. ábra: Perzsa típusú horizontális szélmalom, mely az egyik legrégebbi mechanikus szerkezet a szél energiájának hasznosítására (forrás: Gipe, 1995)

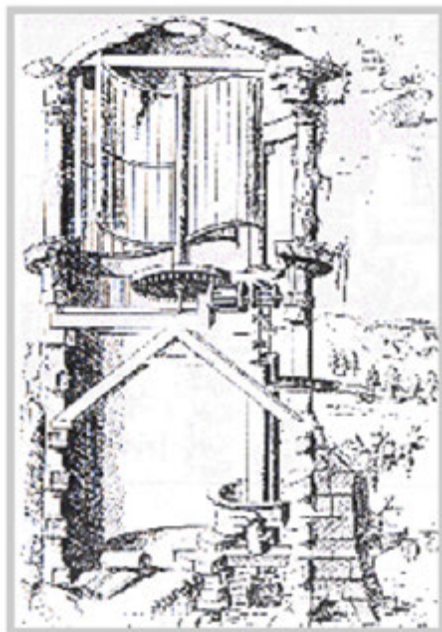
1.1.2. A szélmalom elterjedésének kezdetei

Tibetben a szélllel hajtott imamalmok a VII-VIII. században jelentek meg először, s mind a mai napig láthatóak szerte az országban. A X. századtól kezdődően egyre több arab forrás jelzi a horizontális szélmalom megjelenését Ázsia közel-keleti régiójában. Nagy valószínűséggel Kínában is ebben az időszakban terjedtek el, de a horizontális típusú malmok első írásos emlékei csak a XIII. századból származnak (Gipe, 1995). Kína keleti partjainak a Jangce folyótól északra eső részén, valamint a Tien-san hegység közelében fekvő Thangku és Taku tartományokban mind a mai napig működnek malmok a fenti leírásokban szereplő szerkezetekhez és működési elvekhez nagyon hasonló módon. A kínai malmokat a tengerparti régióban a sós víz – só lepárlása céljából történő – kiemeléséhez használták. Más tartományokban az édesvíz folyókból, tavakból való kiemelése volt a cél, hogy azt átvezethessék öntözési csatornába vagy öntözendő mezőgazdasági területekre. Jól megfigyelhető a kínai dzsunkák és e malmok közötti hasonlóság: a vitorlázat formája, anyaga, szerkezete szinte azonos.

1.1.3. A horizontális és vertikális malmok széleskörű elterjedése

Különböző források eltérően vélekednek a szélmalomok európai és közel-keleti elterjedéséről. Gipe (1995) a nyugat-európai széltechnológia kezdetét az elsőként dokumentált holland típusú szélmalom normandiai megjelenéséhez, 1180-hoz köti. Frode (1987) általánosan elfogadott álláspontja szerint a vertikális tengelyű szélmalomok Perzsiából származnak, s a XII-XIII. században a Közel-Keleten és a mediterrán vidékeken keresztül jutottak el Nyugat-Európába. Shepherd (1990) ettől eltérő véleménye szerint a technológia terjedésének iránya éppen ellentétes volt, s a német lovagok építették az első szélmalomokat Szíriában a III. keresztes hadjárat során. Megint más elképzelések szerint (Shepherd, 1994) az európai és az ázsiai fejlődés egymástól független, párhuzamos folyamat volt.

Európában az első függőleges tengelyű szélmalom leírása és szerkezeti vázrajza 1438-ból származik Mariano Jacopo Taccola naplójából, melyet csak jóval később találtak meg, de sohasem hoztak nyilvánosságra (Hills, 1994). Nyomtatásban Bessoni 1578-as könyvében jelent meg elsőként egy ismertetés és működési vázrajz (1.5. ábra), melyet azután a reneszánsz kor legtöbb könyve átvett. Az ilyen típusú malmok szintén a kutak vizének kiemelésére szolgáltak.



1.5. ábra: Az első ismert illusztráció az európai függőleges tengelyű, horizontális szélmalomról (a metszet készítője: Bessoni, 1578)

A XVI-XVII. században az amerikai kontinensre érkező felfedezők értelemszerűen magukkal vitték az adott kor technikai színvonalát, anyaghasználatát, eszközkészletét. Mivel Amerika keleti partvidékének klímája sok területen hasonlatos volt a telepések régi lakóhelyéhez, ezért a szélmalomok is megépülhettek a hagyományos szerkezetben, a megszokott anyagokból.

Gyors ütemben és széles körben terjedt a szélenergia hasznosítása. A szélmalomok a XVI-XVII. században élték virágkorukat, elsősorban természetesen a tengerparti országokban, ahol a szélre mindig biztosan számítani lehetett. 1680 és 1870 között csupán Angliában 94 találmány szerepel a hivatalos nyilvántartásokban, melyek mindegyike vagy teljesen új szélmalom konstrukció, vagy a megelőzőekhez képest jelentős szerkezeti változtatást tartalmaz (Hills, 1994). E találmányok közös vonása, hogy a szélenergia hasznosításának hatásfokát kívánják javítani. Ebben az időszakban – Angliához hasonlóan – Európa-szerte a szélmalomok széles skálája jelenik meg, melyek régiónkénti elterjedése a szélviszonyoktól, az adott közösség építkezési szokásaitól, a hozzáférhető építőanyagoktól, a pénzügyi lehetőségektől, s más helyi adottságoktól függ. Francia források szerint mind a XIX. századi Kínában, mind szerte Európában egyaránt 500-500 ezer szélmalom működött (Debeir et al., 1991). Kontinensünkön a XIX. század utolsó negyedéig számuk fokozatosan növekedett. Például egyedül Dániában csaknem 25 ezer kisebb méretű szélmalom üzemelt ebben az időszakban (Tar et al., 2001a).

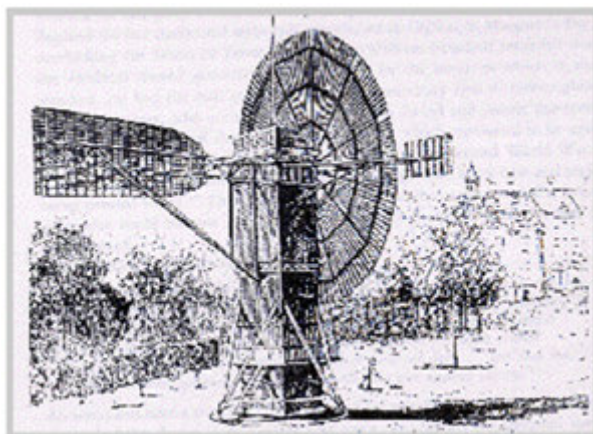
A XVIII-XIX. században az amerikai kontinensen a termőföldnek még nem volt valódi értéke, s a népsűrűség nagyon kicsi volt, valamint a farmok egymástól való távolsága is tetemes, ezért a földművelő gazdák ezen a vidéken mind nagyobb önellátásra törekedtek. Célszerűnek látszott kisebb méretű, egyszerűbb szerkezetű, egy farmot kiszolgáló szélgép tervezése. Egy ilyen gép prototípusa Halladay tervei alapján, 1854-ben készült el (1.6. ábra). Halladay találmánya alapján a szélmalom hidraulikai elvek felhasználásával házi vízmű rendszert működtetett (Gipe, 1995). E gép legnagyobb előnye az volt, hogy felügyeletmentes, mégis károsodás nélküli folyamatos működésre volt képes extrém szélviszonyok esetében is, mivel egy beépített önszabályozó szerkezet képes volt a lapátok hajlásszögét változtatni a szélesebbség függvényében. Egy másik új elemként megjelent a faroklemez, mely a lapátok automatikus szélirányba való beállítását biztosította.



1.6. ábra: Halladay (1854) tervei alapján megépített szélmalom, mely hidraulikai elvek felhasználásával házi vízmű rendszert működtetett.

1.1.4. Szélgenerátorok, melyek elektromos áramot termelnek

Forradalmian új fejezet kezdődött a szélenergia hasznosításának területén, amikor C. F. Bush az 1890-es évek elején az amerikai Clevelandben (Ohio állam) megálmodta és megépítette az elektromos áramot termelő szélturbinát. Ennek az impozáns faszerkezetnek a korabeli rajzát mutatjuk be az 1.7. ábrán. A méltán nagy érdeklődéssel beindított gépek mezőgazdasági farmok elektromos árammal való ellátását biztosították, eleinte kísérleti, majd hamarosan operatív jelleggel. Európában ezzel szinte egy időben készült el a dán Poul la Cour professzor első, majd 1897-ben a második elektromos áramot adó szélgenerátora (Krohn, 2001). E két remekmű több mint húsz éven át üzemelt a dániai Askor közelében. A dán professzor által kifejlesztett szerkezetek egy iskolaépületet világítottak meg. Poul la Cour végzett elsőként tudományos kísérleteket és kutatásokat a szélgépek optimális formai tulajdonságainak – a lapátok száma, a lapátok optimális profilja, a stabil lapátrögzítés technikája, a torony magassága stb. – elemzésére (Krohn, 2001).



1.7. ábra: Brush első elektromos áramot termelő kísérleti szélmalma (korabeli rajz: Cleveland, USA, 1890-es évek eleje).

A XX. század első felét egyre szélesebb körű fejlesztések jellemezték. A vasgyártás és az acélipar fejlődésével a szélerőművek anyaga és alakja is változott. Egyre jobban elterjedtek a tartós és ellenálló vasszerkezetű gépek. Ahogy azt a korabeli Titt katalógusból kivett ismertető is hirdeti (1.8. ábra), már 1905-ben megvásárolhatók voltak a többfunkciós vasszerkezetű szélgenerátorok, melyekkel egyrészt öntözési, vízkiemelési, vízátemelési feladatokat lehetett ellátni, másrészt elektromos áram termelésére is alkalmasak voltak. Ezek a soklapátos vasszerkezetek Európában is mindinkább felváltották a hagyományos fából és kőből épült szélmalomokat, s továbbfejlesztett változataik mind a mai napig megtalálhatók.



1.8. ábra: Amerikai típusú, Angliában gyártott sokfunkciós szélmalom (korabeli rajz: J. W. Titt katalógusából, Anglia, 1905)

A megrendelők részéről egyre intenzívebben jelentkezett az igény a helyszínen fel nem használt energia tárolására, más helyszínre szállítására. Ebben az időben jelentek meg a szélerőművek mellé telepített akkumulátorok. Az 1940-es években megjelentek az 1 MW teljesítmény feletti nagyturbinák, s lehetővé vált egy-egy település teljes energiaellátása csupán a szélenergia felhasználásával. Az első, elektromos hálózatra termelő berendezést a dán Johannes Juul építette az 1950-es években aszinkron generátor felhasználásával (Krohn, 2001).

A több ezer éves hagyományokkal rendelkező szélenergia-hasznosítás látszólag végnapjait élte a XX. század közepe táján, hiszen nem volt jelentős energiahány a Föld fejlett országaiban. A szélenergia ekkor relatíve drága, gyenge hatásfokú és csak időszakosan kinyerhető erőforrásnak számított. Ezért a fosszilis tüzelőanyagok, valamint

az atomenergia átmenetileg háttérbe szorította a szélenergia hasznosítását. Az 1960-as években – a zuhanó energiaárak miatt – minden fejlesztés, s egyben a működő malmok, generátorok, telepek nagy része is leállt. Egy-két évtizeden át, időszakosan úgy tűnt, hogy a szélenergia felhasználása szükségtelen, nem gazdaságos. Ez a nézet azonban csak rövid ideig tartotta magát. Az 1970-es évek sokkoló olajválsága, majd a rákövetkező évtizedekben a globális melegedés problémája újra a szél – mint megújuló energiaforrás – felé fordította a kutatók, a fejlesztők és a közvélemény figyelmét. Minden olajkincsben szegény ország célja a lehető legnagyobb mértékű önellátás volt. Eddig soha nem tapasztalt ütemű fejlődés indult meg, s önálló iparággá nőtte ki magát a mind hatékonyabb szélerőművek tervezése, gyártása, karbantartása, valamint a szélparkok tervezése, telepítése.

Természetesen az adott térség széllimája határozza meg, hogy milyen mértékű szélenergia hasznosításra van esély. Könnyű átlátni azonban, hogy az energiaáraknak az elmúlt évtizedekben tapasztalt nagymértékű növekedésével egyre csökken azon térségek száma, ahol nem gazdaságos a szélenergiának, mint önerőből megújuló energiaforrásnak a hasznosítása.

1.1.5. Magyarországi szélmalomok története

Sok évszázados hagyománya van Magyarországon a szélenergia hasznosításának. Történetírók a XVI. századra teszik az első hazai szélmalom megjelenését, elterjedésük azonban csak a XVII. században vált általánossá (Filep, 1981b). A legelterjedtebbek a forgatható tetőzetű, holland típusú malomok voltak. Terveiket Hollandiából érkező protestáns teológusok és a németalföldi egyetemek ideológusai hozták magukkal. Más elképzelések szerint a holland típusú malom kelet-európai elterjedése egy lassú, regionális folyamat volt. Ezt a feltevést támasztják alá az Alsó-Ausztriában és Cseh-Morvaországban talált, a hazaiakhoz nagyon hasonló szerkezetű malomok.

A legtöbb szélmalom hazánkban 1866 és 1885 között építették (Bárany et al., 1970). A XIX. század végén Hoffer–Schrantz, Knuth Károly és Lakos Székely gyártott szélkonvertereket, főként kastélyok vízellátására (Energia Központ, 2000). Korabeli festmények, rajzok alapján azt gondolhatnánk, hogy csupán az alföldi területen voltak szélmalomok. A valóság azonban az, hogy a XIX. század második felében az alföldi településeken kismértékben csökkent a számuk. Például Sopron külterületén mind a mai napig áll a műemlék szélmalom (melyben több mint egy évtizeden át az Országos Meteorológiai Szolgálat meteorológiai állomása működött). A szélmalomokat hazánkban is a magasabb dombtetőkre, hegyhátakra építették, hogy így a magaslatok nagyobb sebességű légáramlását hasznosíthassák. Az Alföldön szokás volt, hogy egy mesterséges dombra, földhányásra telepítették a szélmalomot, ezzel is növelve a lapátot hajtó szélsébséget.

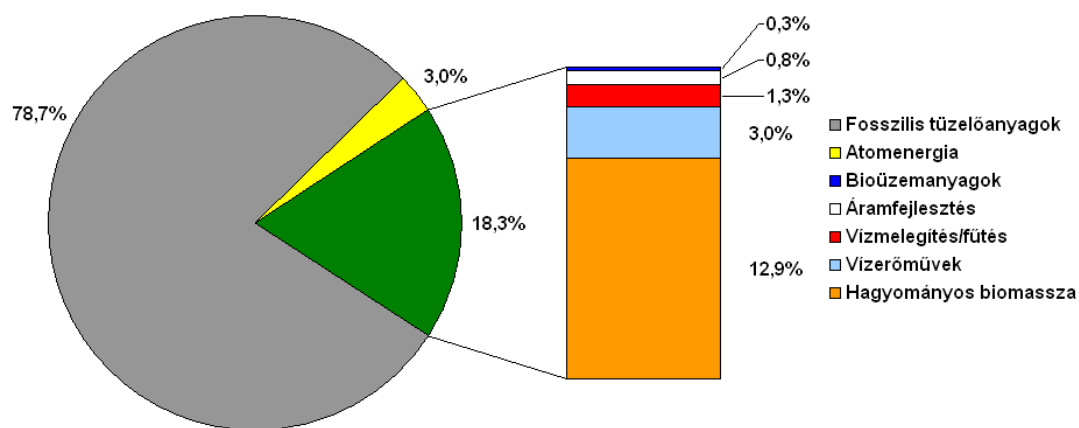
Levéltári adatok alapján 1873-ban összesen 854 szélmalom működött Magyarországon (Erdélyi, 1984). Egyedül például Kiskunfélegyházán már 1855-ben is 62 szélmalom üzemelt. A XIX. század második felében az évtizedenként megépülő malomok száma közel kétszázra volt tehető. Hazai sajátosság, hogy az 1880-as évek végéig, a vasúti pályák kiépüléséig a szélmalomok jól állták a gőzmalomokkal való versenyt. Ennek egyik oka, hogy a szélmalomokba épített, s a finomliszt készítéséhez elengedhetetlenül fontos szitáló berendezések gőzmalomokba való áthelyezése nehézkes volt. Másrészt e régióban hiánycikknek számított a gőzmalom működéséhez szükséges kőszén.

A két világháború közötti időszakban átlagosan 800 szélmalom működött hazánkban (Erdélyi, 1984). Amikor a szélmalomok használata lassan megszűnőben volt, egyes szélmalomok házi igényeknek megfelelő, ún. szélmalomokat építettek (Filep, 1981a), melyek a hagyományos szélmalomok egyszerűsített, kicsinyített változatai voltak. Ezek a mozgatható (kereken húzható) deszka- és vasépítmények, gépezetek a takarmányul szolgáló gabona, kukorica házi darálására, illetve a házi kenyérhez szükséges búza őrlésére szolgáltak. A szélmalomok a második világháború időszakában voltak a legelterjedtebbek, amikor az élelmiszerellátási nehézségek, valamint a malomban történő őrlés hatósági korlátozása ezt különösen indokolta.

A hazai szélmalomok utolsó példányai az 1950-es évek végéig működtek. Az ekkor még jó állapotban lévő épületeket, azok berendezéseit vagy műemléki védelem alá helyezték, vagy múzeumokba telepítették. Az Országos Műemlék Felügyelőség jelenlegi nyilvántartásában mindössze 22 szélmalom szerepel, mindegyikük védett, ipari műemlékként (Erdélyi, 1984). A működő szélmalomok eltűnésével hazánkban a szél energetikai célú felhasználása az 1990-es évek közepéig gyakorlatilag megszűnt.

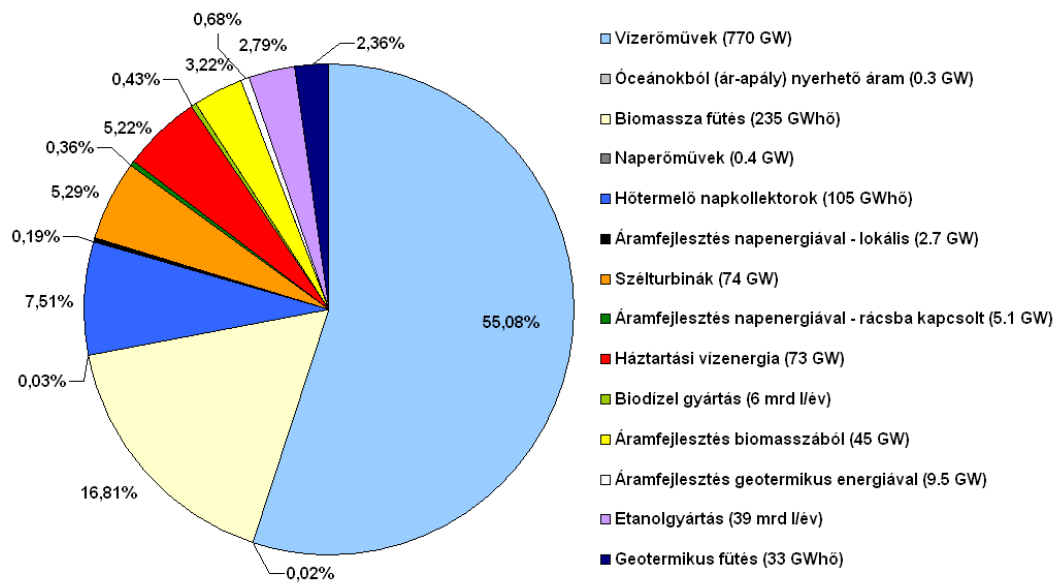
2. fejezet - Erőforrásaink, készleteink, fenntartható fejlődés, a megújuló energiaforrásokban rejlő potenciál becslése

A megújuló energiaforrások bőségesen rendelkezésre állnak a Földön, és mindenki számára lehetőséget kínálnak a tiszta és fenntartható energiák felhasználására. Ezek alkalmazásának széleskörű elterjedése adhatja a megoldást a fosszilis tüzelőanyagok kiváltására, amely jelenleg a globális energiafelhasználás csaknem 80%-át teszi ki (2.1. ábra). A megújuló energiaforrások közé soroljuk a napenergiát, a szélenergiát, a tágabb értelemben vett vízi energiát (idesorolva a szárazföldi folyóvizek, illetve az óceáni árapály felhasználásából nyerhető energiát), a geotermikus energiát és a biomasszából nyerhető energiát. A Föld különböző régióiban más és más megújuló energiaforrás hasznosításához kedvezőek az adottságok. Például a felhőmentes, nagy besugárzású területeken – a sivatagokban – a napenergia hasznosítás dominálhat. A mérsékeltvízi óceáni tengerpartok mentén a szélenergia, a kőzetlemezek határánál a geotermikus energia felhasználása lehet célszerű. A hegyvidéki nagyvesesű folyók, illetve az óceánparti öblök nagy amplitúdójú árapály ciklusa a vízi energia hasznosításának kedvez. A szárazföldi szubtrópusi területeken a bő csapadék hatására jól fejlődő vegetáció a biomassza felhasználását segíti elő.



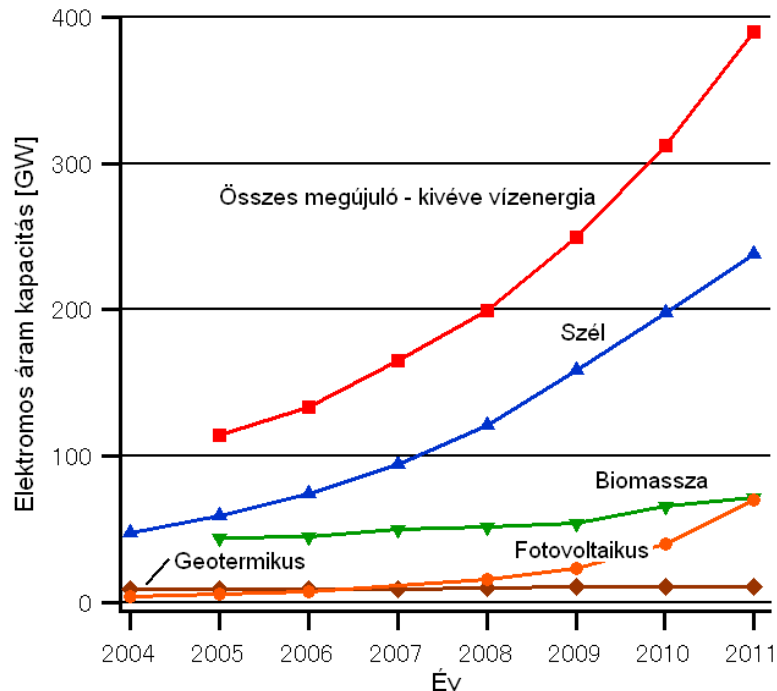
2.1. ábra: A globális energiafelhasználás megoszlása energiaforrásonként (REN21, 2013 nyomán) - animáció

A megújuló energiaforrások potenciálisan felhasználható mennyisége közel hússzor annyi, mint az emberiség jelenlegi teljes energiaigénye. Ugyanakkor a ténylegesen felhasznált energiának mindösszesen csak 18%-a származik megújuló energiaforrásokból. Ezen belül a hagyományos biomassza (tűzifa) felhasználás 13%-ot tesz ki, melyet szűkebb értelemben nem tekinthetünk tökéletes megújuló energiaforrásnak. Leszámítva a tűzifa részarányát, a megújuló energiaforrások felhasználásának részletes jelenlegi megoszlását illusztrálja a 2.2. ábra.



2.2. ábra: A megújuló energiaforrások felhasználásának globális megoszlása (REN21, 2013 nyomán)

Az utóbbi néhány évre (2004-től) követhetjük nyomon a megújuló energiaforrások gyors ütemű növekedését a 2.3. ábrán (ezen a grafikonon a vízenergia nincs feltüntetve). Jól látható, hogy a bemutatott hét év alatt csaknem négyszeresére nőttek a megújuló energiaforrást hasznosító erőmű kapacitások, ami elsősorban a szélenergia hasznosítás bővülésének köszönhető.

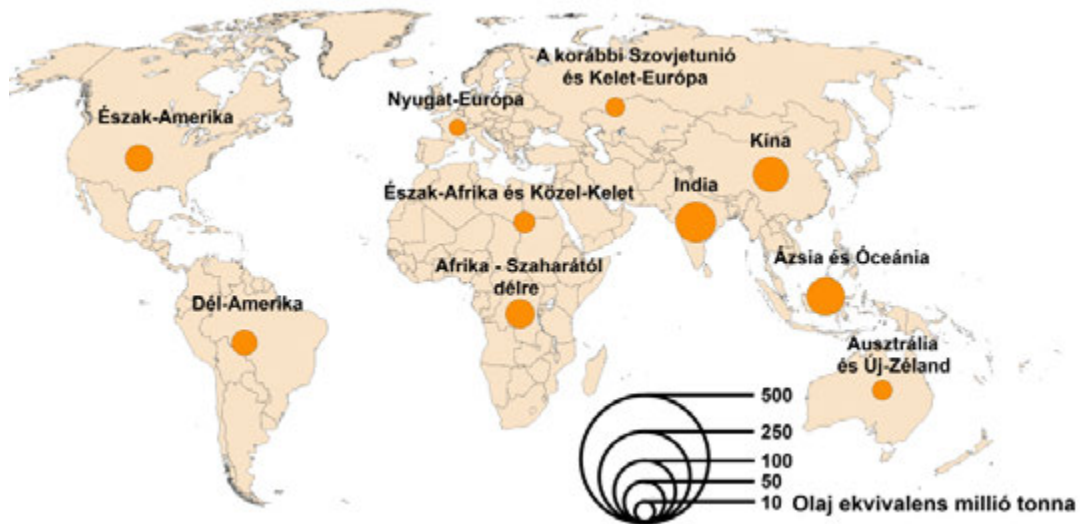


2.3. ábra: A megújuló energiaforrást hasznosító villamosenergia-termelő kapacitások alakulása a 2004–2011 időszakban (REN21, 2013 nyomán)

Egyes becslések szerint a fotovoltaikus napelemekkel tízszer annyi energiát tudnánk előállítani, mint amennyit a Földön jelenleg használunk. Más becslések szerint a megújuló energiaforrások által potenciálisan szolgáltatott energia akár 15-ször is több lehet, mint a jelenlegi nukleáris és fosszilis éves összenergiatermelés együttesen.

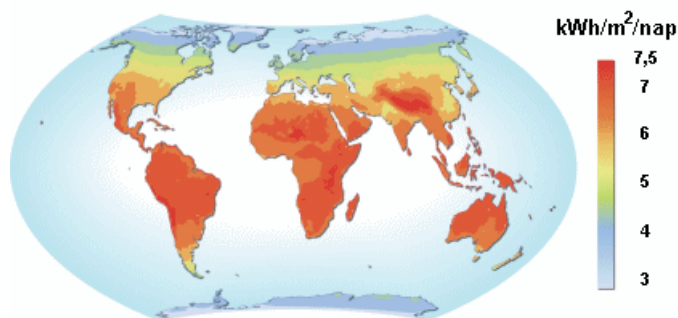
2.1. Napenergia

A megújuló energiaforrások közül a napenergia áll a legnagyobb bőséggel rendelkezésre. A felszínre érkező energia mintegy tízezerszer nagyobb, mint az emberiség által felhasznált energia mennyisége. Igaz ugyan, hogy az egyes országok nem részesülnek egyenlő arányban ebből a hatalmas energiaforrásból, mégis csaknem minden országban van lehetőség a napenergia hasznosítására. Jelen tudásunk szerint a jövőben várható globális éghajlatváltozás a Föld egyetlen régiójában sem fogja jelentős mértékben csökkenteni a beérkező napsugárzás mennyiségét. A 2.4. ábra a Föld napenergia felhasználásának területi eloszlását mutatja be. Összehasonlítva a többi megújuló energiaforrással – érthető módon – a sugárzási energia területi eloszlása a legegyenletesebb, olajekvivalens egységekben megadott értéke kontinensenként 10 és 50 Mt között mozog.



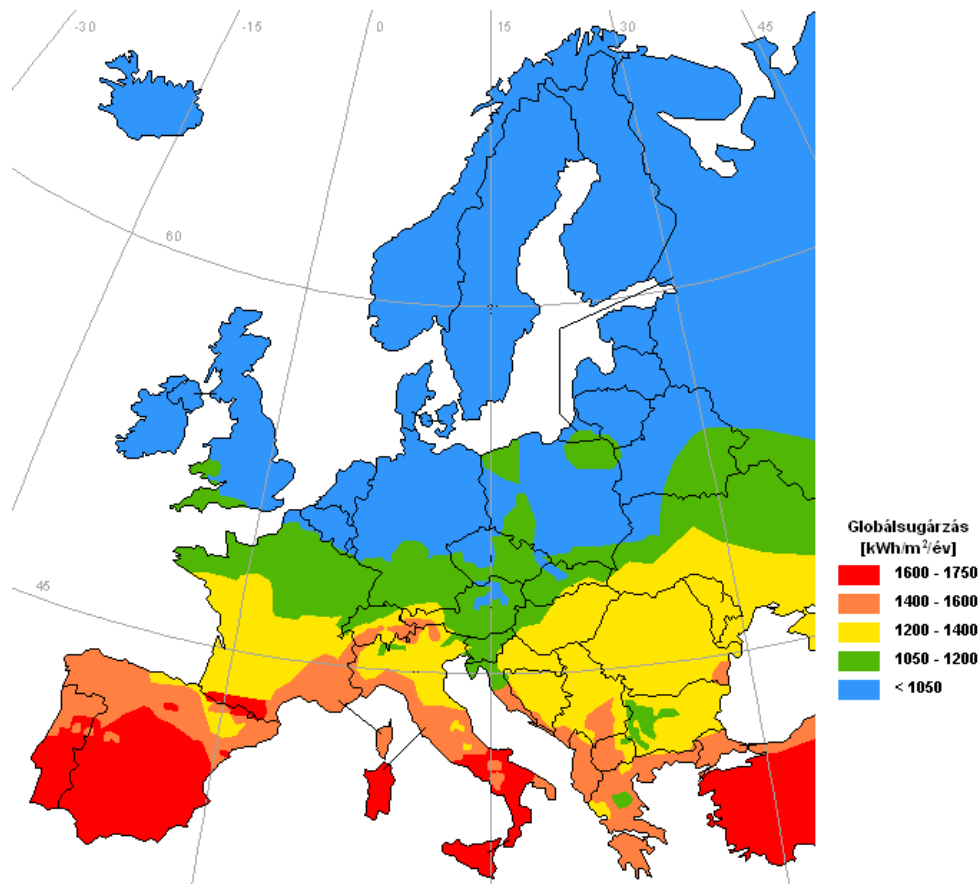
2.4. ábra: A napenergia felhasználásának földrészenkénti megoszlása (olajekvivalens Mt egységben) (WRSC nyomán)

A földfelszínre érkező sugárzási energia becslése az óceán feletti területeken nehézkes, hiszen mind a mérőállomások hiánya, mind a felhőzet által kiszűrt hányad pontos meghatározása még az elméleti becslést is megakadályozza. A kontinentális területekre érkező sugárzási energia éves összegeiből számított napi értékek területi eloszlását mutatja a 2.5. ábra. A trópusi övben ez a mennyiség meghaladja a $6 \text{ kWh/m}^2/\text{nap}$ értéket. A pólusok környékén viszont az éves átlagban vett felszínre jutó napsugárzás a hosszú besugárzásmentes időszak miatt ennek még a felét, a $3 \text{ kWh/m}^2/\text{nap}$ értéket sem éri el.



2.5. ábra: A napenergia átlagos napi értékeinek földrajzi eloszlása, 1983–2005 (Forrás: NASA)

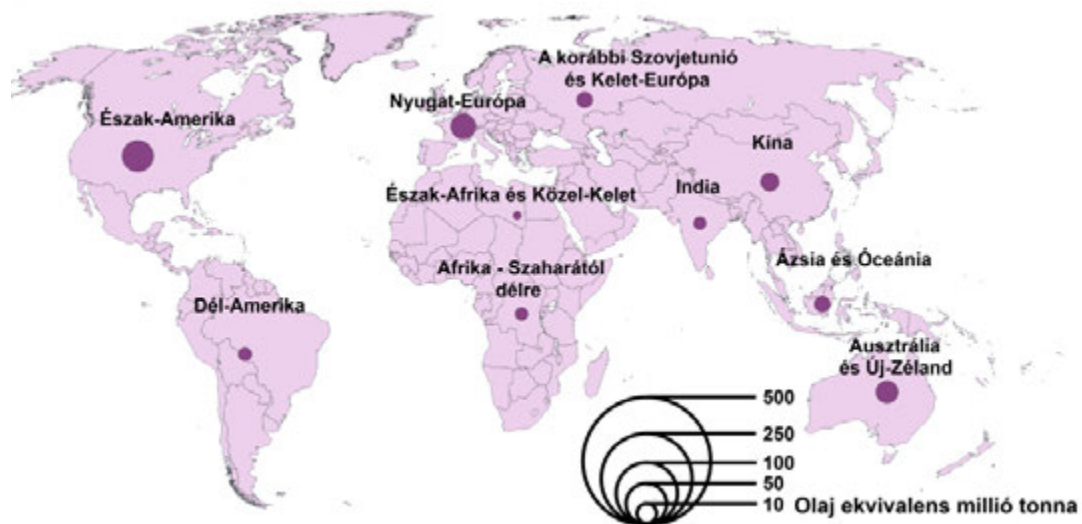
Az európai kontinensre részletesebben mutatja be a globálisugárzás éves értékeit a 2.6. ábra. Jól látható a zonális struktúra: Magyarországtól északra $1050 \text{ kWh/m}^2/\text{év}$ a beérkező sugárzás értéke. A Földközi-tenger térségében viszont $1600 \text{ kWh/m}^2/\text{év}$ fölötti az átlagos globálisugárzás.



2.6. ábra: Az évi globálsugárzás értékének eloszlása Európában (Adatok: Meteonorm 4.0)

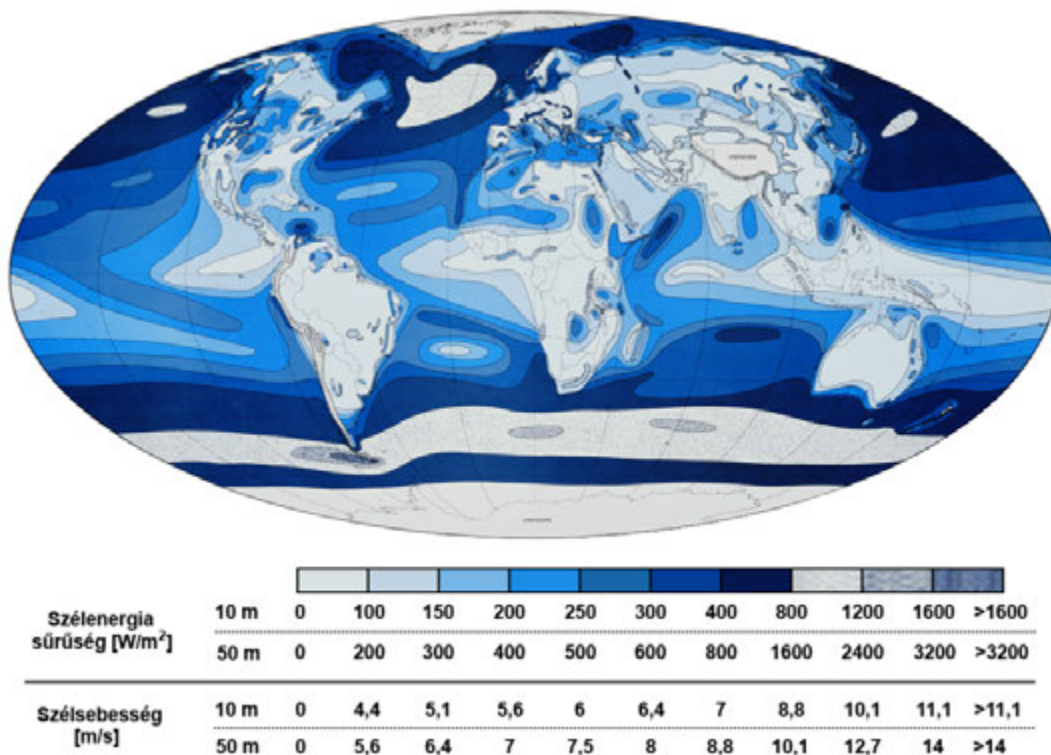
2.2. Szélenergia

A szél az egyik legváltozékonyabb meteorológiai elem, ezért a szélenergia felhasználásához körültekintően kell kiválasztani a szélerőmű telepítésének helyszínét. A potenciálisan kinyerhető szélenergia az összes megújuló energiaforrás közül a legkevesebb fosszilis energia kiváltására alkalmas. Lokálisan, kisebb térskálán ennek ellenére lehetnek nagyon kedvező adottságok, melyek lehetővé teszik a sokkal nagyobb arányú energiatermelést. Kontinentális skálán a szélenergia-potenciálokat a 2.7. ábra foglalja össze. Jól látható, hogy csak Észak-Amerikában és Európában éri el a potenciális szélenergia a 30 Mt olajekvivalens értéket.



2.7. ábra: A szélenergia felhasználásának földrészenkénti megoszlása (olajekvivalens Mt egységben) (WRSC nyomán)

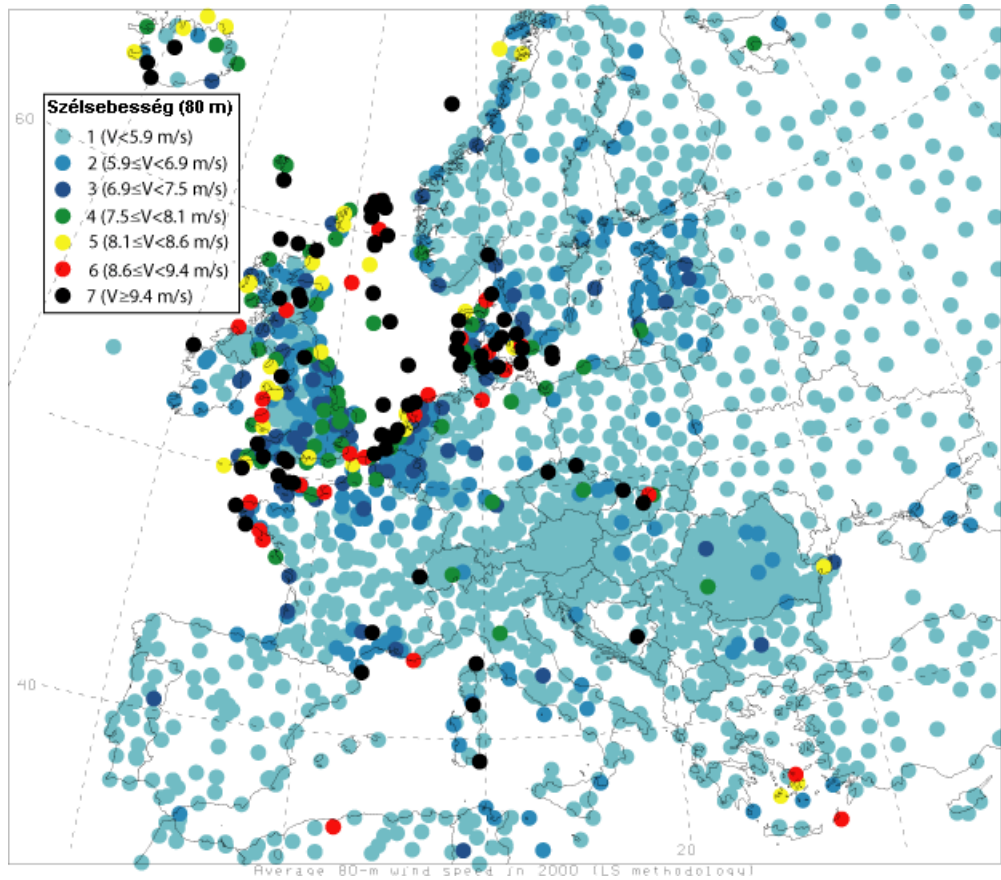
A Föld potenciálisan kitermelhető szélenergia-készletének becslését foglalja össze a 2.8. ábra. A bemutatott térkép csalóka olyan értelemben, hogy a legszelesebb térségek az óceáni területeken jelennek meg, ugyanakkor tudjuk, hogy csak a szárazföldi területeken, illetve a sekélyebb partmenti zónában van reális lehetőség a szél erőművek építésére.



2.8. ábra: Globális szélenergia becslés (GENI nyomán)

Állomási szélmérések és rádiószondás felszállások alapján készített becsléseket összegzi Európára a 2.9. ábra. A térképen az átlagos szélesebségek alapján hét osztályt különíthetünk el, melyeket különböző színek jelölnek. Leolvasható, hogy a legnagyobb átlagos szélesebségű (fekete, $v \geq 9,4$ m/s) pontok Dánia, Hollandia, Belgium, Nagy-Britannia, Izland térségében találhatók. Az erős szeleknek köszönhetően jelentős szélenergia potenciál

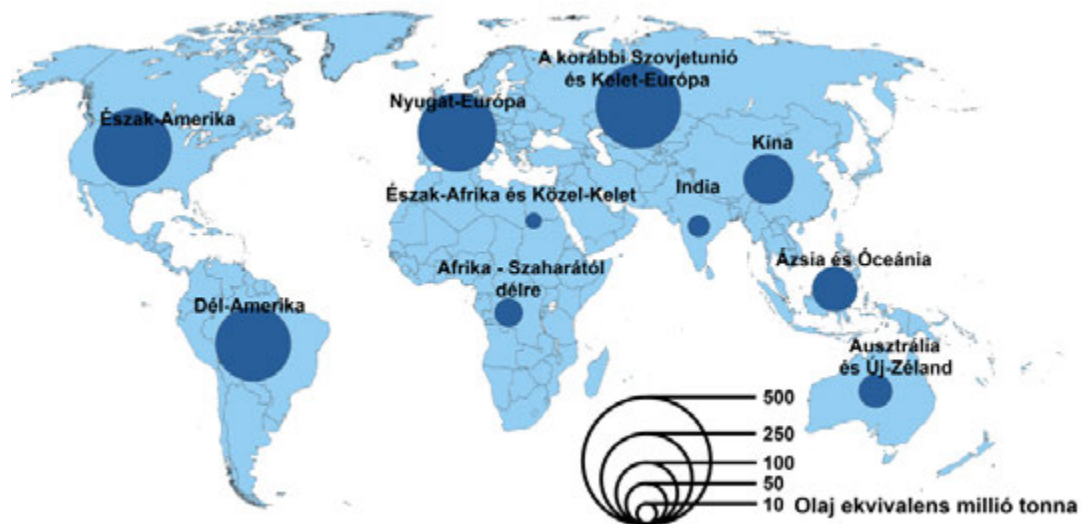
található Észak-Európában az Északi-tenger partvidéki zónájában. A teljes Földre a becslésekhez felhasznált állomások közel 13%-án 7 m/s-ot meghaladó éves átlagos szél jellemző a 80 m-es magassági szinten.



2.9. ábra: A 80 m-es magassági szintre becsült szélesség földrajzi eloszlása Európában (Archer és Jacobson, 2005).

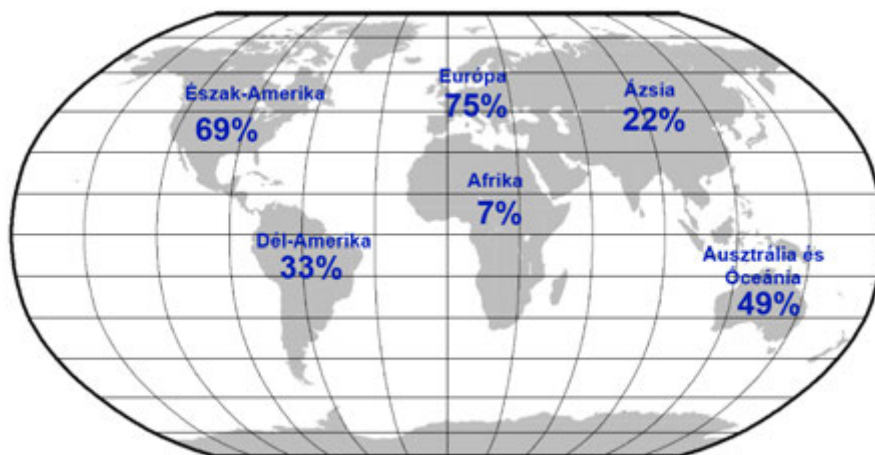
2.3. Vízi energia, óceánok

Az eddigi megújuló energiaforrásokhoz viszonyítva nagyobb mértékű a víz energiájának elektromos áram termelésére való felhasználása. Észak- és Dél-Amerikában, Nyugat-Európában, a volt keleti blokk országaiban (azaz a volt Szovjetunióban és a volt szocialista országokban) a vízből potenciálisan kinyerhető energia eléri a 200 Mt olajekvivalens értéket (2.10. ábra).



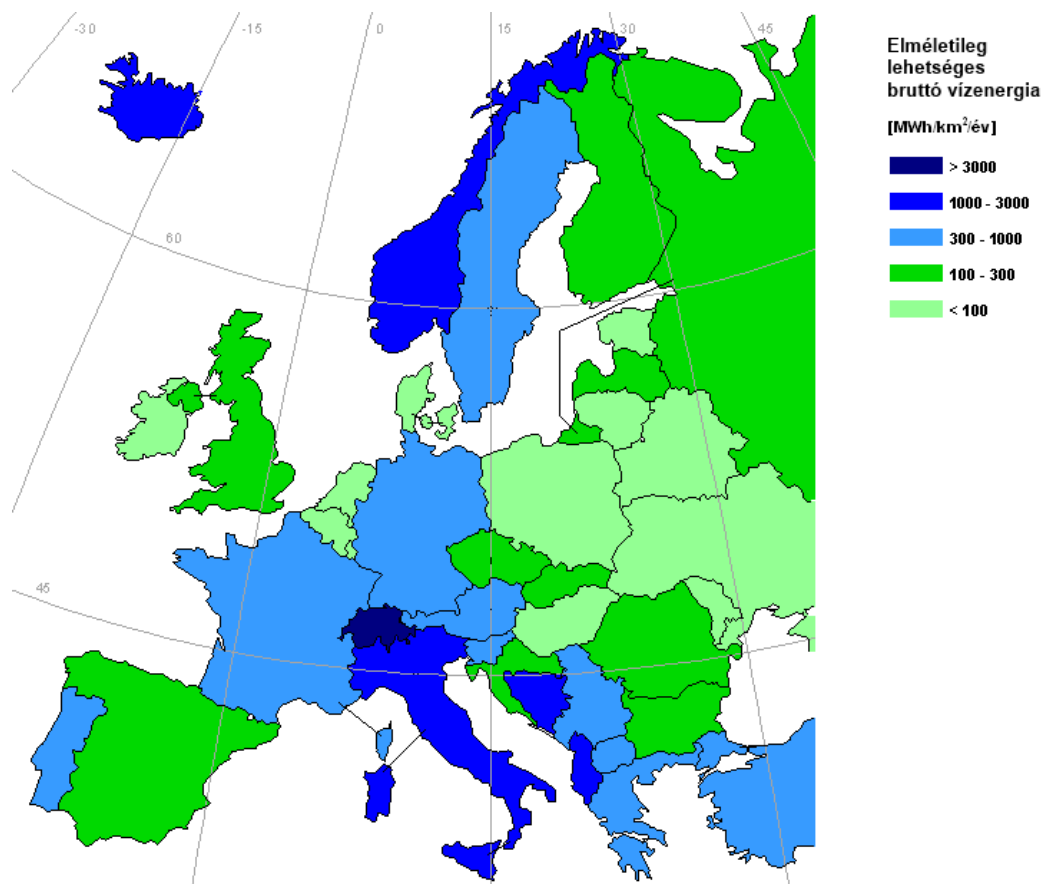
2.10. ábra: A vízenergia felhasználásának földrészenkénti megoszlása (olajekvivalens Mt egységben) (WRSC nyomán)

Észak-Amerikában és Európában 70% körüli a potenciálisan kinyerhető vízenergia felhasználási aránya (2.11. ábra). Lényegesen alacsonyabb ez az arány Ausztráliában (49%), Dél-Amerikában (33%) és Ázsiában (22%). A legkisebb arányban – a lehetségesnek kevesebb mint egytizedét – Afrikában használják fel a rendelkezésre álló vízenergiának.



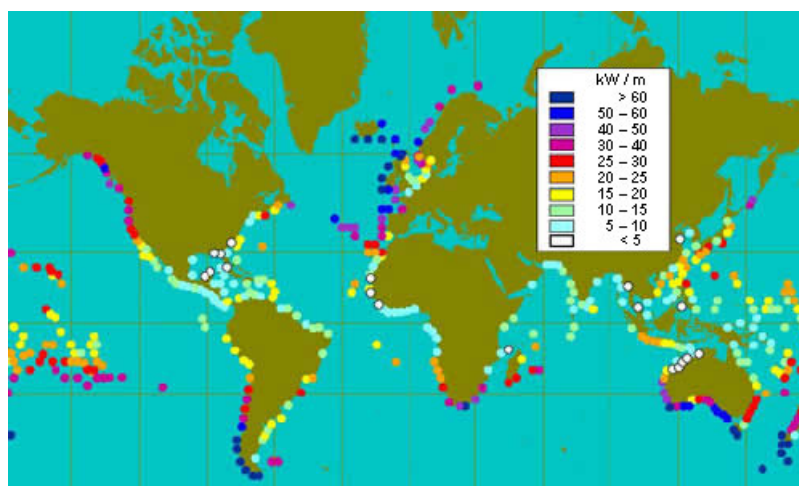
2.11. ábra: A potenciálisan rendelkezésre álló vízenergia felhasználási aránya, 2002 (REN21, 2013 nyomán)

Európára vonatkozóan részletesen láthatjuk a szárazföldi vízi energia potenciális lehetőségeit a 2.12. ábrán. Kiemelkedően jók az adottságaik azoknak az országoknak, ahol magas hegyek, nagy esésű vízfolyások találhatók, például Svájcban, Olaszországban és Norvégiában, ahol évi 1000 MWh/km² értéknél is nagyobb a teljes országra számított maximálisan kihasználható vízi energia. A Kárpát-medencebeli fekvése miatt Magyarország nem tartozik ezek közé a kedvező adottságú területek közé, a potenciálisan felhasználható vízi energia mennyisége nem éri el az évi 100 MWh/km² értéket sem.



2.12. ábra: Az évi potenciális vízienergia termelés országonkénti értékei Európában (GENI nyomán) - animáció

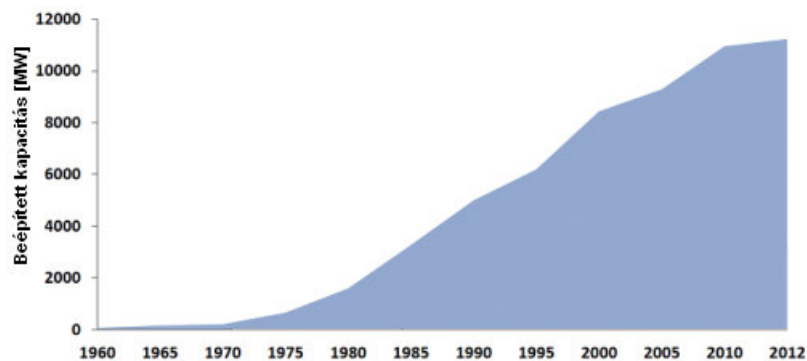
A tágabb értelemben vett vízből kinyerhető energiaforrások közé tartozik az óceán vizének hullámszásából, illetve az árapály jelenség miatti vízmozgásból eredő energia. Ennek globális eloszlását mutatja be a 2.13. ábra. Jól látható, hogy számos óceánparti térségben jelentős ez az energia, ám a kitermelhetőség gyakorlati korlátai miatt ezeket nem minden esetben lehet valóban felhasználni energiatermelési célra.



2.13. ábra: Az árapály erőművek energiatermelése (Hagemann, 2004 nyomán)

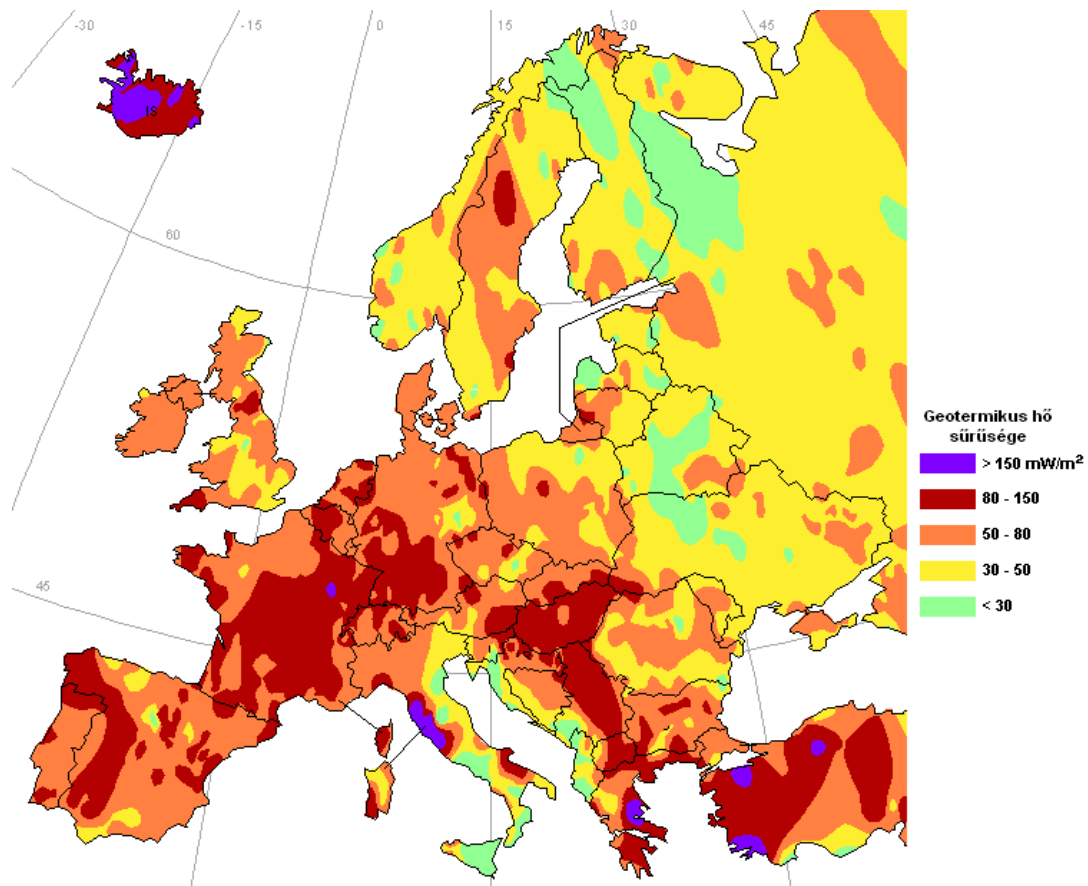
2.4. Geotermikus energia

A teljes Földön a geotermikus energiát hasznosító erőművek kapacitása 2012-ben meghaladta a 11 GW értéket. Az utóbbi félévszázad során bekövetkezett kapacitásbővülés üteme látható a 2.14. ábrán. Ennek a növekedésnek több mint fele az elmúlt két évtizedre tehető. A jelenlegi termelés legnagyobb mennyiségben az Amerikai Egyesült Államokban zajlik, ahol a globális geotermikus energiatermelés közel 30%-át végzik. Jelentős még a termelés a Fülöp-szigeteken, Mexikóban, Olaszországban, Indonéziában és Japánban, melyek együttesen a globális geotermikus forrású energiatermelés 56%-át adják.



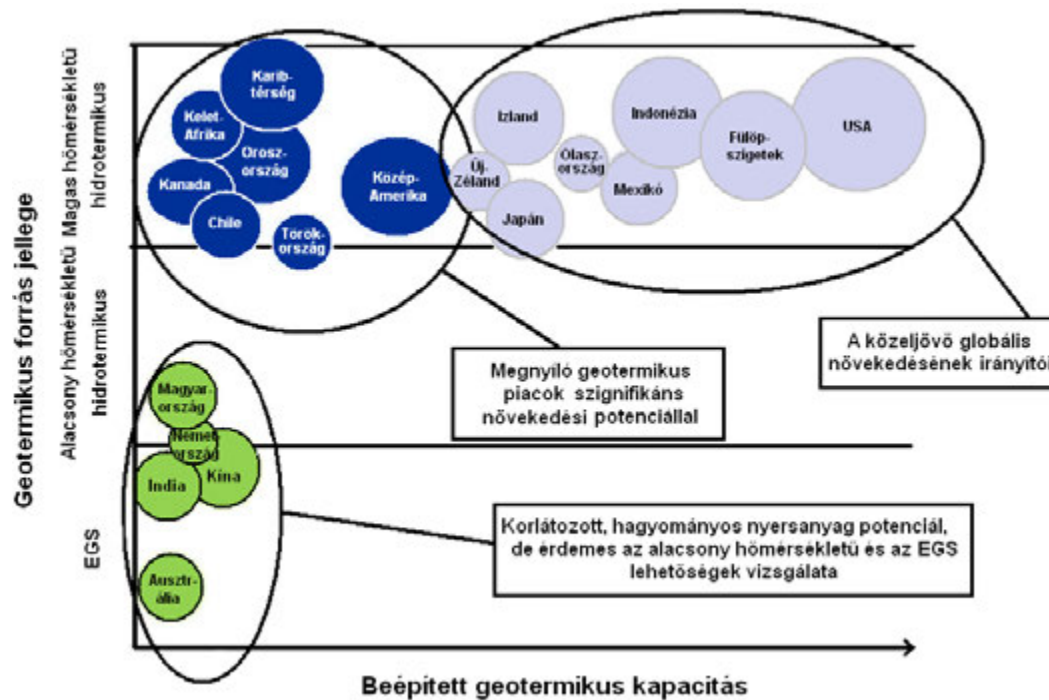
2.14. ábra: A geotermikus erőművek kapacitásváltozása a világon, 1960–2012

A potenciálisan kinyerhető geotermikus energiát meghatározzák a felszín közelében lévő források, melyet például a geotermikus hőszűrűséggel jellemezhetünk. Európára vonatkozóan a 2.15. ábra térképén láthatjuk a geotermikus hőszűrűség területi eloszlását. A legnagyobb hőszűrűségű – akár 150 mW/m^2 értéket is meghaladó – térségeket Izlandon, Olaszország középső részén, Görögországban és Törökország nyugati részén találhatjuk. Hazánk is kedvező adottságokkal rendelkezik: az ország területének nagy részén a geotermikus hő szűrűsége meghaladja a 80 mW/m^2 értéket. A teljes Földre vonatkozóan a kőzetlemezek határán van a legnagyobb mennyiségben kinyerhető geotermikus energia – melyek közül a Csendes-óceán körüli parti területek kiemelkedő lehetőségekkel rendelkeznek.



2.15. ábra: A geotermikus hősűrűség földrajzi eloszlása Európában (GENI nyomán)

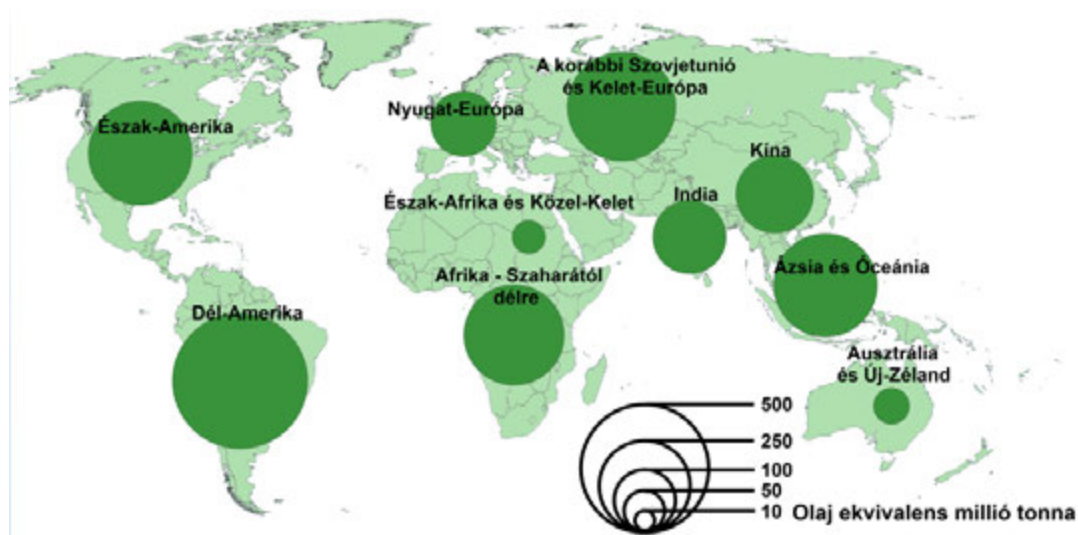
A geotermikus energiatermelés és fejlesztés jövőre vonatkozó tendenciáinak becslését foglalja össze a 2.16. ábra, ahol a geotermikus adottságoknak megfelelő energiaforrás-jelleg szerint is elkülönülnek az egyes országok. A jelenleg is nagy geotermikus energiatermelő országok egyértelműen a további bővülés fő irányítói maradnak. Ugyanakkor újabb régiók, újabb országok kapcsolódnak be ebbe a piacba. Magyarországon az alacsonyhőmérsékletű hidrotermikus eljárások fejlesztése perspektivikus.



2.16. ábra: A globális geotermikus energia fejlesztési irányai országok szerint. A körök mérete a potenciális források MW-ban kifejezett nagyságát reprezentálja. EGS: mesterségesen kifejlesztett földhőrendszer (leírása bővebben a 6. fejezetben található).

2.5. Biomassza

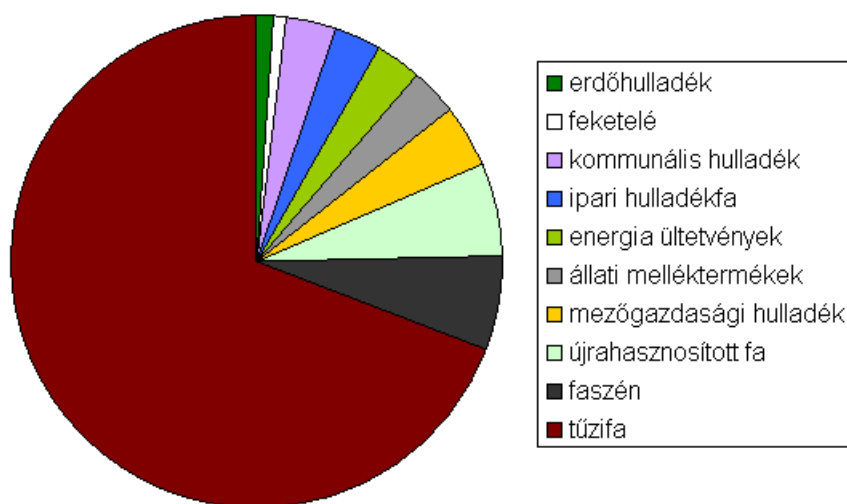
A megújuló energiaforrások közül a biomassza rendelkezik a legnagyobb felhasználható potenciállal. Például Dél-Amerikában a potenciálisan kinyerhető energia eléri az 500 Mt olajekvivalens értéket is (2.17. ábra), s a többi nagy régióban is meghaladja a 100 Mt-t. Egyedül a nagy kiterjedésű sivatagos, nagyon száraz vidékeken (Szahara, Ausztrália) találunk alacsony értékeket, melyek az 50 Mt olajekvivalens értéket sem érik el.



2.17. ábra: A biomasszából nyerhető energia felhasználásának földrészenkénti megoszlása (olajekvivalens Mt egységben) (WRSC nyomán)

Annak ellenére, hogy a biomassza a globálisan legegyszerűsebben eloszló megújuló energiaforrás, kiaknázása korántsem olyan kézenfekvő, hiszen ebből fedezzük mindennapi ételmezésünket is. A növények által évente

beépített szén mennyisége kb. 35 Gt, melyet felhasználva 50%-os széntartalommal számolva is mintegy 1260 EJ energiát kapunk. Ezen mennyiség azonban adott év időjárásától függően jelentősen ingadozik, a jelenlegi energia szükségletnek csupán 1–3 szorosát adja. Az élelmezés fenntartásával optimálisan 250–500 EJ energia nyerhető ki potenciálisan a biomasszából. Ebből 2012-ben összesen mintegy 53 EJ-t hasznosítottak, mely a világ teljes energiatermelésének mintegy 17%-a (Sawin et al., 2012). A legnagyobb forrás továbbra is a tűzifa (67%), majd ezt követi a faszén (6%) és az újrahasznosított fa (6%). A különböző mezőgazdasági források, mint a mezőgazdasági hulladék (4%), állati melléktermék (3%) és energia ültetvények (3%) összesen 10%-kal járulnak hozzá az összenergiához. Az ipari hulladékfa (3%), a kommunális hulladék (3%), a feketeléből (1%) és erdőhulladékból (1%) származó energia további 8%-ot tesz ki (2.18. ábra). Ebből is jól látható, hogy a tradicionális és modern biomassza felhasználás között jelentős különbségek vannak, habár a modern alkalmazások egyre inkább elterjedőben vannak.



2.18. ábra: A globális biomassza alapú energia forrásai (REN21, 2013 nyomán)

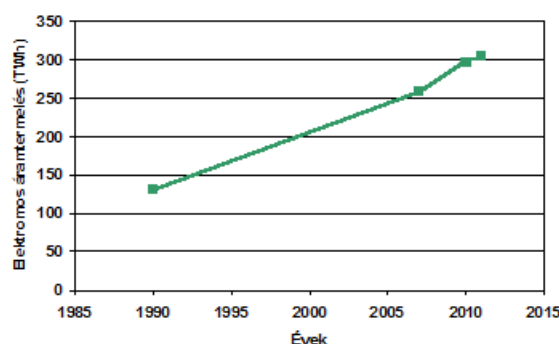
Habár a teljes biomassza energiatermelés évente mintegy 1,3–1,5%-kal nő, a modern biomasszából származó energia 2000-ben 8 EJ, 2004-ben 9,6 EJ, 2010-ben 11 EJ, 2012-ben pedig 18,35 EJ volt (Chum et al., 2007; Sawin et al., 2012), amely a 12 évre nézve évi 6,5%, az utolsó 2 évre nézve pedig évi 18%-os emelkedést mutat. Ennek jelentős részét a másodlagos energiaforrásokból (pl. üzemanyagok) kinyerhető energia adja. A tradicionális források esetén az elsődleges és másodlagos energiaforrások aránya kb. 5:1, a modernekre ez az arány már 2:1. A biomasszából származó energia aránya adott ország teljes energiatermeléséhez képest jelentősen függ az ország gazdaságától. Amíg például a fejlődő országokban (pl. Kína, India, Mexikó) a biomassza csupán 5–27%-át teszi ki az energiaforrásoknak – mely arány folyamatosan csökken a növekvő fosszilis energiafelhasználás miatt –, addig a legszegényebb országokban a teljes energia mintegy 80%-a biomassza eredetű (IEA, 2011; Chum et al., 2007).

A biomassza hőhasznosításának pontos mérőszámait nehéz megadni a házi tüzelések miatt. Az viszont bizonyos, hogy 2000-től 2011-ig 3000-ról 155.000-re emelkedett a Németországban, lakóházakban található pellet tüzelésű kazánok (erről további részletek a 7. fejezetben találhatók) száma, Olaszországban pedig 1,56 millió található belőlük. Az Amerikai Egyesült Államokban a faalapú tüzelés mértéke 34%-kal nőtt az elmúlt 10 évben, összesen 12 millió háztartásban fűtenek pellet és további 2–2,5 millióban egyéb fatüzelésű rendszerrel. Ipari méretekben a teljes biomassza energiatermelésből mintegy 8 EJ-t az ipari és 3,4 EJ-t az épületek fűtésére fordítanak. Kifejezetten a modern biomassza alapú fűtőrendszerek kapacitása kb. 10 GWh-val nőtt globálisan, amellyel a globális kapacitás 290 GWh-ra emelkedett (Sawin et al., 2012).

A fűtésre szánt pellet-termelés 2010-ben 14,6 Mt, 2011-ben 18,3 Mt volt, melynek vezető termelői az USA, Kanada, az EU (Németország, Svédország, Ausztria és Lengyelország együtt), Oroszország, Kína és Brazília. A jelenlegi sorrend változóban van, ugyanis míg 2011-ben Oroszországban 2 Mt pelletet gyártottak, és üzembe helyeztek egy 0,9 Mt kapacitású gyárat is, addig Brazíliában három 1 Mt pellet termelésére alkalmas gyár épül. A brikettet kisebb

mértékben gyártják, mint a pelletet. Kína a fő brikett-termelő évi 0,5 Mt-val, majd követi Japán, India, Malajzia és Thaiföld (összesen 0,5 Mt). Az Ázsián kívüli brikett termelés évi 1,3 Mt-t tesz ki (Sawin et al., 2012).

A biomassza alapú elektromos áram fejlesztés a világtermelés csak kb. 1%-át adja, azonban folyamatosan növekszik (2.19. ábra). A beépített kapacitás globálisan 66 GW volt 2010-ben és 72 GW 2011-ben. A fejlesztett áram kb. 80%-át szilárd biomasszából állítják elő. A szilárd biomasszából 13,7 GW-ot (56,7 TWh), illetve 26,2 GW-ot (69,9 TWh) az USA-ban és az EU-ban termelnek. Ennek 36%-a csak elektromos áramot előállító erőművekből, 64%-a CHP-ből származik (CHP: kombinált hő- és áramfejlesztő üzem, melyről bővebben a 7. fejezetben lesz szó). Az EU-ban a kommunális hulladékból 17,3 TWh-t állítottak elő 2011-ben, melynek közel felét CHP üzemekben fejlesztik. A világ többi nagy villamosenergia-termelői Brazília, Kína, India, Japán és Thaiföld rendre 8,9 GW, 4,4 GW, 3,8 GW, 3,3 GW, illetve 1,6 GW kapacitással, melynek jelentős része együtt-tüzelésű üzemekben történik (Sawin et al., 2012).



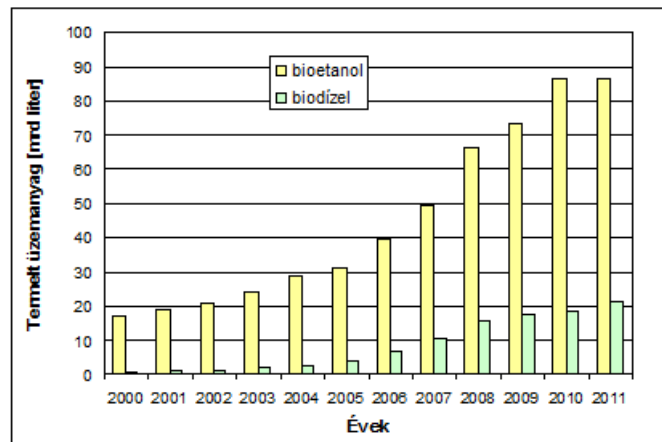
2.19. ábra: A biomassza alapú elektromos áramtermelés globális növekedése, 1990–2011.

Az elektromos áramfejlesztő üzemek elterjedésének egyik következő hulláma az afrikai országok bekapcsolódását fogja jelenteni. Jelenleg Kenya, Mauritius, Uganda, Zimbabwe országokban van CHP erőmű, de megkezdtek az erőművek építését Kamerunban, Elefántcsontparton, Ghánában, Libériában, Nigériában, Ruandában, Szenegálban, Sierra Leonében és Szudánban. Az afrikai üzemek átlagos kapacitása 10–20 MW közötti, mint ahogy ez jellemző a CHP üzemekre az USA-ban is. Az USA-ban további két 100 MW-os erőmű építését kezdték meg. A legnagyobb elektromos áramot termelő erőmű Angliában található és 2012-ben indult be, ahol egy 1 GW kapacitású szénerőművet pellet forrásúvá alakítottak, mely 750 MW kapacitással rendelkezik [2.1]. A fejlett országokban emellett több korábban fosszilis alapanyaggal üzemelő erőművet alakítottak át együtt-tüzeléses rendszerűvé, ebben élén jár Finnország (81 db), USA (40 db) és Németország (27 db).

A szilárd biomassza alapú elektromos áram termelés mellett a biogáz használata is elterjedőben van. Az Európai Unióban 2010-ben 30,3 TWh áramot termeltek (20%-ot CHP-ben), az USA-ban a hulladéklerakók és a farmok áramtermelése 14,3 TWh, illetve 0,5 TWh volt. Példaként emelendő ki Kína is, ahol csak 2009-ben 2000 db nagy és közepes emésztőt építettek ipari célokra, 22.570 db kisebb emésztőt farmokon, és 630-at kommunális hulladék és szennyvíziszap feldolgozó telepeken, így 2010-ben az ország biogáz alapú elektromos áram termelő kapacitása 800 MW volt. Indiában ennek mintegy tizede, 81 MW a kapacitás, 70 új biogáz üzem (kommunális hulladék) bekapcsolásával. Ez az arány tükröződik a háztartásokban alkalmazott biogáz berendezések számában is, 2011-ben Kínában mintegy 43 millió, Indiában pedig 4,4 millió volt található.

A biogázt közlekedési eszközökben is lehet használni, Európában a mintegy 70.000 gázüzemű tömegközlekedési buszból 9000-et hajtanak meg vele. A közlekedésben a bioetanol és biodízel alkalmazása ennél nagyobb. Amint a 2.20. ábrán látható, a bioüzemanyagok termelése folyamatosan nőtt az elmúlt évtizedben, a 2011-ben tapasztalt megtorpanás a gazdasági válság következménye. Braziliában a termelés mintegy 10%-kal esett vissza, melynek eredményeképpen a kormányzatilag szabályozott 25%-os bioetanol bekeverés mértékét 20%-ra csökkentették. Ugyanakkor még így is Brazília a második legnagyobb bioetanol készítő ország. Habár az USA-ban gyártják a legtöbb etanolt, Braziliából további 325 millió litert importáltak 2011-ben. A két ország együttesen a világ bioetanol termelésének 87%-át adja. A gyártott biodízel mennyisége csupán negyede a bioetanolénak. Ez azzal magyarázható, hogy a biodízel gyártás technológiája rendkívül új keletű, 2000 előtt ipari mennyiségben nem is gyártották. A biodízel gyártás technológiai korlátai miatt évi növekedése kisebb (14,5%), mint a bioetanolé (15,5%). Az USA-ban 2010-hez képest 159%-os emelkedés volt tapasztalható a gyártott üzemanyag mennyiségében 2011-ben. A 2011-es megnövekedett teljesítmény miatt vette csak át a vezető szerepet az USA (2.1. táblázat), a legtöbb biodízelt

emellett Németországban és Argentínában gyártják. Észrevehető továbbá, hogy a biodízel globális termelése területileg kiegyensúlyozottabb a bioetanolhoz képest, mindemellett az EU-ban a több dízelüzemű autó miatt nagyobb a gyártott üzemanyag mennyisége. Összességében a bioüzemanyagok így is csak a közlekedésre szánt üzemanyagok 2%-át adják.



2.20. ábra: A globális bioüzemanyag termelés változása a 2000–2011 időszakban (Sawin et al., 2012).

	Bioetanol		Biodízel	
1.	USA	54	USA	3,2
2.	Brazília	21	Németország	3,2
3.	Kína	2,1	Argentína	2,8
4.	Kanada	1,8	Brazília	2,7
5.	Franciaország	1,1	Franciaország	1,6
6.	Németország	0,8	Indonézia	1,4
7.	Spanyolország	0,5	Spanyolország	0,7
8.	Thaiföld	0,5	Thaiföld	0,6
9.	Belgium	0,4	Olaszország	0,6
10.	Kolumbia	0,3	Belgium	0,4
11.	Hollandia	0,3	Hollandia	0,4
12.	Ausztria	0,2	Ausztria	0,4
Globális összes	86,1		21,4	
EU összes	4,3		9,2	

2.1. táblázat: Bioüzemanyag termelés [milliárd liter] országonkénti eloszlása 2011-ben (Sawin et al., 2012).

3. fejezet - Napenergia

Az ember a Nap energiáját először csupán tűzgyújtásra tudta használni. Az időszámításunk előtti VII. században lencsék segítségével fókuszálták a fényt, így lobbantották lángra például a fáklyákat. Egy legenda szerint az i.e. II. században Archimédész a Szirakúzái támadó római hajókat bronzpajzsok által visszavert és fókuszált fénysugarak segítségével gyújtotta fel (Butti és Perlin, 1980). Az ezt követő századokban elsődlegesen az épületek megfelelő tájolásával próbálták használni a Nap melegét. Jelentős előrelépést jelentett, amikor Edmond Becquerel 1839-ben felfedezte a fény katalizátor szerepét az elektromosság előállításakor. Kísérletében az elektrolízis folyamatát vizsgálta, amikor észrevette, hogy a rendszer több elektromos áramot termel, ha természetes fénnel világítja meg (Perlin, 1999). 1876-ban William Grylls Adams és Richard Evans Day fedezte fel a napfénnel megvilágított szelénium elektromos áramtermelő képességét (Perlin, 1999). További előrelépést azonban nem értek el, mivel a szelénium cellák nem termeltek az elektromos eszközök számára elegendő áramot. Felfedezésük jelentősége mégis abban áll, hogy bebizonyították, egy szilárd anyag is képes a Nap energiáját elektromossággá alakítani további hőbevitel, illetve mozgó alkatrész nélkül.

1891-ben az amerikai Baltimore városbeli Clarence Kemp védette le szabadalmát, mely az első kereskedelmi forgalomban kapható vízmelegítő készülék elkészítését tartalmazta. A rendszer kialakítása igen egyszerű volt. Részben arra a korábbi gyakorlatra támaszkodott, mellyel a farmerek melegítettek maguknak vizet. Ehhez csak egy fekete hordó vagy más hasonló tárolóeszköz kellett, ami a nem fekete színű tárolókhoz képest nagyobb hatásfokkal melegítette a benne található vizet. Kemp ennek a módszernek a szigetelésbeli hiányosságait küszöbölté ki, így biztosítva a napközben felmelegített víz hőmérsékletének lassabb csökkenését.

1905-ben Albert Einstein publikálta fotoelektromos hatásról szóló cikkét, amiért 1921-ben Nobel-díjjal jutalmazták. A napenergia-hasznosítás történetének következő fontos állomása 1954 volt, amikor a Bell cég laboratóriumában megszületett az – ekkor még kizárólag – szilícium alapú napelem, amely már képes volt a háztartásban alkalmazott gépek számára elegendő elektromos áramot termelni. Az 1970-es évekig folyamatosan végzett kutatások eredményeként a napelemek hatásfoka egyre növekedett, ezért használatuk is fokozatosan elterjedt. Először csak az űrtechnikában alkalmazták, így biztosítva a műholdak számára nélkülözhetetlen elektromosságot. Később – a fájlagos költségek csökkenésével – az elektromos hálózatoktól távol eső helyeken is bevezették használatukat.

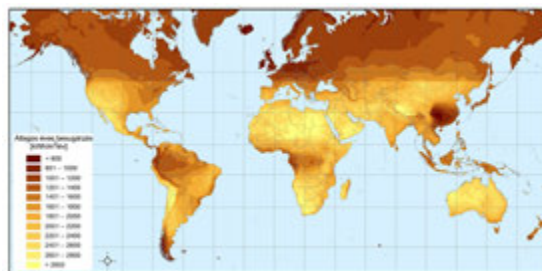
A 80-as évek elején megépítették az első napenergiával hajtott közlekedési eszközöket. 1981-ben megalkották az első repülőgépet, amellyel sikeresen átrepülték a La-Manche csatornát. 1982-ben pedig napvilágot látott az első gépjármű is, mely átszelte Ausztráliát, ahol 1987 óta minden évben megrendezik a napenergiával hajtott gépjárművek versenyét.

További technológiai fejlesztési cél a minél hatékonyabb energiakonverzió és a berendezések méreteinek csökkentése volt. Megjelentek a szilíciumtól eltérő alapanyagú, például kadmium-telluritból készült panelek is. Törekedtek az egyre vékonyabb, szinte film vastagságú panelek előállítására. Az amorf szilícium felhasználásával a síklaptól eltérő formák – például tetőzsindely – is elkészíthetővé váltak. A jelenleg legjobb hatásfokkal rendelkező panelt az Amerikai Egyesült Államokban, a Delaware Egyetemen fejlesztették ki. Érdekessége, hogy a napsugárzásának hullámhossza szerint három különböző anyag felhasználásával alakítja át a fényt elektromos árammá.

3.1. A sugárzási energia a Földön

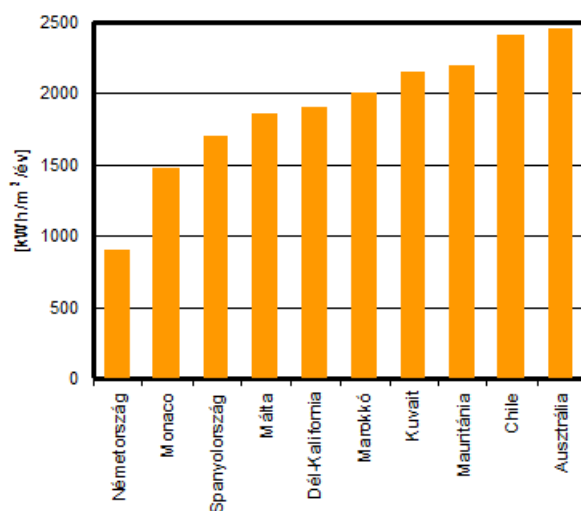
A világ teljes népességéből mintegy 1,5 milliárd fő él elektromos áramellátás nélküli háztartásban. Ezeknek az embereknek több mint 80%-a a Szaharától délre Afrikában, vagy Dél-Ázsiában él. A probléma elsősorban a nehezen megközelíthető térségekben jelentkezik. Például Afrika városon kívüli térségeiben 10 emberből 9 elektromos áram nélkül él. Ez az arány az afrikai városokban sokkal kedvezőbb, 10 emberből csak 5 nélkülözi az elektromos szolgáltatást. Ezeknek az embereknek még egy kis mennyiségű áramhoz való hozzáférés is életmentő lehet, hiszen ez teszi lehetővé a hatékonyabb mezőgazdasági termelést, az egészségügyi ellátás javítását, az oktatást, a kommunikációt (telefon, rádió, TV), s a tiszta ivóvízhez való hozzáférést. A fejlődő országokban az elektromos áramhoz való hozzáférés javítása az elmúlt évtizedekben a központi elektromos hálózat bővítésén keresztül történt. Ehhez elsődlegesen fosszilis energiaforrásokat – kőolajat, földgázt vagy kőszént – használtak fel. Az ilyen típusú hálózatbővítés a vidéki szegényebb társadalmi rétegek számára nem jelent megoldást, mivel a hálózat kiépítése a nagy távolságok, illetve a magas költségek miatt nem megvalósítható. Globálisan az energiatermelés 26%-ban járul hozzá az üvegházgáz kibocsátáshoz, melynek nagy része jelenleg a fejlett országok kibocsátásából származik.

Becslések szerint 2030-ra a fejlődő országok már 70%-kal több energiát fognak felhasználni, mint a fejlett országok, s ennek arányában az üvegházgáz kibocsátás is jelentősen növekszik ezekben a régiókban. Ezért elkerülhetetlen, hogy a szegényebb rétegek számára is elérhető, alacsony szén-dioxid kibocsátással járó technológiákat alkalmazzanak az elektromos áram nagyobb mennyiségű előállítására. Ehhez kínál megoldási lehetőséget a napenergia.



3.1. ábra: Direkt globálisugrás éves összegei (kWh/m^2), 1983–2005 (forrás: NASA)

A Föld felszínére egy óra alatt több napenergia érkezik, mint amennyi energiát a Föld teljes népessége felhasznál. A fejlődő országok nagy többségében különösen jelentős a rendelkezésre álló felhasználható napenergia. Például Afrikában évente mintegy 325 napon olyan erős a napsugárzás, hogy több mint 6 kWh/m^2 a napi energiabevétel. Éves összegben a rendelkezésre álló napenergia meghaladja 2200 kWh/m^2 értéket (3.1. ábra). Összehasonlításképpen néhány kiválasztott országra a 3.2. ábra mutatja be a globálisugrásból származó éves energia mennyiségét. Jól látható, hogy míg Németországban a potenciálisan rendelkezésre álló energia alig éri el az $1000 \text{ kWh/m}^2/\text{év}$ értéket, addig Ausztráliában megközelíti a $2500 \text{ kWh/m}^2/\text{év}$ értéket. Becslések szerint, ha a Föld összes sivatagjának csupán 1%-át lefednénk napelemekkel, így ezzel a világ jelenlegi teljes energiaszükségletét biztosítani tudnánk. Sajnálatos módon a legtöbb napenergia éppen azon országok felszínére érkezik, amelyek a legkevésbé képesek azt hasznosítani. Ehhez mind a megfelelő technológiai ismeretek, mind az előállításához szükséges kapacitások hiányoznak.

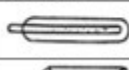


3.2. ábra: A globálisugrás éves összegei (kWh/m^2) néhány országban

3.2. Technológia

Alapvetően két formája van a napenergia hasznosításának: a passzív hasznosítás, illetve az aktív hasznosítás. Passzív hasznosítás például a mezőgazdasági növények, gabonafélék szárítása, a víz pasztörizálása. Ebben az esetben nem kell gondoskodni az előállított energia konvertálásáról, szállításáról. Az aktív hasznosítás szintén két csoportot alkot: (1) Termikus hasznosítás, amikor a beérkező napsugárzás összegyűjtése után fő célunk a hőtermelés. Ez történhet napkollektorok segítségével. (2) Fotelektromos hasznosítás, amikor a beérkező sugárzás átalakítása elektromos árammá fotovoltaiikus napelemekkel történik.

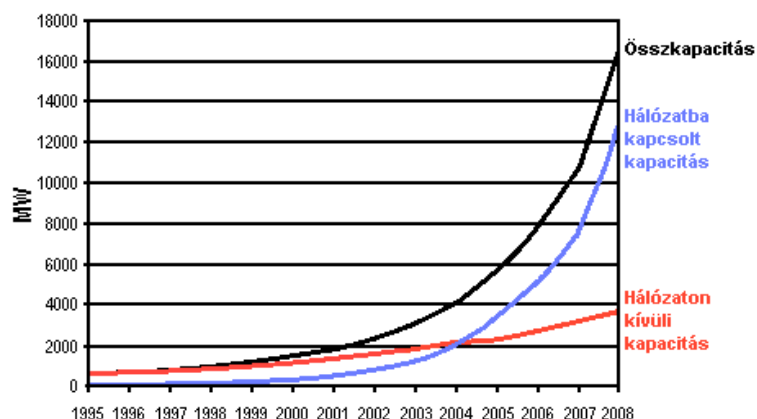
A napkollektorok elnyelik a bejövő napsugárzást és hőt termelnek, éppen ezért a legkönnyebben fűtésre és hűtésre lehet felhasználni. Ezen eszközök széles skálája létezik ma már (3.1. táblázat). Vannak például sík lapokból álló napkollektorok, melyeket a házak tetőszerkezetéhez erősítünk, vagy parabolatányérok, naptornyok, nappiramisok, melyeket a nagyobb teljesítményű ún. naperőművekben használnak. A koncentrált napenergia (CSP: Concentrating Solar Power) rendszerek lencsék vagy tükrök felhasználásával nagyobb felületről összegyűjtik a napsugárzást egy nyalábbba, és így már segítségükkel elektromos áram termelhető. Az összegyűjtött napenergia szolgál a víz felmelegítésére, amely gőzt termel, s ez meghajt egy áramgenerátorral összekötött turbinát.

Napkollektor típusa, formája				C együttható, értéke a direkt sugárzás fókuszálásának mértékét fejezi ki	Az elérhető hőmérsékleti tartomány (K)
Stacionárius	Nem konvekciós medence		Sík elnyelő	< 1	300–360
	Sík elnyelő réteg			< 1	300–350
	Üreges burkolat			< 1	320–460
Napkövető	Egy tengelyű	Összetett parabolikus visszaverő	Vonalszerű elnyelő	1–5	340–510
		Parabolikus visszaverő		5–15	340–560
		Parabolikus visszaverő		15–40	340–560
		Fresnel refraktor		10–40	340–540
	Henger alakú refraktor	10–50		340–540	
	Két tengelyű	Parabola tányér alakú visszaverő	Pontszerű elnyelő	100–1000	340–1200
		Gömb formájú visszaverő		100–300	340–1000
		Heliosztatikus mező		100–1500	400–3000

3.1. táblázat. A napkollektor típusok osztályozási rendszere (Norton, 2011 nyomán)

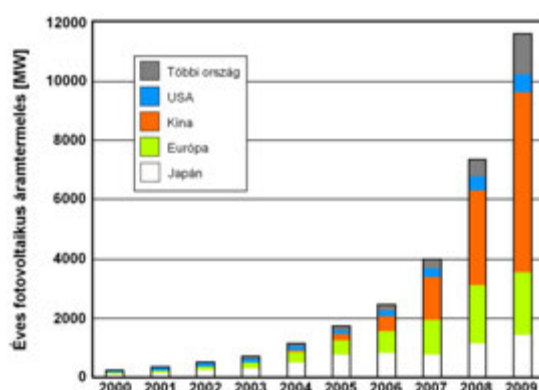
A fotovoltaikus rendszerek napelemeket alkalmaznak, melyek egymással összekötve együttesen végzik a Naptól érkező sugárzás elektromos árammá való átalakítását. Néhány kis napelemmel már akár kézi számológépeket is működtethetünk. Több ezer napelem táplálja a nagyobb naperőműveket.

A napelemek több mint 90%-a szilikon alapú anyagokból áll. Azokhoz a napelem-rendszerekhez, amelyeket az elektromos hálózathoz csatlakoztatnak, átalakító eszközöket is kell alkalmazni az előállított egyenáram váltóárammá alakításához. A hálózathoz nem kapcsolt napelem-rendszerekhez is használható ilyen átalakító, de ebben az esetben célszerű akkumulátorokat is üzemeltetni az esetlegesen termelt többletenergia tárolására. Az akkumulátorokkal együtt, azok túltöltését megakadályozó eszköz beiktatására is szükség lehet. Napjainkban a napkollektor rendszerek mintegy 30%-os hatékonysággal képesek a hőt elektromossággá alakítani, szemben a napelemek 15%-os hatékonyságával. A legújabb kutatások különböző polimerek és nanorészecskék alkalmazásának lehetőségét vizsgálják a napelem-rendszerekben, mely hosszútávon jelentősen növelheti a berendezések hatékonyságát. Ma még sem a napelemeket, sem a napkollektorokat nem használják széles körben elektromos áram termelésére: globálisan tekintve részesedésük nem éri el az 1%-ot. Ennek oka, hogy más technológiákhoz viszonyítva ezen eszközök előállítása relatíve költséges. A jövőben valószínűsíthetően dráguló fosszilis energiahordozók miatt néhány évtizeden belül gazdaságilag is kedvezőbbé válhat a napenergia áramtermelés céljára való felhasználása. Már az elmúlt öt évben is jelentősen növekedett a napenergia felhasználás iránti érdeklődés. A napelemek globális kapacitása 2004 és 2008 között hatszorosára növekedett (3.3. ábra).



3.3. ábra: A fotovoltaikus rendszerek globális kapacitásbővülése az 1995–2008 időszakban. (REN21, 2013 nyomán)
- animáció

A legnagyobb fotovoltaikus áramtermelők: Kína, Európa és Japán. A világ teljes termelése napjainkra meghaladja a 10.000 MW-ot, melynek több mint felét Kína termeli (3.4. ábra).



3.4. ábra: A fotovoltaikus napelemek globális áramtermelése a 2000–2009 időszakban (Arvizu et al., 2011 alapján).

A napenergia felhasználásának technikai potenciálja még óriási fejlesztési lehetőségeket tartogat. Nehéz megbecsülni a reálisan felhasználható energiamennyiséget. A napenergia sajátossága, hogy a földfelszínre leérkező mennyiség óriási, de az energiasűrűség kicsi, ezért a hatékony hasznosítás nehézkes. A 3.2. táblázatban a Föld különböző térségeiben rendelkezésre álló összes termelhető napenergia becslése szerepel. Az intervallumok alsó és felső értékét rendre a minimális és maximális éves felhőmentes besugárzási mennyiségek alapján számították a napkollektorok kihelyezésére jelenleg rendelkezésre álló szabad földterületek, illetve a potenciálisan felszabadítható maximális földterületek figyelembevételével. Jól látható, hogy a jelenlegi, mintegy 500 EJ napenergia termelés legalább háromszorosa, de akár százszorosa is kinyerhető lenne, megfelelő technikai berendezések alkalmazásával.

Régió	Lehetséges energiatermelés (EJ)
Nyugat-Európa	25–914
Közép- és Kelet-Európa	4–154
Volt Szovjetunió	199–8.655
Észak-Amerika	181–7.410
Közép- és Dél-Amerika	113–3.385
Közel-Kelet és Észak-Afrika	412–11.060
Afrika (Szaharától délre)	372–9.528
Ázsia	196–6.469
Összesen	1.502–47.574

3.2. táblázat. Potenciális évi napenergia-termelés a Föld különböző régióiban (Arvizu et al., 2011 alapján).

Mivel a globális népesség növekedésével az energiaigény is együtt nő, valamint a Föld felszínének több mint kétharmadát óceánok borítják, ezért perspektivikusnak látszik a napkollektorokat vagy a napelemeket az ember által kevésbé hasznosított óceánfelszínre is kihelyezni. Az ún. napszigetek rendkívül vékony napkollektorokból vagy napelemekből összeállított berendezések, melyeket a napsugárzás irányába forgatnak, s a termelt energiát vezetékeken juttatják a távoli hálózatokhoz. Az úszó napszigetek sivatagi környezetben is elképzelhetők (3.5. ábra), melynek prototípusát (100 m-es átmérővel) az Egyesült Arab Emírátsok északi részén tervezik megépíteni.



3.5. ábra: Tervezett úszó napszigetek a nyílt óceánon, a partmenti területeken, illetve sivatagi környezetben (Hinderling, 2008 nyomán)

4. fejezet - Szélerergia

Az elmúlt évszázadok során nemcsak a Föld lakóinak száma nőtt robbanásszerűen, hanem ezzel párhuzamosan az egy főre jutó felhasznált energia és a légkörbe juttatott szennyező anyagok mennyisége is nagy ütemben emelkedett (Sørensen, 2000). Az emberi tevékenység – így például a fosszilis tüzelőanyagként felhasznált szén, olaj és földgáz elégetése, az erdőirtások és műtrágyázás egyre intenzívebbé válása – befolyásolja a Föld éghajlatának alakulását. A nemzetközi tudományos közélet napjainkra már elfogadta, hogy az éghajlati rendszer antropogén eredetű változása a jövőben olyan skálán is jelentkezhet, mely már közvetlenül érinti a globális gazdasági rendszert, az emberi társadalmat. Így a hagyományos energiakészletek csökkenésével és a légkör szén-dioxid tartalmának jelentős növekedésével napjainkban egyre nagyobb szerephez jutnak a megújuló energiaforrások. E lehetséges alternatív energiaforrások egyike a szél.

Sok évszázados hagyománya van Magyarországon a szélerergia hasznosításának, s még az 1950-es évek elején is közel 800 szélmalom üzemelt hazánkban. A több évtizeden át zuhanó, majd ismét meredeken emelkedő energiaárak és a sokkoló olajválság hatására az 1970-es években világszerte minden addig megvalósuló mértékű technológiai fejlesztések indultak be, melyek azóta is töretlenül folynak. Hazánkban csak két évtizedes késéssel, az 1990-es években kezdődtek meg a szélpotenciál-mező új szempontok alapján történő feltérképezését szolgáló kutatások.

4.1. A szélerergia hasznosításának elméleti alapjai

Ebben a fejezetben a szélergetikai vizsgálatokhoz nélkülözhetetlen alapfogalmakat definiáljuk, s a szélergetikai számításokhoz felhasznált elméleti összefüggéseket, módszereket ismertetjük.

4.1.1. A rendelkezésre álló és a kinyerhető szélteljesítmény becslése

A szélerergia hasznosítása a légkör kinetikus energiájának közvetlen felhasználását vagy elektromos energiává történő átalakítását jelenti. Egy m tömegű, v sebességgel mozgó légtömeg kinetikus energiája (E):

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.1)$$

Felhasználva a sűrűség (ρ) és az időegység alatt a rotor által súrolt felületen (F) áthaladó levegő térfogatának ($V = F \cdot v$) definícióját, az egységnyi idő alatt rendelkezésre álló szélteljesítmény az alábbi formában írható:

$$P = \frac{1}{2}\rho v^3 F \quad (4.2)$$

A mozgó levegő rendelkezésre álló szélteljesítményének ismeretében felmerül a kérdés, hogy valójában ennek mekkora hányada nyerhető ki ténylegesen. A turbinán áthaladó légtömeg energiája csak részben hasznosítható, melyet a rotor két oldalán létrejövő sebességkülönbségeknek megfelelő energiamennyiség definiál. A kinyerhető szélteljesítmény becsléséhez két feltétel teljesülése szükséges. Egyrészt, a levegő összenyomhatatlan, amely megközelítőleg igaz, ha a szélerergia kisebb, mint 100 m s^{-1} . Másrészt, az átalakító rendszeren nem történik aerodinamikai vagy mechanikai veszteség, azaz ideális átalakító rendszerrel van dolgunk (Molly, 1990; Gasch, 1991; Hau, 1996).

A 4.1. ábrán egy idealizált szélturbina környezetében kialakuló áramlási mező szerkezetét mutatjuk be (Gasch, 1991). Az ábra jelöléseit használva, a kinyerhető szélteljesítmény mennyisége

$$P_{\text{extr}} = P_1 - P_3 = \frac{1}{2}\rho(F_1v_1^3 - F_3v_3^3) \quad (4.3)$$

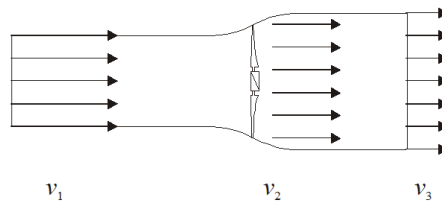
alakban írható, ahol P_1 , P_2 és P_3 rendre a rotor előtt, a rotor vonalában és a rotor mögött rendelkezésre álló szélteljesítményt jelöli, F_1v_1 és F_3v_3 pedig a rotor felületén áthaladó légtömeg térfogatát a rotor előtt és mögött. Az összenyomhatatlan gáz kontinuitási egyenletét

$$F_1v_1 = Fv_2 = F_3v_3 \quad (4.4)$$

felhasználva a kinyerhető szélteljesítmény az alábbiak szerint írható fel:

$$P_{extr} = \frac{1}{2} \rho F_1 v_1 (v_1^2 - v_3^2) \quad (4.5)$$

ahol azonban F_1 értéke ismeretlen.



4.1. ábra: Idealizált szélturbina körüli áramlási mező (Gasch, 1991 nyomán).

A fenti egyenlet átalakítását Newton III. törvénye alapján végezhetjük el: a rotorra ható erő megegyezik azzal az erőhatással, amit a rotor fejt ki a mozgó légtömegre (Molly, 1990). Így a kinyerhető szélteljesítmény:

$$P_{extr} = S v_2 \quad (4.6)$$

ahol:

$$S = m(v_1 - v_3) = \rho F_1 v_1 (v_1 - v_3) \quad (4.7)$$

A (4.5), (4.6) és (4.7) egyenletek felhasználásával:

$$v_2 = \frac{1}{2}(v_1 + v_3) \quad (4.8)$$

mely összefüggést Froude-Rankine elméletként említ a szakirodalom (Gasch, 1991). A kinyerhető szélteljesítmény pedig a (4.4) összefüggés alapján az alábbi formában írható fel:

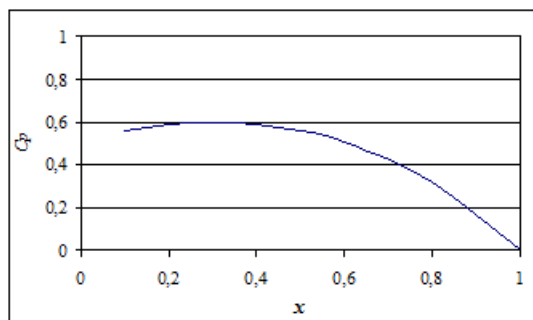
$$P_{extr} = \frac{1}{4} \rho F (v_1 + v_3) (v_1^2 - v_3^2) \quad (4.9)$$

4.1.2. A teljesítménytényező

A kinyerhető szélteljesítmény nagymértékben függ az alkalmazott turbina tulajdonságaitól, az ún. teljesítménytényező (c_p) értékétől (Justus, 1985), melyet a kinyerhető és a rendelkezésre álló szélteljesítmény hányadosaként definiálhatunk:

$$c_p = \frac{P_{extr}}{P} = \frac{1}{2} (1 - x^2) (1 + x) \quad (4.10)$$

ahol $x = v_3/v_1$. A teljesítménytényező maximális értéke $c_{pmax} = 0,5926$ (4.2. ábra), azaz a rendelkezésre álló szélteljesítmény legalább 40%-a mindenképpen elvész. Ezt az értéket Betz-limitként említi a szakirodalom (Justus, 1985; Sørensen, 2000), amelyet egyetlen szélenergia-átalakító rendszer sem képes felülmúlni. Az elvileg elérhető maximális hatásfok akkor alakul ki, ha a rotor előtti szél sebessége a gépen áthaladva harmadára csökken.



4.2. ábra: A teljesítménytényező (c_p) értéke a rotor mögött és előtt kialakuló szélsébségek hányadosának ($x = v_3/v_1$) függvényében (forrás: Hau, 1996).

4.1.3. A nyomatéktényező és a gyorsjárási tényező

A szélturbinák hasznosítható nyomatéka (M) az alábbi formában definiálható:

$$M = \frac{1}{2} c_m \rho R F v^2 \quad (4.11)$$

ahol c_m a nyomatéktényező, R pedig a lapát sugara.

A lapátkerek fontos üzemeltetési jellemzője a gyorsjárási tényező (λ), amely a lapátkerek kerületi sebességének (u_k) és a szélsébségnek a hányadosa:

$$\lambda = u_k / v \quad (4.12)$$

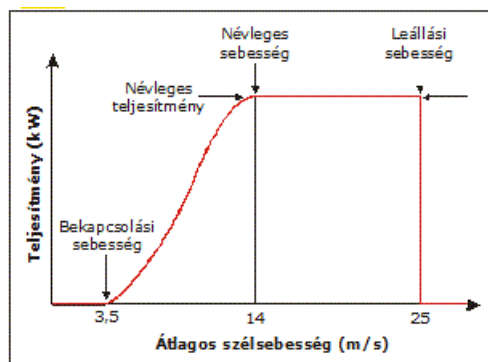
A gyorsjárási tényező a teljesítménytényező és a nyomatéktényező hányadosaként is megadható:

$$\lambda = c_p / c_m \quad (4.13)$$

$\lambda \leq 3,5$ esetén lassú járású, míg $\lambda > 3,5$ esetén gyorsjárássú szélturbináról beszélünk (Hunyár et al., 2001). A lassú járású rendszerek általában kisebb teljesítménytényezővel rendelkeznek, mint a gyorsjárássúak. Mivel indítónyomatékuk azonos, alacsony szélsébségnél jobban terhelhetők.

4.1.4. A teljesítménygörbe

Egy szélérőmű energiatermelésének becsléséhez a teljesítménygörbét használják, mely a rendelkezésre álló szélteljesítmény szélsébségtől és más meteorológiai paraméterektől való függését mutatja (4.3. ábra).



4.3. ábra: Egy átlagos szélerőmű teljesítménygörbéje

Abban az esetben, ha a mozgó légtömeg hatására a szélerőenergia átalakító rendszerben nem jön létre gyorsulás, a kinyerhető szélerőteljesítmény zérus. Mivel a forgással szemben a szélerőenergia természetes ellenállással rendelkezik, a rendszer csak egy jól definiált szélerősebesség (küszöbérték) elérésekor kezd forgó mozgásba. Ez az ún. bekapcsolási vagy indulási sebesség, melynek értéke általában $3\text{--}5\text{ m s}^{-1}$ közé esik. A növekedő szélerősebességgel a hálózatra kapcsolt szélerőművek leadott teljesítménye a legerősebb emelkedést az átlagos szélerősebesség $1,4\text{--}2,0$ -szeresénél mutatja (Hau, 1996). A teljesítmény növekedési üteme ezután lelassul. Maximális értékét (a névleges teljesítményt) az ún. névleges szélerősebesség elérésekor veszi fel a görbe, melynek tipikus értéke lassú járású rendszerek esetén $10\text{--}13\text{ m s}^{-1}$, gyorsjárású rendszerekénél $14\text{--}17\text{ m s}^{-1}$ (Dobesch és Kury, 1999). A névleges teljesítmény elérése után a leadott teljesítményt a vezérlőrendszer határozza meg, hogy megelőzze a generátor túlterhelését, az áttétel esetleges sérülését. A tovább növekvő szélerősebességgel a rendszer megközelítőleg a névleges teljesítményértéken marad. Az ún. leállási sebesség elérésekor a forgómozgás leáll, megakadályozva ezzel a lapátok és a torony mechanikai sérüléseit. A leállási sebesség értéke a legtöbb hálózatra termelő erőmű esetén 25 m s^{-1} . A lassú járású rendszerek gyakran nem rendelkeznek leállási sebességgel, mivel a lapát lassabb kerületi sebessége miatt a rendszer leállítása csak kismértékű csökkenést okoz a sok lapátból álló rotorra ható tolóerőben.

A leállítás természetesen veszteséget okoz az energiatermelésben, azonban a 25 m s^{-1} -nél nagyobb átlagos sebességértékek előfordulása rendkívül ritka. Továbbá, a magasabb szélerősebességeknek is ellenálló tornyok és turbinák építésének többletköltségei jelentősen meghaladják a lehetséges többlettermelés nyereségét.

4.1.5. Az energiatermelés becslése

A tervezett telepítés helyszínén mért széladatok felhasználásával becsülhető a leendő szélerőmű által T idő alatt termelt energia (E_T) mennyisége:

$$E_T = \int_0^T P_{\text{erő}}(t) dt \quad (4.14)$$

melyet a (4.2) és (4.10) egyenletek felhasználásával az alábbi alakban írhatunk:

$$E_T = \rho_{\text{rel}} \cdot T_A \cdot \int_0^{\infty} f(v) P_N(v) dv \quad (4.15)$$

ahol:

$$P_N(v) = \frac{1}{2} \rho F v^3 c_p \quad (4.16)$$

a teljesítménygörbe, ρ_{rel} a relatív sűrűség, T_A pedig a gyakorlati hasznosíthatóságot jellemző konstans, amelynek leggyakrabban használt értéke $0,95$ (Dobesch és Kury, 1999). Az energiatermelés számításához szükség van mind a $P_N(v)$ teljesítménygörbe, mind pedig a széladatok $f(v)$ valószínűségi sűrűségfüggvényének ismeretére, melyet a mért széladatok relatív gyakoriságával becsülhetünk. Szélerőenergetikai vizsgálatokhoz legáltalánosabban elfogadott

a Gamma-függvények családjába tartozó Weibull-eloszlás. A kétparaméteres Weibull-eloszlás $f(v)$ sűrűségfüggvénye az alábbi módon írható:

$$f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right) \quad (4.17)$$

ahol az A és a k paramétert rendre skála-, illetve alakparaméternek nevezik. Az alakparaméter (k) értékétől függően három speciális esetet különböztetünk meg:

1. ha $k = 1$, akkor az exponenciális,
2. ha $k = 2$, akkor a Rayleigh,
3. ha $k = 3,5$, akkor megközelítőleg a normál eloszlást kapjuk.

A k értéke általában 1,5 és 3 közé esik, ezért gyakran Rayleigh-eloszlással közelítik a széladatok gyakorisági eloszlását. Inhomogén terep esetén azonban az alakparaméter értéke 1,3 és 1,8 közé esik (Dobesch és Kury, 1999). Így azonos átlagsebességet tekintve az energiatermelés becsült értéke meghaladja a Rayleigh-eloszlással számított értéket.

A Weibull-eloszlás egyik tulajdonsága, hogy ha v szélesebbesség A és k paraméterű Weibull-eloszlással jellemezhető, akkor v^m szintén Weibull-eloszlású A^m és k/m paraméterekkel (Troen és Petersen, 1989). A skála- és az alakparaméter ismeretében a széladatok $\mu(v)$ átlaga, $\sigma^2(v)$ szórásnégyzete, valamint az átlagos teljesítmény (P) a Γ függvény felhasználásával számítható:

$$\mu = A\Gamma(1+1/k) \quad (4.18)$$

$$\sigma^2 = A^2[\Gamma(1+2/k) - \Gamma^2(1+1/k)] \quad (4.19)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A^3 \Gamma(1+3/k) \quad (4.20)$$

Optimális esetben a legnagyobb hatékonyságot az:

$$v_{opt} = A \left(\frac{k+2}{k}\right)^{1/k} \quad (4.21)$$

sebességnél veszi fel a rendszer, mely általában az átlagos szélesebbesség 1,4–2-szeresével egyenlő (Troen és Petersen, 1989).

4.2. Szélerergia-hasznosítás a nagyvilágban

Az 1970-es évektől kezdődően – a szélerergia-hasznosítás szempontjából kitűnő szélviszonyai miatt – kizárólag a tengerpartokra telepítettek szélérőműveket. A technológia elmúlt néhány évtizedben mutatott robbanásszerű fejlődésével azonban lényegesen csökkent a szélérőművekben előállított villamos energia ára. Ezzel párhuzamosan az igények növekedése és nem utolsósorban a környezet védelmének előtérbe kerülése szükségessé tette a szárazföldek belsejében (onshore), majd a tengereken (offshore) is a szélerergia hasznosítását.

Az elmúlt évtizedben minden eddiginél nagyobb mértékben megnőtt, 2008 és 2012 között pedig megháromszorozódott a hasznosított szélerergia mennyisége a világon (GWEC, 2013). A szélből globálisan kinyert teljesítmény mértéke 2012 végén meghaladta a 282.000 MW-ot, mely becslések szerint átlagosan 75 millió amerikai és 160 millió európai háztartás ellátására elegendő. A 2012-ben üzembe állított szélérőművek összteljesítménye 44.799 MW-ra tehető. Ennek közel egy-egy harmadát kitevő fejlesztés az USA-ban (13.124 MW) és Kínában

(12.960 MW) valósult meg. Kínában már a teljes energiafelhasználás 26,7%-át, az Amerikai Egyesült Államokban 21,2%-át, míg Németországban 11,1%-át a szélenergia hasznosításával állítják elő. A világ 10 legnagyobb szélenergia-hasznosító országa közül 6 még európai, de jelentős fejlesztést hajtott végre 2012-ben India, Brazília, Kanada, sőt Mexikó is. A szélparkok jellemzően 10–50 szélérőműből állnak, bizonyos országokban azonban nagy az egyedül álló szélturbinák aránya.

A technológia folyamatos fejlesztését nagymértékben serkenti az évről-évre kiéleződő költségverseny is, hiszen a megújuló energiaforrások hasznosításának lehetőségeit, elterjedésük mértékét és optimális felhasználási területeiket elsősorban a hagyományos energiahordozókkal szembeni versenyképességük határozza meg. Miközben az energiafajták legtöbbször egyre drágul, a szélenergia fajlagos költségei egyre kisebbek lesznek. A hatékony szélparkok által termelt energia előállításának költsége az elmúlt években olyan szintre csökkent, hogy napjainkban már versenyképes számos hagyományos energiahordozóval, és olcsóbb, mint az atomenergia.

Ezen túlmenően, minden felelős kormány tudatában van annak, hogy az energiapiac átszervezésével és privatizációjával párhuzamosan szükség van a megújuló energiaforrások hosszú távú támogatási rendszerének kidolgozására. A piacbarát politika – mely a szélenergia kiaknázásának fejlődését biztosítja – magában foglalja:

- az egységes energia-átvételi rendszert (mivel a létező energia-átvételi szabályok gyakran háttérbe szorítják a megújuló energiaforrásokat);
- a megújuló energiaforrások teljes energiafelhasználásban képviselt százalékos arányának fokozatos növelését (amely szerepet játszik a fenntartható fejlődés serkentésében);
- az energiatermelést kísérő szennyezőanyagok kibocsátásának büntetését, vagy – ezzel ellentétesen – a megújuló erőforrások hasznosításának gazdasági serkentését (mely elősegíti környezetvédelmi és egészségügyi előnyeik piaci elismertetését).

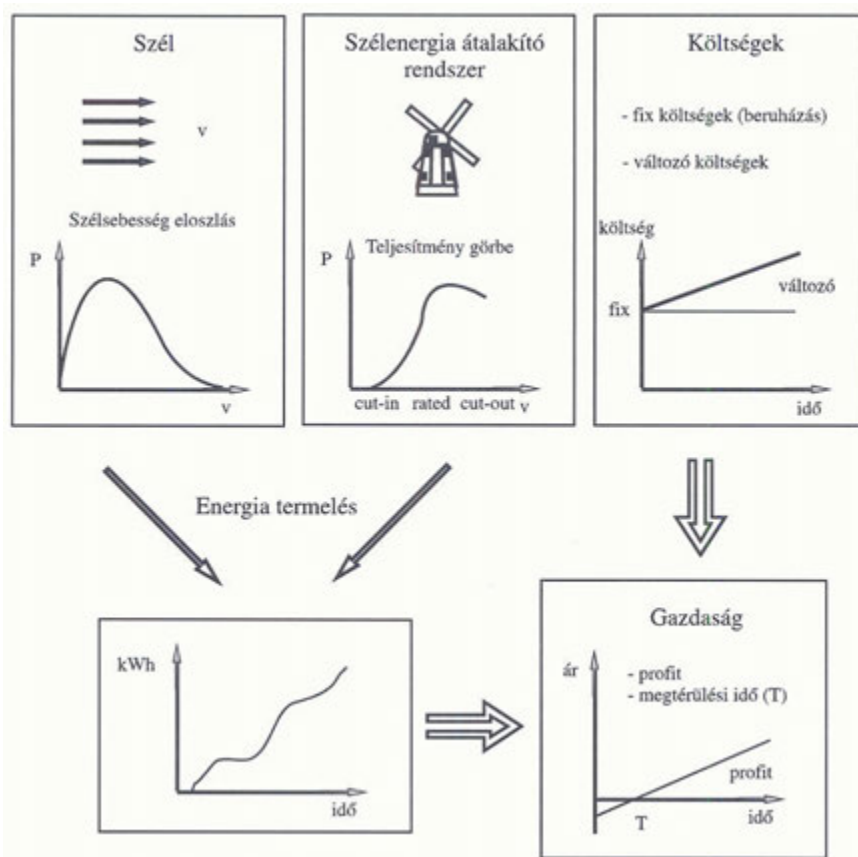
A szél gazdasági hasznosításának témaköre rendkívül összetett, s csak időben dinamikusán változó folyamatként tekinthető. Könnyen belátható, hogy egy jövőbe tekintő, felelős gazdaságpolitika az energia árba nem csak a beruházás, a kitermelés dologi és bérköltségeit számítja, hanem a környezeti károk rehabilitációs költségeit is. Ilyen feltételekkel például a kisebb hatásfokkal kinyerhető szélenergia elektromos árammá való konvertálása is gazdaságossá válhat a hagyományos szén vagy földgáz alapú energiatermeléssel összehasonlítva.

A világ számos országa óriási szélenergia-kinccsel rendelkezik, s a szélérőművek telepítésének infrastrukturális igényei szerények. A mind megbízhatóbb konverziós technológiák fejlődése minden eddigi becslést felülmúl. Mint minden új piaci résztvevőnél, a szélenergia esetében is a politika játssza a legfontosabb szerepet a piaci korlátok leküzdésében. Az egyre gyorsabban fejlődő iparág jelentős hatást gyakorol az európai energiapiacra. Fejlődésének további üteme döntően az elkövetkező néhány évben hozott politikai döntésektől függ.

Összegzésként elmondhatjuk, hogy a szélenergia kitermelés elmélete és gyakorlata több évezredes múltra tekint vissza, s jelenleg egy dinamikusán fejlődő iparág a világon. A szélenergiát átalakító berendezések működési elve, mérete, formája, teljesítménye, azaz lényegében minden paramétere forradalmian megváltozott az elmúlt néhány évtizedben. A 2000–2012 időszakban minden eddiginél nagyobb mértékben megnőtt a szélenergia termelés mennyisége mind Európában, mind az egész világon.

4.3. A szélenergia hasznosításának lehetőségei hazánkban

Az energiaáraknak az elmúlt évtizedekben tapasztalt nagymértékű növekedésével egyre csökken azon térségek száma, ahol nem gazdaságos a szélenergiának mint önerőből megújuló energiaforrásnak a hasznosítása. A szélenergia-hasznosítás legfontosabb komponenseit a 4.4. ábra mutatja be. A helyi szélviszonyok és az alkalmazott energia-átalakító rendszer teljesítményértékei együttesen definiálják a kinyerhető energia mennyiségét. Ezen paraméterek kölcsönhatásban állnak a beruházás költségeivel, illetve az értékesítés piaci feltételeivel. Látható tehát, hogy a szél gazdasági hasznosításának témaköre rendkívül összetett, s csak időben dinamikusán változó, sokparaméteres folyamatként tekinthető. Így még arra a nagyon egyszerű kérdésre sem adható egyértelmű válasz hazánkban, hogy egy adott térségben érdemes-e a szélenergia kiaknázása érdekében befektetéseket végezni.



4.4. ábra: A szél gazdasági hasznosításának legfontosabb komponensei és azok kapcsolatának folyamatábrája (Troen és Petersen, 1989 nyomán)

4.3.1. A hazai szélergia-kutatás legfontosabb mozzanatai

A legelső említendő tudományos vizsgálatokat a szélklimatológia témakörében Hegyfokyn Kabos végezte hazánkban 1894-ben, amikor a meteorológiai obszervatóriumok adatai alapján a szélirányok eloszlását, napi menetét és évszakos változását elemezte a Kárpát-medencében (Hegyfoky, 1894). Kimutatta, hogy az uralkodó szél irányára nagy hatással vannak hazánk domborzati viszonyai. Véleménye szerint az ország legszelesebb tája a Felső-Tisza vidéke. Úttörő munkája vitathatatlan, de megállapításait és magyarázatait az őt követő nemzedékek joggal bírálták.

A meteorológiai szakirodalmat áttanulmányozva nagy valószínűséggel állítható, hogy elsőként Steiner (1923) végzett szélergetikai szempontú vizsgálatokat Túrkeve és Ógyalla többéves szélesebesség megfigyelései alapján (Tar, 1991). Eredményei rámutattak arra, hogy energetikai szempontból nincs lényeges eltérés a két állomás között. Hasonló elemzést készített Hille (1932) is, aki két budapesti, valamint az ógyallai állomáson mért szélesebességek gyakorisági értékeit határozta meg.

Az ország szélergia készleteinek bizonyos mértékű feltárása a 30-as évek elején indult meg a Műszaki Egyetem Géptani Tanszékének kutatásai keretében (Szokol, 1964). Sajnálatos módon a II. világháború véget vetett az itt folyó munkának, s komoly veszteséget okozott a kutatások dokumentálásában is.

1938-ban Réthly és Bacsó írt hazánk szélrendszeréről, a szélirány és a szélesebesség napi menetéről (Réthly és Bacsó, 1938). Érvelésükben – mivel a szél sebessége növekszik a magassággal – a legelénkebb széljárású területeknek hegyvidékeinket, azon belül a legmagasabb Kékestető környékét jelölték meg.

Az ötvenes évek elején íródott, Magyarország éghajlatát taglaló könyv (Bacsó et al., 1953) szélerrel foglalkozó fejezete alpműnek tekinthető ebben a témakörben. Szabóné (1962) 49 állomás 1921–1950-ig terjedő adatsorából számított szélirány gyakorisági értékei jó egyezést mutattak a Bacsó et al. (1953) által közöltekkel. Kakas (1947,

1952) szélklíma vizsgálatai során kitért annak energetikai vonatkozásaira is. Megállapította, hogy éghajlatunk az alacsony tengerszint feletti magasságokban nem bővelkedik szélenergiában.

A témával foglalkozó szakemberek hamar felismerték, hogy a levegő energiatartalmának megítéléséhez nem elegendő az átlagos értékek vizsgálata, hanem ismerni kell a szélesebbég négyzetének és köbének jellegzetességeit is (Aujeszy, 1951). A meteorológusok szélenergia kutatásban betöltendő szerepét először Czelnai (1953) fogalmazta meg: feladatuk a legelőnyösebb helyek kiválasztása és a műszaki szakemberek tájékoztatása a várható szélenergia mennyiségéről. Levezette az elméletileg kinyerhető teljesítményt és az elméleti hatásfokot. Bebizonyította, hogy az elméleti hatásfok akkor éri el a maximumát, ha a rotor mögötti és előtti szélesebbég aránya 1:3. Tanulmányában rámutatott arra, hogy energetikai célú vizsgálatok során a szél vertikális eloszlása is lényeges szerepet játszik. Ő javasolta elsőként az energetikai célú, többszintű szélméréseket.

Ezt a véleményt támogatta, sőt konkrét terveket dolgozott ki ilyen mérőhelyek felállítására Kakas és Mezősi (1956). Elsőként foglalták össze a hazai szélenergia-kutatás legfontosabb teendőit, lépéseit is. Eredményeik felhívták a figyelmet arra, hogy bár kiemelkedő tereppontokon komoly eredményre lehet számítani a szélenergia kitermelése szempontjából, viszonylag kis térségben belül is lényeges különbségek mutakozhatnak.

Szokol (1964) 10 meteorológiai megfigyelő állomás 30 éves, órás széladatai alapján azt a következtetést vonta le, hogy a szélenergia nagyüzemi hasznosítására hazánkban – főként sík vidékeken – nincs lehetőség. Lassú járású, kis teljesítményű gépek talán Szombathely környékén működtethetők, de ezek is rossz hatásfokkal.

Ledács Kiss (1966) azonban ezzel ellentétes véleményen volt. Állításának igazolására meghatározta 17 sík vidéken telepített meteorológiai állomáson, 35 méteres magasságban a napi lehetséges szélenergiát. Energetikai szempontból Siófokot és Pápát tartotta a legjobb széljárású helyeknek.

Bárány et al. (1970) bebizonyította, hogy az Alföldön (az északkeleti rész kivételével) szoros, fordított összefüggés áll fenn a szélesened időszakok gyakorisága és a múltban telepített szélmalomok területi eloszlása között. Ez a tény valószínűsíti annak lehetőségét, hogy ezeken a vidékeken, ebben az alacsony magasságban is létezik hasznosítható szélenergia, mely legalább kisüzemi méretekben kinyerhető.

A szélesebbég magassággal való növekedése a szélenergia-hasznosítás igen fontos tényezője. A különböző szélprofil törvényekben szereplő paraméterek azonban hely-, idő-, sőt sebességfüggők (Tar et al., 2001a). Mivel a szélprofil egyenletek egzakt formája nem alkalmas a magasabb szintek szélesebbégeinek meghatározására, ezért ennek becslésére több empirikus összefüggést dolgoztak ki (Aujeszy, 1949).

Ambrózy és Tárkányi fogalmazta meg 1981-ben a szélenergia felmérésének alapvető irányait: a meglévő éghajlati adatbázis alapján tartamgyakoriságok számítása, toronymérések végzése, valamint e szempontból a határreteg vizsgálata és modellezése (Ambrózy és Tárkányi, 1981).

Wágner és Papp (1984) vizsgálta a szél néhány statisztikai jellemzőjét a szélenergia felhasználása szempontjából. Megállapították, hogy a hasznosítható szélesebbégek gyakoriságának éves menete megegyezik a szélesebbég átlagok éves menetével.

Komplett statisztikus szélklíma elemzést adott Tar (1991) 13 meteorológiai állomás öt éves (1968–1972) adatsorából. Vizsgálta a szélviszonyok és a szélenergia kapcsolatát a makroszintoptikus helyzetekkel, majd későbbi kutatásai során (Tar et al., 2001b) a szél időbeli változását a globális felmelegedéssel összefüggésben.

A statisztikai vizsgálatok mellett ún. spekulatív becslési módszerekkel (Tar et al., 2001a) is kísérletet tettek hazánk hasznosítható szélenergiájának meghatározására. Ide sorolható Vajda (1999) tanulmánya, melyben egy érdekes gondolatmenet során a teljes légkör mozgási energiájából az alsó 100–200 méteres rétegre és a szárazföldre vonatkoztatva 3 TW széltejesítménnyel számol. A gondolatmenetet Tar et al. (2001a) folytatta tovább, s a fentiek alapján azt a következtetést vonta le, hogy a hazánk területére eső hasznosítható széltejesítmény mennyisége 1,8 GW.

Koppány (1989) a budapesti magaslégköri megfigyelések alapján meghatározott átlagos szélesebbég és légköri sűrűség magasság szerinti változásaiból arra következtetett, hogy egy 500 m magas dombtetőn közel 11-szer akkora fajlagos széltejesítmény nyerhető, mint sík területen. Számításai szerint az ország villamos energia fogyasztásának közel három százalékát fedezni lehetne a szélenergia hegyvidéki területeken történő hasznosításával.

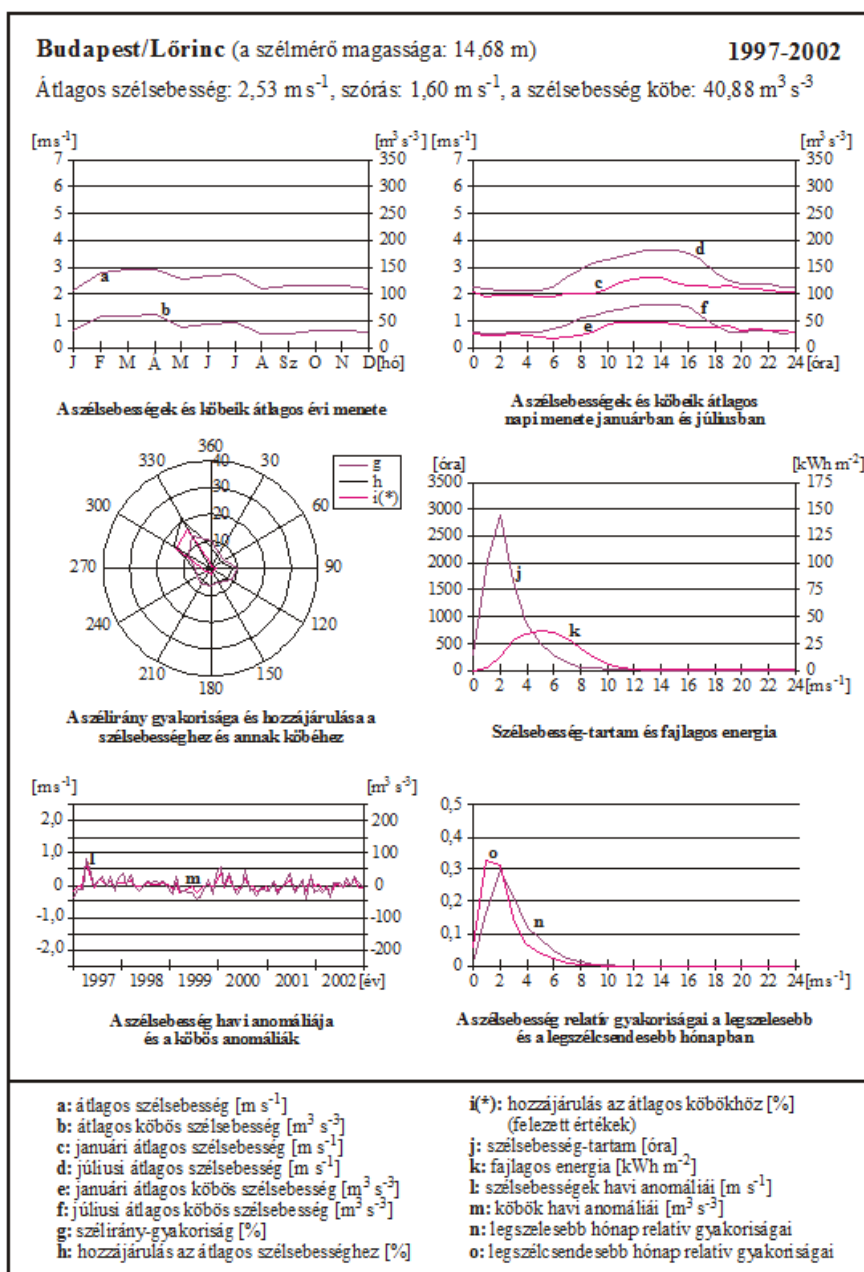
Az MVM és az OVIT támogatásával 1991-ben elindult egy program, mely során az országban 10 távvezeték oszlopra (26 és 50 m magasság között) szélsébségmérőket szereltek fel, melyek 1991 augusztusától 1 éven át működtek. A mérés eredményeit és a szélerergia-felhasználás szempontjából készített gazdasági értékelést egy tanulmányban foglalták össze (MVM, 1992). E mérések és néhány meteorológiai állomás szélsébség adatainak felhasználásával született hazánk első energetikai szélterképe (Blahó és Marshall, 1993), mely azt sugallja, hogy csak a Dunántúl nyugati, északnyugati részén van gazdaságosan hasznosítható szélerergia.

A 90-es évek közepén indultak el azok az új kutatások, melyek energetikai szempontból vizsgálják hazánk szélviszonyait. Az első eredményeket az Európai szélátlasz által megkívt formában részben a Közép-európai országok szélátlasza (Dobesch és Kury, 1997) közli. Lényegesen részletesebbek és informatívabbak az ELTE Meteorológiai Tanszékén végzett kutatások (Radics, 2004; Radics és Bartholy, 2008; Radics et al., 2010; Péliné et al., 2011), valamint a Magyarország légköri eredetű megújuló energiaforrásainak vizsgálatával foglalkozó konzorcium keretein belül (Dobi, 2006) összeállított munkák, melyek a szélmező átfogó statisztikai elemzése mellett már hazánk különböző magasságra modellezett energetikai célokat szolgáló szélterképeit is bemutatják.

A korábbi szélklimatológiai vizsgálatok eredményeit összevetve nem mutatható ki hazánk szélklimájának alapvető megváltozása az elmúlt évszázad során annak ellenére, hogy kisebb térségeket és rövidebb idősorokat vizsgálva esetenként szignifikáns trend is megjelenik. Továbbá, levonható az a legfontosabb következtetés, hogy hazánkban az alapáramlás sebességét és irányát a domborzati viszonyok nagymértékben módosítják. Ezért még a klimatológiaiag optimálisnak mutató helyeken is elengedhetetlen a kifejezetten energetikai szempontú szélérés és vizsgálat egy tervezett szélérőmű telepítése előtt.

4.3.2. Hazánk szélklimája

Az Európai Unió finanszírozásában, a dán Risø Nemzeti Kutatólaboratórium kiadásában a 80-as évek végén megjelent az Európai szélátlasz (Troen és Petersen, 1989). Ez a közel 700 oldalas kiadvány országonkénti összesítésben tartalmazza az uniós országok szélklima adatait, elsősorban a szélerergia-hasznosítás szempontjából lényeges információkra koncentrálv. Magyarország – számos közép- és kelet-európai országgal együtt – kimaradt ebből az atlaszból. Ezt a hiányt pótolták később négy hazai meteorológiai állomás (Budapest, Debrecen, Pécs és Szeged) adatainak feldolgozásával – az Európai szélátlasz által megkívt formában – a Közép-európai országok szélátlaszában (Dobesch és Kury, 1997). Azonban a lokális sajátosságokkal rendelkező hazai szélviszonyok megfelelő pontosságú bemutatásához ennél lényegesen több mérőállomás bevonása szükséges. Az Európai szélátlasszal megegyező módszertant alkalmazva 2004-ben az ELTE Meteorológiai Tanszékén már 29 magyarországi állomásra készült el hazánk szélátlasza (Radics, 2004), mely megjelenési formájában is pontosan követte az európai ajánlásokat (4.5. ábra).



4.5. ábra: Budapest-Pestszentlőrinc állomás klímalapja (forrás: Radics, 2004)

A meteorológiai világszervezet, a WMO (World Meteorological Organisation) által elvárt automatizált mérőrendszerek telepítése Magyarországon az 1990-es évek során megtörtént. Míg az automatizálás előtti időszakban a Fuess rendszerű szélmérők voltak az általánosan elterjedt műszerek, az automatizálás óta az Országos Meteorológiai Szolgálat mérőhálózatában a szélérések a finn Vaisala szenzorokkal történnek rendszeres kalibrálás, ellenőrzés és karbantartás mellett. Az automatizálás nem csupán az eljárások, a műszerek, de sok esetben a mérési magasságok és helyszínek változását is jelentette. Így hazánk szélklímájának hosszabb időszakra történő egységes vizsgálata – az adatsorokban fellelhető inhomogenitások miatt – nem lehetséges. Az alábbiakban a szélátlaszok által tartalmazott legfontosabb információk alapján a szinoptikus meteorológiai állomások 1997–2010 között mért adatai alapján mutatjuk be hazánk szélklímájának legfontosabb jellemzőit.

Éves átlagos szélesség, annak szórása és a szélességek köbének átlaga:

Magyarországon – 10 m-es standard magasságban – az éves átlagos szélesség $1,4\text{--}4,3 \text{ m s}^{-1}$ között változik, míg a szélesség szórása $1,2\text{--}3,0 \text{ m s}^{-1}$ között mozog. Hazánk így az európai szélosztályozás kategóriáit követve a mérsékelt szél tartományba sorolható. Az átlagos szélességi értékekben viszonylag nagy térbeli változásokat

észlelhetünk. A legszeleesebb vidék az északnyugati, míg a legkevésbé szeles területek a délnyugati és az északkeleti országrészben találhatók. Hazánk területét két lokális minimum jellemzi, egy a délnyugati, egy pedig az északi, északnyugati országrészben. Általánosságban elmondható, hogy a Dunántúlon uralkodó átlagos szélsébségek nagyobbak, mint az ország keleti felét jellemző értékek.

A kinyerhető szélenergia azonban a szélsébség harmadik hatványával arányos, ezért becsléséhez köbös mennyiségeket használunk, melyek lényegesen nagyobb változékonyságot mutatnak. A szélsébség köbének átlagai $10\text{--}250\text{ m}^3\text{ s}^{-3}$ közé esnek, melyek áttekintésével már a szélsébség szélsőértékeinek eloszlásáról is képet kaphatunk. Hiszen a ritkán előforduló erős, viharos szelek a köbös átlagot jelentősen megnövelik, míg az átlagos szélsébséghez csak kismértékben járulnak hozzá.

A szélsébség átlagos évi menete:

A szélsébség és annak harmadik hatványa határozott éves menetet mutat tavaszi maximummal, őszi, ritkábban téli minimummal. A szélenergia-hasznosítás szempontjából a legkritikusabb időszakot így hazánkban az átmeneti évszakok jelentik. Az éves menet vázolt jellege jól magyarázható a tavasszal megerősödő ciklontevékenységgel. A legszeleesebb és a legszélsédsendesebb hónap átlagos szélsébségeinek különbsége $0,5\text{--}2\text{ m s}^{-1}$ közé esik. Ez közel $40\text{--}60\%$ ingadozásnak felel meg az éves átlaghoz képest. A köbös átlagok évi menete még sokkal inkább kifejezett, itt sok esetben $100\text{ m}^3\text{ s}^{-3}$ feletti eltérések is előfordulnak az egyes hónapok között.

A szélsébség átlagos napi menetei januárban és júliusban:

A szélsébség és köbös átlagai határozott napi menetet mutatnak. A hőmérséklettel való szoros kapcsolatot erősíti az is, hogy júliusban sokkal nagyobb a nappal és éjjel mért szélsébség értékek közötti különbség, mint januárban. Olyannyira, hogy egyes mérőhelyeken a nappali maximum az éjjeli minimum több mint kétszerese is lehet. Megfigyelhető, hogy a legmelegebb órákban legerősebbek a szelek. Míg a januári maximumok általában $12\text{--}13$ órákor, addig a júliusi maximumok ettől egy-két órával később jelentkeznek. A szélsébség köbének menetei itt is teljesen hasonlóan futnak, s a napi változékonyság mértéke akár $150\text{--}200\text{ m}^3\text{ s}^{-3}$ is lehet.

A szélirányok gyakorisága:

A legváltozatosabb képet a szélirányok eloszlása mutatja. A Dunántúlon és a középső országrészben az északi és északnyugati szelek, míg a keleti országrészben az északi és északkeleti szelek a leggyakoribbak. Természetesen a tájegységet jellemző uralkodó szélirány mellett sokszor a lokális orográfiai hatások is jelentősek. Hazánkban az uralkodó szélirányok relatív gyakorisága alacsony, csupán $11,5\%$ és $25,4\%$ közé esik. A szélsédsendes időszakok aránya viszont néhány térségben kifejezetten magas értéket vesz fel, átlagosan $1,3\%$ és $23,2\%$ között változik.

A szélsébségtartam és a fajlagos energia:

Az egyes szélsébségi értékek átlagos éves időtartamának áttekintéséből megállapítható, hogy a legtöbb állomáson az $1\text{--}3\text{ m s}^{-1}$ sebességű szelek a maximális gyakoriságúak, tartamuk átlagosan $1500\text{--}3000$ óra. Tehát a gyenge szelek a legjellemzőbbek országunkra. A szélsédsendes órák száma nagyon változó, 120 és 2000 óra közé esik. A legtöbb állomáson a 10 m s^{-1} -nél nagyobb szélsébségértékek tartama éves átlagban nagyon kicsi, általában 100 óra alatt marad.

A szélenergia hasznosítása szempontjából kiemelkedő fontosságú, hogy a telepítési helyszín szélklímájának megfelelően legyen megtervezve és kiválasztva a szélgenerátor. Ehhez nyújt óriási segítséget az egyes állomások szélsébség eloszlásaihoz rendelhető mennyiség, az ún. rendelkezésre álló fajlagos energia. Hazánkban a legnagyobb átlagos éves energiát a $4\text{--}9\text{ m s}^{-1}$ -os szelek hordozzák, melyek már elég erősek és még elég gyakoriak ahhoz, hogy számottevő fajlagos energiát képviseljenek (átlagosan $20\text{--}120\text{ kWh m}^{-2}$).

Havi szélsébség-anomáliák:

A szélsébség havi anomáliáit gyenge fluktuációk jellemzik. Az eltérések néhány kivételtől eltekintve 1 m s^{-1} -on belül maradnak, tehát azonos nagyságrendűek az éven belüli és a napi változásokkal. A szélsébség harmadik hatványának havi anomáliái jól követik az átlagos szélsébséget jellemző görbét. Nincs jelentős különbség sem a pozitív, sem a negatív irányú eltérések előfordulásában. Azaz szélklímánk az év során kiegyenlítettnek mondható.

A szélesebbesség relatív gyakoriságai a legszelesebb és legszélcsendesebb hónapban:

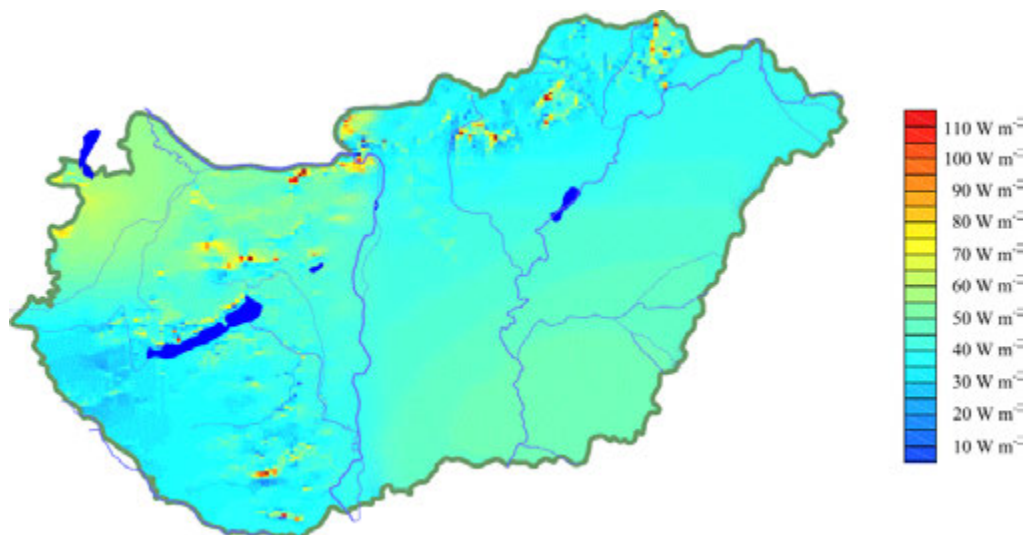
A legszelesebb hónapban az $1\text{--}4\text{ m s}^{-1}$ -os szelek a leggyakoribbak, 15–35%-os relatív gyakorisággal. A legkisebb átlagsebességű hónapban az $1\text{--}2\text{ m s}^{-1}$ -os szelek fordulnak elő a legnagyobb – átlagosan 20–40%-os – gyakorisággal. Ezen értékek kifejezetten magasnak mondhatók, s igazolják, hogy hazánkra általában a gyenge szelek jellemzőek. A legkevésbé szeles hónapban néhány állomáson rendkívül magas a szélcsendes időszakok aránya.

Látható tehát, hogy az ország területén belül jelentős eltérések mutatkoznak mind a szélsőértékekben, mind azok előfordulásának időpontjában. A hazai szélerergia-viszonyok részletes, kisebb léptékű áttekintéséhez szükséges tehát a szélmező energetikai szempontú modellezése.

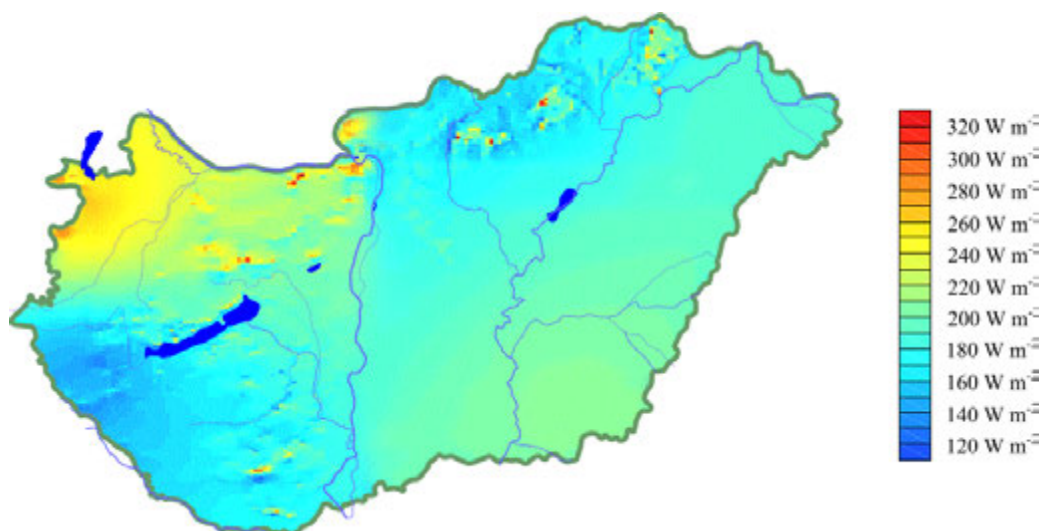
4.3.3. A szélmező modellezése

Egy szélérőmű vagy akár egy szélpark tervezésének előfeltétele a – lokális szélmező pontos ismeretét feltételező – lehetséges éves energiatermelés becslése. Kizárólag ennek felhasználásával igazolhatjuk a szélergiát átalakító rendszerek gazdaságosságát. A szakszerű tervezéshez és telepítéshez a rotortengely magasságában mért szélvektor legalább kétéves adatsora (Dobesch és Kury, 1999) szükséges. A gyakorlatban azonban az ilyen magasságban történő mérések ritkák, mert megvalósításuk technikai akadályokba ütközik és rendkívül drága. A helyszíni mérések mellett vagy helyett szükség van tehát a meteorológiai mérőhálózatok hosszú mérési adatait felhasználó matematikai-fizikai modellek adaptálására. Egy szélérőmű optimális elhelyezésének meghatározásához pedig nélkülözhetetlen a numerikus áramlási modellek alkalmazása.

A domborzat áramlásmódosító hatásának figyelembevételével 10 és 120 m felszín feletti magasságra modellezett rendelkezésre álló szélteljesítmény-mező kompozit térképét a 4.6. és 4.7. ábrán mutatjuk be. Magyarország szélerergia viszonyait bemutató térképek alapján elmondható, hogy hazánkban az átlagos szélesebbesség és a rendelkezésre álló szélteljesítmény nagy térbeli változékonyságot mutat. Különösen a hegyvidéki területeken találunk kis távolságon belül jelentős eltéréseket. 120 m-es magasságban az átlagos szélesebbesség közel másfélszerese, a modellezett rendelkezésre álló szélteljesítmény pedig több mint háromszorosa a 10 m-re számított értéknek. A felszín feletti magasság növekedésével a leginkább és legkevésbé szeles vidékek szélerergia-viszonyai közti különbség egyre nő. Mindezek alapján levonható az a legfontosabb következtetés, hogy a szélerergia hasznosítására leginkább alkalmas térség az északnyugati országrész.



4.6. ábra: A domborzat áramlásmódosító hatásának figyelembe vételével 10 m felszín feletti magasságra modellezett rendelkezésre álló szélteljesítmény-mező (forrás: Radics, 2004)



4.7. ábra: A domborzat áramlásmódosító hatásának figyelembe vételével 120 m felszín feletti magasságra modellezett rendelkezésre álló szélteljesítmény-mező (forrás: Radics, 2004)

A nagyteljesítményű, elektromos áramot termelő szélérőművek helyének kiválasztása nem csak klimatológiai, de komoly műszaki, gazdasági és környezetvédelmi megfontolásokat is igényel. A beépítettség és az érdesség megváltozása, a szélklíma esetleges változása és a pontos helyszín egyedi domborzati viszonyai miatt azonban minden egyes konkrét esetben el kell végezni a helyszíni szélmérést, majd a részletes domborzati és érdességi paraméterek felhasználásával a modellezést.

4.3.4. Problémák és kilátások

Hazánkban – meteorológiai szempontból – a legnagyobb problémát általában az jelenti, hogy a tervezett erőmű helyszínéről nem áll rendelkezésre megfelelő hosszúságú, elegendően gyakori időközönként észlelt széladat. Magyarországon (mint ahogy szerte a világon) a meteorológiai állomásokon elhelyezett szélmérő műszerek konvencionális magassága 10 m. A szélérőművek átlagos magassága azonban ennél lényegesen nagyobb (100–150 m). A hazai mérési idősorok felhasználásával a működési szint szélerenergia készletét vertikális extrapoláció segítségével becsülhetjük, de sokkal pontosabb értékeket kapunk, ha az adott magasságban elhelyezett mérőműszerek adataival dolgozunk.

Az energiatermelés szempontjából fontos tényező a szélesebbesség éves átlagának eltérése a sokéves átlagértéktől. Már tíz százalékos eltérés is körülbelül harminc százalékos bizonytalanságot okoz az éves energiatermelés becslésében. A becslés hibája természetesen időfüggő mennyiség, a vizsgálatokban felhasznált mérési idősor hosszának függvénye (Aspliden et al., 1986). A szélmező évszakos változásai miatt a három hónapnál rövidebb szélmérési adatainak használata több mint 80%-os, az egy évnél rövidebb adatsor több mint 30%-os bizonytalanságot jelent, s egy öt éves idősor is majdnem 20%-os pontatlanságot okoz a kinyerhető energia becslésében. Látható tehát, hogy a helyszínen végzett mérések időtartamának hossza az energiatermelés becslésének egyik kulcskérdése.

A nagyteljesítményű, villamos energiát termelő szélérőművek felállítása gyakran a helyi közösségek erős ellenállásába ütközik, amelynek leggyakrabban a bizonytalanság és a tájékoztatatlanság a fő oka. A lakosságot a telepítést megelőzően leginkább az erőművek környezeti hatásai – a zajkibocsátás, a telekommunikációs összeköttetések zavarása, a biztonság, az esztétikai hatás, az állatok élőhelyére gyakorolt hatás stb. – aggasztják. Ez onnan ered, hogy míg a szélerenergia hasznosításának – az alábbiakban részletezett – környezeti előnyei globális vagy regionális szinten, addig hátrányai lokálisan jelentkeznek.

A szélturbinák üzemeltetése igen olcsó. Kezelő személyzetet nem igényelnek, felügyeletük távfigyelési rendszerrel megoldható. Éves karbantartási költségük igen alacsony, élettartamuk legalább 25 év. A berendezések önfogyasztása a kimenő teljesítmény kb. 3%-a. A megtérülési mutatókat azonban a magas beruházási költségek jelentősen rontják.

Egy működő szélérőműnek nincs közvetlen szennyezőanyag kibocsátása. Az erőmű felépítése, szállítása és összeszerelése során okozott közvetett kibocsátás mértéke elhanyagolható. Egy átlagos, szárazföldi területen

felállított szélturbinának a betonalapozáson, földmunkákon, valamint a felépítéshez szükséges munkálatokon kívül nincs eróziós hatása sem. A működésüket befejező szélerőművek lebontása után nem marad hátra környezetszennyező anyag, s jelentős tereprendezésre sincs szükség. Az alkatrészek többsége újrahasznosítható, a létesítmény megszüntetését követően az eredeti táj teljes mértékig visszaállítható.

A szárazföldi telepítésű szélerőmű parkok által használt területen kettős földterület használat lehetséges. A szélparkok által elfoglalt terület szinte teljes egészében továbbra is mezőgazdasági művelés alatt állhat vagy megmaradhat természetes állapotában. Napjainkban azonban a szélparkok egy jelentős részét a tengerekre telepítik.

A lokálisan mérhető hátrányok egyike a működő szélerőművek zajszennyezése. Az erőművek akusztikus kibocsátásai a mechanikai és aerodinamikai hatások együtteseként jönnek létre a szélesebbesség függvényében. A turbinák által okozott zajszennyezés az egyik legfontosabb kritérium, amely miatt nem szabad a szélerőműveket a lakóövezetek közelébe telepíteni. Jelenleg is folynak azok a kutatások, amelyek az erőművek által kibocsátott infrahangok állatvilágra gyakorolt hatását vizsgálják. Az elérhető legmagasabb hangkibocsátási szint azonban erősen függ a helyi szabályozásoktól.

A táj jellegétől függetlenül a modern szélerőművek megjelenése mind vizuális, mind esztétikai hatást kifejt a környező tájra. Míg az esztétikai megítélés szubjektív, a vizuális hatások egy része objektíven mérhető. Ilyen például a rotor lapátok által okozott mozgó árnyékok hatása. Megfelelő tervezéssel és a lapátok reflexiós hatást csökkentő burkolásával ez a jelenség könnyen elkerülhető.

Bizonyos területeken a szélturbinák visszaverhetik, szórhatják az elektromágneses hullámokat, azaz zavart okozhatnak a telekommunikációs összeköttetésekben. Az előzetes felmérések alapján az előre kijelölt kulcsfontosságú területek elkerülésével ez a probléma is könnyen orvosolható.

Elképzeltető, hogy a nagyfeszültségű elektromos áramot termelő szélerőművek, szélparkok mellett – a villamos energia rendszer szabályozhatósága, befogadó képességének korlátai miatt – a szélerenergia kisüzemi (kisfeszültségű elektromos áramot termelő, valamint mechanikai munkát végző) felhasználása talán még nagyobb szerephez juthat a közeljövőben Magyarországon.

Összefoglalásként, a szélerenergia hazai hasznosítási lehetőségeivel kapcsolatban a következő kijelentések fogalmazhatók meg:

- A szélerenergia hasznosításának fizikai alapjai egyszerűek. Az áramlás teljesítménysűrűsége (egységnyi felületen és egységnyi idő alatt áthaladó légtömeg mozgási energiája) a szélesebbesség harmadik hatványával arányos, így a meteorológiai szélmérések felhasználásával könnyen becsülhető. Az összes mozgási energia nyilvánvalóan nem nyerhető ki (ehhez olyan turbina kellene, amely mögött leáll a levegő). Az elvi határ az ún. Betz limit (59,3%), de további veszteségek is fellépnek. A legkorszerűbb erőművek hatásfoka lassan megközelíti az 50%-ot.
- A napjainkban telepített szélerőművek modern technológiájú, megbízható eszközök, melyek elterjedtsége világszerte nő.
- A szélerenergia kiaknázásának legnagyobb problémája az erőforrás rendelkezésre állásának bizonytalansága. Akár kifejezetten rövid időtartam alatt is jelentős eltérések, ingadozások mutatkozhatnak a pillanatnyi szélesebbességben, melyek rendkívül nehezen jelezhetők előre. Mivel napjainkban a szélerőművekkel előállított elektromos energiát szinte teljes egészében a meglévő elektromos hálózatokba integrálják, szükség van a (nem szél alapú, gyorsan kapcsolható) operatív tartalék kapacitások megfelelő arányú növelésére és az aktív piaci elosztás megszervezésére. A szélerenergia hálózati integrálásának alapkérdése tehát az előrejelezhetőség, melynek legjobb eszköze a numerikus időjárási előrejelző programok adaptálása.
- A főösleges szélerenergia gazdaságos felhasználásának technológiái (akkumulátorok töltése, lendkerekes tárolás, víztározók szivattyús feltöltése stb.) még csupán kísérleti stádiumban vannak, ezért az ilyen céllal létrehozott beruházások egyelőre nagyon magas kockázatot viselnek.
- Az Európai Unióban megfogalmazott elvárásoknak megfelelően már a hazai energiapolitika is támogatja a megújuló energiaforrások hasznosítását. A kitűzött energiapolitikai cél, hogy a megújulók (köztük a szélerenergia) bruttó végső energiafogyasztásban képviselt részaránya 2020-ra elérje a 14,65%-ot.

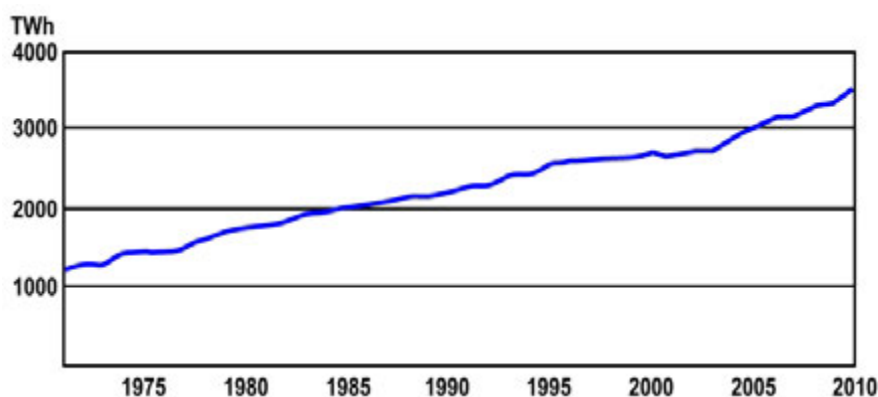
- Magyarország a rendelkezésre álló szélenergia tekintetében kifejezetten gyenge adottságú. Ez a tény a szélerőmű telepítések megtérülési idejét a fejlett piacokon szokásos 8–10 évhez képest jelentősen megnövelheti.
- A villamos energia termelését célzó szélenergia-hasznosítás 2000-ben még nem volt jelen hazánkban. Az utóbbi években végzett kistérségű vizsgálatok és beruházások azonban igazolták, hogy hazánk megfelelően kiválasztott térségeiben is lehetséges nagyteljesítményű, gazdaságosan üzemelő, villamos energiát termelő szélerőműveket telepíteni.
- Magyarországnak van kinyerhető szélenergia-kincse, amit elődeink a kor technológiai szintjének megfelelően ki is használtak. A szélenergiának – mint megújuló energiaforrásnak – a napenergia, a vízenergia és a biomasszából nyert energia hasznosítása mellett Magyarországon is fontos szerepe lehet a jövőben. Jelenlegi ismereteink birtokában azonban elmondható, hogy a szélenergia hazánkban nem válhat a hagyományos energiaforrásokat nagymértékben kiváltó megújuló energiaforrássá, de jelentősen hozzájárulhat az antropogén környezetszennyezés megfékezéséhez. Hiszen csökkentheti a fosszilis energiahordozók felhasználási ütemét és növelheti a lokális energiaellátás biztonságát úgy, hogy közben a környezetvédelem érdekeit is szolgálja.

5. fejezet - Vízenergia

A vízenergia hasznosításon belül elkülöníthetjük a kontinentális édesvizek és az óceáni területek hatalmas víztömegeinek felhasználását.

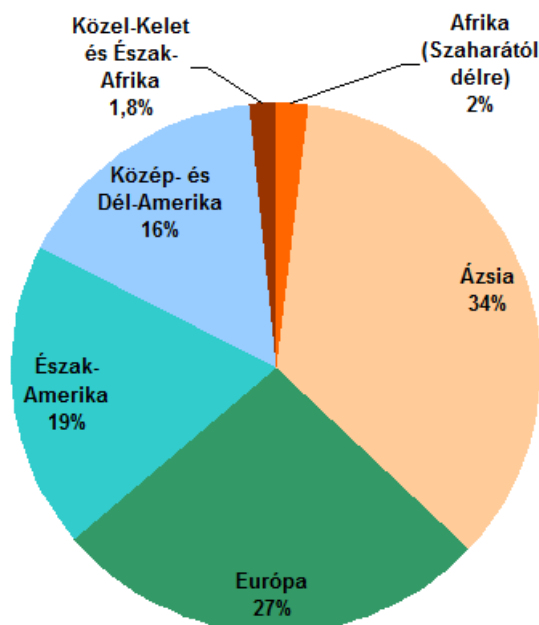
5.1. Energiatermelés a szárazföldi vizekből

A víz függőleges és vízszintes irányú mozgásának kinetikus energiájából is kinyerhetünk energiatermelés céljára felhasználható hányadot. A vízenergia felhasználása több mint öt évezreddel ezelőtt indult: öntözésre, majd később a víz mozgása által hajtott vízkerekeket, vízimalmokat használták a gabona liszté őrlésére. A vízenergiából történő elektromos áram nyeréséhez szükséges fejlesztések a XVIII. században indultak, majd a generátorok használatának elterjedése a XIX. század végére tehető. Például az Amerikai Egyesült Államok és Kanada határán elhelyezkedő Niagara-vízesés energiájából a közeli település közvilágítását táplálták 1881-től. Az 1880-as évek végére az Észak-Amerikában működő vízenergián alapuló elektromos áramtermelő erőművek száma már meghaladta a 200-at. A XX. század során az Amerikai Egyesült Államok elektromos áramtermelésének egyre nagyobb hányadát biztosították vízerőművek: 1920-ra már a teljes nemzeti termelés 25%-át, 1940-ben 40%-át. A fosszilis energiahordozók és a nukleáris energia elterjedése később visszaszorította a vízerőművek részesedés-növekedését, ennek ellenére az összkapacitás folyamatosan bővült. 1970 óta globálisan több mint háromszorosára nőtt a vízenergia felhasználásával történő elektromos áramtermelés, az utóbbi két évtizedben pedig mintegy 50%-os növekedést figyelhetünk meg (5.1. ábra). A legnagyobb növekedés egyértelműen Kínában jelentkezett.



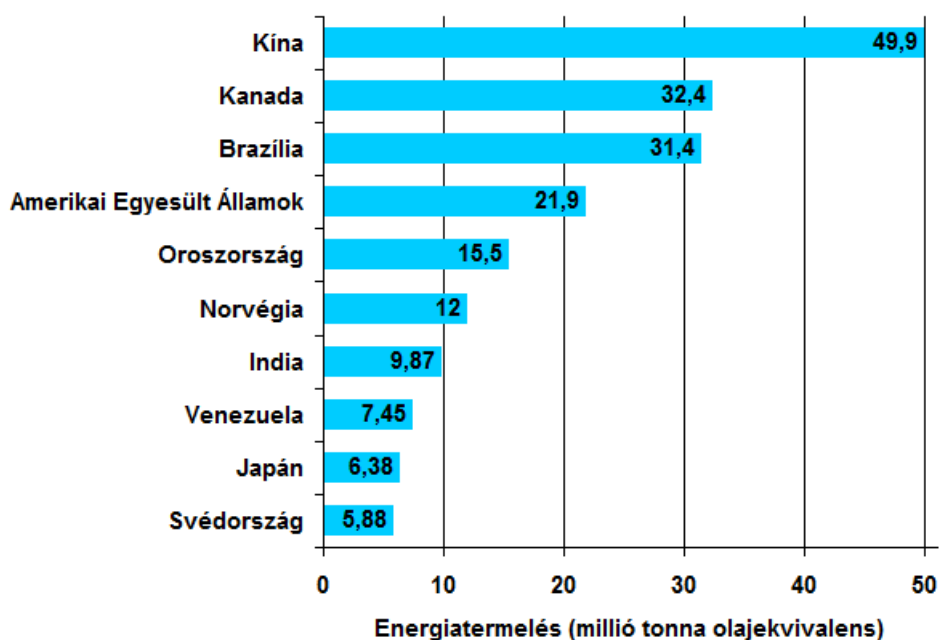
5.1. ábra: A vízenergia felhasználásával történő elektromos áramtermelés növekedése az 1971–2010 időszakban (IEA, 2012c adatai alapján)

Jelenleg a világ több mint 160 országában termelnek elektromos áramot vízenergia felhasználásával, mely a teljes áramtermelés 16%-át adja. A világszerte megtalálható mintegy 11.000 vízerőmű összkapacitása 874 GW (WEC, 2010a). Ebből a legnagyobb hányad – mintegy 35% – Ázsiában található, és jelentős az európai részesedés is 27%-kal (5.2. ábra). Több mint 35 országban a nemzeti szintű elektromos áramtermelés több mint felét vízerőművekkel állítják elő. Nagyon magas – 90%-ot meghaladó – a vízenergia áramtermelésben betöltött szerepe például Paraguayban, Norvégiában, Albániában, Tádzsikisztánban, Nepálban, Kongóban, Mozambikban és Zambiában (IEA, 2012a).



5.2. ábra: A vízenergia felhasználásával termelt elektromos áram földrészenkénti megoszlása (WEC, 2010a adatai alapján)

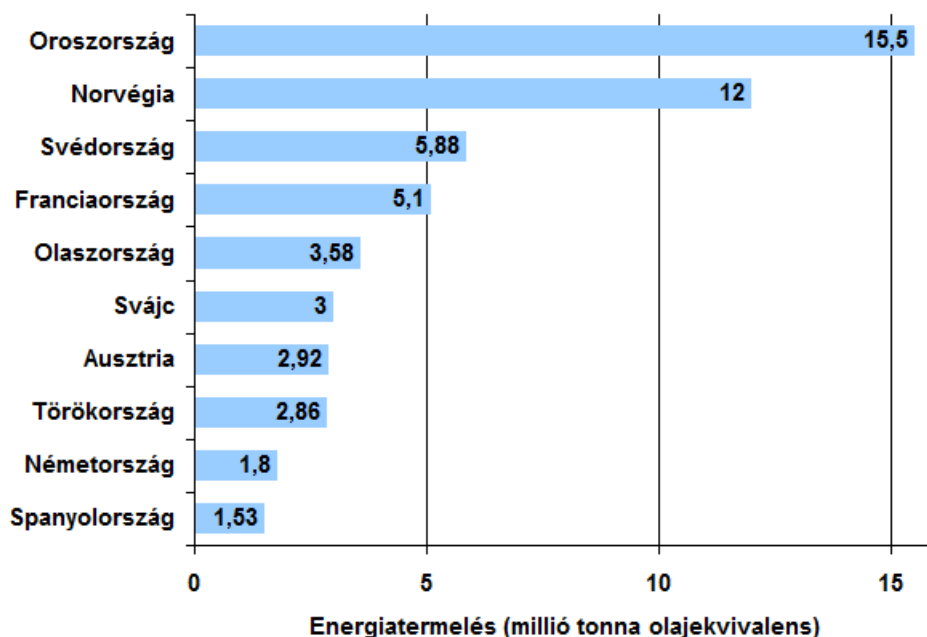
Becslések szerint a technikailag potenciálisan felhasználható vízenergia meghaladja a 16.400 TWh-t évente, mely nagyon egyenlőtlenül oszlik el a Föld különböző régióiban. Ennek a lehetséges energiamennyiségnek a fele öt országban – Kínában, az Amerikai Egyesült Államokban, Oroszországban, Braziliában és Kanadában – áll rendelkezésre. Az európai országokban a vízenergia potenciál relatíve kisebb, mint a Föld más térségeiben. Ennek ellenére a legnagyobb arányú a vízenergia potenciál kihasználása Európában (29%), különösen magas ez az arány Svájcban (88%), Norvégiában (70%), Svédországban (69%) és Franciaországban (68%). Európán kívül 60%-ot meghaladó kihasználási arány csak Mexikóban (80%) és Japánban (61%) jellemző (IEA, 2010a). A becslések szerint a rendelkezésre álló lehetőségeknek globálisan csak mintegy ötödét használjuk ki.



5.3. ábra: A világ első 10 vízenergia felhasználásával elektromos áramot termelő országa (WEC, 2010a adatai alapján) – animáció

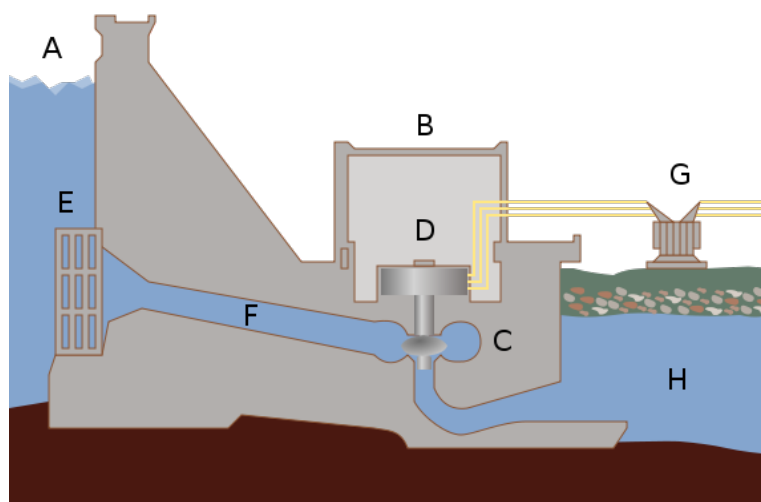
A vízenergia felhasználásával a legtöbb áramot termelő ország Kína, ezt követi Kanada, Brazília és az Amerikai Egyesült Államok (5.3. ábra), melyek mindegyikében a vízenergia-termelés több mint 20 millió tonna olajekvivalensnek felel meg. Európában a legnagyobb vízenergia-felhasználó országok: Oroszország, Norvégia, Svédország és Franciaország (5.4. ábra). Ez a négy ország összességében sem éri el a kínai vízenergia-termelés mértékét, holott együttesen csaknem 40 millió tonna olajekvivalensnek megfelelő vízenergia-termelést végez.

Magyarország adottságai nem túl kedvezőek a vízenergia hasznosítása szempontjából, a telepített összkapacitás alig haladja meg az 55 MW-ot. A hazánkban létesített 23 vízerőmű közül csupán kettőnek a beépített kapacitása haladja meg az 5 MW-t: az 1975 óta üzemelő Kiskörei Vízerőmű 28 MW-os, az 1956 óta üzemelő Tiszalöki Vízerőmű 12,9 MW-os beépített kapacitással rendelkezik (MEH, 2012).



5.4. ábra: Európa 10 legtöbb elektromos áramot termelő országa a vízenergia felhasználásával (WEC, 2010a adatai alapján) – animáció

A vízerőműveknek (5.5. ábra) három alapvető típusát különböztethetjük meg.



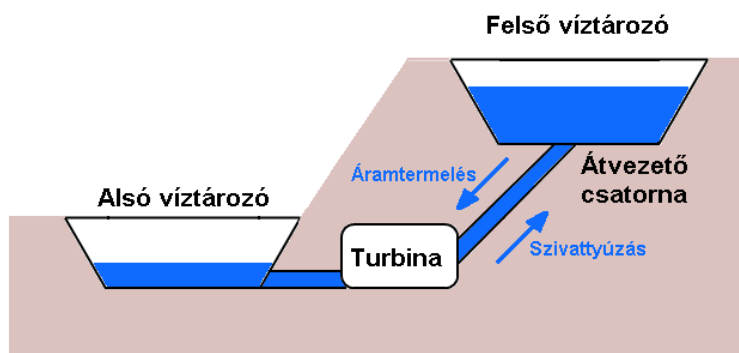
5.5. ábra: Vízerőmű szerkezeti felépítése. A - víztározó, B - gépház, C - turbina, D - generátor, E - vízbevezetés, F - frissvíz csatorna, G - villamos távvezeték, H - folyó (Forrás: Tomia, wikipedia)

- (1) A folyóvízre telepített vízerőművek a víz természetes lefolyását felhasználva generálnak elektromos áramot.
- (2) A víztározókhoz kapcsolódó erőművek az összegyűjtött nagy mennyiségű víz leeresztésével állítják elő az áramot. Ebben az esetben a turbina és a generátor a megépített duzzasztógát alján helyezkedik el. Példaként az 5.6. ábrán az amerikai Hoover-gát fotóját láthatjuk, melyet a Colorado folyó felduzzasztásával építettek 1931 és 1936 között.



5.6. ábra: Az amerikai Hoover-gát. Beépített kapacitása: 2080 MW. A legtöbb termelt energia 1984-ben 10,348 TWh volt, 1940 óta a legkevesebb évi energiatermelés 2,648 TWh volt 1956-ban. Az átlagos energiatermelés 4,2 TWh/év. (Fotó: Florian.Arnd)

- (3) A szivattyús energiátározó vízerőművek lényege, hogy az alacsonyabban fekvő víztározóba már leeresztett víztömeget egy magasabban fekvő víztározóba szivattyúzzák fel, majd onnan ismét leeresztik. A leeresztéskor termelt energiát a hálózatba betáplálják, s amikor a csúcsidőn kívül csökken a felhasználói energiaigény, akkor a feleslegessé vált energiával oldják meg a víz visszavezetését a magasabban fekvő tározóba (5.7. ábra).



5.7. ábra: Két eltérő tengerszint feletti magasságon fekvő víztározó alkalmazásával kialakított szivattyús vízerőmű sematikus felépítése.

A fenti osztályozás is mutatja, hogy a vízenergia nagyon rugalmasan felhasználható az eltérő feltételeknek megfelelően. Folyamatos, állandó mértékű áramtermelésre, illetve csúcsidőszakban jelentkező nagy áramigény kielégítésére egyaránt lehetőség van. A vízerőműveket a hasznosítható esés alapján, illetve a beépített teljesítőképességük alapján is csoportosíthatjuk.

A víz hasznosítható esése alapján történő osztályozás szerint megkülönböztethetünk kis-, közepes- és nagy esésű vízerőműveket. A kisesésű vízerőművek esetén 15 m-nél kisebb, a nagy esésű vízerőművek esetén viszont 50 m-nél nagyobb a hasznosítható esés. Az 5.8. ábrán egy 100 m hasznosítható esést is meghaladó, nagy esésű amerikai vízerőmű látható, melyet a Hoover-gáthoz hasonlóan szintén a Colorado-folyó felduzzasztásával működtetnek Arizona és Utah állam határán. A gáthoz kapcsolódó víztározó az attól északkeletre elhelyezkedő Powell-tó, mely az Amerikai Egyesült Államok második legnagyobb mesterséges tava.



5.8. ábra: Az 1964-ben üzembe helyezett Glen-kanyon gát, melynek magassága 220 m. A hasznosítható esése meghaladja a 150 m-t. Beépített kapacitása: 1296 MW. Átlagosan évente csak a teljes kapacitás negyedét használják ki. A legtöbb termelt energia 1984-ben 10,4 TWh volt, a legkevesebb évi energiatermelés mintegy 2 TWh volt 2002-ben. Az átlagos energiatermelés 3,454 TWh/év.

A víz esése (h) alapján kinyerhető P teljesítmény az alábbi képlet alapján számítható:

$$P = \rho g Q h \quad (5.1)$$

ahol ρ a víz sűrűsége (értéke $1,023 \text{ kg/m}^3$), g a nehézségi gyorsulás (értéke $9,81 \text{ m/s}^2$), Q az időegység alatt átáramló vízmennyiség (vízhozam).

A beépített kapacitás alapú osztályozást az 5.1. táblázat részletezi. A kis vízerőműveken belül ún. mikro- (vagy törpe-) vízerőműveket is elkülöníthetünk, melyek 100 kW-nál is kisebb teljesítményűek.

Kategória	Beépített teljesítőképesség	Típus	Energiafelhasználás módja	Beruházási költségek (millió USD/MW)
kicsi	< 10 MW	folyóvízi	alapterhelés	2–4
közepes	10–100 MW	folyóvízi	alapterhelés	2–3
közepes	100–300 MW	víztározó és gát	alap- és csúcsterhelés	2–3
nagy	> 300 MW	víztározó és gát	alap- és csúcsterhelés	< 2

5.1. táblázat. Vízerőművek osztályozási rendszere (IEA, 2010 alapján)

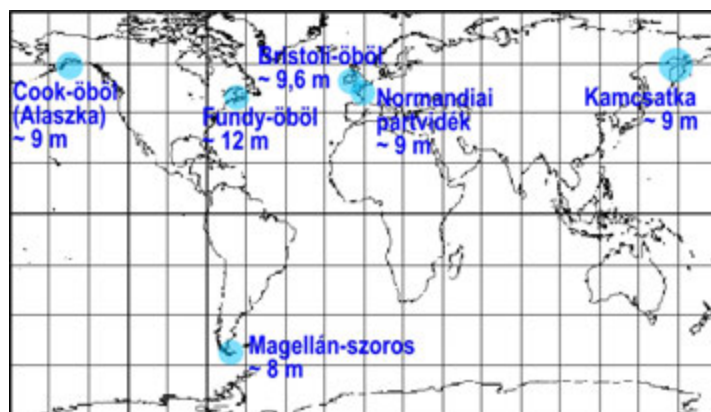
A vízerőművek építése ugyan minden esetben nagy költségű beruházást jelent, de a hosszú élettartam miatt ez megtérül. Az 50–100 éve épített vízerőművek nagy többsége mind a mai napig működik, és megbízható, hatékony áramtermelésre alkalmas. Nagy előnye a vízerőművek alkalmazásának a relatíve alacsony fenntartási költség. Előnyös továbbá az is, hogy segíthetik az árvízi szabályozást, a mezőgazdasági öntözést, s az ivóvíz-ellátás biztonságát.

A globális klímaváltozás hatására a potenciálisan felhasználható vízenergia régióként változhat a jövőben, de globális skálán ezek kiegyenlítik egymást, s a teljes Földre vonatkozóan lényegében nem változnak a lehetőségeink. Előrejelzések szerint a XXI. század közepéig a jelenlegi globális vízenergia felhasználás meg fog duplázódni, mely háttérben az ázsiai potenciális fejlesztések állnak. A fejlődő országokban mind nagy, mind kisebb vízerőművek építését tervezik. Ezek jelentős mértékben hozzájárulhatnak az energiaigényes, modern szolgáltatások bővüléséhez, a szegénység csökkentéséhez, a társadalmi és gazdasági fejlődéshez. A fejlett ipari országokban a meglévő vízerőművek fejlesztésével mintegy 5–20%-os kapacitásbővülés érhető el.

5.2. Energiatermelés az óceánok vizéből

Az óceáni víztömegek felhasználásával kinyerhetünk energiát az árapály jelenségből, a hullámból, illetve a mélységgel történő természetes hőmérsékletváltozásból.

Az árapály jelenség az egész Földre kiterjedően a Hold tömegvonzásának hatására jelentkezik. A partmenti területeken a jelentős vízszintváltozással (5.9. ábra) járó árapály rendszeres időközönként kiszámítható áramlásokat hoz létre. A dagály közeledtével az áramlás a part irányába hajtja a nagytömegű óceáni víztömegeket, míg az apály időszakában éppen ellenkezőleg, a nyílt vizek felé történik az áramlás. Különböző méretű turbinák elhelyezésével az átfolyó vízmennyiség mozgási energiája elektromos energiává alakítható át. Alkalmaznak a tengerfenéken elhelyezett kisebb méretű turbinákat, valamint hajókról lebocsátható vagy függőleges tornyokba épített nagyobb turbinákat is. Az így kinyerhető globális kapacitás mintegy 90 GW.



5.9. ábra: A legjelentősebb vízszintváltozással járó árapály jelenségek földrajzi eloszlása

A vízszint függőleges irányú változása (h) alapján kinyerhető P teljesítmény az alábbi képlet alapján számítható:

$$P = \frac{1}{2} \rho g h^2 \quad (5.2)$$

ahol ρ a víz sűrűsége (értéke $1,023 \text{ kg/m}^3$), g a nehézségi gyorsulás (értéke $9,81 \text{ m/s}^2$).

A hullámozás a vízfelszín fölötti légáramlás, a szél hatására alakul ki. A hullámozó víz mozgásából energiát nyerhetünk ki, melyet műholdas megfigyelések segítségével akár egy-két napra lehetséges előrejelezni. Becslések szerint az óceáni hullámozás energiájának felhasználásával kinyerhető globális energiakapacitás $1000\text{--}9000 \text{ GW}$ értékű. Nagy előnye a hullámozásból származó megújuló energiának, hogy a környezetre nézve csak nagyon alacsony terhelést jelentenek.

Az óceán hőenergiájának felhasználása azon alapszik, hogy a meleg trópusi felszíni vizek és a hűvösebb mélységi vizek között állandóan fennálló hőmérsékletkülönbség van. Ez a technológia ugyan még fejlesztés alatt áll (WEC, 2010b), de nagyon ígéretes energiaforrás, mert csökkentheti az óceán felszíni rétegének hő, illetve szén-dioxid kibocsátását, mely a globális melegedés hatására továbbra is tartósan növekedni fog. Becslések szerint a kinyerhető globális kapacitás eléri az 1000 GW -t.

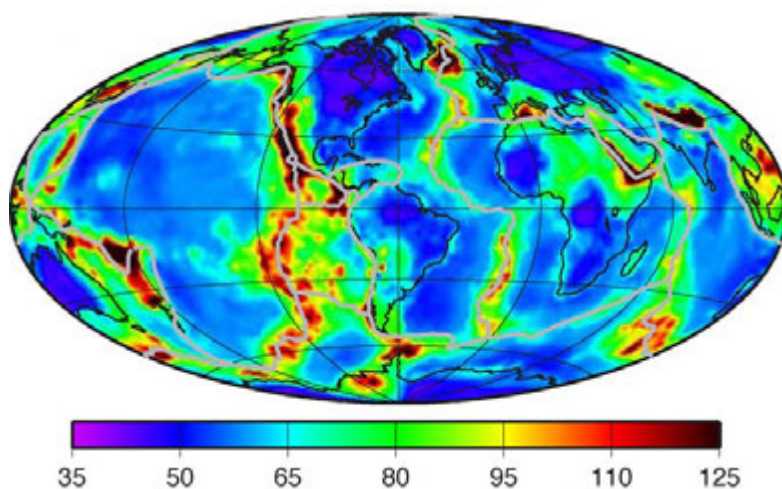
6. fejezet - A geotermikus energia

Az 54/2008 (III.20) Kormányrendelet definíciója szerint geotermikus energiának nevezzük „a földkéreg belső energiáját, amely energetikai céllal hasznosítható. A geotermikus energia a legalább +30 °C hőmérsékletű folyékony vagy gáz halmazállapotú anyagok (azaz a geotermikus energiahordozók) közvetítésével, ezek közvetlen földkéregből való kitermelésével vagy recirkuláltatásával nyert energia.”

A XVI.–XVII. századra ismertté vált, hogy a felszíntől a Föld belseje felé haladva a hőmérséklet nő. Erre bizonyítékul szolgált többek között a bányajaratokban tapasztalható hőmérsékletemelkedés, a feltörő hévizek, vagy a vulkáni magma magas hőmérséklete. Eredetének magyarázatára azonban a XX. századig, a radioaktív bomlás megértéséig várni kellett. A földhő ugyanis döntő többségében a hosszú felezési idejű radioaktív izotópok bomlásából származik, s csak kis mértékben járulnak hozzá egyéb folyamatok, mint például az asztenoszféra (a Föld felső köpenyének képlékeny része) konvekciós áramlásainak súrlódási hője, vagy a bolygó keletkezésekor csapdába esett hő kiáramlása (Mádlné Szőnyi, 2006).

A geotermikus energia földi eloszlása nem egyenletes. A geotermikus gradiens fejezi ki a hőmérséklet mélységgel történő növekedésének nagyságát, értéke 10 °C/km és 60 °C/km között változik (Mádlné Szőnyi, 2008). A Föld belseje felé haladva a hőmérséklet átlagosan 25–30 °C-kal nő km-enként, ennél magasabb a lemezszegélyeknél – szubdukciós zónáknál, középsőceáni hátságoknál –, és azokon a területeken, ahol a földkéreg az átlagosnál vékonyabb. A mélyebb medencékből felszálló felszín alatti vizek is előidézhetnek pozitív geotermikus anomáliát. Lokális hőanomáliák kialakulhatnak gránittestekben dúsuló radioaktív elemek bomlása miatt, melyet a hőszigetelő kőzetekkel való fedettség is elősegít (Mádlné Szőnyi, 2008).

A geotermikus energia számszerűsítésére a hőáramsűrűséget alkalmazhatjuk (6.1. ábra), mely megadja az egységnyi felületen egységnyi idő alatt átáramló hő mennyiségét. A globális átlag 87 mW/m² (Pollack et al., 1993), az európai átlag 70–90 mW/m², Magyarországon a jellemző érték 80–120 mW/m² közötti (Dövényi et al., 2002).

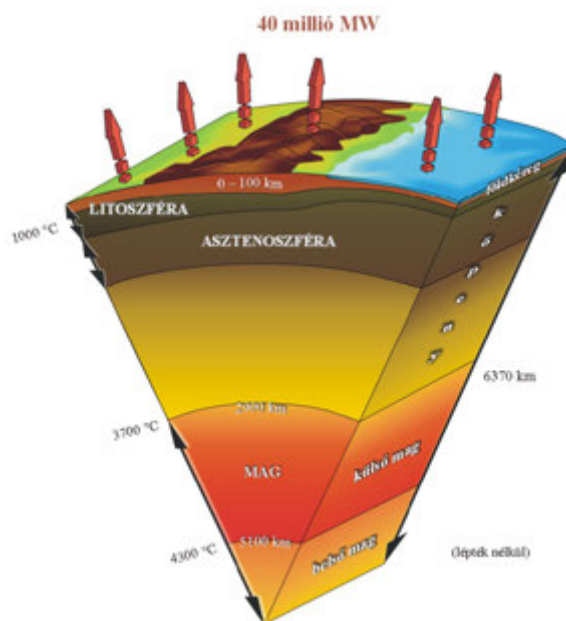


6.1. ábra: Felszíni hőáramsűrűség, mW/m² (Shapiro és Ritzwoller, 2004)

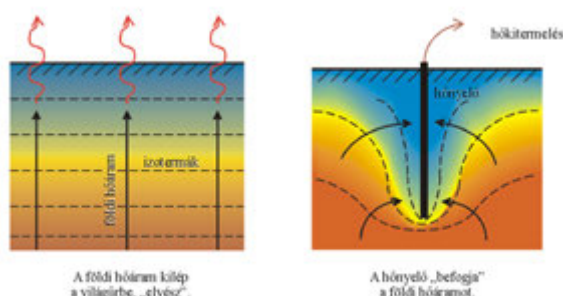
A geotermikus energia hőtartalmának közvetlen hasznosítása hosszú múltra tekint vissza: balneológiai célokra évezredek, fűtésre évszázadok óta használják. 1904-ben Olaszországban alkalmazták először áramfejlesztésre a geotermikus energiát. Felhasználása a jövőben hosszú távon megbízható alapenergia-ellátást jelenthet, s így az üvegházgázok kibocsátása is csökkenthető (Goldstein et al., 2011). Az éghajlatváltozás várhatóan nem befolyásolja nagymértékben globálisan a geotermikus energia hasznosításának hatékonyságát, azonban széleskörű elterjedése jelentős szerepet játszhat a klímaváltozás enyhítésében. Regionális skálán a csapadékhullás eloszlásának megváltozása hatással lehet a talajvíz-tározók feltöltődésére, és ezen keresztül a geotermikus energiához való hozzáférésre.

6.1. Hasznosíthatóságának elmélete

Bolygónk térfogatának 99%-a 1000 °C-nál magasabb hőmérsékletű, és csupán 0,1%-a, a földkéreg felső része hidegebb 100 °C-nál (6.2. ábra). A Föld belsejében keletkezett hőenergia a felszín felé áramlik. Ez felhasználás nélkül a légkörbe távozik, és így energetikai szempontból elvész. Ha a rendszerbe beiktatunk egy hőnyelőt, az „befogja” a földi hőáramot (6.3. ábra).



6.2. ábra: A Föld belső szerkezete és hőmérséklete (Mádlné Szőnyi, 2006)



6.3. ábra: A geotermikus hőtermelés elve (Mádlné Szőnyi, 2006)

A kontinentális földkéreg felső 1 km-es rétegének belső hőtartalma a világ energiafogyasztásánál nagyságrendekkel nagyobb, közel egy millió évig lenne elegendő, újratöltődése azonban csak ezer évet venne igénybe. Ezáltal a geotermikus készletek a technikai-társadalmi rendszerek időskáláján megújulónak tekinthetők (Mádlné Szőnyi, 2006).

A természetes utánpótlódásnál kisebb mértékű kitermelés mellett a földhő megújulásra képes. Az egyensúlyt szem előtt tartó mértékű termelés azonban sok esetben nem gazdaságos, s ezért a befektetés megtérülése érdekében a fenntarthatónál nagyobb mértékű kitermelést folytatnak, melynek következményeként a tározó kimerülhet. A leállítást követően természetes folyamatoknak köszönhetően megkezdődik a geotermikus helyreállítás. Ennek időtartamát, mértékét szimulálva megtervezhető, milyen időtartamú termelés-leállási szakaszok esetén a leghatékonyabb a mező megújulása (Mádlné Szőnyi, 2006).

A Föld hőenergiája bőséges forrás ugyan, de földrajzilag nem egyenletes eloszlásban, s kis koncentrációban találhatjuk meg. A földi hőáram a Napból érkező hőnél kb. 4 nagyságrenddel kisebb. Másik hátránya, hogy túl

nagy mélységben található az ipari alkalmazáshoz (Riva et al., 2012). Előnye más megújuló energiafajtákkal szemben, hogy a napszaktól vagy az időjárástól függetlenül folyamatosan rendelkezésre áll, így hasznosítása pontosan előre tervezhető. További előnyként jelentkezik, hogy megfelelő technológia alkalmazásával gazdaságosan és fenntartható módon kitermelhető. Mindehhez kedvező földtani adottságok, kis mélységben magas hőmérséklet (vagyis nagy geotermikus gradiens), a túlzott mértékű kitermelés elkerüléséhez pedig előrelátó tervezés szükséges.

A geotermikus fluidum összetétele helyspecifikus. A nagy oldott ásványianyag-tartalom a közvetlen felhasználást nehezítheti. Zárt rendszert alkalmazva a károsanyag-kibocsátás minimalizálható. A geotermikus energia globális potenciálját – más megújuló energiaforrásokkal összehasonlítva (6.1. táblázat) – számottevő mértékűre becslik (Mádlné Szőnyi, 2008; IPCC, 2011).

6.1. táblázat: Megújuló energiák globális technikai potenciálja (IPCC, 2011)

Energiaforrás	Globális technikai potenciál (EJ)
Napenergia	1575–49837
Geotermikus energia (elektromosság)	118–1109
Szélenergia	85–580
Biomassza	50–500
Geotermikus energia (hő)	10–312
Óceánból származó energia	7–331
Vízenergia	50–52

A geotermikus energia globális technikai potenciálja összemérhető az éves teljes elsődleges energiafogyasztással. Az energia felhasználásának így vélhetően nem a technikai potenciál elérése fog gátat szabni, hanem az ún. EGS (Enhanced Geothermal System, mesterségesen kifejlesztett földhőrendszer) technológia fejlődésének üteme az egyes régiókban (Goldstein et al., 2011).

6.2. Technológia

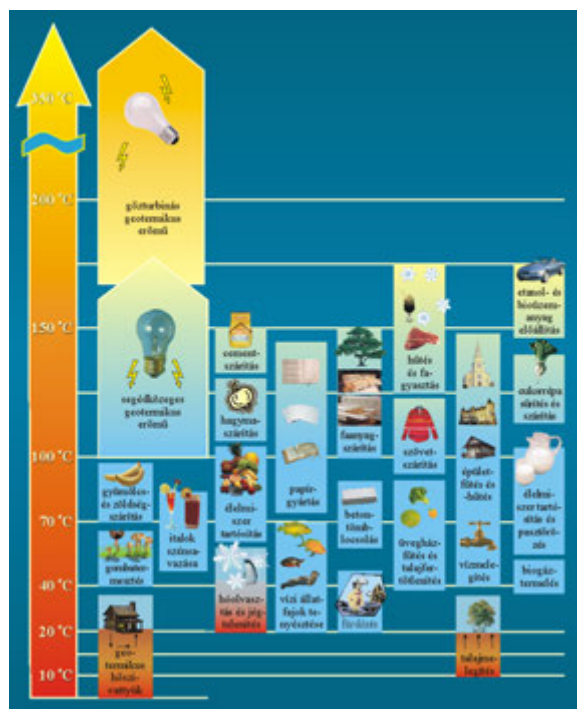
A geotermikus energia felhasználásához szükség van hőforrásra, tározóközetre, valamint hőközvetítő folyadékra. A hőforrásnak mindenképpen természetesnek kell lennie, de a rendszer további két eleme lehet mesterséges is. Amennyiben ezek természetes eredetűek, akkor természetes, egyébként pedig mesterséges rendszerről beszélünk.

A geotermikus energia hasznosítási módja elsősorban a felszínre érkező víz/gőz hőmérsékletétől függ. A 100 °C feletti hőmérsékletű fluidum *energiatermelésre* alkalmas, alacsonyabb hőmérsékletű folyadék esetén inkább a *közvetlen hőhasznosítás* jellemző. Hatékonysági szempontból fontos megoldás a kaszkád rendszerű hasznosítás: ekkor a fogyasztókat hőigény szerint csökkenő sorrendbe állítva a lehetőség szerinti legtöbb energiát hasznosíthatjuk.

Amennyiben a természetes visszapótlás mennyiségénél nem vesznek ki többet a termelés során, úgy a folyamat hosszú távon fenntartható marad, mint ahogy ezt igazolják egyes, évszázadok óta hozamcsökkenés nélkül működő természetes hőforrások példái is. A termelés azonban így többnyire nem gazdaságos. A mai technológiai színvonalon a geotermikus erőművek 100 °C feletti hőmérsékletű és 4 km-nél kisebb mélységből származó energiaforrásokból képesek gazdaságos áramtermelésre (Riva et al., 2012).

Az erőműveknek két fő változata létezik: a visszatáplálás nélküli (egyutas) és a visszatáplálásos (kéktutas) rendszer. Kéktutas rendszer alkalmazása esetén a folyadékot energetikai hasznosítás után az eredeti tároló közegbe visszasajtolják, annak nyomásának fenntartása céljából.

A geotermikus energiát hőmérsékletétől függően alkalmazhatjuk többek között energiatermelésre, ipari célokra, távfűtésre, üvegházak fűtésére, balneológiai célra, jégtelenítésre, szárításra (6.4. ábra). Ez történhet nyitott vagy zárt rendszerben attól függően, hogy a geotermikus folyadékot közvetlenül, vagy hőcserélők és közvetítő közeg alkalmazásával áramoltatjuk a rendszerben.



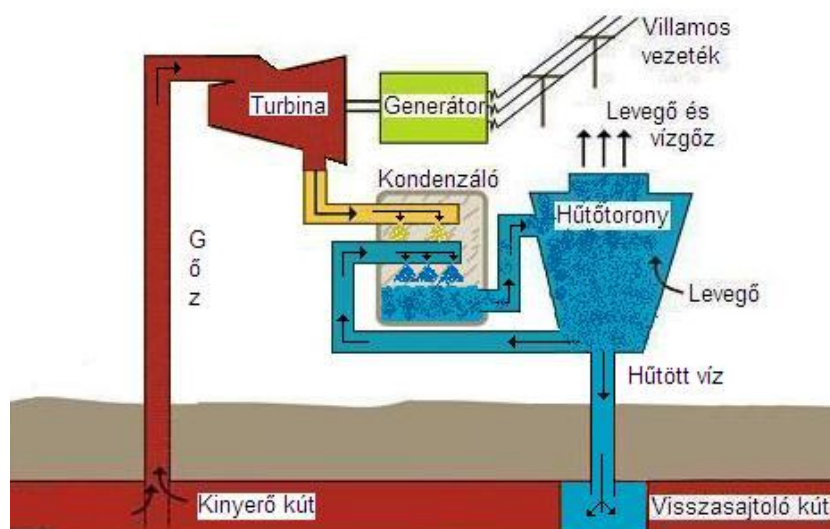
6.4. ábra: Lindal-diagram: a geotermikus energia hőmérséklettől függő felhasználási területei (Mádlné Szőnyi, 2006)

A geotermikus források felhasználhatóságának skálája igen széles: a nagy, kontinentális méretű villamosenergia-hálózatokba betáplálható, de a kis, izolált települések, önálló épületek, tanyák helyben történő energiaellátása is megoldható segítségükkel (Goldstein et al., 2011). A fejlesztési és építési költségek igen magasak, de ezt ellensúlyozza a viszonylag alacsony üzemeltetési költség.

A geotermikus energiát hasznosító üzemek életciklus-elemzésével kimutatható, hogy üvegházgáz-kibocsátásuk más megújuló energiaforrásokéhoz és az atomerőművekhez hasonló (Goldstein et al., 2011).

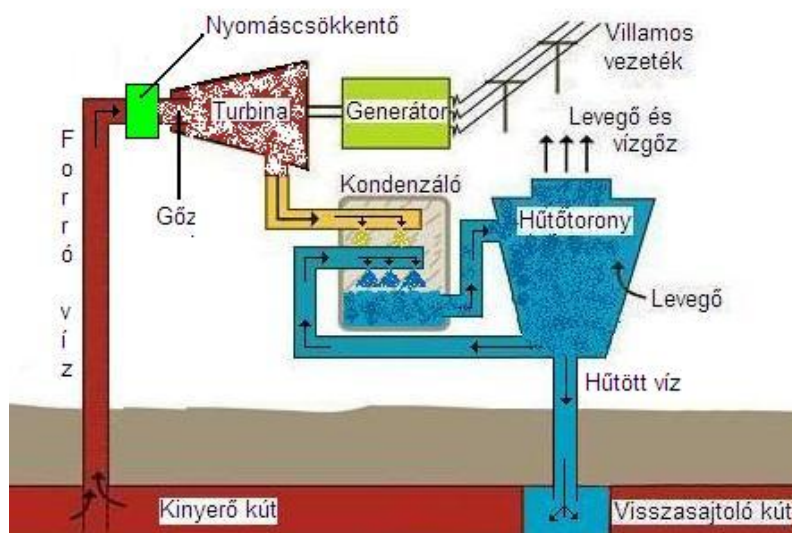
Geotermikus alapú villamosenergia-termelésre a *gőzüzemű erőműveket* nagyjából 150 °C-os folyadék hőmérsékletig működtetik. Ennél alacsonyabb hőmérsékletnél többnyire segédközegek erőműveket alkalmaznak.

A szabad gőzkibocsátó technológia alkalmazásakor a gőzt – amennyiben száraz gőzről van szó – közvetlenül a turbinára vezetik, mely annak meghajtását követően a légkörbe kerül. Nedves gőz kitermelése esetén először eltávolítják a keverék víztartalmát, majd a – már száraz – gőzt a turbinára vezetik. A *szabad gőzkibocsátó üzemek* (6.5. ábra) könnyen, gyorsan felszerelhetők, kapacitásuk jellemzően 2,5–25 MW_{vill} közötti, s az egyik legnagyobb ilyen típusú üzem az amerikai Kalifornia államban található (Mádlné Szőnyi, 2006).



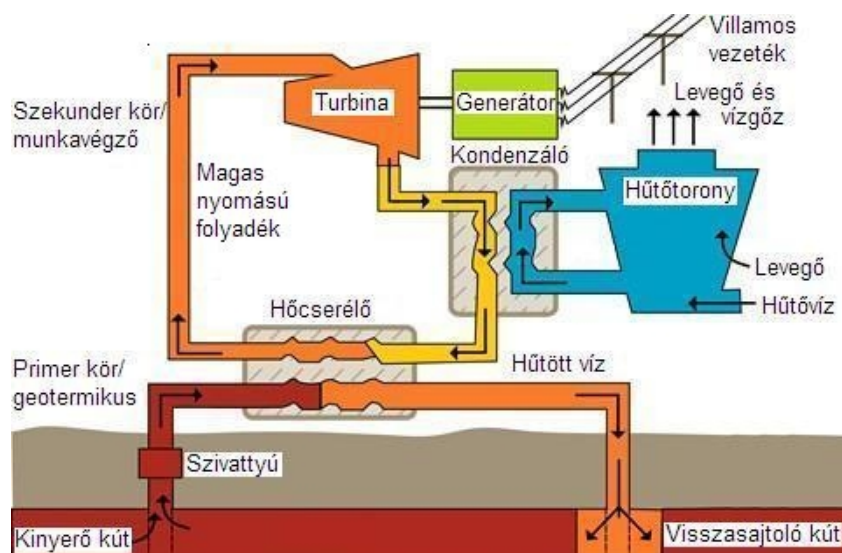
6.5. ábra: Szabad gőzkibocsátó üzem sematikus ábrája (Forrás: Szebik, 2009)

A *kondenzációs üzemekben* (6.6. ábra) forró, túlnyomásos vizet nyernek ki, melyet nyomáscsökkentéssel a turbinára vezetnek. Itt az addig folyékony víz térfogata megnő és hirtelen gőzzé alakul, ami meghajtja a turbinalapátokat. Ezek ugyan a szabad gőzkibocsátó üzemeknél nagyobb kapacitásúak (50–60 MW_{vill}), de építésük is költségesebb (Mádlné Szőnyi, 2006).



6.6. ábra: Kondenzációs üzem sematikus ábrája (Forrás: Szebik, 2009)

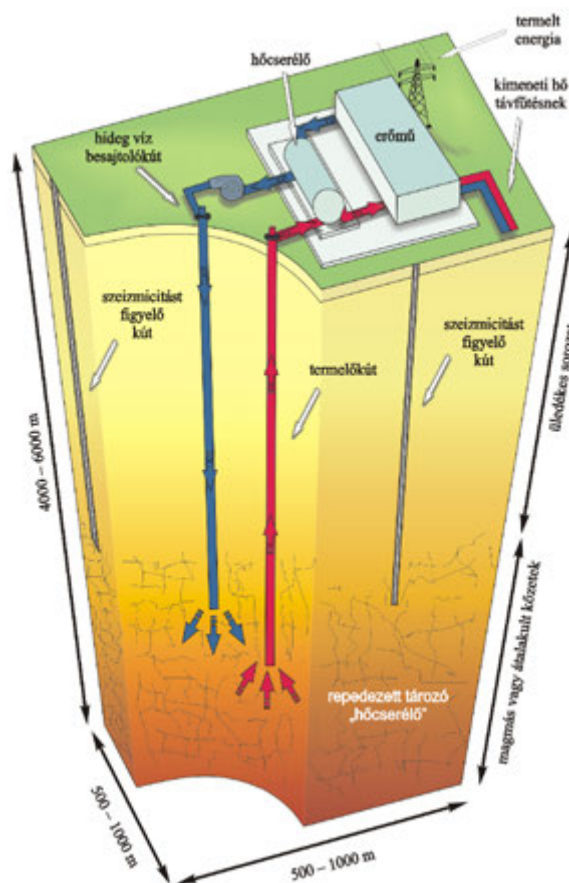
A *segédközegek üzemek* (6.7. ábra) a kondenzációs üzemeknél összetettebbek, így telepítésük is drágább. Itt a víz, a gőz, vagy ezek együttese hőcserélőn keresztülhaladva egy másodlagos munkafolyadékot melegít fel. Ez a munkafolyadék (többnyire alacsony forráspontú szerves vegyület) gőzzé alakulva meghajt egy turbinát, és így áramot termel (Goldstein et al., 2011). Használat után a folyadékot a ciklus elejére visszavezetik. Ez a technológia lehetővé teszi a 100–150 °C hőmérsékletű geotermikus fluidumok áramtermelési célú felhasználását (Mádlné Szőnyi, 2006). A segédközegek általában néhányszor 10 MW_{vill} kapacitásúak, mely sorba kapcsolt modulok segítségével áll elő (Mádlné Szőnyi, 2006).



6.7. ábra: Segédközegettes üzem sematikus ábrája (Forrás: Szebik, 2009)

Léteznek továbbá kombinált vagy hibrid üzemek, melyek az itt felsorolt alaptípusokat ötvözik (Goldstein et al., 2011). A *kogeneráció*s, más néven *kombinálthő- és áramtermelő erőművek* (CHP) a villamos energia termelésekor keletkező hulladékhőt is hasznosítják (ezáltal növelve a hatékonyságot), melyre az egyik legjobb megoldást a kaszkád-rendszerek nyújtják. A hő szállítása az elektromos áram szállításánál sokkal kevésbé hatékony, így körültekintően, a potenciális felhasználók közelében kell az üzemeket telepíteni.

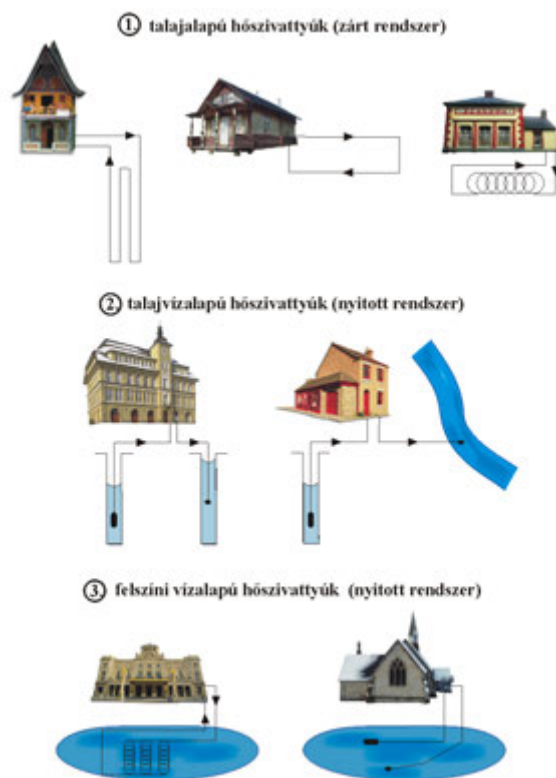
A legutóbbi évtizedekig a geotermikus energia használata azokra a területekre korlátozódott, ahol a földtani viszonyok lehetővé tették, hogy a hő és a geotermikus készletek a felszín közelében rendelkezésre álljanak (Mádlné Szőnyi, 2006). A legújabb technológiák segítségével azonban a kevésbé kedvező adottságú helyeken is lehetővé válhat a geotermikus energia kitermelése. Ezen technológiák közé tartozik a *mesterségesen kifejlesztett földhőrendszer* (Enhanced Geothermal System, EGS). Ennek lényege, hogy néhány (4–6) km-es mélységbe lefúrva a Föld (szinte) bármely pontján elérhető az a hőmérséklet, mely már lehetővé teszi a geotermikus felhasználást. A tározóközetbe nagy nyomáson vizet szajtolva a közet porozitása megnő, a folyadék felmelegszik, s hőcserélőként viselkedik. Egy másik kúton keresztül a vizet felszínre hozzák, melynek hőenergiáját aztán a korábban bemutatott módon nyerik ki (6.8. ábra). A világ számos országában zajló EGS-projektek jelenleg még kísérleti fázisban vannak. Napjainkban a tervezők legfontosabb feladata, hogy hosszú távon is fenntartható, ugyanakkor elfogadható áron üzemeltethető erőműveket hozzanak létre. Eközben ügyelniük kell arra is, hogy minimalizálják a vízvesztéseket és csökkentsék a technológia által esetlegesen indukált földrengések kockázatát (Tester et al., 2006).



6.8. ábra: Mesterségesen kifejlesztett földhőrendszer (Mádlné Szőnyi, 2006)

Érdemes az alkalmazott technológiák között megemlíteni a hőszivattyúkat, noha ezek idesorolása vitatott, ugyanis míg a hőszivattyúk egy része a geotermikus energiát, más része azonban csak a felszínközeli réteg hőtartalmát nyeri ki, mely nem a Föld mélyében lezajló folyamatok, hanem a Nap sugárzása által termelődik újjá.

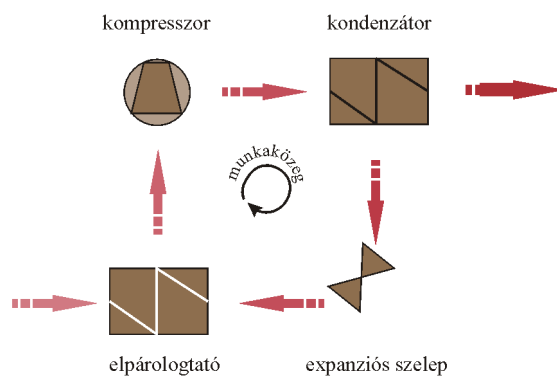
A *földhőszivattyúk* (Ground Heat Pump, GHP) a viszonylag állandó hőmérsékletű talaj, illetve talajvíz hőjét használják az épületek fűtésére (és hűtésére), valamint kommunális melegvíz előállítására. Segítségükkel a környezet közvetlenül nem hasznosítható hőenergiáját vonjuk el, amelyet – külső energia alkalmazásával – nagyobb hőmérsékletű, hasznosítható hővé alakítunk. A GHP rendszerek többféleképpen csoportosíthatók (6.9. ábra). Léteznek zárt és nyílt rendszerek. A nyílt rendszerekben maga a hőforrás a munkaközeg, zárt rendszerekben annak hőjét egy hőcserélő segítségével nyerik ki, ezáltal a geotermikus folyadék kémiai összetétele nem befolyásolja a felhasználást. Lehetséges a hőforrás jellege alapján elkülöníteni levegő-, talaj-, talajvíz-, felszíni víz-, vagy hulladékhő alapú hőszivattyúkat. A rendszer elhelyezése alapján megkülönböztethetünk vízszintes, 1–2 m mélységben elhelyezett talajkollektorokat, 10–100 m mélyen függőlegesen lefűrt földhőszondákat, illetve fűrólyuk-hőcserélőket.



6.9. ábra: Földhőszivattyúk típusainak sematikus vázlata (Mádlné Szőnyi, 2006)

A hőszivattyúk lényegében nem mások, mint fordított céllal működő hűtőegységek, melyekkel nem a párologtatóval elvont, hanem a kondenzátorban leadott hőmennyiséget hasznosítjuk. A berendezések működését villamos energia felhasználásával biztosítjuk.

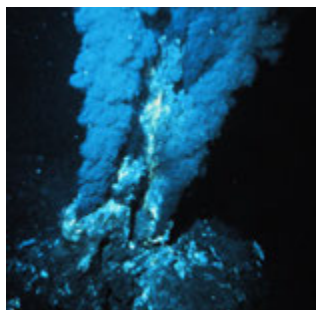
A hőszivattyúk működését a 6.10. ábra összegzi: (1) Az eredetileg folyékony munkaközeg a környezet hőjének hatására az elpárologtatóban gáz halmazállapotúvá válik. Ehhez szükséges, hogy a hőforrás hőmérséklete a munkaközeg adott nyomásra vonatkozó forráspontjánál nagyobb legyen. (2) A kompresszor – melyet villamos energia működtet – összenyomja a munkaközeget. A kompresszor működtetéséhez szükséges energia származhat fosszilis energiahordozók felhasználásából, de megújuló energiaforrásból vagy hulladékhőből is. (3) A kondenzátorban a munkaközeg nagy nyomású gőze átadja hőjét a hőfelvő közegnek, eközben lecsapódik. (4) Végezetül a munkaközeg az expanziós szelepen keresztül visszakerül az elpárologtatóba, ahol a folyamat újra elkezdődhet (Mádlné Szőnyi, 2006).



6.10. ábra: Kompresszoros hőszivattyús rendszer elvi vázlata (Mádlné Szőnyi, 2006)

A hőszivattyúban lezajló folyamatot többek között a teljesítmény-tényezővel (Coefficient of Performance, COP) jellemezhetjük, mely a kinyert hasznos energia és a befektetett (kompresszorban felhasznált) energia hányadosaként definiálható. Jellemző értéke napjainkban 3 és 6 közötti (Mádlné Szőnyi, 2006). A földhőszivattyúk alkalmazásához nem szükséges kedvező geotermikus adottság, de a kedvező adottságok segítik a hatékonyabb energiatermelést. Ráadásul alkalmazásukkal az antropogén tevékenységek káros környezeti hatásai csökkenthetők (pl. hűtővíz hőenergiájának kinyerésével a felszíni vizek hőszennyezése mérsékelhető, miközben az épület fűtése is megoldhatóvá válik).

A tenger- és óceánfelszínek alatt elterülő geotermikus források hasznosítására jelenleg még nem létezik megfelelő technológia, bár az ebben rejlő potenciál igen magas. Fejlesztések zajlanak a világ több országában, a kísérletek, ötletek közül megemlíthetjük a felhagyott tengeri olajkutakon keresztül történő hőkinyerést, illetve a tengerfelszín alatt elhelyezkedő vulkánok és óceánközépi hátságok fekete füstölgőinek hőfelhasználását (Hiriart et al., 2010). Fekete füstölgőknek (6.11. ábra) nevezzük a tenger alatti vulkanikus központokat, ahol forró vulkáni anyagok törnek fel a mélyből, főleg ún. utóvulkáni tevékenység keretében. Ezek már nem láva formájában jelennek meg, hanem 300–400 °C-os forróvízes oldatokként, amelyekből a hideg tengervízbe érve sok anyag kiválik. Emiatt jön létre az általában vas-szulfid ásványoktól sötét, kavargó füstre emlékeztető jelenség, mely általában több méter magas kúrtőt alkot. Az eddig megfigyelt legnagyobb fekete füstölgő 150 m átmérőjű, és 50 m magas volt. Egy-egy fekete füstölgő akár 100 ezer évig is aktív maradhat (Kereszturi, 2008).



6.11. ábra: Egy fekete füstölgő (NOAA)

A mélységi fúrásokból, azaz közvetlenül a kb. 900–1300 °C hőmérsékletű magmából nyert geotermikus energia hasznosításának ötlete is felmerült (Northrup et al., 1978), de még napjainkban sem valósult meg részben kockázati, részben finanszírozási okokból. 2009-ben egy 2,1 km mélységű feltáró jellegű geotermikus kút fúrásakor váratlanul magma beáramlást észleltek (Elders et al., 2011), mely egyedülálló lehetőséget biztosít az ilyen irányú kutatások számára.

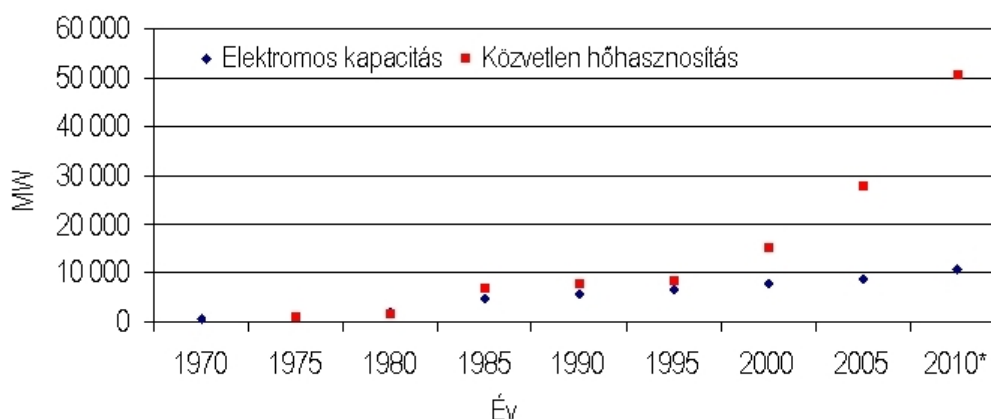
Perspektivikus jövőbeli fejlesztési irányok az erőművek hatékonyságának és kapacitásának növelése. A földhőszivattyúk alkalmazásának további elterjesztése, illetve az EGS technológia ipari méretűvé válásához szükséges részletek kidolgozása (mint például nagy mélységben megfelelő méretű hőcserélő-rendszer kiépítése) is fontos a geotermikus energia kinyerésének szempontjából.

6.3. Fejlődéstörténet

A geotermikus energiát először vulkánok, forró vízi források közelében figyelték meg, ahol fürdőzésre, főzésre, melegítésre évezredek óta használják. A hőmérséklet mélységgel való növekedésének tapasztalati leírása a XVI.–XVII. századra tehető. Az első geotermikus erőművet Olaszországban, Larderelloban építették, mely 1904 óta üzemel (1913 óta kereskedelmi céllal). Az Amerikai Egyesült Államokban a kaliforniai „The Geysers” mező 1932 óta szolgáltat elektromos áramot. Ezen fejlesztéseket számos további követte, melyek száraz gőzt használtak áramfejlesztésre: Mexikó 1959, Japán Matsukawa 1966 (Lund, 2007). Az 1958-ban létesített új-zélandi Wairakei volt az első kondenzációs típusú erőmű. Az egykori Szovjetunióban épült az első segédközegezes erőmű, mely a Kamcsatka-félszigeten, 81 °C-os fluidum felhasználásával termelt áramot. Az 1970–1980-as évek során további erőműveket építettek Izlandon, El Salvadorban, Kínában, Indonéziában, Kenyában, Törökországban, a Fülöp-szigeteken, Portugáliában (az Azori-szigeteken), Görögországban és Nicaraguában. Később erőműveket telepítettek Thaiföldön, Argentínában, Tajvanon, Ausztráliában, Costa Ricán, Ausztriában, Guatemalán, Etiópiában, Németországban, és Pápua Új-Guineán is (Lund, 2007). Napjainkban összesen 24 országban működnek elektromos áramot termelő geotermikus erőművek.

A közvetlen hőfelhasználás módszerei (pl. távfűtés, geotermikus hőszivattyúk) is igen kiforrottak. A termálvizet termelő kutak fűrése az 1800-as évek végén, 1900-as évek elején terjedt el világszerte, az 1920-as, 30-as években már Budapesten is épületeket fűtöttek a feltárt melegvízzel (Mádlné Szőnyi, 2008). Ezzel szemben az újabb EGS (Enhanced Geothermal System, mesterséges földhőrendszer) technológia még kísérleti stádiumban van.

A geotermikus energia hasznosításában az elmúlt 40 évben bekövetkezett fejlődést a 6.12. ábra mutatja be. Mind a beépített elektromos kapacitás, mind a közvetlen hőhasznosítás nagymértékű (átlagosan évi 7%-os, illetve 11%-os) globális növekedése megfigyelhető.



6.12. ábra: A geotermikus energia globális elterjedése: az elektromos kapacitás és a közvetlen hőhasznosítás növekedése 1970–2010 között (Goldstein et al., 2011)

2008-ban a világ primerenergia-felhasználásának csak mintegy 0,1%-át biztosították geotermikus forrásból. Számítások szerint 2050-re ez az arány 3%-ra nőhet a villamosenergia-fogyasztás, és 5%-ra a közvetlen hőfelhasználás (fűtés és hűtés) esetében (Goldstein et al., 2011). A becsült geotermikus energia-felhasználás 2015-re 122 TWh/év lesz az elektromosság és 224 TWh/év a hőfelhasználás területén. 2050-re az eddigi növekedési trendek extrapolációjából mindezekre 1180 TWh/év (elektromosság) és 2100 TWh/év (hő) adódik. Az előrejelzések szerint néhány ország elsődleges energiaigényének legnagyobb része geotermikus energiából származik majd (Goldstein et al., 2011).

6.4. Világpotenciál

Ebben az alfejezetben áttekintjük a geotermikus energia hasznosításának lehetőségeit mind a közvetlen hőhasznosításra, mind a villamosenergia-termelésre vonatkozóan. Országokként bemutatjuk a beépített kapacitásokat és az átlagos éves használatot. Végül ismertetjük a mesterségesen kifejlesztett földhőrendszer technológia újabb kutatási és fejlesztési irányait.

6.4.1. Közvetlen hőhasznosítás

Közvetlen hűtésre és fűtésre a geotermikus energiát 2008-ban 78 országban alkalmazták (6.2. táblázat) 121,7 TWh hőenergiát termelve (Goldstein et al., 2011). Az iparág tendenciáját jól jellemzi, hogy 1985-ben még csak 24, 1995-ben 28, 2000-ben 58, 2005-ben 72 ilyen országról volt tudomásunk (Mádlné Szőnyi, 2006; Lund et al., 2010). A beépített kapacitás 2005-höz képest csaknem 80%-kal, míg az éves felhasznált energia 60%-kal nőtt 2009 végére. A hasznosítás fő típusai és azok megoszlása 2009-ben a következőképpen alakultak (Lund et al., 2010): épületek fűtése (63%), fürdők, balneológia (25%), kertészeti üvegházak és talajfűtés (5%), ipari hőfelhasználás és mezőgazdasági szárítás (3%), akvakultúra, halgazdálkodás (3%), hóolvasztás (1%).

Mint azt az egyes országok beépített kapacitását és éves geotermikus energia-használatát összegző 6.2. táblázatból is leolvashatjuk, nem feltétlenül a legjobb geotermikus adottságú területek állnak az élen. Ennek oka, hogy akkor is lehet hőszivattyúk segítségével geotermikus energiát kinyerni, ha a forrás hőmérséklete nem elég magas a közvetlen felhasználáshoz. A földhőszivattyúk telepítése nem egyenletes, e technológia elsősorban Észak-Amerikában, Európában és Kínában terjedt el. A GHP technológia 2009-ben globálisan mintegy 70%-kal járult

hozzá a telepített geotermikus hőkapacitáshoz, és ez 1995 óta a geotermikus hasznosítás leggyorsabban növekvő formája (Rybach, 2005; Lund et al., 2010). Az öt legnagyobb beépített kapacitással rendelkező ország (Amerikai Egyesült Államok, Kína, Svédország, Norvégia, Németország) birtokolja az összkapacitás 60%-át, míg az öt legnagyobb fogyasztó (Kína, Amerikai Egyesült Államok, Svédország, Törökország, Japán) felelős az éves fogyasztás 55%-áért. Az egységnyi területre vonatkozó beépített kapacitás listáján hazánk az 5. helyen áll (Lund et al., 2010). 34 országban fűtenek üvegházakat geotermikus energiával, ezek közül a listavezető országok Törökország, Magyarország, Oroszország, Kína és Olaszország.

Az 1985–1995 közötti stagnáló szakasz után a geotermikus energia közvetlen felhasználásának szignifikáns növekedése tapasztalható az elmúlt 15 évben (6.12. ábra), főképp a fosszilis tüzelőanyagok drágulása és azok megújuló energiaforrásokkal történő kiváltásának igénye miatt (Goldstein et al., 2011).

6.2. táblázat: Közvetlen hőhasznosítás a világ országaiban 2009 végén (Lund et al., 2010)

Ország	Kapacitás, MW	Éves használat, GWh/év
Kína	8898	20931,8
Amerikai Egyesült Államok	12611,46	15710,1
Svédország	4460	12584,6
Törökország	2084	10246,9
Japán	2099,53	7138,9
Norvégia	3300	7000,6
Izland	1826	6767,5
Franciaország	1345	3591,7
Németország	2485,4	3546,0
Hollandia	1410,26	2972,3
Olaszország	867	2761,6
Magyarország	654,6	2713,3
Új-Zéland	393,22	2653,5
Kanada	1126	2464,9
Finnország	857,9	2325,2
Svájc	1060,9	2143,1
Brazília	360,1	1839,7
Oroszország	308,2	1706,7
Mexikó	155,82	1117,5
Argentína	307,47	1085,3
Ausztria	662,85	1035,6
Szlovákia	132,2	852,1
India	265	707,0
Dánia	200	694,5
Izrael	82,4	609,2
Dél-Korea	229,3	543,0
Algéria	55,64	478,7
Jordánia	153,3	427,8
Lengyelország	281,05	417,0
Szerbia	100,8	391,7
Bulgária	98,3	380,6

Románia	153,24	351,5
Szlovénia	104,17	315,7
Irán	41,608	295,6
Görögország	134,6	260,5
Csehország	151,5	256,1
Egyesült Királyság	186,62	236,1
Írország	152,88	212,2
Spanyolország	141,04	190,0
Grúzia	24,51	183,1
Macedónia	47,18	167,1
Belgium	117,9	151,9
Horvátország	67,48	130,3
Litvánia	48,1	114,3
Portugália	28,1	107,3
Tunézia	43,8	101,1
Észtország	63	98,9
Kolumbia	14,4	79,7
Bosznia és Hercegovina	21,696	70,9
Ausztrália	33,33	65,3
Mongólia	6,8	59,2
Chile	9,11	36,6
Kenya	16	35,2
Ukrajna	10,9	33,0
Dél-Afrika	6,01	31,9
Ecuador	5,157	28,4
Vietnam	31,2	25,6
Marokkó	5,02	22,0
Thaiföld	2,54	22,0
Nepál	2,717	20,5
Guatemala	2,31	15,7
Tadzsikisztán	2,93	15,4
Peru	2,4	13,6
Honduras	1,933	12,5
Indonézia	2,3	11,8
Etiópia	2,2	11,6
Albánia	11,48	11,2
El Salvador	2	11,1
Fülöp-szigetek	3,3	11,0
Fehéroroszország	3,422	9,4
Lettország	1,63	8,8
Costa Rica	1	5,8
Egyiptom	1	4,2

Jemen	1	4,2
Örményország	1	4,2
Venezuela	0,7	3,9
Karib-szigetek	0,103	0,8
Pápua Új-Guinea	0,1	0,3
Összesen	50583	121696

6.4.2. Villamosenergia-termelés

A geotermikus eredetű elektromosság az energiakereskedelemben 1913 óta van jelen. Áramot jelenleg 24 országban termelnek geotermikus energia felhasználásával. Becslések szerint 2008-ban az éves geotermikus villamosenergia-termelés 67,2 TWh-nak adódott (Goldstein et al., 2011). 2005 és 2010 között mintegy 20%-kal bővült a beépített kapacitás (Bertani, 2010). Ezen értékeket országonként a 6.3. táblázat részletezi, a geotermikus energia 2005-ös és 2010-es felhasználási adataival együtt.

6.3. táblázat: Geotermikus villamosenergia-termelés a világ országaiban (Bertani, 2010)

Ország	Kapacitás, MW	Éves használat, GWh/év	Kapacitás, MW	Éves használat, GWh/év
	2005		2010	
Amerikai Egyesült Államok	2564	16840	3093	16603
Fülöp-szigetek	1930	9253	1904	10311
Indonézia	797	6085	1197	9600
Mexikó	953	6282	958	7047
Olaszország	791	5340	843	5520
Izland	202	1483	575	4597
Új-Zéland	435	2774	628	4055
Japán	535	3467	536	3064
Kenya	129	1088	167	1430
El Salvador	151	967	204	1422
Costa Rica	163	1145	166	1131
Törökország	20	105	82	490
Pápua Új-Guinea	6	17	56	450
Oroszország	79	85	82	441
Nicaragua	77	271	88	310
Guatemala	33	212	52	289
Portugália	16	90	29	175
Kína	28	96	24	150
Franciaország	15	102	16	95
Németország	0,2	1,5	6,6	50
Etiópia	7,3	0	7,3	10
Ausztria	1,1	3,2	1,4	3,8
Thaiföld	0,3	1,8	0,3	2
Ausztrália	0,2	0,5	1,1	0,5
Összesen	8933	55709	10715	67246

2009-ben a geotermikus energia termelésében első volt az Amerikai Egyesült Államok, melynek néhány nyugati államában összpontosul a világ összes telepített kapacitásának mintegy 30%-a. További 30%-nyi kapacitás található a Fülöp-szigeteken és Indonéziában. A kapacitás harmada Mexikóban, Olaszországban, Japánban, Izlandon és Új-Zélandon van telepítve. A fennmaradó 16 ország között az összkapacitás néhány százaléka oszlik meg, melyek közül néhányban (pl. Chile, Németország, Ausztrália) azonban további jelentős fejlesztések várhatók a közeljövőben (Bertani, 2010; Goldstein et al., 2011).

Ugyan globálisan a villamosenergia-termelésnek csak kb. 0,3%-a származott geotermikus forrásokból 2008-ban, regionálisan azonban hat országban (El Salvador, Kenya, Fülöp-szigetek, Izland, Costa Rica, Új-Zéland) ez az arány a 10%-ot is meghaladta (Goldstein et al., 2011). Az alábbi honlap interaktív térképe segítségével a világ bármely geotermikus erőművéről kaphatunk további információkat: <http://map.thinkgeoenergy.com/>

6.4.3. Mesterségesen kifejlesztett földhőrendszer (EGS)

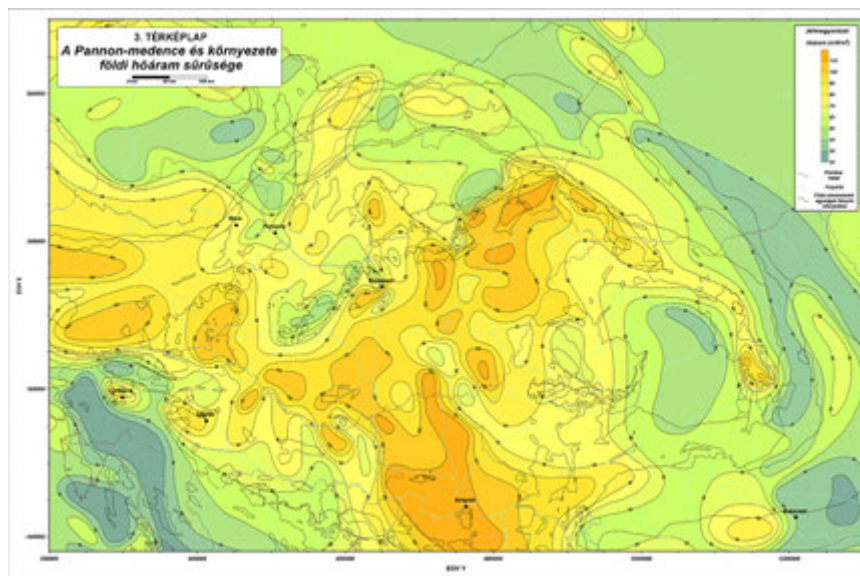
Noha kereskedelmi célra az EGS technológiát még nem használják, számos helyen folynak a kísérletek e területen Európában, az USA-ban és Ausztráliában egyaránt. Az 1987-ben a franciaországi Soultz-sous-Forêts-ban létesített

1,5 MW-os demonstrációs erőművet már a hálózatba is bekapcsolták. A németországi Landauban 2007 végén kezdte meg működését egy 2,5–2,9 MW-os EGS erőmű. További kutatások szerint a Pannon-medence magyarországi része az egyik legígéretesebb terület Európában a technológia alkalmazása szempontjából (Mádlné Szőnyi, 2006). Az egyelőre még nagyrészt próba üzemmódban működő demonstrációs erőművek fontos adatokat szolgáltatnak a technológia valós körülmények közötti működéséről és teljesítményéről. Még sok részletkérdés megválaszolásra vár a technológia kereskedelmi alkalmazása előtt, mint például a mesterséges kőzetrepesztés miatt fellépő esetleges szeizmikus aktivitás monitorozása, kezelése (Goldstein et al., 2011).

2006 decemberében megkezdtek a bázeli erőmű próbaüzemét, mely terület szeizmikus szempontból igen nyugodt helynek számít. Az EGS technológia alkalmazásának megfelelően hideg vizet sajtoltak a mélybe, hogy a geotermikus energia segítségével elektromos áramot állítsanak elő. Értelmszerűen kívánatos lenne a hulladékhő felhasználása, így az erőművet a potenciális fogyasztók közelében építették fel. A projekt több szeizmikus mikroeseményt váltott ki, így azt néhány nappal a kísérlet kezdete után, egy 2,6-os magnitúdójú földrengést követően leállították. A nyomás csökkentése ellenére azonban néhány órával később egy 3,4-es magnitúdójú rengés következett be, és a leállítás után még hónapokkal is mértek szeizmikus aktivitást a mélyben. A vizsgálatok befejeztével 2009-ben végleg bezárták az erőművet (Jánosi, 2010).

6.5. Magyarország geotermikus energia-hasznosítása

Magyarországon a geotermikus gradiens az átlagosnál nagyobb (45–50 °C/km), továbbá az ország területének több mint 70%-án rendelkezésre áll a földhő közvetítő közegeként a termálvíz (vagy más néven hévíz, mely definíció szerint a 30 °C-ot meghaladó hőmérsékletű rétegvíz). Elmondható tehát, hogy geotermikus adottságaink igen kedvezőek (6.13. ábra), melynek oka a földtörténeti fejlődésben keresendő: a litoszféra földtörténeti múltban bekövetkezett elvékonyodásának következménye. A kedvező adottságok ellenére a felszínen mérhető vízhőmérséklet csak ritkán haladja meg a 100 °C-ot – 2006-os adatok szerint összesen három ilyen kutat tartanak nyilván (Mádlné Szőnyi, 2006).



6.13. ábra: Hőáramsűrűség a Pannon-medencében és környezetében (http://geophysics.elte.hu/atlas/geodin_atlas.htm)

A geotermikus energiát Magyarországon közvetlen hőhasznosítás céljára alkalmazzák: 2713,3 GWh-val 2009-ben az országok közti rangsorban a 12. helyen állt a 6.2. táblázat adatai szerint. Geotermikus energiára alapuló villamosenergia-termelésünk viszont nincs. Mezőgazdasági célú felhasználásunk jelentős. Nyílt területeken a termálvizet a fűtés mellett öntözésre is alkalmazzák. A felhasználás másik nagy területe az üvegházak, egyéb mezőgazdasági épületek fűtése, termények szárítása, állattenyésztés (az állandó magas hőmérséklet biztosításával). A geotermikus energiával fűtött üvegházak területe tekintetében Magyarország a világ élmezőnyébe tartozik.

A geotermikus energia felszíni megnyilvánulásai már régóta ismertek, Budapest termálforrásait a Római Birodalom fennállásának idejében is használták. A termálvíz feltárása 1877-ben kezdődött meg, az 1920–1930-as években az artézi kutakkal feltárt melegvízzel már épületeket fűtöttek Budapesten (Mádlné Szőnyi, 2008; Lund et al., 2010). Több településünkön (Csongrád, Hódmezővásárhely, Kapuvár, Kistelek, Makó, Nagyatád, Szeged, Szentes, Szigetvár, Vasvár) üzemel napjainkban is geotermikus távfűtés-rendszer. Negyvennél is több településünk több mint 9000 lakását fűti geotermikus hő (Lund et al., 2010).

Ma Magyarországon több mint 900 termálkút üzemel, amelynek mintegy 31%-a balneológiai célú, több mint negyedük az ivóvízellátásban hasznosul, és közel fele szolgál fűtésre (Statistikai Tükör, 2009). 2009-ben mintegy 26–38 PJ hőenergiát hoztunk felszínre, melyből csak 4,13 PJ-t hasznosítottunk (Eurostat, 2012). A rendszer nagy veszteséggel működik, a hatékonyság azonban növelhető. Jelenleg a felszínre hozott hévizet úgy hűtik le a megfelelő hőmérsékletre, hogy annak hőjét nem használják fel, miközben az épületek egy részét földgázzal fűtik. A pazarló felhasználás megszüntetésével a mostani hő többszörösét (akár további 10–15 PJ-t) lehetne kinyerni, többlet héviz kitermelése nélkül (Mádlné Szőnyi, 2008; Munkácsy és Krassován, 2011). 2010-ben a geotermikus hőhasznosítás 4,23 PJ-t, a hőszivattyúk alkalmazása 0,25 PJ-t tett ki, 2020-ra ezen értékek 16,43 PJ-ra, valamint 5,99 PJ-ra való növekedését prognosztizálják (Magyarország Megújuló Energia Hasznosítási Cselekvési Terve 2010–2020, 2011). Magyarországon a geotermikus potenciál legalább 60 PJ/év (Mádlné Szőnyi, 2008).

A hazai hőszivattyús földhőhasznosítás elterjedése 2002-ben indult meg (Mádlné Szőnyi, 2008). Azóta jelentős növekedés történt az évente eladott hőszivattyúk számában (a 2002-es néhány száz tizes érték 2007-ben már megközelítette az ötszázat, 2008–2010 között pedig az ezret is), mely 2011-ben visszaesett mintegy 800 darabra (Ádám, 2012). Ezen értékekkel Európa több országához képest is nagyságrendekkel le vagyunk maradva, mind abszolút (hőszivattyúk darabszáma), mind relatív (százezer lakosra eső hőszivattyúk száma) értelemben.

Magasabb (mintegy 120–150 °C-nál melegebb) hőmérsékletű fluidum akár áramtermelésre is alkalmas lehet. Ilyen geotermikus mezők azonban csak az ország területének kis részén jöhetnek számításba. Jelenleg csak kutatási tevékenységről lehet beszámolni, a kiaknázás lehetőségéről/szükségyszerűségéről, az ebben rejlő potenciálról az egyes kutatók véleménye eltérő (Munkácsy és Krassován, 2011).

Az Alföldön található Ferencszállás mellett néhány éven belül megépülhet hazánk első EGS technológián alapuló, 11,8 MW teljesítményű geotermikus erőműve. A projekt megvalósításához az Európai Unió mintegy 11,3 milliárd forinttal járulna hozzá, mely a költségek felét fedezi. A beruházás megindításáról szóló döntés 2012 decemberében született meg (<http://www.bruxinfo.hu/cikk/20121218-magyar-geotermikus-beruhazas-is-a-ner300-kiemelt-projektjei-kozott.html>).

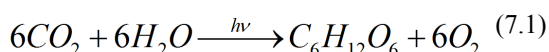
7. fejezet - Bioenergia

A természetes biomassa a Földön – szárazföldön és tengerben egyaránt – élő és nemrég elhalt szervezetek tömege és biológiai eredetű mellékterméke. Az emberi tevékenység által ez kibővül az ipari biotechnológiai termékekkel, és a biológiai eredetű vagy biológiailag lebomló ipari és kommunális hulladékkal. Definíció szerint az ember testtömegét nem számítjuk ide (Láng, 2002). A biomassa mint megújuló energiaforrás törvényi definíciójában csak az emberi tevékenységből származó biológiai anyagok kaptak helyet. Ennek megfelelően a 2010. évi CXVII. törvényben foglaltak szerint a biomassa „a mezőgazdaságból (a növényi és állati eredetű anyagokat is beleértve), erdőgazdálkodásból és a kapcsolódó iparágakból – többek között a halászatból és az akvakultúrából – származó, biológiai eredetű termékek, hulladékok és maradékanyagok biológiailag lebontható része, valamint az ipari és települési hulladék biológiailag lebontható része”. Tömegarányát tekintve a biomassa elsődleges forrása a növényi fotoszintézis.

A biomassa potenciálisan a legnagyobb globális megújuló energiaforrás, évi primér produkciója 4500 EJ, melyből 2900 EJ használható potenciálisan bioenergiaként. A teljes mennyiség mintegy 10%-os szintű kitermelése becslések szerint hosszú távon is fenntartható (Hall és Rosillo-Calle, 1999). Az ennél nagyobb arányú folyamatos termelés korlátja nem a forrás rendelkezésre állása, hanem a termelés fenntarthatósága, valamint a kinyert energia konverziója és szállítása.

A növények napenergia konverziója igen alacsony hatásfokú, kevesebb mint 1%. Következésképpen arányaiban nagy földterületek szükségesek a növényi alapú fenntartható mértékű energia termeléséhez. Emellett a biomassa energiasűrűsége igen alacsony. Összehasonlításképpen a szén energia sűrűsége 28 GJ/t, az ásványi olajé 42 GJ/t, a földgázé 52 GJ/t, míg a biomasszáé csak 8 GJ/t (50%-os nedvességtartalmat feltételezve). A kis hatásfok miatt a szállítás, a megtermelt energia egy jelentős hányadát felemésztí, ezért a biomassa alapú energiatermelő rendszerek tervezésekor a szállítási távolság minimalizálása alapvető fontosságú (McKendry, 2002).

A biomassa alapú energiatermelésnek három nagy előnye van a többi megújuló energiához képest. Egyrészt, az összes többi energiaforráshoz viszonyítva területi eloszlása a legegyszerűsebb. Másrészt, a biomassa felhasználása nem ütközik technológiai akadályokba, az adott régió ipari fejlettségétől függően lehet alakítani a termelési folyamatot. Harmadrészt a fotoszintézis révén – melynek alapegyenletét a (7.1) formula mutatja be – a növények életük folyamán a légkörből kinyert CO₂-t építik be növekedésükkor. Így a bomlási folyamat során keletkező CO₂ mennyisége nem jelent plusz terhelést a légköri CO₂ egyensúlyra nézve.



Az első két előnynek köszönhetően az éves globális energiafelhasználás (kb. 500 EJ) mintegy 10%-a a biomassa alapú energiatermelésből származik. Ezzel a 4. helyet foglalja el az összes energiaforrás közül, a megújuló energiáknak pedig hozzávetőleg 80%-át adja (IEA, 2011). Ugyanakkor meg kell említenünk termelésének korlátait is. Egyrészt a különböző növényfajok/fajták energiahasznosítása különböző hatásfokú. Másrészt az ipari célú termesztéssel a növény- és állatvilág természetes egyensúlya felborul. Harmadrészt, a nagyobb hatásfok érdekében – hogy a bioenergia fenntartható legyen – a termesztéskor további energia bevitelére van szükség (pl. műtrágyák). Ha mindehhez hozzáadjuk a földhasználatból eredő változásokat, akkor már nem feltétlenül garantálható a CO₂ egyensúly fenntartása (Bauen et al., 2009).

7.1. Biomassa alapanyagok

Az energiatermelés céljára hasznosítható biomassa alapanyagokat négy nagy csoportra oszthatjuk: nyers fa származékokra, energianövényekre, mezőgazdasági termékekre és egyéb szerves hulladékokra (7.1. ábra).

A nyers vagy vágott fák esetén beszélhetünk a fakitermeléskor keletkező elsődleges és másodlagos maradványokról. Előbbihez az ágak apróléka és a tuskók tartoznak, utóbbihoz pedig már a fafeldolgozás során keletkező melléktermékek, úgymint fűrészpor, faforgács, fakéreg, nyesedékfa, faszén. További csoportba sorolandó a metszési hulladék. A legnagyobb csoportot természetesen a tűzifa képezi, mely a termelt biomassa energiájának mintegy 2/3-át adja.

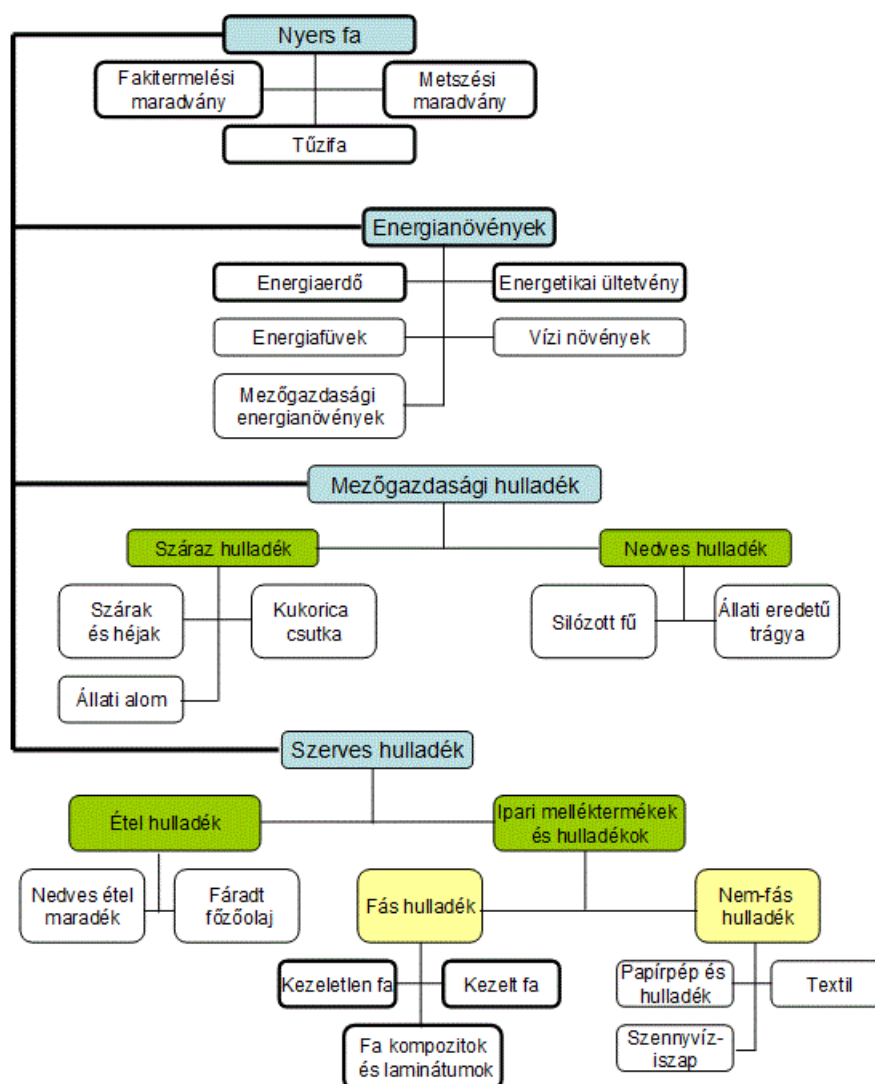
Az energianövények csoportjába kifejezetten az energiatermelés számára ültetett növények tartoznak, melyek lehetnek fás-, illetve lágyszárúak. A fás szárúak esetén két lehetőség van az üzemszerű termesztésre. Mindkettő a gyorsnövekedésű fákat részesíti előnyben (Bauen et al., 2009). A kapott faanyagot tüzelőként hasznosítják. Energiaerdőknek olyan fákat telepítenek, melyek 8–20 éves korukra érik el ideális méretüket (kb. 15 cm törzsátmérővel), és kérgük vékony (pl. eukaliptusz, éger, nyír) (McKay, 2011). A kivágott fákat általában újratelepitik. Az energetikai ültetvényeken ezzel szemben egy év után tarvágást végeznek (a gyökerek és a kis tönkők megmaradnak), mert a törzsből induló új hajtások gyorsabban növekednek. Az új növekményeket 2–5 évente le lehet vágni, az ültetvény pedig akár 30 évig is termékeny marad (DEFRA, 2004). A tönkről gyorsan növő fajok közül a fűzfát és a nyárfát részesítik előnyben. Mind a két típusú termesztésnek megvan a maga előnye. Az energiaerdő aratásakor keletkező faanyag tömörebb és jobban hasznosítható, míg az energetikai ültetvényekről összességében nagyobb mennyiségben és gyakrabban termelhető be faanyag.

A különböző lágyszárú növények nagyobb feldolgozást igényelnek. Az energiafűvek (pl. repce, cirok, elefántfü, vesszős köles) és mezőgazdasági energianövények (pl. napraforgó, szója, cukornád), valamint a nem étkezési célú búza és kukorica is a kinyerhető alapanyag függvényében dolgozhatók fel. Az olajos növényekből biodízel, a cukornövényekből bioetanol, a keményítőt tartalmazó növényekből, valamint a nagy égési energiájú növényekből fűtőtermék készül. Meg kell említenünk az energianövények sorában az algák termesztését is, melyből különböző fajtájú bioüzemanyagok nyerhetők ki.

A mezőgazdaságban a termelés során nagyon sok hulladék (10–50%) keletkezik, akár a betakarítás, akár pedig az állattartás eredményeképpen, melynek jelentős része kezeltlen vagy kezeletlenül fűtésre használható. Nedvességtartalmuktól függően megkülönböztetünk száraz és nedves hulladékot. A szárazokat égetik, míg a nedves hulladékoknál – akár komposztált fű, akár trágya esetén – főként az anaerob bomlás következtében fejlődő metángáz kinyerése a cél.

A szerves hulladékok két jellemző csoportja az ételmaradékok, valamint az ipari melléktermékek és hulladékok. Az ipari hulladékokat két csoportra oszthatjuk: fa, illetve egyéb szerves hulladékokra. A fa alapú hulladék minden esetben tüzelőként kerül felhasználásra, általában brikett formájában. A papírpép és -hulladék újrahasznosítása tüzelőként, illetve átalakítása elektromos árammá egyre nagyobb mértékben biztosítja az energiát a papíripar számára. Például 2002-ben az USA-ban a papírgyártáshoz szükséges áram több mint 40%-át, az EU-ban több mint 30%-át voltak képesek biztosítani (Metz et al., 2007). A szennyvíziszap hasznosítására két mód lehetséges: egyrészt szárítással tüzelőként, másrészt az energiaköltséges szárítás helyett, a nedves iszapban zajló anaerob bomlási folyamatokkor keletkező gázok energetikai alkalmazásával.

A különböző forrásból származó biomasszákat csoportosíthatjuk fő alkotóelemeik szerint is. Eszerint megkülönböztetünk olaj, cukor és keményítő, lignin/cellulóz alapú, illetve mikroorganikus forrásokat. Az olaj alapú források közé tartozik például a repce, napraforgó, fáradt olaj, állati zsírok; a cukor és keményítő tartalmú forrásokhoz a cukornád, cukorrépa és a különböző gabonák. A lignint és cellulózt például fából, szalmából, energia növényekből, fa és papír jellegű kommunális hulladékból lehet kinyerni.



7.1. ábra: Biomassza alapanyagok (vastag keret - a fa alapú biomassza) (Vis és van den Berg, 2010, Ladanai és Vinterbaeck, 2009).

7.2. Konverziós folyamatok

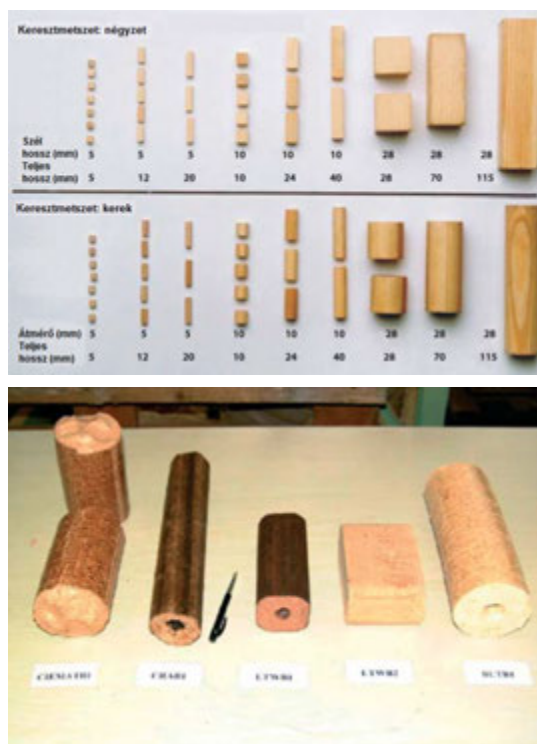
A biomasszából átalakítás során nyerhető ki a hasznosítható energia (pl. hő, elektromosság vagy folyékony üzemanyag formájában). Az egyes alapanyagok átalakítása történhet mechanikus, termokémiai és biokémiai módon, melyeket a következőkben tekintünk át. Az átalakítás eredményeképpen szilárd, folyékony, illetve gáznemű fűtőanyagot, bioüzemanyagot és hőt kapunk (Crucible Carbon, 2008).

7.2.1 Mechanikai átalakítás

A mechanikai átalakítás lehet maga a teljes átalakítási folyamat, vagy annak előfeldolgozási része. Ez az eljárás darabolást, tömörítést vagy sajtolást jelent. Legelterjedtebb formái a pellet és brikett készítés, valamint a sajtolás, melyet egyes olaj alapú növények (pl. repce) átalakításakor használnak (IEA, 2012b).

A pellet és brikett (7.2. ábra) készítését szárítási folyamat előzi meg, mely történhet szabad levegőn vagy szárítóházban. Máskülönb a megtermelt hő jelentős része a nedvesség elpárologtatására fordítódna, és kisebb lenne a fűtőértéke. A pelletek rövidek, henger alakúak, átmérőjük kisebb mint 25 mm. Készíthetők fűrészporból, nyesedékből, faforgácsból, szalmából. Az alapanyagot szükség esetén először feldarabolják, majd finom porrá zúzzák, melyet átréselnek a pellet keresztmetszetét formáló nyomórácson. A formázáskor keletkező súrlódás

elégendő hőt termel ahhoz, hogy az alapanyagban levő lignint meglágyítsa. Hűtés után a lignin ismét megszilárdul és ez tartja össze a formát. A fabrikett néhány (3–7) cm átmérőjű, henger vagy négyzetes keresztmetszetű tömörített fa. Készítésekor az alapanyagokat dugattyúhoz hasonló üzemű prés segítségével tömörítik össze, sajtolási folyamat révén (European Commission, 2005).



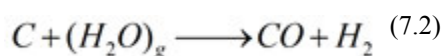
7.2. ábra: Különböző méretű és formájú pellet és brikett szabványok (BIONORM-projekt).

7.2.2 Termokémiai átalakítás

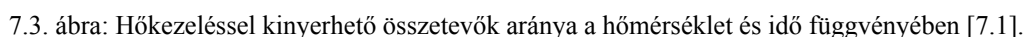
A termokémiai átalakításnak 5 fő módját alkalmazzák: a pörkölést, a pirolízist, a gázosítást, a cseppfolyósítást és az égetést. A pirolízis és a gázosítás során az alapanyagot kevesebb oxigén környezetében hevítik, mint amennyi a teljes égéshez szükséges lenne, eredményül pedig gázkeveréket, folyadékot és faszenet kapnak. A termékek égéshője függ az alapanyagtól, a hevítés sebességétől és mértékétől, a keletkező gázok reakciójától, a tartalmazott vagy hozzáadott víz mennyiségétől és a jelenlevő anyagoktól (vagy azok hiányától), melyek katalizátorként működhetnek (European Commission, 2005).

Pörköléskor az alapanyagot (jelenleg főként fát) 200–300 °C-ra hevítik és elszéneseítik. Ez hasonlít a hagyományos faszen készítéséhez, de azzal a jelentős különbséggel, hogy több gáz marad a kapott fűtőanyagban. A pörkölt fát jellemzően pelletté alakítják, így 25%-kal nagyobb tömeg-, és akár 30%-kal nagyobb energiasűrűség érhető el a hagyományos fa pellettekhez képest. Ráadásul a pörkölt biomassa tulajdonságai nagyban hasonlítanak a szénéhez, így a már létező szénérőművek átalakítása nélkül kezelhető, tárolható és felhasználható. Ez a technológia nagyüzemben jelenleg még csak demonstrációs fázisban van, évenkénti 35–60 kt kapacitással (IEA, 2012b).

A pirolízis során az alapanyagot oxigénmentes környezetben hevítik 400–600 °C közötti hőmérsékleten. Ennek következtében a biomassa lebomlik vízre és nagyon reakcióképes, kis molekulatömegű darabokra, melyek nagy része szénat alkot. A forró szén reakcióba lép a vízgőzzel, melyből nagy fűtőértékű szén-monoxid és hidrogén gáz keveréke (szintézisgáz) lesz:



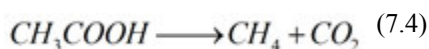
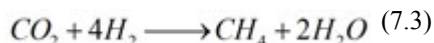
A kis molekulatömegű anyag egy része eltávolítható a reaktorból, amely ezután hűléskor rekombináldódik és kátránnyá alakul. A finom szemcseméretű hamu és részben elszénesezett biomassa a gázban maradhat, ezért



A gáz megtisztítása fontos lépés, bármelyik fenti termokémiai folyamat során keletkezik. Az a cél, hogy a füstgázok emisszióját, szennyezőanyag (pl. hidrogén-szulfid és szerves kénhidrogének) tartalmát lecsökkentsék, és megsűrjék a szilárd anyagoktól és a kémiai folyamatok során keletkezett kátránytól. Erre sokféle módszer létezik: gáz átvezetése vízen és oldószereken; szűrés elektrosztatikus csapadékkeltéssel vagy keveréssel; molekuláris sziták használata vagy hűtés, mely során a vizet és egyéb szennyezőket ki tudnak vonni; vas, kalcium, cink-oxid vagy egyéb redukáló hatású anyag használatával a kéntartalmú összetevők eltávolítása céljából. Vízen való átvezetéssel tovább csökkenthető a CO₂ mennyisége. A tisztítási folyamatok többsége csak ipari méretekben költséghatékony, kis méretű biomasszaüzemekben nem (European Commission, 2005).

Az anaerob bomláskor oxigénhiányos környezetben, különböző baktériumok bontják le az alapanyagban található polimereket, melynek eredményeképpen biogáz termelhető. Ez a gáz főleg metánt és szén-dioxidot tartalmaz, de lehet benne ammónia, hidrogén-szulfid és szerves kénhidrogén is, melyek korrozívak, mérgezők és büdösek. A folyamat több lépcsőből áll. Először az olyan polimereket, mint a cellulóz, keményítő, proteinek és lipidek hidrolízissel cukorrá, aminosavakká, zsírsavakká alakítják. Ezután acetontképző baktériumokkal ezt tovább bontják hidrogéngázzá, kis molekulatömegű savakká (elsősorban ecetsavvá) és szén-dioxiddá. Végül az így kapott termékek

két különböző úton alakulnak át metánná. A baktériumok egy csoportja a hidrogént hasznosítva a szén-dioxidból metánt termel (7.3), másik csoportja pedig az acetátot bontva fejleszt metánt és szén-dioxidot (7.4) (IEA, 2012b).



Az erjesztés az emberiség által tudatosan alkalmazott legrégebbi biológiai folyamat. Ennek során általában élesztőt használnak, hogy olyan kémiai reakciókat indítsanak el, melyek a kívánt terméket hozzák létre, azaz etanolt és szén-dioxidot. Az etanolt nemcsak alkoholos italokhoz használják fel, hanem oldószerként, adalékként és üzemanyagként is. Ezt a módszert főként cukornádra alkalmazzák, de búzára, melaszra és petrokémiai alapanyagokra is lehetséges. Az élesztő helyett enzimes konverziós folyamatokat használnak abban az esetben, ha az alapanyag keményítő, cellulóz, protein vagy zsírsav (European Commission, 2005).

Az olaj és zsír alapú források az erjesztés kivételével az összes fő átalakítási folyamattal – közvetlen égetés, pirolízis, gázosítás, anaerob bomlás és olaj kinyerés – feldolgozhatók. Az oldható szénhidrátok (cukor, keményítő) esetén az anaerob bomlás és olaj kinyerés nem alkalmazható. A lignin és cellulóz átalakítás szintén nem működhet olaj kinyeréssel, valamint az anaerob bomlás és erjesztés csak a cellulózra működik.

Összefoglalva a közvetlen égetéssel hőt termelhetünk, az anaerob bomlással gáznemű, az olaj kinyeréssel folyékony halmazállapotú feldolgozott biomasszát kaphatunk. Erjesztéssel gáznemű és folyékony fázisú másodlagos biomasszát kapunk. A pirolízissel mindhárom fázisú termék előállítható a hőn kívül, míg a gázosításnál csak szilárd terméket nem nyerünk.

7.2.4 Bioüzemanyagok

A bioüzemanyagokat attól függően, hogy az alkalmazott technológia milyen fejlettségi szinten van, illetve milyen alapanyagokat használnak, első, második vagy harmadik generációs üzemanyagokra oszthatjuk.

Az első generációbeli bioüzemanyagok ipari termeléséhez már kidolgozott technológiák állnak rendelkezésre. Ennek során bioetanolt állítanak elő cukor és keményítő alapú mezőgazdasági terményekből, biodízelt olaj alapú növényekből és állati zsírokból, valamint biometánt anaerob bomlással nedves biomasszából.

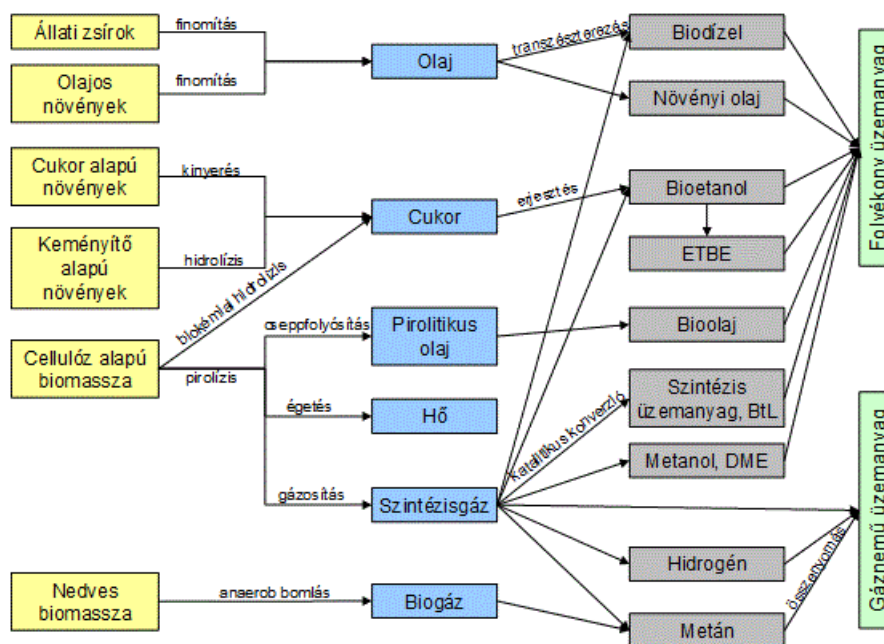
A második generáció széles skálát fed le, melyek már új alapanyagokból készülnek:

- Bioetanol és biodízel előállítása hagyományos technológiákkal, de olyan alapanyagokból, mint a kutyatejfélék (jatropha), manioka vagy japán fű (Miscanthus).

- Hagományos és új bioüzemanyag fajták (etanol, butanol, szindízel) melyeket lignocellulóz anyagokból (rostos biomassza, pl. fűfélék, fa) állítanak elő. Az előállítás bio- és termokémiai átalakítással zajlik, de ezek még csak demonstrációs szinten üzemelnek.

A harmadik generációs üzemanyagok előállítása többnyire még csak fejlesztési fázisban van, vagy még nagyon messze vannak az ipari méretektől. Ilyenek például az algából előállított bioüzemanyag, vagy a biomasszából nyert hidrogén (Kitani et al., 1999; Rutz és Janssen, 2008).

A különböző alapanyagokat először előfeldolgozással egy egyszerűbb molekula összetételű anyagra (pl. lipidek, szintézisgáz) bontják, majd további kezeléssel folyékony vagy gáznemű üzemanyagot (7.4. ábra) készítenek belőlük. Az alábbiakban az öt legfontosabb üzemanyag, a bioetanol, a biodízel, BtL, biometán és biohidrogén előállításának módjait részletezzük.



7.4. ábra: A különböző biomassza alapanyagok bioüzemanyag konverziós útvonalai (Rutz és Janssen, 2008).

Bioetanol

A bioetanol mikrobiológiai erjesztéssel állítják elő. A biomassza alapanyagát tekintve lehet cukor, keményítő vagy lignocellulóz komponensű. Alapanyagtól függetlenül a cél egy glükóz massa előállítása, melyet baktériumokkal, élesztővel erjesztenek, hogy a glükóz etanollá alakuljon. Az erjesztést követően desztillációval, majd dehidrációval kapjuk a kész bioetanol. A desztilláció során az erjesztett massa 10–15%-os alkoholtartalma 90%-ra nő, mely dehidrációval tovább növelhető 99%-ig. Attól függően, hogy mi az alapanyag, az előállítás előfeldolgozási folyamatokkal egészül ki (Cheng és Timilsina, 2010).

Cukor alapú növényeknél (cukorrépa, cukornád) a növényi glükózt egyszerűen áztatással vagy préseléssel vonják ki.

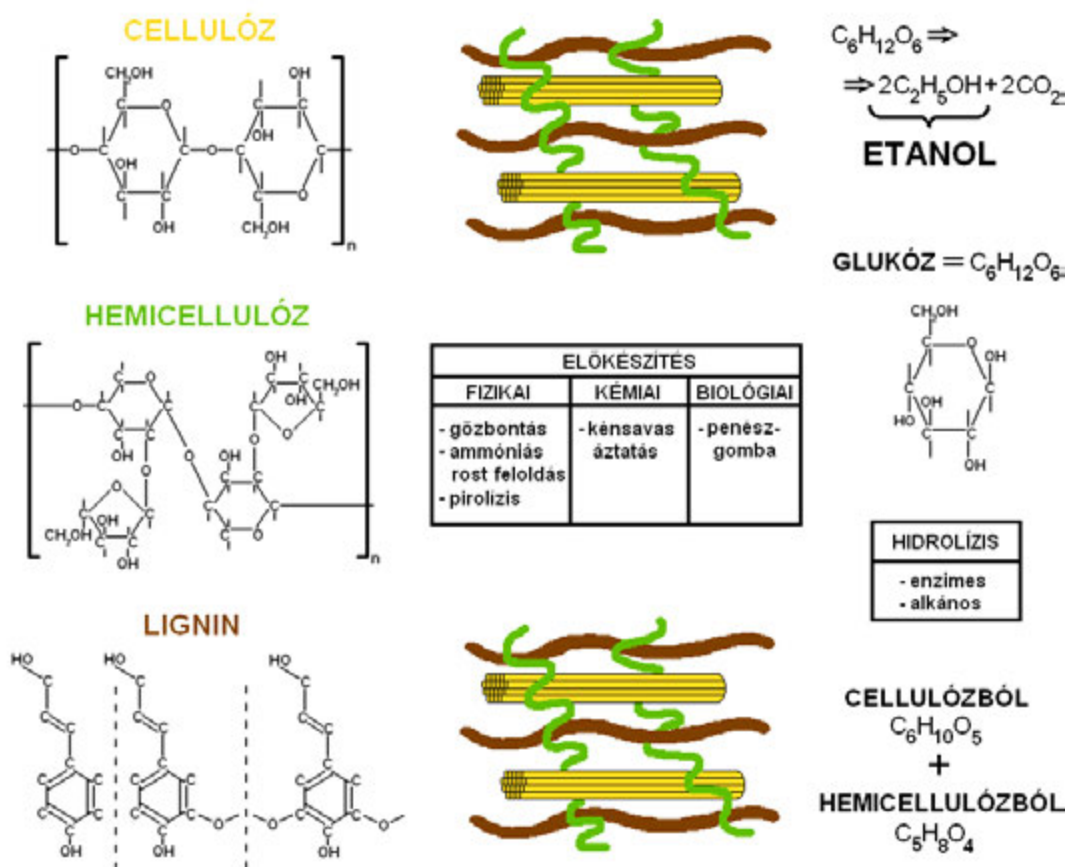
A keményítő hosszú glükóz molekulákból áll, így az erjesztés előtt szacharizációval le kell bontani a keményítőmolekulákat. Ennek során a biomasszát (pl. kukorica, búza) először beáztatják, hogy a keményítő reakcióba lépjen a vízzel, majd a masszát melegítik, hogy a növényi sejtfalak felbomoljanak. A melegítés közben amiláz enzimeket adnak hozzá, melyek a keményítőt cukorrá alakítják.

A lignocellulóz alapú (fa) bioetanol előállítása azért nehéz, mert bár a magas cukortartalmú cellulózban gazdag a biomassza, de a cellulóz molekulákat lignin tartja össze. A lignin adja a cellulózáznak a szilárdságot, és nem tartalmaz cukrot, ezért első lépésben ettől az összetevőtől kell mentesíteni az alapanyagot. Ezt úgy érik el, hogy először nagyon apró, 2 mm-nél kisebb – egyes esetekben néhány μm átmérőjű – darabokra zúzzák az alapanyagot.

Második lépésként további fizikai, kémiai vagy biológiai előkezelést alkalmaznak. A fizikai előkezelés lehet gőzbontás, melyet 160–260 °C-on magas nyomású gőzzel végeznek, mely telíti a lignocellulózatokat. A nyomás hirtelen lecsökkentése robbanásszerű dekompresszióhoz vezet és felbontja a lignocellulózt. Ehhez hasonló eljárás az ammóniás rostfeloldás is, ahol az alapanyagot kb. 100 °C-on beáztatják ammóniába, majd a nyomást hirtelen lecsökkentve felbontják a lignin és a cellulóz közti kötést. További módszer lehet a pirólízis is, melynek során a lignin folyékony halmazállapotban kerül ki a biomasszából. A fizikai előkezelések összességére elmondható, hogy nagyon hatékonyan bontják fel a lignocellulózt, de jelentős mennyiségű energiafelhasználással járnak (Cheng és Timilsina, 2010).

A kémiai előkezelés leggyakoribb formája az oldott kénsavas áztatás, melyet magas hőmérsékleten (140–190 °C) alkalmazva felbontják a lignocellulóz szerkezetet. Ezt követően az elegy szétválasztható folyékony és szilárd részre. A folyékony részben a cukorrá bomlott hemicellulóz, a szilárdban a cellulóz található. Az elkülönített szilárd terméket enzimikus hidrolízisnek vetik alá, melynek eredménye az erjeszthető glükóz massa. Egy másik kémiai

módszer az alkános hidrolízis, melyben az elszappanosítást használják fel. Itt a magas hőmérsékleten (100–170 °C) reagáló anyagok a lignocellulózból észtereket hoznak létre, kisebb molekulákra bontják a nagy lignocellulóz elemeket. Ezzel az eljárással azonban jelentős mennyiségű lignin maradhat az elegyben, mely gátolhatja az enzimes hidrolízist (Sims et al., 2008). A 7.5. ábrán a fás szárú növények etanollá alakításának fő lépései láthatók.



7.5. ábra: A ligno-cellulóz alapú növények etanollá alakításának fontosabb lépései. - animáció

A biológiai előkezeléskor fabontó penészgombákat (pl. barna-, fehérpenész) használnak. A leghatékonyabb a fehérpenész, mely a cellulózt és a lignint egyaránt bontja. Habár ez a legolcsóbb előkezelési forma, sajnos a leglassabb is, általában néhány hetet vesz igénybe. Annak ellenére, hogy a lignocellulóz alapú etanolgyártás még csak fejlesztési fázisban van, több előnnyel is járna alkalmazása, például többféle alapanyagot lehet felhasználni, nem okoz ellentéteket az élelmiszertermesztéssel, kisebb üvegházhatású gáz kibocsátással jár.

Halmazállapotát tekintve a bioetanol a benzinhez hasonló, azonban kisebb fajlagos energiaértéke miatt kb. másfélszer annyi etanolra van szükség, mint benzinre ugyanakkora energia fejlesztésére (7.1. táblázat). Átlagosan tekintve az etanol előállításához 21–36 MJ/l energiára van szükség. Ha a melléktermékekből (pl. lignin) származtatható energiát elhanyagoljuk, akkor az energiamérleg negatív.

	Sűrűség [kg/l]	Viszkozitás [mm ² /s]	Gyulladáspont[°C]	Fajlagos energia érték [20 °C-on MJ/kg]	Fajlagos energia érték [MJ/l]	Oktánszám [RON]	Üzemanyag ekvivalencia
Benzin	0,76	0,6	<21	42,7	32,45	92	1
Bioetanol	0,79	1,5	<21	26,8	21,17	>100	0,65

7.2. táblázat: A fosszilis eredetű benzin és a bioetanol fizikai tulajdonságai (Paul és Kemnitz, 2006).

Mint minden energiahordozónak, a bioetanolnak is van szennyező hatása, ezért számításba kell venni a felszínhasználattal, szállítással, konverziós folyamatokkal járó szennyezést is. A bioetanol előállításához nagy mennyiségű vízre van szükség, és a víz szennyezése is problémát okozhat. Ugyanakkor az etanol természetben is előfordul, gyorsan és természetes úton bomlik, a bomlás során azonban csökkenti a szennyezett víz vagy talaj oxigéntartalmát. Emiatt ha az etanolt keverik a benzinnel, akkor a szennyezéskor a benzin lassabban fog lebomlani. Ezzel együtt a bioetanol használata igen előnyös is lehet. Brazíliában például a cukornád ültetvényekből származó etanol segítségével mintegy 46 Mt szén ekvivalens szennyezőanyag kibocsátás csökkenéssel lehet számolni, mely Brazília fosszilis üzemanyag kibocsátásának kb. 20%-a. Ez annak is köszönhető, hogy az ország éghajlata és talajának termőképessége igen előnyös a cukornád számára, csak kevés műtrágyára van szükség. Emellett a bioetanol üzemanyagként történő alkalmazása során kevesebb (akár 25%) CO keletkezik a hagyományos üzemanyaghoz képest, valamint kénmentes, viszont a VOC és PAN kibocsátás növekszik (Rutz és Janssen, 2008).

Biodízel

Biodízelt olyan biomasszából lehet előállítani, melynek magas a lipidtartalma, ilyenek például a repce, a szója, a kókusz, a napraforgó vagy a mikroalgák és a fáradt olaj. Az előállítás két nagy fázisra osztható: (1) az olaj vagy zsír kinyerése az alapanyagból, (2) az olaj dízellé alakítása. Az előkezelés lépései attól függenek, hogy mi az alapanyag. Az előkezelés tartalmazhatja például az alapanyag szárítását, tisztítását, zúzását. Ezt követi az olajok és zsírok többnyire mechanikai kinyerése. Utána a nyersolaj, a finomítás különböző fázisain megy keresztül. Először, mivel az olaj foszfátartalma nagy, ezt el kell távolítani, mert zavarossá teszi az olajat, vízmegkötő hatása van, és növeli a szükséges katalizátoranyag mennyiségét. El kell távolítani továbbá a szabad zsírsavakat, elszappanosítással vagy észterezéssel, melyet alkohollal végeznek. Fehérítéssel eltávolítják a pigmenteket és a nyom fémeket, valamint csökkentik az oxidáció során keletkezett anyagokat. Dehidrációval pedig eltávolítják a vizet, mely a transzészterezést gátolja, és csökkenti a biodízelgyártás hatékonyságát. Ezt követően zajlik a transzészterezés, melynek során sav vagy enzim katalizátor segítségével alkohollal eltávolítják a glicerint az olajból. Ennek eredményeképpen kapunk biodízelt és glicerint (Sims et al., 2008, Cheng és Timilsina, 2010).

A lipid alapú bioüzemanyagok tulajdonságai nagyon eltérők lehetnek az előállítás különbözősége miatt. Ezzel együtt hatásfokuk jobb, mint a bioetanolé, majdnem teljes értékű dízelt lehet így előállítani (7.2. táblázat).

	Sűrűség [kg/l]	Viszkozitás [mm ² /s]	Gyulladáspont[°C]	Fajlagos energia érték [20 °C - on MJ/kg]	Fajlagos energia érték [MJ/l]	Cetánszám	Üzemanyag ekvivalencia
Dízel	0,84	5	80	42,7	35,87	50	1
Repce olaj	0,92	74	317	37,6	34,59	40	0,96
Biodízel	0,88	7,5	120	37,1	32,65	56	0,91
BtL	0,76	4	88	43,9	33,45	>70	0,97

7.3. táblázat: A fosszilis eredetű dízel és a különböző biodízelek fizikai tulajdonságai (Paul és Kemnitz, 2006).

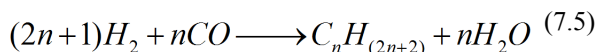
A biodízel környezetszennyező hatása kisebb, mint a fosszilis dízelé. Amellett, hogy vízben jobban oldódik, biológiailag lényegesen gyorsabban bomlik le. Ugyanakkor előállításához (tisztításkor) nagy mennyiségű vízre van szükség. A biodízel szinte teljes mértékben vegyíthető a dízel üzemanyaggal; 5%, 20%, illetve 30%-os arányban szokták keverni. Tisztán üzemanyagként használva 40–70%-os üvegházgáz kibocsátás csökkenés érhető el. Mivel a bioetanolhoz hasonlóan ez sem tartalmaz kén, ezért már a keveréssel is csökkenthető a káros anyag kibocsátása. Emellett a CO és a nagy átmérőjű PM kibocsátás is kisebb (Rutz és Janssen, 2008).

BtL (Biomass to Liquid)

A BtL (Biomass to Liquid – biomasszából folyékony) üzemanyagok előállítása viszonylag új keletű. Mivel nincs még nagyüzemi gyártásra tervezve, ezért a második generációs üzemanyagokhoz tartozik. A biodízeltől abban különbözik, hogy gyártása során szintézisgázt alkalmaznak. Előnye, hogy különféle alapanyagokból készülhet, mint például szalma, hulladékfa, energiafüvek.

A BtL üzemanyagok gyártása a CtL (Coal to Liquid – szénből folyékony) és GtL (Gas to Liquid – földgázból folyékony) üzemanyagok gyártásakor szerzett tapasztalatokon alapszik. Az alapanyagot víz és oxigén jelenlétében

először gázosítják. A gázosítás a következő három fő lépésből áll. Először alacsony hőmérsékleten karbonizálják a biomasszát (melynek kb. 15–20%-os nedvességtartalma van) részleges oxidációval levegővel vagy 400–500 °C-os oxigénnel. Így a biomassza lebomlik gázzá, kátránnyá és faszénné. A magas hőmérsékletű gázosításnál a kátránytartalmú gázt teljesen eloxidálják levegő vagy oxigén jelenlétében. Végül az endotermikus keverőágyas gázosításnál a faszént porrá zúzzák, majd befűjják a gázosítóba. A porított szén és a gázosító közeg endotermikus reakcióba lép, melynek eredményeképpen tiszta szintézisgázt kapunk. A szintézisgáz főként H₂-t, CO-t, CO₂-t és CH₄-t tartalmaz. A folyamat során az a cél, hogy minél nagyobb mennyiségű H₂ és CO legyen a gázban (Rutz és Janssen, 2008). Második lépésként megtisztítják a gázt. Erre azért van szükség, mert a gázosítás fizikai korlátai nem teszik lehetővé a kátrány teljes eltávolítását, valamint az egyéb szennyeződésektől – például a kéntől – is meg kell tisztítani a gázt. A BtL gyártás harmadik lépése az ún. Fischer-Tropsch (FT) folyamat, melynek során különböző kémiai reakciókkal a szintézisgázból szénhidrogén-molekulákat állítanak elő. A legalkalmasabb reakciók a hidrogénből és a szén-monoxidból alkánokat, valamint vizet képeznek:



legtöbb így képződött alkán egyenes láncot alkot, mely dízelgyártásra alkalmas. A CO alkánná alakítása két úton zajlik, egyrészt hidrogénezéssel, másrészt a C-O kötések hidrogénnel történő felbontásával. A reakciók fémkarbonilok segítségével mennek végbe, melyek CO ligandumai eldisszociálnak. A katalizátorként használt fémkarbonilokat jellemzően átmeneti fémek Co, Fe, Ru (ruthenium) alkotják (Cheng és Timilsina, 2010).

Amint a 7.2. táblázatból láthatjuk, a BtL üzemanyagok tulajdonságai nagyon hasonlítanak a dízel üzemanyagokra. A magas cetánszám ideális égési környezetet biztosít, szinte teljes égés megy végbe. A többi bioüzemanyaggal ellentétben a BtL NO_x tartalma jelentősen kisebb. Előnye továbbá, hogy a korábbi motorok átalakítása nélkül használható.

Biometán

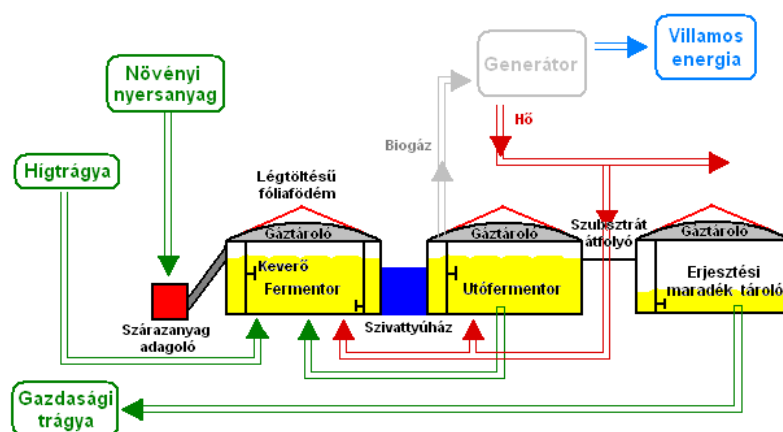
Napjaink közlekedési infrastruktúrája folyékony üzemanyagokon alapszik, ezért a gáz alapú üzemanyagok bevezetése lassú folyamat. A földgáz üzemű járművek esetén az átállás könnyebb. További előnye, hogy a biometán a leghatékonyabb és legtisztább éghető bioüzemanyag, mely napjainkban rendelkezésre áll. Szinte bármilyen biomasszából előállítható, beleértve a nedves biomasszákat is, melyek a legtöbb bioüzemanyag előállítására alkalmatlanok.

Gyártása két fő lépésből áll, a biogáz előállításából és a gáz megtisztításából. A biogázt anaerob bomlással készítik. A bomláshoz különböző baktériumtörzseket használnak, hogy a bomlás különböző fázisai a legnagyobb hatékonysággal menjenek végbe. Négy fő csoportra különíthetők el az alkalmazott baktériumok. Egy részük a komplex szerves hulladékot cukrokká és aminosavakká bontja. Más részük – az erjesztő baktériumok – az így kapott anyagokból szerves savat képeznek. A harmadik baktériumcsoport a szerves savat hidrogénné, szén-dioxiddá és acetáttá alakítja, melyből a metanogén baktériumok – a negyedik csoport – biogázt termelnek. A baktériumok aktivitása hőmérsékletfüggő, ezért legalább 20 °C-ot kell számukra biztosítani. Általánosságban ha magasabb hőmérsékletet alkalmazunk, a gyorsabb feldolgozási idő eredményeképpen, 25–40%-kal kisebb emésztőtároló is elegendő. Az emésztők típusai különböző szempontok szerint csoportosíthatók, melyeket összefoglalva a 7.3. táblázat mutat (Rutz és Janssen, 2008).

Szempon	Típus tulajdonsága
Folyamat hőmérséklete	pszichrofil baktériumok (25 °C) mezofil baktériumok (32–38 °C) termofil baktériumok (42–55 °C)
Alapanyag nedvességtartalma	nedves bomlás (szárazanyag tartalom < 15%) száraz bomlás (szárazanyag tartalom 20–40%)
Bomlási folyamat lépcsőinek száma	egy kettő több
Adagolási folyamat	szakaszos kvázi-folyamatos folyamatos

7.4. táblázat: Emésztők osztályozási elve (Rutz és Janssen, 2008).

A bomlási folyamat eredményeképpen kapott biogáz általában 6:4 arányban tartalmaz metánt és szén-dioxidot. Emellett kis mennyiségben hidrogén-szulfid és kis mennyiségben (0–2%) egyéb gázok (NH_3 , CO , H_2 , N_2 , O_2) is megtalálhatók benne (Graaf és Fender, 2010). Mivel csak a metán használható üzemanyagként, ezt el kell különíteni. A végső termék a biometán, mely 95–100%-os metántartalommal rendelkezik. A többlépcsős erjesztési folyamatot több erjesztő (fermentor) összekapcsolásával végzik (7.6. ábra). Egy ilyen üzem általában mezőgazdasági üzemek mellé telepítenek, mert így az erjesztéshez szükséges biomassa szállítási veszteség nélkül hozzáférhető. A termelt biogáz az épületek (keltetők, ólak) fűtésére és elektromos áram termelésére egyaránt felhasználható. Az erjesztés után fennmaradó sűrű pépszerű maradék pedig trágyázásra alkalmas, ezáltal csökkentve a magas nitrogén- és foszfáttartalmú műtrágyák alkalmazásának szükségességét.



7.6. ábra: Biogázüzem általános sémája.

Maga a metán magas üvegház-potenciállal rendelkezik, 100 évre vonatkoztatva minden egyes metánmolekula 23-szor jobban melegíti a légkört, mint egy CO_2 molekula. Üzemanyagként magasabb fajlagos energiával, illetve üzemanyag-egyenértékkel rendelkezik (7.4. táblázat), mint a folyékony bioüzemanyagok (7.2. táblázat). Biogáz előállításával a mezőgazdasági tevékenység során a légkörbe juttatott metán jelentős része csökkenhet, hiszen égéskor CO_2 -dá alakul. Attól függően, hogy milyen alapanyagot használnak előállításához, a biogázzal a CO_2

kibocsátás 65–85%-kal kisebb a fosszilis üzemanyagokhoz képest. Emellett az NO_x, CO és szénhidrogén mennyisége is jelentősen kisebb a biogázban, mint a jelenlegi fosszilis üzemanyagokban (7.5. táblázat).

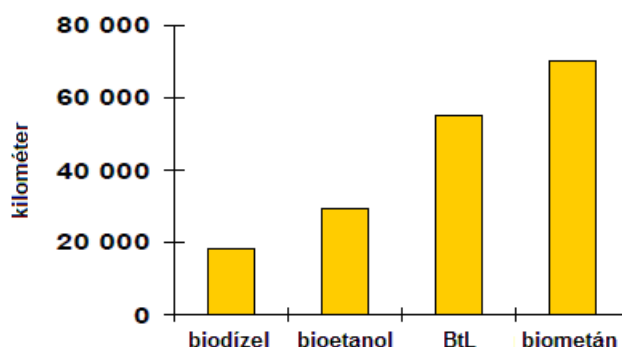
	Sűrűség [kg/l]	Viszkozitás [mm ² /s]	Gyulladáspont[°C]	Fajlagos energia érték [20°C-on MJ/kg]	Fajlagos energia érték [MJ/l]	Oktánszám [ROZ]	Üzemanyag ekvivalencia
Metán	0,72	-	-	50	36	130	1,4

7.5. táblázat: A biometán fizikai tulajdonságai (Paul és Kemnitz, 2006).

kibocsátott anyag	Benzin	dízel
NO _x	55%	80%
CO	55%	50%
PM	-	98%
szénhidrogén	80%	80%
ózon keletkezés	65%	85%

7.6. táblázat: A biometán használatával elérhető kibocsátás-csökkentés mértéke a fosszilis benzinhoz és dízelhez képest (Rutz és Janssen, 2008).

Egy másik előnye a biometánnak az, hogy mivel hulladékból állítják elő, nem igényel földterület felhasználást. Továbbá a biometán hektáronkénti energiahasznosítása közel három és félszer akkora, mint a biodízelé (7.7. ábra).



7.7. ábra: Különböző bioüzemanyagokból kinyerhető energia, szállítási kilométerekben kifejezve, 1 ha földterület használatával számítva (Costa Gomez, 2006).

Biohidrogén

A hidrogén az univerzum egyik leggyakoribb eleme. Habár a hidrogénüzemű üzemanyagcellák használata nem növeli az üvegházgázok koncentrációját, előállításukkor jelentős mennyiségű üvegházhatású gáz és egyéb káros anyag szabadulhat fel. A hidrogén előállítására számos lehetőség kínálkozik (Rutz és Janssen, 2008).

1. Elektrolízis: a víz elektromossággal H₂-re és O₂-re bontható. A kapott hidrogén rendkívül tiszta, de az eljáráshoz nagymennyiségű elektromosságra van szükség. Ideálisan ezt olyan megújuló energiaforrásokkal lehetne fedezni, mint a nap- vagy a szélenergia.
2. Gőz-metán reakció: természetes metángázból közel 1100 °C-on katalizátor jelenlétében hidrogén fejleszthető. Ez relatíve hatékony eljárás és kis költséggel jár.
3. Fotoelektrolízis: Egy félvezető segítségével a víz napfény segítségével felbontható. Az eljárás során egy fotovoltaiikus cellát vízbe tesznek, mely napfény hatására felbontja a vízmolekulákat. Még csak laboratóriumi kísérletek szintjén működik ez a technológia.

4. Hidrogén előállítása szénből: Igen környezetkárosító módja a H_2 fejlesztésnek. A technológia fejlesztés alatt áll.
5. Bio-hidrogén: egyes zöld algák hidrogént termelnek a napfény hatására, mely hasznosítható. Ez az eljárás is kísérleti fázisban van.
6. Biomassza melléktermék: A fenti átalakítási folyamatok egy részénél – például a gázosítás során – melléktermékként H_2 keletkezik.

Amint látható, a hidrogén nagyüzemi fejlesztésének még technológiai korlátai vannak. A hatékonyabb felhasználáshoz azonban új típusú üzemanyagcellákra is szükség van, ezért a hidrogén ipari méretű alkalmazására még egy-két évtizedet várni kell.

7.2.5 Konverziós technikák ipari elterjedése

A fő konverziós folyamatok kereskedelmi szinten is elérhetők, de az egyes altípusok között nagy különbségek vannak (7.8. ábra). A biomassza előkezelések közül a hidrotermikus kezelés jelenleg kutatási és fejlesztési stádiumban van. A pörkölési eljárás bevezetés alatt áll. A pirolízist napjainkban kezdik iparilag alkalmazni. A pellet és brikett készítés már jól bevált technológia az iparban.

Az anaerob bomlással végzett mikrobiológiai üzemanyagcellák használata még csak kísérleti stádiumban létezik. A kétfázisú bomlás és a biogáz feljavítás technológiáinak ipari alkalmazása még néhány évet vár magára. Az egyfázisú bomlással, valamint a szemétkerakókból és szennyvízből származó biogáz ipari előállítását viszont már megvalósították (IEA, 2012b). A közvetlen hőtermelő technológiák közül a kis méretű gázosítás még kezdeti ipari fázisban van, a gőzkazánokban és tüzelőkben felhasznált biomassza az iparban elterjedt.

Elektromos áram előállítására az égetést, az együtt-tüzelést és a gázosítás során keletkező biogázt használják. A hagyományos gőzciklussal fejlesztett ipari méretű elektromos áramfejlesztés könnyen elterjedt. Kezdeti ipari állapotban van az olyan motorok elterjedése, ahol a hővezető folyadék nem víz, hanem bioüzemanyag. A gőzüzemű biogázt használó motorok demonstrációs, illetve kezdeti ipari állapotúak. Az együtt-tüzeléskor a meglévő szénadagolást biomassza égetéssel egészítik ki.

Az égetéshez hasonlóan a gázosításnál is a motorok alkalmazása kezdeti állapotban van, míg a gőzciklussal működtetett áramfejlesztők ipari méreteket öltenek. Kísérleti és demonstrációs fázisban az üzemanyagcellákkal történő gázosítás van, míg demonstrációs és kezdeti ipari felhasználásúak a belsőégésű gáz- illetve belső gázosító kombinált turbinák.

A különböző biomassza alapanyagokra alkalmazható konverziós eljárásokat, valamint azok eredményét a 7.1. animációra kattintva lehet áttekinteni.



7.1. interaktív animáció: Különböző biomassza alapanyagok hasznosítási lehetőségei. Az alapanyagokra kattintva megjelenik az alapanyag neve, az alkalmazott eljárás, valamint az eredmény.

Üzem típusa	Termék fajtája	A termék(ek) vagy rendszer(ek) folyamatainak fejlesztési állapota			
		Alap és alkalmazott K+F	Demonstrációs	Kezdeti kereskedelmi	Kereskedelmi
Alacsony nedvességtartalmú lignocellulóz	Tömörített biomassa	Porkölés	Hidrotermális olaj (Hy olaj)	Pirolízis olaj (Py olaj)	Pelleté alakítás
	Faszén	Pirolízis			Karbonizáció
	Hő			Kis skálájú elgázosítás	Égető kazánok
		Égetés		Py / Hy olaj	Ház / központi / ipari
	Áram vagy CHP	Égetés párosítva	Stirling motor	Szerves Rankine-ciklus	Gőzciklus
		Együtt-tüzelés vagy együtt-égetés szénnel	Indirekt	Párhuzamos	Direkt
		Elgázosítás (G) vagy Integrált elgázosítás (IG)	IG-üzemanyagcella IG-gázturbina		
			IG-Kombinált ciklus	G és gőzciklus	
	Nedves hulladék	Anerob bomlás biogázzá			
			2 lépésű		Hulladéklerakó (1 lépésű)
		Mikrobiológiai üzemanyagcella	Átalakítás hidrogénné		Kis trágya emésztők
Cukor vagy keményítő növények	Hő vagy áram vagy üzemanyag		Biogáz továbbfejlesztése metánná		
			Olaj vagy gáznemű üzemanyagokká alakítás hidrotermális feldolgozással		
	Cukor vagy keményítő növények	Cukor erjesztés	Butanol		Etanol
		Mikrobiológiai feldolgozás			
		Hidrogén	Gázolaj/dízel/repülőgép üzemanyag	Biobutanol / butanol	
	Olajok növényi vagy hulladék	Üzemanyagok	Kinyerés és észterezés		Biodízel
			Kinyerés és hidrogénezés	Megújuló dízel	
			Kinyerés és finomítás	Repülőgép üzemanyag	

7.8. ábra: A biomassa konverziós folyamatok és termékek fejlesztési állapota (Chum et al., 2007).

7.3. A biomassa közvetlen hasznosításának technológiái

Amint láthattuk, a biomassa új energiahordozóvá alakítása – eltekintve a brikett és pellet készítésétől – egyes esetekben még igen költséges formája az energia kinyerésének. Ugyanakkor, ha közvetlen energianyereséget szeretnénk elérni, egyszerűbb technológiákhoz is folyamodhatunk, melynek eredményeképpen hőt vagy a hőn kívül elektromos áramot nyerünk.

7.3.1 Biomassa-hő technológiák

A biomassa felhasználásának legősibb formája az égetés. Ahhoz, hogy nagyobb hatékonyságot érjünk el, mint az egyszerű kazánok, és a lehető legkisebb mértékben szennyezzük környezetünket, valamint a lehetőségekhez képest a legkisebb befektetéssel tegyük mindezt, új eljárásokra van szükség.

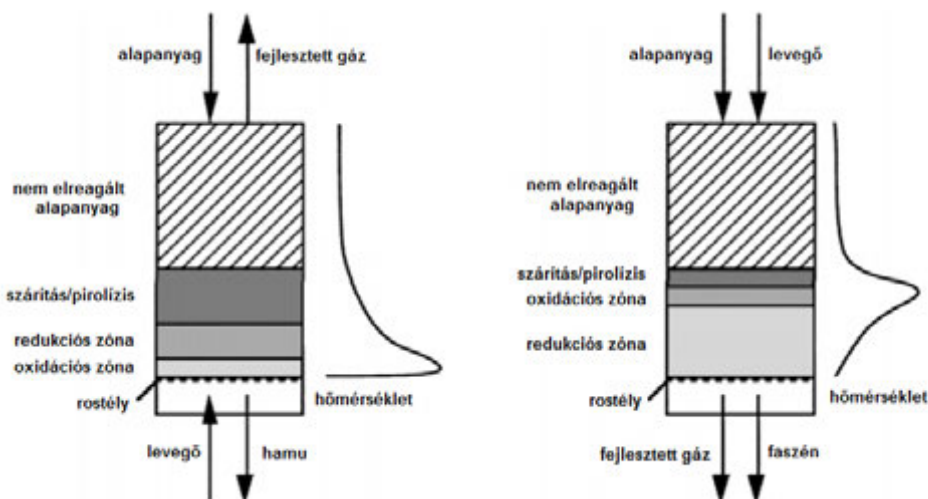
Égetés

A fa és egyéb szilárd biomassa közvetlen égetése a legrégebbi és leghozzáférhetőbb energiaforrás, és jelenleg is ez teszi ki a biomassa-felhasználás legnagyobb részét. Mivel ipari méretekben is elterjedt, ezért a fejlesztések a több alapanyagú teljes teljesítmény és az áram- és hőfejlesztés hatékonyságának növelésére irányulnak.

Szociális és gazdasági körülményektől függően a háztartási égetési technológiák hőhatékonysága nagy skálán mozog. A nyílt tűzhelyek, kandallók hatásfoka -10% és 10% között mozog. A negatív hatásfok nem megfelelően szigetelt körülmények között lehetséges, amikor nagy mennyiségben keveredik be hideg levegő az égéstérbe, és összességében több energiát fogyaszt, mint termel. Ilyen főként fagypont alatti külső hőmérséklet esetén fordul elő (Bauen et al., 2009). A fejlett országokbeli hagyományos tűzhelyek hatásfoka 10–15%, míg a forgáccsal vagy pellettel üzemelő fűtőberendezések a 90%-ot is elérheti. Fejlett biomassza gőzkazánok hőhatékonysága 100% feletti is lehet, ha az égetéskor felhasznált levegőt nedvesítik, mielőtt a gőzkazánba kerülne, és a füstgáz kikondenzálódik, amikor kilép a kazánból (Westermarck, 2006). Ez a kondenzációs energia többletet jelent a biomassza égési energiájához képest.

Technológia

Ahhoz, hogy a betáplált biomassza teljesen elhasználódjon és kis méretben is hatékony legyen az égetés, felső adagolású, alsó légbefúvós gőzkazánokat fejlesztettek ki, melyeknek két égési fázisa van: pirolízis és oxidációs zóna (7.9. ábra bal oldali része). Kis mennyiségű alapanyag betáplálása kerülendő, mert az túl sok emisszióval jár. Ezért ajánlott hőtárolóval összekapcsolni a fatüzelésű gőzkazánokat. Mivel a pelletek automatikus adagolása könnyű, ezért egyre inkább kezdenek elterjedni a kisebb háztartásokban is. A pellet alacsony nedvességtartalmának köszönhetően magas fűtőérték érhető el. A pellet kazánokban (7.10. ábra) a belső kerámiaszigetelés és víztartály biztosítja a hőmegtartást. Az utóbbi 10 évben a folyamatos fejlesztések eredményeképpen a kezdeti 60%-os hatékonyságot 80–90%-ra emelték, míg a VOC és kátrány kibocsátást századára csökkentették. A felső légbefúvós kazánokat (7.9. ábra jobb oldali része) főként faforgácsok és hasonló alapanyagok égetésére használják, melyeknek alacsony a hamutartalma, míg a rostélyos kazánokat magas hamu- és nedvességtartalom esetén is lehet alkalmazni. A szalmabálák égetésére speciális égetőket fejlesztettek ki.



7.9. ábra: Alsó légbefúvós (bal oldalon), felső légbefúvós kazán (jobb oldalon) (Kitani et al. 1999).



7.10. ábra: Pellet kazán.

Az álló vagy buborékolatós fluidágyas gőzkazánokat ipari méretekben alkalmazzák hulladékfa vagy a papíripari hulladékok feldolgozására. A fluidágyas gőzkazánokban közel homogén hőmérséklet- és koncentrációeloszlás érhető el, s ezzel relatíve kevés levegő felhasználásával az alapanyagok jelentős része elégethető. A fluidágy különböző típusú összetevői további lehetőséget biztosítanak katalitikus reakciókra. Továbbá a fluidágy hőjének kivonásával irányítható az égési hőmérséklet, mellyel csökkenthető a hamuképződés és az NO_x kibocsátás is.

Együtt-tüzelés

Az együtt-tüzelés nem más, mint egynél több tüzelőanyag egyidejű égetése. Ezt a módszert már létező szén- vagy gázerőművekben lehet alkalmazni; a biomassa a tüzelőanyag 3–20%-át adja. Az együtt-tüzelés a legkisebb költséggel járó megújuló energia hasznosítási forma, mely napjaink hatékony elektromos áramfejlesztő erőműveinek kiegészítésével elérhető. Mivel a biomassa kisebb mennyiségben tartalmaz kén- és metánvegyületeket, ezért nem csak a CO_2 , hanem más szennyező anyagok kibocsátása is csökkenthető.

Ideális a lokális forrású biomassa használata, de a legtöbb erőmű importálja ezeket. Például pelletet Kanadából, vagy olívahulladékot a mediterrán vidékről.

Biomassa adagolási módszerek

A biomassa négyféleképpen adagolható az ilyen üzemekben (Van Loo és Koppejan, 2008):

1) Előkeverés

Amikor a bioüzemanyag aránya kicsi, együtt adagolható a szénrel a szénmalomba, hogy aztán együtt égessék el őket. Ez a legegyszerűbb módszer, és ez igényli a legkisebb befektetést. Másrészt azonban ez a technológia hordozza magában leginkább azt a veszélyt, hogy meghibásodik az üzemanyag-adagoló.

2) Közvetlen együttes adagolás

Ennél a lehetőségnél a biomassa külön előkezelése, aprítása történik. A porított biomasszát közvetlenül az égetőbe juttatják. Az égető előterébe több szállító csövet kell beszerezni, melyek könnyen eltömődhetnek.

3) A biomassa és szén külön égetése

Ennél a típusnál egészen az égetési fázis végéig külön kezelik a biomasszát és az alap-tüzelőanyagot. Habár ez a legdrágább eljárás, itt kell számolni a legkisebb meghibásodási aránnyal.

4) A biomassa újraégetése a felső kemencében

Ekkor a biomasszát arra használják, hogy az NO_x emissziót csökkentsék. A bioüzemanyag égetése egy speciálisan kialakított újraégető-rendszerben történik, a kemence felső végén. Ez még kísérleti fázisban van.

Hőfejlesztés kapcsolása

Az együtt-tüzelésre három módszer létezik.

1. Közvetlen együtt-tüzelés (7.11a. ábra)

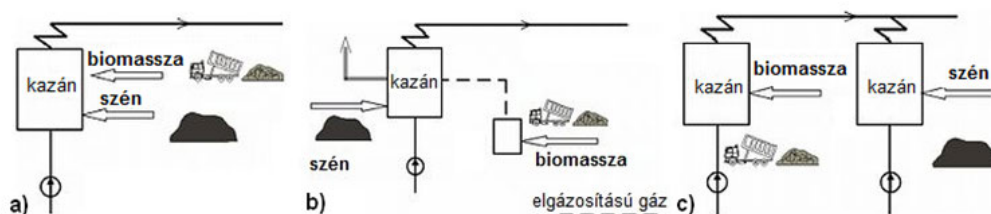
Ez a legolcsóbb, legegyszerűbb és leginkább alkalmazott eljárás. A biomasszát közvetlenül juttatják a kemencébe a szénrel együtt. Előfeldolgozása történhet előkeveréssel vagy közvetlen együttes adagolással. A több típusú üzemanyagot felemésztő fluidtüzelésű üzemek akár 90% feletti hatékonyságot is elérhetnek, és a füstgáz kibocsátás alacsonyabb, mint a hagyományos rostélyos égetésnél, mert alacsonyabb hőmérsékleten zajlik az égetés.

2. Indirekt együtt-tüzelés (7.11b. ábra)

Ebben az esetben a biomasszát először gázosítják, majd a képződött gázt a fő fűtőegységben tüzelik el. Előfordul, hogy a gázt előtte le kell hűteni és tisztítani, mely bonyolultabbá és költségessé teszi a működést. Ugyanakkor ez a módszer széles skálájú alapanyag-használatot tesz lehetővé. Mivel a gázosítás külön zajlik, ezért a szénből és biomasszából származó hamu el van különítve. Továbbá amiatt, hogy a nagyon eltérő vegyi összetételű és fizikai tulajdonságú alapanyagokból eredő problémákat a fő égetés előtt megoldják, ezért a gőzképzés hatékonysága nem sérül.

3. Párhuzamos együtt-tüzelés (7.11c. ábra)

Nevéből adódóan a biomassza égetése és a gőzfejlesztés külön zajlik, csak a különböző források által generált gőz kerül be a turbinákhoz. Ez a módszer leginkább a papíriparban terjedt el, ahol kifejezetten a termeléshez használt és hulladékként jelentkező biomassza számára épített gőzgépek vannak. Ennek segítségével gazdaságosabbá tehetik működésüket és növelhetik energiahatékonyságukat.



7.11. ábra: Hőfejlesztés kapcsolási rendszerek: a) közvetlen, b) indirekt, c) párhuzamos együtt-tüzelés [7.1].

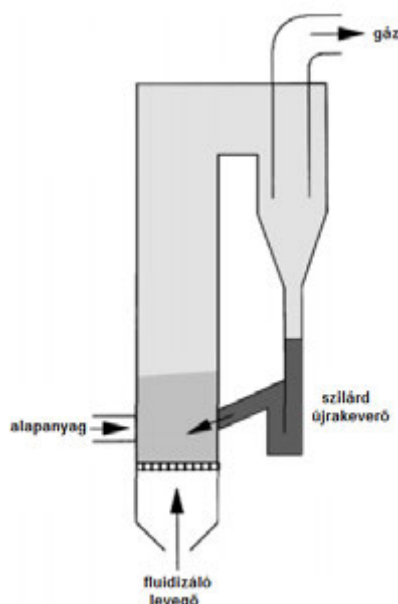
Technológiák

1. Fluidágyas tüzelő

A technológia a fűtőanyag és levegő fluidizált mozgásán alapszik. Széntüzelésű erőművekben elterjedt alkalmazás. A tüztérben található fluidágy – mely többnyire homokból készül – olyan közeget képez, mely magas égési hőmérsékletet biztosít a lehetséges szennyeződések, alacsony energiatartalom vagy magas nedvességtartalmú alapanyag ellenére. Az elsődleges légbefúvó mozgásban tartja a fluidágy alapanyagát (olyan lesz a részecskék mozgása, mint a forrásban levő folyadéknak), míg a másodlagos légbefúvó a kazán magasabb részein táplálja a levegőt, hogy több szakaszban biztosítson teljes égést. Az ágy hőmérséklete 750–950 °C, mely meggátolja az NO_x keletkezését és biztosítja az alacsony hamuképzésű alapanyagok elégetését. A fluidágy alapanyagát mészkővel vagy dolomittal kiegészítve a SO₂ szennyezés is csökkenthető. Az égéstérben a fluidágy 90%-a homok és hamu, a maradék pedig az üzemanyag (Kitani et al., 1999; Boross és Czinder, 2004). Kis befektetés szükséges ahhoz, hogy biomassza üzemre alakítsanak át egy már létező erőművet. Két fő típusa, a cirkulációs (7.12. ábra, 7.6. táblázat) és az álló fluidágy a legelterjedtebbek.

A cirkulációs folyamattal több különböző tulajdonságú alapanyag hatékony égetése oldható meg. Az ágy anyagának cirkulációja és az égéstérben levő nagy turbulencia biztosítja az alapanyag és az égési levegő jó keveredését, mely egyben hatékonyan szállítja a hőt a kazán belső felszínén. Egy hatékony részecske elkülönítő, az ún. ciklon a folyamat lelke, mely különbséget jelent az álló fluidágyas megoldáshoz képest. A ciklon elkülöníti

a bizonyos szemcseméretnél nagyobb részecskéket a füstgázból és visszajuttatja a kazán aljára. A ciklon szerepe, hogy az el nem égett részecskéket az égéstérbe visszavezetve égésre bírja.



7.12. ábra: Cirkulációs fluidágyas kazán sematikus ábrája (Kitani et al., 1999).

Levegő helyett túlnyomáson is lehet alkalmazni ezt az eljárást, mely hasonló alapelven működik, mint a légbefúvásos, kivéve, hogy az égetés a légköri nyomásnál magasabb nyomáson zajlik. Itt veszélyforrásként jelentkezik a reaktor nyomástűrő képességének túllépése.

	Álló fluidágy	Cirkulációs fluidágy
Alapanyag	Jó bioüzemanyagokhoz (nedvesség<63%)	Nedves alapanyagokkal limitált (nedvesség<58%)
	Alacsony szénarány (max. 30%)	Teljes szén kapacitás
	Teljes kapacitás olaj és gáz használatával	Olaj és gáz felhasználás max. 40%
Folyamat	Durva szemcséjű ágy alapanyag	Finom szemcséjű ágy alapanyag
	Alacsony fluidizáló sebesség	Magas fluidizáló sebesség
Működés	Alacsony áramfogyasztás	Magasabb áramfogyasztás
	Kis kopás	Kopás lehetséges
	Alacsony fenntartási költség	Szemcsézettebb => magas fenntartási költség
Teljesítmény	Jó hatékonyság	Jó hatékonyság
	Alacsony NO _x kibocsátás	Nagyon alacsony NO _x kibocsátás
	Alacsony N ₂ O kibocsátás	Magasabb N ₂ O kibocsátás
	SO ₂ szűrés korlátozott mészkővel	Hatékony SO ₂ szűrés mészkővel

7.7. táblázat: Az álló és cirkulációs fluidágyas kazánok főbb tulajdonságainak összehasonlítása [7.1].

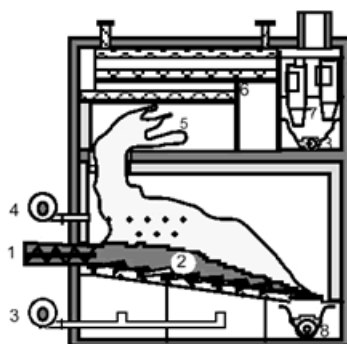
2. Porított alapanyag égető

Ennél a technológiánál, bármilyen alapanyagot is használjanak (szén vagy biomassza), az égetést megelőzően azt 1 mm-nél kisebb átmérőjű szemcsékké porítják. Kevesebb típusú alapanyagot lehet hozzá felhasználni, de mégis ez a világon a legelterjedtebb elektromos áramfejlesztő technológia. Ennek egyik oka a csökkentett emisszió, habár az alacsonyabb energiasűrűség miatt nagyobb mennyiségű biomasszára van szükség. A porégetés

folyamatát nehéz irányítani, és túlzottan magas ($>1200\text{ }^{\circ}\text{C}$) égési hőmérsékletek is előfordulhatnak, mely nagy NO_x kibocsátással jár. A közvetlen együttadagoláson kívül azonban az összes adagoló eljárás alkalmazható.

3. Rostélyos tüzelő (7.13. ábra)

Az alapanyagot ez esetben egy mechanikus rácson (rostélyon) égetik, mely a tüzelőanyagot lépcsős, vándor vagy vibrációs eljárással vezeti át a kazánon. Ahogyan az alapanyag szállítódik, az égetéssel a nedvesség elpárolog, a keletkező hamut összegyűjtik és elvezetik. A rostély alatti levegő utánpótlás gyakran szakaszos, hogy jobban lehessen szabályozni az égést. Habár ez a legrégebbi és legegyszerűbb módja a szilárd tüzelőanyagok égetésének, ez a legkevésbé hatékony is, ráadásul jelentős füstgáz kibocsátással is jár. A többi technológiához képest a kamrán belüli hőmérséklet nagyobb, $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ között változik. A fa alapú tüzelőanyagok használata nem ütközik semmilyen akadályba, azonban más típusoknál több probléma is felléphet az összetétel és nedvességtartalom miatt.



7.13. ábra: Vibrációs rostélyos tüzelő (1 – alapanyagbekeverő, 2 – vibrációs rostély, 3 – alsó légbefúvó, 4 – felső légbefúvó, 5 – égéstér, 6 – fűtéstér, 7 – ciklon, 8 – hamugyűjtő) [7.1].

A direkt tüzelésű kazánok energiatermelése a házi kályháktól ($1\text{--}10\text{ kW}$) az ipari méretű hő- és áramfejlesztőkig ($> 5\text{ MW}$) terjed. A közepes teljesítményű berendezések a családi házak fűtésére alkalmas kis kazánoktól ($10\text{--}50\text{ kW}$), a kerület vagy falu fűtésére elegendő teljesítményt adókig ($150\text{--}1000\text{ kW}$) széles skálán mozog. Az együtt-tüzeléssel már nagy teljesítményű ($>100\text{ MW}$) üzemek is kialakíthatók. A különböző típusú biomassza tüzelő berendezések jellemző alkalmazási tulajdonságai a 7.7. táblázatban találhatók.

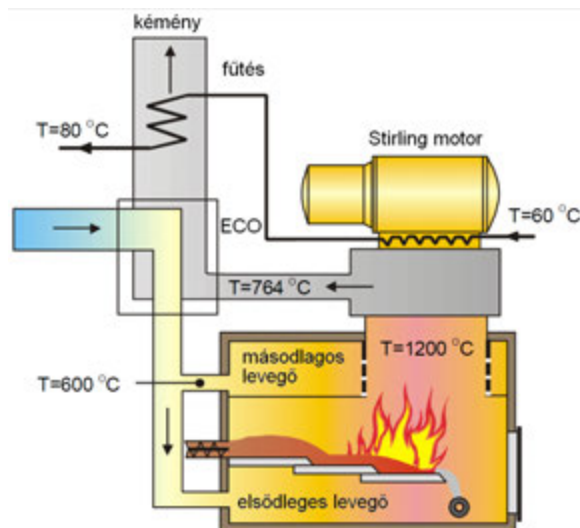
Alkalmazás	Típus	J e l l e m z ő teljesítmény	Alapanyagok	H a m u - tartalom	Víz- tartalom
Kézi	Fa kályha	2 kW – 10 kW	száraz hasadék fa	<2%	5%–20%
	Fahasáb kazán	5 kW – 50 kW	hasábfa, ragadós fa hulladék	<2%	5%–30%
Pellet	Pellet kályhák és kazánok	2 kW – 25 kW	fa pellet	<2%	8%–10%
Automatikus	Alsó tüzelésű kemence	20 kW – 2,5 MW	faforgács, fa hulladék	<2%	5%–50%
	Mozgó rostélyos kemence	150 kW – 15 MW	minden fa alapú bioüzemanyag, legtöbb biomassza	<50%	5%–60%
	Rostélyos előfűtő	20 kW – 1,5 MW	száraz fa (hulladék)	<5%	5%–35%
	Alsó tüzelésű, mozgó rostélyos kemence	2 MW – 5 MW	nagy nedvesség tartalmú faforgács	<50%	40%–65%
	Szalmbála égető	3 MW – 5 MW	szalmbála	<5%	20%
	Szemesbála égető	3 MW – 5 MW	szemesbála	<5%	20%
	Szalma égetők	100 kW – 5 MW	szalmbálák és maradványok	<5%	20%
	Álló fluidágyas	5 MW – 15 MW	különböző biomassza, d < 10 mm	<50%	5%–60%
	C i r k u l á c i ó s fluidágyas	15 MW – 100 MW	különböző biomassza, d < 10 mm	<50%	5%–60%
	Porégető	5 MW – 30 MW	különböző biomassza, d < 5 mm	<5%	<20%
E g y ü t t - tüzelés	Álló fluidágyas	összesen 50 MW – 150 MW	különböző biomassza, d < 10 mm	<50%	5%–60%
	C i r k u l á c i ó s fluidágyas	összesen 100 – 300 MW	különböző biomassza, d < 10 mm	<50%	5%–60%
	Szalmbála és porégető	szalma 5 MW – 20 MW	szalmbála	<5%	20%
	Szénégető	összesen 100 MW – 1 GW	különböző biomassza, d < 2 – 5 mm	<5%	<20%

7.8. táblázat: A különböző biomasszatüzelők főbb tulajdonságai [7.1].

7.3.2 Kogeneráció

A fűtésre szolgáló alapanyagok nem csak hőtermelésre, hanem a hő felhasználásával gőzfejlesztésre és gőzturbinák által elektromos áram termelésére is alkalmasak (7.14. ábra). Az ilyen kombinált hő- és áramfejlesztő üzemeket rövidítve CHP-nak (combined heat and power) nevezzük. A kombinált energiatermelés elve egyszerű. A hagyományos áramfejlesztés átlagosan 35%-os hatékonyságú, az energiapotenciál akár 65%-át bocsátják ki hőfeleslegként. A legújabb kombinált ciklusú üzemekben a hatékonyság 55%-ra emelhető, ha az elektromosság szállításából és elosztásából származó veszteségeket nem vesszük figyelembe. A hő felhasználásával a CHP üzemek hatékonysága 90%-nál nagyobb is lehet.

Az üzemek telepítése és mérete a helyi forrásoktól és igényektől függ, máskülönben a költség már nem térül meg. A berendezések és üzemek kapacitása nagyon széles skálán mozoghat, a családi házak ellátásától a nagyüzemi méretekig. A kogenerátor négy fő része a motor, az elektromos áramfejlesztő, a hővisszanyerő és az ellenőrző rendszer. Az egyes kogenerátorok fajtáit a motor és betáplált alapanyag alapján lehet elkülöníteni. A meghajtó egység lehet dugattyús, gőz-, illetve gázturbina, valamint ezek kombinációja. Az alapanyagok általában biogáz és folyékony bioüzemanyagok (Ranalli, 2007).



7.14. ábra: A biomassza-tüzelésű, kapcsolt energiatermelést megvalósító Stirling-motor sémája (Büki, 2010).

7.3.3 Bioüzemek

A bioüzemek a biomassza-feldolgozás során különböző termékeket – üzemanyagot, hőt, vegyi anyagokat – állítanak elő. A folyamatos működéshez egész évben rendelkezésre álló biomasszára van szükség. Ilyenek például a mezőgazdasági termékek és hulladékok vagy az energianövények. Ha az alapanyagok nagyon eltérnek egymástól, akkor el kell őket különíteni és típusonként meghatározott előfeldolgozást kell alkalmazni. A feldolgozáskor keletkező köztes termékeket különböző gyártási folyamatok elemeként fel lehet használni. A végeredmény a bioüzemanyagok és termékek széles skáláját fedi le, melyek egy része már napjainkban is működik üzemi szinten, más része még fejlesztés alatt áll. Mint a legtöbb üzem esetén, itt is elsődleges szerepe van a gazdaságosságnak. Egyes konverziós folyamatok, mint például a gázosítás túl drága lehet egy ilyen üzemben. Ugyanakkor a biomassza hosszútávú beszerzése olcsóbb, mint a fosszilis tüzelőké. A közeljövőben a bioüzemek elterjedése még nem valószínű, hiszen egyelőre nem lehet felmérni az üzemek gazdasági előnyeit évtizedekre előre. Egyetlen (gazdaságilag is) versenyképes előnyük a fenntarthatóság, és hogy üvegházgáz kibocsátásuk minimális (European Commission, 2005). Kérdés azonban, hogy az azonnal érvényesülő haszon, illetve a hosszútávú környezetterhelés csökkentés ellentéte feloldódik-e valaha.

7.4. A biomassza hasznosításának története

Láthattuk, hogy a biomassza használatának története egészen az ősemberig nyúlik vissza, az egyes átalakítási és alkalmazási technológiák azonban csak a XIX. sz. végén jelentek meg, és csak a XX. sz. végén kezdtek elterjedni.

1812-ben Londonban először mutattak be pirolízis üzemelt, mellyel olajat lehet előállítani. 1840-ben Franciaországban üzembe helyezték az első biomassza alapú gázegetőt. Az 1860-as évektől kezdve a főzés, fűtés, gőzmozdonyok és gőzhajók elsődleges fűtőanyaga a fa volt, melyet csak 30 évvel később váltott fel a szén. Az így termelt gőzből az 1870-es években már elektromos áramot generáltak. A német Nicolaus August Otto felfalta a robbanómotort, melyet 1876-ban etanollal is működtettek. Néhány évvel később Henry Ford az első kísérleti autót szintén etanollal hajtotta meg. 1900-ban a szintén német Rudolf Diesel demonstrálta, hogy dízelüzemű motorjai mogyoróból sajtolt olajjal is képesek működni. A T-Model megépítésekor (1908) Henry Ford arra számított, hogy a közlekedési eszközök fő üzemanyaga az etanol lesz, ezért Kansasban etanol üzemelt épített. A széntüzelés csak 1910-től jelent meg a háztartásokban, habár az iparban már 20 éve használták. Az 1930-as években a kerozin és üzemanyagolaj

átvette az elsődleges energiahordozó szerepét a gazdaságban. Az Amerikai Egyesült Államokban a '30-as évek közepéig az autókat etanollal hajtották meg, melyet a második világháborút követően a piacon megjelenő alacsony árú és nagy mennyiségű benzin váltott fel. Az 1950-es években az elektromos- és gázfűtés felváltotta a fatüzelést a legtöbb otthonban és kereskedelmi létesítményben. A biomassza, mint megújuló energiaforrás azonban csak az 1970-es évektől került előtérbe. Ebben az időszakban a fosszilis üzemanyagok árának jelentős emelkedése miatt alternatív energiaforrás után kezdtek el kutatni. Elsők közé tartozott az elgázosítás technológiájának és az erre épülő gázüzemű autóknek a kifejlesztése, illetve energiatranszportja [7.2].

A biomasszát megújuló energiaforrásként 1975-ben fogadták el hivatalosan. A biomasszán alapuló energiatermelés kis skálájú használata ez időben terjedt el. Habár a biomassza-kazánok és -kályhák működésének alapjait már 1930-ban véglegesítették, csak az 1970-es évektől kezdve váltak népszerűvé. Az 1980-as években jelentek meg azok a generátorok, melyeket fatüzeléssel fűtöttek. 1982–1983-ban kisüzemeket építettek, melyekben hulladékfából képesek voltak elektromosságot termelni. Eredetileg ezek az üzemek fűrészpont használtak, de a fakitermelés növekedésével egyéb fa, mezőgazdasági és kommunális hulladék is alkalmazásra került. Az 1990-es években a fosszilis üzemanyagok árai szabályozottak lettek, mely jelentősen visszavetette a fejlesztéseket. Ezzel párhuzamosan az USA-ban az oxigénezett (etanollal kevert) üzemanyagok használatára kötelezték azokat a területeket, ahol a CO₂ szennyezés nagyon magas – ezáltal az etanolgyártás ismét elkezdett növekedni. 1992-ben, Kanadában az etanol üzemanyagokat adómentessé tették. A 2000-es években a kimerülő szén és kőolaj tartalékok, az atomerőművek balesetei és az üvegházhatású gázok csökkentésére irányuló törekvések következtében újra lendületet kapott ez az ágazat. Ekkor jelentek meg az energianövények és a hozzájuk kapcsolódó kutatások.

A biomasszát hasznosító technológiák fejlődési irányai szerteágazók (7.8. táblázat). A biomassza alapanyagok (új energianövények), a közvetítés, az átalakítás, a végtermékek és az integrált rendszerek fejlesztése egyaránt folyamatos és sokrétű. Egyes fejlesztések, mint például az etanol előállításához szükséges energiabevitel 10–30 MJ/l-rel történő csökkentése, a 2020-as évekre már megvalósulhat. Ugyanakkor az algatelepek teljes kihasználhatóságát csak a 2050-es évekre prognosztizálják. A különböző fejlesztési irányok összefoglalása a 7.8. táblázatban található.

Felhasználási fázis	Feltörekvő technológiák	Jövőbeli technológiák
Biomassza alapanyagok	- új energiafűvek - új olajnövények - biohulladék-kezelés	- új erőművek - vízi biomassza (algák) - kiseb energiabefektetéssel járó mezőgazdasági rendszerek - informatikai módszerek alkalmazása a felszíni és biológiai rendszerkezelésekben
Ellátó rendszerek	- új agrotechnikák (aratás) - ellátó hálózat logisztikai fejlesztése - egyéb egyszerű előkezelések (pl. ártmosás) - biomassza sűrítés	- biofinomítók - biotechnológia alapú minőség-ellenőrzés a teljes beszerzési láncban - informatikai eszközök használata a beszerzési hálózat és kezelés optimalizálására
Átalakítás	- fejlesztett égetés - együtt-tüzelés - gázosítás - pirolízis - bioetanol cukorból és keményítőből - bioetanol lignocellulóz anyagokból	- biohidrogén (biomassza konverzióból) - plazma alapú konverziók - meglévő biokonverziós technikák fejlesztése - új konverziós utak (pl. elektrokémiai) - új módszerek az alsó légbefűvős feldolgozásra (pl. pirolitikus folyadékok vagy FT-bioüzemanyagok esetén)

	• biodízel növényi olajokból • anaerob bomlás fejlesztése	
Végtermékek	• biohő • fejlesztett szilárd biotüzelők (pl. pelletek) • közlekedési bioüzemanyagok • bioelektromosság	• hidrogén használata üzemanyagcellákban • FT bioüzemanyagok használata új típus motorokban (pl. kombinált robbanó motorok) • új biotermékek • komplex, több termékű rendszerek • CO₂ elnyelés; más új végtermékek (pl. zárt rendszerek)
R e n d s z e r integráció	• standardok létrehozása • legjobb gyakorlat • gazdasági és ökológiai modellezés és optimalizáció	• informatikai alapú kezelés • szocio-technológiai és esztétikai kivitelezés • fenntarthatóság kialakítása globális és lokális hatások figyelembevételével

7.9. táblázat: A biomassza technológiai fejlesztéseinek jövőbeli irányai [7.1].

Közülük kiemelten fontos szerepe van az algatenyészetek alkalmazhatóságának (FAO-Report-44, 2010). Algákat szinte bárhol lehet termeszteni, ahol elegendő napfény, CO₂ és víz áll rendelkezésre. Mivel az algáknak több fajtája van, ezért olyan területeken is termesztethetők, ahol a hőmérséklet alacsony (akár 5 °C alatti). Termesztésükhöz nincs szükség talajra, így mezőgazdasági termelésre alkalmatlan területeken is lehet üzemeket létrehozni, ráadásul a mezőgazdasági növényekhez képest lényegesen nagyobb mennyiség, akár 70 t/ha szárazanyag nyerhető ki belőlük. A kísérleti üzemekben általában szennyvizet áramoltatnak az algákat tartó berendezésekben, melyek a vízben található anyagokat bontva a kapott CO₂-t használják fel. Attól függően, hogy milyen algákat alkalmaznak, kinyerhető belőlük hidrogén is, vagy éppen élelmezési célokat is szolgálhatnak magas vitamin és tápértéküknek köszönhetően. A számtalan alkalmazási terület mellett további előnye az algák hasznosításának, hogy a korábban bemutatott biomassza termékek szinte összes típusa előállítható belőlük (7.15. ábra). Jelenleg azonban még csak fejlesztési, illetve demonstrációs fázisban van az algarendszerek kiépítése.



7.15. ábra: Az algatelepek ipari felhasználásának lehetőségei (FAO Report-44, 2010).

7.5. Magyarország biomassza energia hasznosítása

Magyarország köztudottan mezőgazdasági ország, s ez a megújuló energiaforrások felhasználását tekintve is igaz. 2009-ben hazánkban összesen 65 PJ biomassza eredetű energiát állítottak elő, mely az összes megújuló forrásból származó energia mintegy 92%-a. Ennek jelentős része az erdőgazdálkodásból származó szilárd biomassza tüzelésből és az ebből előállított elektromos áram fejlesztéséből adódik. A 65 PJ a globális biomassza alapú energiatermelésnek mindössze 1,2%-e.

Hazánkban több, közepes méretű biomassza erőmű üzemel, ezek közül a legnagyobbak a Mátrai erőmű (103 MW), a Pannongreen cégcsoport (85 MW), az AES Borsodi Erőmű (80 MW), az Oroszlányi Erőmű (49 MW), az Ajkai Erőmű (33 MW) és a Bakony Bioenergia cégcsoport erőműve (30 MW). A közepes méretű erőművek többsége erdészeti vagy ipari fahulladékot használ, de például a Pécsi Erőmű 50 MW-os erőművet 2012-ben szalmaerőművel egészítették ki, mely 35 MW teljesítménnyel bővítette az áramfejlesztést. Kis (2–7 MW) kapacitású biomassza erőmű található továbbá Szigetváron, Papkeszin, Balassagyarmaton, Kőrmenden, Szentendrén és Szombathelyen (Büki, 2010; Simon et al., 2010; Kiss, 2008).

Biogázból összesen 95,2 GWh-nyi áramot termeltek 2009-ben, melynek jelentős része kis biomassza erőművekből származik (Csorna, Városföld, Boly, Csongrád, Tamási, Tiszakeszi, Nádudvar, Tatabánya). A legnagyobb csak elektromos áramot előállító biogázüzem Nyírbátorban található, mely 4 MW kapacitással rendelkezik. Összességében 2050 GWh-nyi áramot fejlesztettek biomassza segítségével 2010-ben. Az elmúlt évek növekedése után 2011-ben kb. 500 GWh-val esett vissza a termelés, melynek fő oka a kazincbarcikai erőmű leállítása volt (MEH, 2012). Hőtermelésre többszázezer háztartásban használnak fatüzelésű kazánokat és kályhákat. Ennél nagyobb méretekben mezőgazdasági üzemekben, illetve épületegyüttesek és nagyobb épületek fűtésére használnak különböző berendezéseket. Jó példa erre a 2013-ban induló Hajdú-Bihar megyei „kazán program”, melynek során 43 településen létesítenek biomassza kazánokat önkormányzati épületek fűtésére [7.3]. Az elektromos áramfejlesztéshez hasonlóan a bioüzemanyag gyártás alul marad hazánkban az uniós átlaghoz képest. Bioetanolból és biodízelből egyaránt 150 millió litert gyártottak Magyarországon 2008-ban.

A jövőre vonatkozó biomassza felhasználást hosszú távra előre kell tervezni annak érdekében, hogy a felhasználásra szánt alapanyagok időben rendelkezésre álljanak. Az erdőgazdálkodásból mintegy 24,5 PJ energia nyerhető ki. Magyarországon jelenleg 4,5 millió hektár mezőgazdasági terület van. Ebből – az élelmezés és természetes környezet megtartásával – fél millió hektár hasznosítható energiatermelési céllal. A területtől függően fás-, illetve lágyszárú energiaültetvény hozható létre. Becslések szerint lágyszárú energianövényekkel mintegy 78,5 PJ energiát lehetne kinyerni, fás szárúakkal pedig 68,5 PJ-t. A lágyszárú növények alkalmazásának hátránya, hogy jobb minőségű termőtalajt igényelnek, az időjárás is jelentősen befolyásolja termelhetőségüket, valamint jelentős hányaduk invazív faj. A fák ezzel szemben rosszabb talajon is megélnek és relatíve rossz mezőgazdasági években is elegendő a betakarítható mennyiség. A becsült szilárd biomassza potenciál tehát, a jelenlegi teljes biomassza alapú energiatermelésnek csak legfeljebb kétszeresét adja. A 2009-es adatok alapján míg az Európai Unióban biogázból összesen 347,5 PJ, addig hazánkban csupán 1,28 PJ energia állítható elő. A hazai termelés 57%-át mezőgazdasági telepek, 33,5%-át szennyvíztelepek, 9,1%-át hulladéklerakó telepek adják. A biogáz üzemek számának növelésével, azon belül is a hulladékkezelés fejlesztésével összesen 72–157 PJ-lal lenne növelhető a biomassza alapú energiatermelés.

8. fejezet - Az energia- és környezetpolitika nemzetközi összefüggései

Az ipari forradalom óta eltelt időben az emberi tevékenység környezetre gyakorolt hatása jelentősen megnőtt. Ez egyrészt az ipari és mezőgazdasági tevékenység fejlődésével, egyre komplexebbé válásával, másrészt a népesség számának, valamint a fogyasztási igények növekedésével magyarázható.

Az, hogy környezetünkre lokálisan hatással lehetünk, már az ipari forradalom előtt is ismert volt. Arra, hogy bizonyos antropogén folyamatok nagytérségű, esetenként globális környezeti hatásokat is okoznak, az 1970–80-as években derült fény a környezet állapotának monitorozására szolgáló eszközök, rendszerek fejlődése, valamint a tudományos kutatások eredményei révén. Ebben meghatározó szerepet játszott a környezeti savasodás problémájának megjelenése és felismerése. A gazdasági tevékenységek kiterjedésével a környezeti hatások egyre inkább növekedtek, bizonyos környezetszennyező anyagok a légköri cirkuláció és a vízfolyások közvetítésével nagy távolságokra juthattak el, átlépték az országhatárokat és lassan globálissá váltak. Ezzel párhuzamosan a mind nagyobb mértékű földhasználat-változás és más tevékenységek következtében az élővilág folyamataiba való beavatkozás is globális szintű lett, ami együtt járt a biológiai sokféleség gyorsuló csökkenésével, az erdővel borított területek rohamos zsugorodásával.

A gazdaság fejlődésével a természeti erőforrások iránti igény is megnövekedett. A készletek, valamint azok lelőhelyei is egyaránt egyre fontosabbá váltak, a fokozódó hozzáférési, hasznosítási igények nemzetközi konfliktusokhoz vezettek. A természeti erőforrások sorában a legnagyobb figyelmet az energiahordozók kapták. Mivel a Föld fosszilis tüzelőanyag készletei végesek, ezért a megújuló energiaforrások alkalmazása egyre inkább elterjedt. A megújuló energiaforrások elterjedését az alábbi okok is elősegítették: (1) az antropogén éghajlatváltozás egyik kiváltó oka a fosszilis tüzelőanyagok égetéséből származó üvegházgázok légköri koncentráció növekedése; (2) a légszennyezés hatásainak csökkentése az új energiatermelési formák megjelenésével; (3) egyes országok energiaiimportból származó kiszolgáltatottságának csökkentése; (4) az energiaellátás biztonságának növelése. A fentiek értelmében a nemzetközi egyezményekben, jegyzőkönyvekben foglalt teendők, vállalások megvalósítása egyszerre tartalmazott éghajlati, környezetvédelmi, valamint energiagazdálkodási elemeket. A politikai és gazdasági döntéshozók számára az éghajlat, illetve annak megváltozása elsősorban az energiagazdálkodással való összefüggése révén bír nagy jelentőséggel.

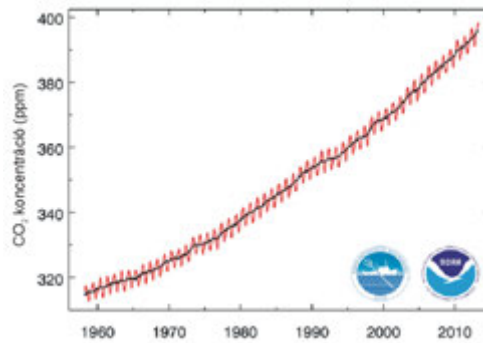
Világossá vált, hogy a környezeti (valamint az azokkal összefüggő gazdasági) problémákat a nemzetek nem képesek önállóan kezelni, nemzetközi összefogásra van szükség. Az elmúlt évtizedekben folytatott munkának köszönhetően napjainkra több száz, nemzetek közötti, multilaterális környezeti megegyezés született, melyek nagy részét Magyarország is elfogadta (Faragó és Nagy, 2005).

Számos környezeti probléma esetében fontossá vált az elővigyázatosság elvének alkalmazása, vagyis a folyamat okainak és következményeinek feltárására vonatkozó jelentős tudományos bizonytalanság ellenére el kell kezdeni a cselekvést a becsült káros hatások csökkentése érdekében. Ha ugyanis megvárnánk, míg a tudomány minden kétséget kizáróan bebizonyít egy-egy jövőre vonatkozó feltevést, nagy veszélye lenne annak, hogy a folyamat már visszafordíthatatlanná vált, vagy legalábbis akkor már sokkal nehezebb, költségesebb lenne a beavatkozás.

Az alábbi nagyon fontos kérdésekre várnak választ a döntéshozók a tudomány képviselőitől a különböző környezeti, éghajlatváltozási problémákra vonatkozóan: Változik-e? (Ha igen, veszélyes-e?) Mi magunk okozzuk-e? (Vagy tőlünk független a kiváltó ok?) Biztosak vagyunk-e ebben (illetve mennyire vagyunk biztosak benne)? Ugyanilyen kérdések fogalmazódtak meg annak idején a magaslégköri ózonréteg „elvékonyodása” kapcsán és más nagytérségű környezeti folyamatok esetében.

A fentiekben megfogalmazott kérdésekre a légkör összetételét illetően a válaszok keresése, megfogalmazása már a XIX. században elkezdődött. Az ipari forradalommal elkezdődött a fosszilis tüzelőanyagok nagyarányú és egyre növekvő mértékű felhasználása. Arrhenius már 1896-ban kidolgozta elméletét a jégkorszakok kialakulásának magyarázatára, mellyel az üvegházhatás folyamatán keresztül összefüggésbe hozta a légkör szén-dioxid-tartalmának és a felszín hőmérsékletének megváltozását (Arrhenius, 1896). Elsőként jutott arra a megállapításra, hogy a fosszilis

tüzelőanyagok égetésekor kibocsátott szén-dioxid mennyisége elegendő ahhoz, hogy globális felmelegedést okozzon. 1938-ban Callendar volt az első, aki megállapította, hogy a CO₂ növekvő légköri koncentrációja következtében megfigyelhető a globális átlaghőmérséklet emelkedése (Callendar, 1938). Revelle és Suess (1957) kifejtették, hogy a légköri CO₂ szintje az antropogén tevékenység hatására növekszik, és megfogalmazták a további mérések szükségességét. 1957-ben, a Nemzetközi Geofizikai Év alkalmával elkezdődtek az azóta is folyamatos mérések Hawaii-on, a Mauna Loa Observatóriumban. A 8.1. ábra jól mutatja a légköri CO₂ mennyiségének alakulását: az ún. „fűrészfog-effektus”-t, mely a vegetáció éves periódusa miatt alakul ki, illetve a folyamatosan emelkedő trendet. Az adatokból kiolvasható az a sajtóban igen nagy visszhangot kiváltó tény, miszerint a műszeres mérések kezdete óta először a légköri CO₂-koncentráció szintje 2013 májusában meghaladta a 400 ppm-et.



8.1. ábra: A légköri CO₂ mennyiségének alakulása, Mauna Loa Observatórium, 1957–2013. (Forrás: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/obop/mlo/>)

Földünk éghajlatának folyamatos változását igazolják a különböző paleoklimatológiai vizsgálatok, az éghajlat korábbi évszázadokra, sőt évezredekre vonatkozó rekonstrukciói. Ezen változásokhoz képest a jelenleg zajló folyamatok sokkal gyorsabbak, ezért kiemelt figyelmet igényelnek, melyet a globális megfigyelések és a numerikus éghajlatmodellezési eredmények is alátámasztanak. A jóval nagyobb figyelem másik oka, hogy a mostani változások és hatások egy olyan időszakban mennek végbe, amikor az emberiség létszáma lényegesen megnövekedett. A teljesség igénye nélkül felsorolunk néhány, az iparosodás óta megfigyelt változást: a globális átlaghőmérséklet emelkedése, a gleccserek visszahúzódása, a jégtakaró olvadása, az extrém időjárási jelenségek gyakoribbá válása. A gyorsan zajló változások legfőbb veszélyét az jelenti, hogy az ökoszisztémák és a társadalmak jelentős része nem képes alkalmazkodni a gyorsan változó környezeti körülményekhez.

Sok vita van arról, hogy a fenti változásokért mennyiben felelősek a természetes és mennyiben az antropogén tényezők. Az emberiség fejlődése során viszonylag állandónak tekinthető éghajlati rendszerhez alkalmazkodott (például az elmúlt 10 ezer évben a természetes globális hőmérsékleti ingadozás nem haladta meg a $\pm 0,5$ °C-ot). Ebbe a rendszerbe az elmúlt két évszázadban az emberiség több ponton is beavatkozott, mind a kibocsátások forrásai, mind a nyelők oldalán: a növekvő ipari tevékenységen keresztül, az antropogén kibocsátások gyorsuló növelésével; a földhasználat megváltoztatásával; illetve a vegetáció, az erdőterületek átformálásával, egyes kiterjedt területeken annak elpusztításával. Noha abszolút értékben az antropogén kibocsátásból származó emissziók mértéke a természetes kibocsátásokhoz képest elenyésző, a probléma mégis jelentős, mivel még ez a relatív kis, de folyamatosan növekvő többlet is elvezethet az egyensúly felborulásához. Az egyes üvegházhatású gázok molekulái ráadásul sokáig (a szén-dioxidé száz évnél is tovább) a légkörben maradnak. A hosszú légköri tartózkodási idő miatt felmerülnek az egyes nemzetek, régiók eltérő felelősségéhez kapcsolódó, sőt a nemzedékek közötti etikai kérdések is.

A megfelelő energiaellátás kulcsfontosságú a társadalmak számára, ugyanakkor az energia ágazat vált a legjelentősebbé mind a véges környezeti erőforrások növekvő felhasználása, mind a káros környezeti hatások kapcsán. Ez utóbbiak sorában pedig nemzetközi szinten a legjelentősebbé és láthatóan egyelőre a legnehezebben megoldhatóvá az éghajlatváltozás erősödő veszélye vált. Minderre tekintettel a környezet és gazdaság összefüggésrendszerből a továbbiakban alapvetően a klíma és energia kölcsönhatással foglalkozunk.

8.1. Nemzetközi egyezmények

Az 1970-es évek elejéig nem kapott különösebb figyelmet az esetleges antropogén éghajlatváltozás kérdése. Az 1972-es **stockholmi környezetvédelmi ENSZ-konferencián** viszont már ott szerepelt az ajánlások között az

üvegházhatású gázokkal kapcsolatos környezeti megfigyelések és kutatások összehangolása. A konferencián elismerték, hogy a környezetre gyakorolt antropogén hatások csökkentése érdekében nemzetközi összefogás szükséges, mivel ezen problémák többsége globális jellegű. A konferenciát követően indult el az **ENSZ Környezetvédelmi Programja** (UNEP – United Nations Environmental Programme).

Az 1979-es genfi Éghajlati Világkonferencián döntöttek az Éghajlatkutatási Világprogram (World Climate Research Programme, WCRP) elindításáról, mely az éghajlati rendszer jövőbeli állapotának becslése érdekében az ok-okozati viszonyok jobb megértését, valamint a befolyásoló tényezők meghatározását tűzte ki célul. A kiadott nyilatkozat szerint valószínűnek látszik, hogy a légköri CO₂ növekvő mennyisége hozzájárulhat a globális melegeedéshez. Egyes kérdésekben nő a tudományos bizonyosság, míg másokban továbbra is nagyfokú a bizonytalanság, így 1992-ben a Riói Nyilatkozatban rögzítik az elővigyázatosság elvét (UN, 1992a, 15. elv), amely a továbbiakban a nemzetközi klímapolitika alakításának is az egyik sarokköve lett. Ennek megfelelően: „*ahol a komoly vagy visszafordíthatatlan változások veszélye fennáll, a teljes tudományos bizonyosság hiánya nem lehet a környezet károsodásának megelőzésére szolgáló költség-hatékony intézkedések elhalasztásának oka*” (UN, 1992a). Ez az elv alkalmazandó minden környezeti probléma esetén – így nemcsak az éghajlat vonatkozásában, hanem például a biodiverzitás kérdésében is.

1988-ban a WMO (Meteorológiai Világszervezet) és az UNEP kezdeményezésére megalakult az **Éghajlatváltozási Kormányközi Testület** (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC). A testület célja, hogy összefoglalja és értékelje az antropogén tevékenység által kiváltott éghajlatváltozással kapcsolatos kutatási eredményeket. Eddigi Értékelő jelentéseit (Assessment Report, AR) 1990-ben, 1996-ban, 2001-ben és 2007-ben adta közre. Az ötödik jelentés közzététele 2013-2014 folyamán várható.

Az IPCC jelentései jelentős mértékben hozzájárultak az éghajlati rendszer működésének pontosabb megértéséhez és a nemzetközi válaszpolitikák megalkotásához, de újabb kérdések is felmerültek (melyek, természetüknél fogva esetenként növelték a bizonytalanságot). Nagy előrelépésként értékelhető, hogy megindult a konkrét párbeszéd e téren a tudomány és a politika között. Előtérbe került a tudományos alapokon megfogalmazott állítások alapján a nemzetközi megállapodások kidolgozásának szükségessége, de egyúttal a fennmaradt tudományos bizonytalanságok jobb körülhatárolása, számszerűsítése is.

Az emberiség környezetre és ennek részeként a földi éghajlatra gyakorolt hatásának mérséklésére többféle megközelítés is kínálkozik. Az egyik lehetséges mód a környezetre káros kibocsátásokat kiváltó okok kezelése a hajtóerők szintjén: ilyen például a népesség növekedése, a nem fenntartható fogyasztási szokások, „minták” terjedése, s mindezek nyomán a természeti erőforrások nem fenntartható használata, az energiatudatosság növekedése. A termelési és fogyasztási szokások változtatása többek között a környezet- és energiatudatosságra nevelés, energiatakarékosság, energiahatékonyság-növelés stb. révén érhető el. A környezeti probléma „forrásától”, eredeti hajtóerőitől távolabbi és így kevésbé hatékony szinten – például az üvegházgáz-kibocsátások szempontjából – kevésbé kritikus más energiahordozó választásával (másik fosszilis energiahordozó, atomenergia vagy megújuló energiaforrás) szintén elérhető kibocsátás-csökkentés (hiszen például a földgáz fajlagos CO₂-kibocsátása kisebb, mint a kőszéné). Ezzel viszont más környezeti és társadalmi-gazdasági problémák erősödéséhez járulunk hozzá (véges földgázkészletek, energiainport-függőség, energia- és környezeti biztonsági kérdések stb.). Végül a kibocsátások kezelése az adott források és nyelők szintjén is lehetséges azok mérséklésével, illetve a nyelőkapacitások erősítésével; ezt a környezetvédelmi szakirodalom a „csővégi” megoldások kategóriájába sorolja. Fontos figyelembe vennünk, hogy a megelőzés – tehát a probléma forrásánál való kezelése – a környezeti előnyökön túlmenően többnyire anyagilag is kedvezőbb, mint a már kialakult problémák, káros hatások megoldása. Ha sokáig halogatjuk a cselekvést, az is előfordulhat, hogy sokkal drasztikusabb, esetleg visszafordíthatatlan változásokkal kerülünk szembe.

A kialakult helyzet megoldása mindannyiunk közös felelőssége, de mivel egyes nemzetek jóval előbb léptek az iparosodás útjára, mint mások, ezért az üvegházgáz-többlet légköri felhalmozódásáért és ezáltal az éghajlatváltozás megnövekedett veszélyéért viselt felelősség különböző mértékű, elsődlegesen a fejlett államoké. Mindezeket figyelembe véve 1992-ben elfogadták az **ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezményét** (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC), melynek célkitűzése: „*az üvegház-gázok légköri koncentrációinak stabilizálása olyan szinten, amely megakadályozná az éghajlati rendszerre gyakorolt veszélyes antropogén hatást. Ezt a szintet olyan időhatáron belül kell elérni, ami lehetővé teszi az ökológiai rendszerek természetes alkalmazkodását az éghajlatváltozáshoz, továbbá, ami biztosítja, hogy az élelmiszer-termelést az éghajlatváltozás ne fenyegetse, valamint, ami módot nyújt a fenntartható gazdasági fejlődés folytatódására*” (UNFCCC, 1992). Ennek érdekében elővigyázatossági lépéseket szükséges tenni az éghajlatváltozás és annak káros hatásainak

megelőzése, enyhítése érdekében, nemzeti stratégiák alkalmazásával. A fejlett országok arra vállaltak kötelezettséget, hogy a szén-dioxid és a Montreáli Jegyzőkönyv által nem szabályozott egyéb üvegházgázok antropogén emisszióinak 1990. évi szintjét ne lépjék túl 2000-ben.

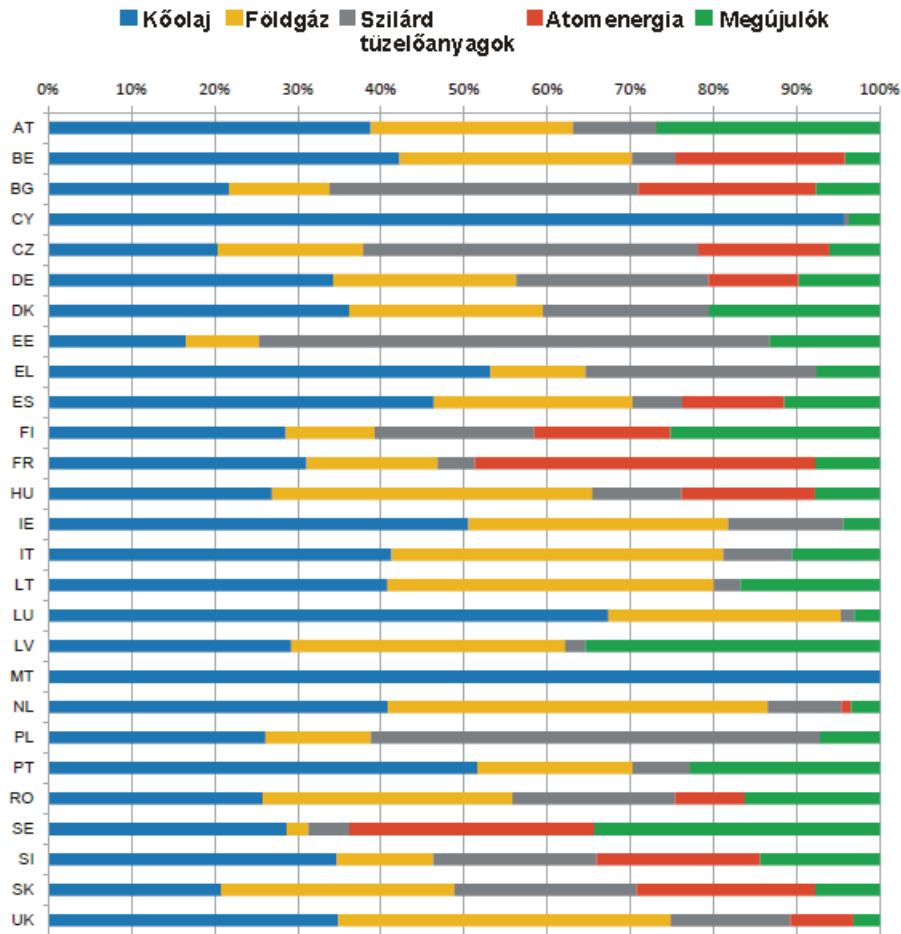
1997-ben, az UNFCCC tagállamok harmadik konferenciáján született meg (és 2004-ben lépett hatályba) a **Kiotói Jegyzőkönyv**, melynek fejlett országot képviselő aláírói kötelezték magukat, hogy a 2008–2012 közti kötelezettségvállalási időszakra 6 üvegházgáz (illetve azok csoportjainak: CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆) kibocsátását legalább 5%-kal csökkentik az 1990-es szinthez képest. A vállalások országonként eltérőek voltak. Egyes országok ennél nagyobb csökkentést vállaltak (például az Európai Unió 15 tagállama együttesen 8%-os csökkentést vállalt), míg mások (például Ausztrália és Izland) azt vállalták, hogy korlátozzák, azaz egy adott értéknél nem növelik jobban kibocsátásukat. Az átalakuló gazdaságú országok – amelyeknél éppen a piacgazdaságra való áttérés zajlott – pedig más bázisvetet alkalmazhattak. Magyarország így 6%-os csökkentést vállalt az 1985–1987-es időszak átlagos kibocsátásához képest.

Abban az érintettek egyetértettek, hogy a Kiotói Jegyzőkönyvben foglalt vállalások nem elegendőek, annak lejárta után jelentős további csökkentésekre volna szükség. Az érdeellentétek miatt azonban egy újabb nemzetközi megállapodás megkötése rendkívül nehézé vált. A fejlődő államok ahhoz ragaszkodnak, hogy a fejlettek (történelmi felelősségük okán) magasabb kibocsátás-csökkentési vállalásokat tegyenek. A fejlettek pedig azt szeretnék elérni, hogy a fejlődők legalább mérsékeljék kibocsátásuk növekedését. Emiatt az ezt követő klímapolitikai tárgyalások (Koppenhága 2009, Cancún 2010, Durban 2011) nem vezettek eredményre. Végül egyelőre a Dohában 2012 végén tartott UNFCCC konferencián megállapodtak abban, hogy a 2012-es év végén lejáró Kiotói Jegyzőkönyv érvényét meghosszabbítják 2020-ig (Faragó, 2012). Emellett 2012-től folynak a nemzetközi tárgyalások egy új globális megállapodás kidolgozásáról, amelynek 2015-re kellene elkészülnie.

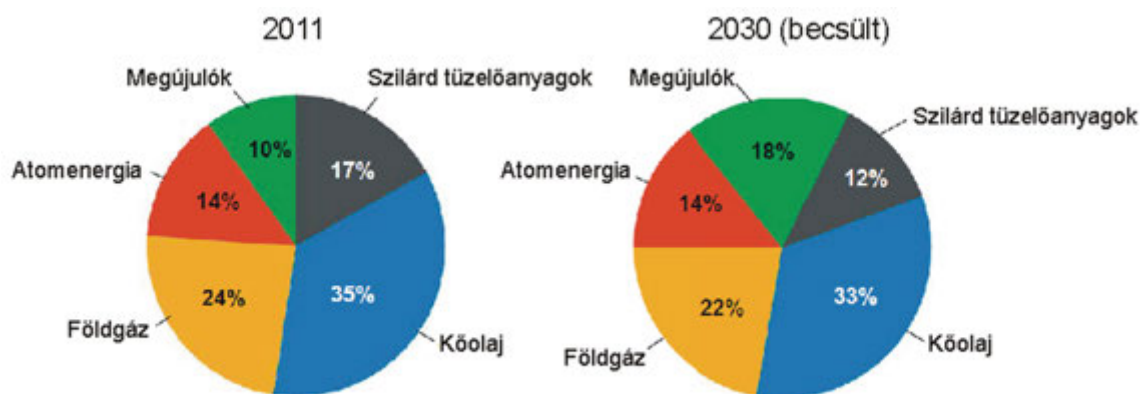
8.2. Az Európai Unió energiafelhasználása

Az EU tagállamok energiaszükségletét biztosító források összetétele jelentősen eltér egymástól. Ez többek között az eltérő földrajzi adottságok, elérhető nyersanyag-források (beleértve az EU-n kívülről érkezőket), illetve az adott ország politikai döntéseinek következménye. 2011-ben átlagosan a bruttó belföldi fogyasztás energiaszükségletét az alábbi forrásokból elégítették ki: 35% kőolaj, 24% földgáz, 17% szilárd tüzelőanyag, 14% atomenergia, 10% megújuló energia (EC, 2013). Ez az összetétel országról országra (8.2. ábra), valamint időben is változik. A 2011-ben fennálló helyzetet, illetve az Európai Unió egészére 2030-ra becsült arányokat mutatja a 8.3. ábra.

Egyes országokban már 2011-ben is számottevő (akár 30% fölötti) volt a megújulók részaránya, míg másutt továbbra is jelentős (például Máltán egyeduralkodó) a kőolaj energiatermelésben játszott szerepe. A 27 EU tagországból 14-ben atomenergiát is alkalmaznak. Hazánkban a földgáz- és kőolaj-felhasználás – melynek jelentős része importból származik – biztosítja az energiaszükséglet mintegy kétharmadát, ezt követi a részarány alapú sorrendben az atomenergia, a kőszén, valamint a megújuló energia.



8.2. ábra: A bruttó belföldi fogyasztás energiaforrások szerinti megoszlása 2011-ben az Európai Unió tagállamaiban. (Forrás: Európai Bizottság)



8.3. ábra: A bruttó belföldi fogyasztás energiaforrások szerinti megoszlása 2011-ben és becsült arányai 2030-ban az Európai Unióban. (Forrás: Európai Bizottság)

Az országonkénti jelentős eltérések ellenére a tagállamok három közös célt tűztek ki: (1) a háztartások és vállalkozások energiaszámláinak csökkentését a versenyképesség érdekében; (2) a megbízható és folyamatos energiaellátás biztosítását, az ellátásbiztonságot; és (3) az energiatermelés, szállítás és felhasználás környezeti hatásainak korlátozását, azaz a fenntarthatóságot. Mindezek elérése érdekében 2010 júniusában elfogadták az Európai Unió következő évtizedre vonatkozó fejlesztési stratégiáját. Ennek az **Európa 2020 stratégiának** az éghajlat- és energiapolitikai célkitűzéseit a korábban elfogadott „klíma-energia csomag” alapján határozták meg,

s ezek a következők: (1) az üvegházhatású gázok kibocsátásának 20%-os csökkentése az 1990-es kibocsátási szinthez képest, (2) az energiahatékonyság 20%-os növelése, (3) a megújuló energiaforrások részarányának 20%-ra való növelése a teljes energiafogyasztásban. Emellett jogszabály született a szén-dioxid-leválasztás és -tárolás (angolul CCS, carbon capture and storage) technológiai bevezetésének elősegítésére, illetve szabályozására.

2011-ben az Európai Unió teljes üvegházgáz-kibocsátása 16%-kal volt alacsonyabb az 1990-es szintnél. Ugyanebben az évben az összes energiafogyasztásnak 13%-a származott megújuló energiaforrásokból, a 2005-ös 8,5%-kal szemben. Ahhoz, hogy a 2020-as célokat elérjük, évente átlagosan még további 6,3%-os növekedés lenne szükséges (EC, 2013).

Európa energiainporttól való függése az elmúlt két évtizedben nőtt, és ez a tendencia várhatóan a jövőben is folytatódni fog. Mivel a világ energiaigénye tovább emelkedik, a készletek pedig végesek, a verseny következtében az árak növekedésére kell számítani. Sajátos körülmény, hogy néhány tagállam kizárólag orosz szállítóktól, egyetlen szállítási útvonalon szerzi be gázfelhasználása több mint 80%-át, ami rendkívül kiszolgáltatottá teszi ezeket az országokat. Ezért is annyira lényeges a fent említett EU-szintű megújuló energiahasznosítási és energiahatékonysági cél elérése. Ezzel egyidőben az USA óriási erőfeszítéseket tesz az import visszaszorítására az ún. palagáz-készleteinek kitermelése révén. Megjegyezzük, hogy vannak, akik szakmai érvek alapján helytelennek tartják mind az említett CCS-technológia alkalmazását, mind a palagáz-kitermelést.

A nemzetközi gazdasági környezet és az árak növekedése együtt az európai cégek versenyképességét negatívan befolyásolja (EC, 2013). Mindezek gazdaságilag is indokoltá teszik az EU 20%-os hatékonyságnövelési célját, mely 2020-ig hozzávetőlegesen 1000 széntüzelésű hőerőmű vagy 500.000 szélturbina megépítését váltja ki, ezáltal fékezve az energiaigényt, csökkentve az importot és a légszennyezést (EC, 2013).

A megújulóenergia-felhasználás részarányának növekedése azonban technikai problémákat is felvet, mivel szükségessé teszi a kiépített hálózatokba történő betáplálás lehetőségének biztosítását (hacsak nem a helyi energiaellátást biztosító energiatermelés a cél). Ez főként az időszakosan termelő megújuló energiaforrásoknál (például nap-, szélenergia) lényeges. A folyamatos energiaellátás biztosítása megoldható fosszilis tüzelőanyagot hasznosító kapacitásokkal, illetve a határokon átnyúló infrastruktúra segítségével is (hiszen minél nagyobb az ellátási terület, annál könnyebb a megújuló energiaforrások ingadozó teljesítményét kiegyenlíteni).

9. fejezet - A megújuló energiaforrásokban rejlő potenciál becslése Magyarországra

Az elmúlt évtizedek során – a megújuló energiaforrások közül – a nap- és szélenergia hasznosítása fejlődött a legnagyobb ütemben a világon és Európában egyaránt. E tendencia folytatódása várható a közeljövőben is, hiszen a jelentősen emelkedő antropogén eredetű üvegházgázok emissziója elengedhetetlenné teszi nemzetközi megállapodások létrejöttét.

Az Európai Unió 1997-ben kiadta a megújuló energiaforrásokról szóló ún. Fehér Könyvét. A könyv ajánlása szerint 2010-re a Közösség országaiban 12%-ra kellett növelni a megújuló energiaforrások arányát. Az Európai Unióhoz történt csatlakozással Magyarország kötelező vállalást csak a villamos energiatermelés tekintetében tett, miszerint a 2003-as 0,6%-os szintről 2010-re 3,6%-ra növeli a megújuló energiaforrások részarányát. Hazánk már 2005-ben teljesítette vállalását, bár ennek több mint 90%-át az erőművek által eltüzelt faforgács és faapríték adta, amely nem egyértelműen sorolható a megújuló energiaforrások közé.

Az Európai Parlament és Tanács RED (Renewable Energy Directive - 2009/28/EK) irányelve továbbra is kötelezi Magyarországot a megújuló energiaforrások részarányának növelésére. Szám szerint arra, hogy 2020-ra teljes energiafogyasztásának legalább 13%-a megújuló energiaforrásból származzon. Ennek hatására a Nemzeti Fejlesztési Minisztérium 2011-ben kiadta Magyarország megújuló energiaforrások hasznosítására vonatkozó Nemzeti Cselekvési Tervét (NCsT), melyben részletes összefoglalást találhatunk a megújuló energiahordozók 2020-ig terjedő felhasználásának tervezett alakulásáról. A cselekvési tervben megfogalmazottak szerint hazánk a megújuló energiaforrások alkalmazását nem csupán és nem elsősorban kötelezettségnek, hanem a gazdasági fejlődéshez történő hozzájárulás egyik kiemelkedő lehetőségének tekinti. Míg a megújuló energiaforrásokból előállított energiának a 2005. évi bruttó végső energiafogyasztásban képviselt részaránya 4,3%, s 2011-ben is csupán 8,1% volt, addig a Nemzeti Cselekvési Terv 2020-ra reális célkitűzésként a 14,65%-os arány elérését fogalmazta meg. A magyar megújuló energiapolitika célja – az Európai Unió politikájával összhangban – az ellátásbiztonság, a versenyképesség és a fenntarthatóság együttes megvalósítása. Hazánk energiaimport függősége igen magas, a kőolaj- és a földgázfelhasználás jelentős része (rendre 80%-a, illetve 83%-a) importból származik. A megújuló energiaforrások alkalmazásával ez a függőség csökkenthető, mely pozitív társadalmi, gazdasági hatásokkal járhat.

A referencia forgatókönyv szerint Magyarországon a 2020. évi országos primerenergia igény évi 1175 PJ-nak prognosztizálható. Hazánkban politikai és szakmai célkitűzés a 10%-os energiatakarékosság elérése. Így az elkövetkező években, évtizedben tervezett jelentős energiatakarékossági programok elindításának együttes hatásaként a 2020. évi primer energiahordozó felhasználás értéke várhatóan csak a 2008-as értéket megközelítő 1130 PJ (1100–1290 PJ) körül alakul. A megadott intervallum azért ilyen széles, mert meghatározása számos, nehezen előrejelezhető külső tényezőtől függ (mint például a gazdasági fejlődés mértéke és szerkezete, a kőolaj árának vagy a forint árfolyamának alakulása).

Mivel a megújuló energiaforrások széleskörűen hozzájárulnak a nemzetgazdasági célok teljesítéséhez (munkahelyteremtés, GDP növelése, ellátásbiztonság stb.), ezért stratégiai célként tűzték ki azok felhasználásának a lehetőségek határáig történő növelését. Az alábbiakban a cselekvési terv alapján áttekintjük az egyes megújuló energiaforrás típusokban rejlő lehetőségeket.

9.1. Vízenergia

Magyarország vízenergia adottságai csak részben kedvezőek, ugyanis kevés a hegyvidéki terület, országosan eltérő a csapadék eloszlása mind térben, mind időben, továbbá a nagy vízhozamú folyóink kis esésűek. Hasznosítása elsősorban vízgazdálkodási, árvízvédelmi és környezetvédelmi kérdés. A vízenergia esetében, a nagyobb duzzasztóművek létesítése helyett célszerűbb kisebb kapacitású erőművek építése, illetve korszerűsítése. A cselekvési terv ezért a vízenergia vonatkozásában a kisebb folyók szabályozhatóságában fontos szerepet betöltő, már meglévő duzzasztókba beépíthető törpe vízerőművekkel, valamint a folyómedrekbe telepített átáramlásos turbinákkal

számolt. A törpe vízerőművek telepítési lehetőségeinek, helyszíneinek számba vétele alapján 2020-ig összesen 16–17 MW_e beépített villamos energia teljesítmény installálása tűnik reálisnak (NCsT, 2011).

A vízerőművek leginkább a járási energiaellátásban, azaz lokális környezetben, saját energiafelhasználás céljából jelenthetnek hatékony és gazdaságos megoldásokat. Amennyiben telepítésük során a környezetvédelmi és vízgazdálkodási szempontok érvényesítésre kerülnek, akkor a vízenergia az egyik legtisztább energiaforrás, ami ezen túlmenően kiválóan szabályozható, így a villamosenergia-rendszer szabályozhatóságához is hozzájárul.

9.2. Szélenergia

A szélerőművek legfőbb sajátossága, hogy időjárásfüggők, azaz villamos teljesítményük a szélesebbség függvénye, bizonyos érték alatt a szolgáltatott teljesítmény pedig zérus. Elsősorban ez a sajátosság határozza meg villamos teljesítményük értékelését, az elérhető primerenergia területén mutatott megtakarításukat, valamint a szennyezést csökkentő hatásukat. Hazánkban az eddig telepített szélerőművek esetében a névleges szélesebbség a 10–14 m/s (36–50 km/h) tartományba esik, s 2–3 m/s szélesebbség alatt (amelynek előfordulási gyakorisága hazánkban még a rotorok magasságában is számottevő) nem adnak le villamos teljesítményt. A szélesebbség kiszámíthatatlan változása miatt a szélerőművek nem mindig állnak a fogyasztók rendelkezésére, azaz egy ugyanolyan beépített villamos teljesítményű szélerőmű és fosszilis erőmű nem azonos értékű a fogyasztói ellátás szempontjából. Az országos villamos elosztó rendszer csak akkor működhet kellő biztonsággal, ha miközben szélerőművekből teljesítményt vételez és továbbít a fogyasztók felé, közben kihasználatlan tartalékként egyidejűleg rendelkezésre áll ugyanennyi szabad erőművi teljesítmény vagy szabadon lehívható import. A szélesebbség csökkenése esetén ugyanis ezek beléptetése elkerülhetetlen.

Magyarország összesített szélenergia-potenciálja több ezer MW_e teljesítmény. Az elmúlt években végzett felmérések alapján meghatározásra kerültek azok a helyszínek, ahol a természetvédelmi, környezetvédelmi szempontok figyelembevételével gazdaságosan telepíthetők szélerőművek. A szélenergia egy rendkívül környezetbarát, korszerű energiaforrás, ezért a jövő energiaellátásának az egyik kulcseleme lehet. Ugyanakkor egy nem szabályozható, időjárásfüggő technológia. Így a szélenergia széleskörű elterjedésének eléréséhez az energiatárolás gazdaságos biztosítását kell megoldani, melynek a villamos energia rendszer szabályozhatósága, befogadó képessége szab határt. Az ország 2020-as célkitűzése így értelemszerűen a villamos energiarendszer szabályozhatósági korlátjához igazodik, ami a jelenlegi ismertek alapján kb. 740 MW_e összteljesítményig képes a szélenergiát befogadni. Természetesen ez az érték a későbbiekben a hálózat rugalmasabbá tételével tovább növelhető (NCsT, 2011).

A nagyobb szélerőmű parkok mellett olyan kisebb szélkerekek, törpe turbinák elterjedésével is számol a cselekvési terv, amelyek időszakosan termelnek hálózatra, és elsősorban a helyi autonóm energiaellátásban töltenek be fontos szerepet. A szakértői becslések szerint 2020-ig ezek megjelenése kb. 10 MW_e villamos energia összteljesítménnyel várható. A fentiek alapján 2020-ig tehát szélenergiából 750 MW_e kapacitás kiépítését lehet reálisan megcélozni (NCsT, 2011).

9.3. Geotermikus energia

Magyarországon a geotermikus gradiens jelentősen meghaladja a világátlagot, így a geotermikus energia az ország egyik legfontosabb természeti kincse. A fenntartható erőforrás gazdálkodással összhangban az új kapacitások kialakítása során különös figyelmet kell fordítani e természeti kincsünk megőrzésére, ami általában a visszasajtolást teszi szükségessé.

A geotermikus energia felhasználási formái közül az épületek hőellátása kiemelt fontosságú. A termálkutak víz- és hőteljesítménye nagyobb épületegyüttesek ellátását és kisebb-nagyobb települések távhőellátását teszi lehetővé. További jelentős lehetőség van a geotermikus energia szerepének növelésében. Magyarország a világátlagnál jóval magasabb potenciállal rendelkezik, s az ország bizonyos területein már jelenleg is elterjedt ez a fűtési forma. A jövőben elsősorban a már meglévő kapacitások gazdaságosabb felhasználására kell törekedni, azok rekonstrukciójával, fejlesztésével. 2020-ra így akár több mint háromszorosára is nőhet a geotermikus energia fűtési célú hasznosítása. Ennek egyik eleme a gyógyturisztikai lehetőségekkel kombinált fürdőrekonstrukciók, illetve fürdőfejlesztési program.

A közvetlen hőhasznosítás mellett várhatóan 2020-ig megjelenik a geotermikus energia elektromos áram termelésre történő hasznosítása is, mintegy 57 MW_e beépített teljesítménnyel. A geotermikus energia esetében a kútlétesítés és visszasajtolás közvetlen költségén kívül a hőellátási és elosztási rendszer kiépítésének ráfordítási költségei miatt a legjelentősebb korlátozó tényezőt a finanszírozás biztosítása jelenti.

9.4. Napenergia

A napenergia aktív hasznosításának két módját különböztethetjük meg: a napenergia termikus hasznosítását, illetve a napenergia villamos energia termelését célzó hasznosítását. A napenergia aktív hasznosítására alkalmas rendszerek (napkollektorok, napelemek, naperőművek) az elméleti potenciálnak jelenleg csak töredékét hasznosítják hazánkban, magas árak miatt még nem eléggé elterjedtek. Amennyiben árak csökken, a napenergia hasznosítás területén további fejlődés várható.

A napsütéses órák számának hazai átlaga magas, ezért a termikus napenergia-hasznosításban jelentős potenciállal rendelkezünk. A fotovoltaiikus napenergia esetében a felgyorsult gyakorlatorientált kutatás-fejlesztési munkák és a rövid időn belül várható eredmények már versenyképes rendszerek terjedését teszik lehetővé. A termikus napenergia-hasznosítás területén leginkább a családi házak, a közintézmények és önkormányzati létesítmények melegvízellátása biztosítható. A fotovoltaiikus napelemrendszerek tekintetében várhatóan a kettős hasznosítás élvez majd előnyt. A legfontosabb cél a saját energiatermelés, amelyet többlet zöldenergia értékesítés egészíthet ki. A fotovillamos eljárás a jövőben is elsősorban a villamos energiával el nem látott területek (országutak, tanyák) ellátásában játszhat szerepet, mert itt a napelemes autonóm áramforrás összességében olcsóbb lehet, mint a hálózati csatlakozás kiépítése. Ezzel párhuzamosan a fotovoltaiikus rendszerek árának csökkenésével megjelenhetnek Magyarországon az első naperőművek is.

9.5. Hőszivattyúk

Magyarországon az egyik legszélesebb körben alkalmazható megújuló energiaforrás típus, mivel egyrészt univerzálisan hasznosítható fűtésre és hűtésre egyaránt, másrészt beépített, urbanizált területeken is jól alkalmazható. A hőszivattyú alkalmas eszköz a földhő (talajhő, hidrotermikus energia és légtermikus energia) hasznosítására, ami az országban szinte mindenhol – bár alacsony hőmérsékleten – rendelkezésre áll. Ebből adódóan a hőszivattyúk területén gyors fejlődés várható, a beépített teljesítmény 2020-ra a jelenlegi érték közel negyvenszeresére növekedhet. Hőszivattyúk tekintetében is a legjelentősebb korlátozó tényezőt a finanszírozás jelenti.

9.6. Biomassza

Hazánk kiváló adottságokkal rendelkezik a biomassza hosszútávon fenntartható, versenyképes előállítására. A nagyvárosokon kívül eső térségekben a biomassza az egyik legkönnyebben elérhető, olcsó energiaforrás, ezért annak energetikai hasznosítása túlmutat az energiapolitika céljain, egyben fontos agrár- és vidékfejlesztési eszköz is. A megújuló energiaforrások közül a legjelentősebb jövőbeli növekedés a biomassza esetében várható: 2020-ig közel 19 PJ növekedéssel számolnak, elsősorban a kimondottan erre a célra termesztett energianövények, melléktermékek és hulladékok megnövekedő mennyiségéből. Utóbbiak részaránya a felhasználható biomassza típusokon belül 2020-ra elérheti az 50%-ot (NCsT, 2011) is.

A bioenergia alapú villamosenergia-termelés előre jól tervezhető, szabályozható. A bioenergiának a helyi fűtési igények kielégítésében lehet a jövőben nagyobb szerepe, de a tervek szerint kis- és közepes kapacitású kapcsolt villamos- és hőenergia termelési rendszerek terjedésére is hangsúlyt kívánnak fektetni.

9.7. Biogáz

A biogáz alkalmazások elterjesztése nem csupán energetikai megfontolásból indokolt, hanem számos egyéb tényező is alátámasztja az e területen történő további fejlesztéseket. A biogáz-előállítás a termelési hulladékok, mezőgazdasági melléktermékek és egyéb szerves anyagok kezelésével hozzájárul a környezetvédelmi célok teljesítéséhez, a metángáz-kibocsátás csökkentésével fontos klímavédelmi eszköz. A közeljövőben várhatóan Magyarországon is megjelennek a biogáz üzemek bázisán a biometán termelő üzemek. Ezek a földgázzal egyenértékű tisztított biogázt táplálnak be a gázvezeték hálózatba, s így a közlekedési célú felhasználást is lehetővé teszik. A közlekedés területén

a jövőben a biogáz szerepe várhatóan növekedni fog, elsősorban azokban a vidéki városokban, ahol a biogáz ésszerű távolságon belül beszerezhető (tankolható). A biogáz termelés 2020-ra várhatóan megduplázódik.

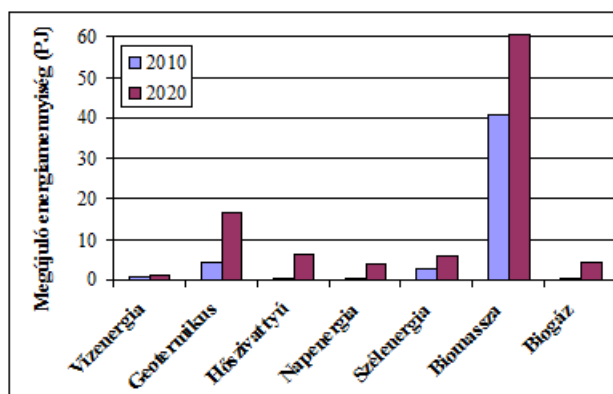
9.8. Bioüzemanyag

A szilárd biomasszához hasonlóan Magyarország kiemelkedően jó feltételekkel rendelkezik a bioüzemanyag előállítás területén. A bioüzemanyagok gyártása – ebben az esetben is – nem csak energetikai, hanem mezőgazdasági és vidékfejlesztési kérdés is. A magyar bioüzemanyag-gyártás hozzájárulhat a mezőgazdasági termékpályák stabilizálásához, a magasabb feldolgozottsági fokú termékek piaci megjelenéséhez.

A bioüzemanyagok hazai előállításainak lehetőségei alapján jelentős jövőbeli felhasználás tervezhető. Az alkalmazásnak elsősorban motorteknikai korlátai vannak, mivel a jelenlegi gépjárművek – konstrukciós kialakításuk miatt – csak a korlátozott mennyiségben bioüzemanyagot tartalmazó üzemanyaggal képesek problémamentesen üzemelni. A magasabb bioüzemanyag komponens tartalmazó motorhajtóanyagot vagy tiszta bioüzemanyagot felhasználni képes járművek elterjedését elsősorban a tömegközlekedés területén ösztönözik.

A bioüzemanyag mellett fontos az alternatív üzemanyag felhasználás, így az elektromos, a hibrid és hidrogén alapú rendszerek, valamint azok gazdasági és infrastrukturális hátterének kiépítése. E területen intenzív kutatás-fejlesztés folyik, melynek eredményeképpen 2020-ig ezen alternatív üzemanyagok a jövő közlekedésének kézzelfogható, versenyképesen elérhető energiahordozóit jelenthetik.

A cselekvési terv célkitűzéseit az adottságokból, a reálisan elérhető lehetőségekből, a gazdaságfejlesztés és munkahelyteremtés szempontjaiból kiindulva határozták meg. Látható tehát, hogy jelentős előrelépés várható a megújuló energiaforrások minden szegmensében (9.1. ábra), 2020-ra a megújuló energiaforrások bruttó felhasználása 2010-hez képest várhatóan megduplázódik.



9.1. ábra: A megújuló energiaforrások hazai hasznosításából származó energiamennyiség jelenlegi értékei és előrejelzése 2020-ra (NCsT, 2011 alapján) – animáció

10. fejezet - Fenntarthatóság

A korábbi fejezetekben áttekintettük az egyes megújuló energiaforrásokban rejlő lehetőségeket. Ahogyan láttuk, amennyiben sikerül teljes körben alkalmazni az új technológiákat, a jelenlegi energiafogyasztásunk biztosan fedezhető. De miért is váltanánk ki nagy hatékonyságú benzinüzemű gépjárműveinket vagy szénüzemű áramfejlesztő erőműveinket, miért nem nyitunk újabb bányákat az esőerdő közepén? Környezetvédelmi szempontok figyelembevételével erre az a válasz, hogy romboló hatással vannak környezetünkre és egyes melléktermékeik növelik légkörünk üvegházgáz-koncentrációját, mely globális felmelegedéshez vezet. Egészségügyi szempontból az egészségre káros anyagok kibocsátása a fő ellenérv. Ha a gazdasági szempontokat tekintjük, akkor is tudomásul kell vennünk, hogy a kinyerhető kőolaj és a többi fosszilis energiahordozó készletei sem kimeríthetetlenek.

10.1. Az emberiség energiaigényének növekedése

A Nemzetközi Energia Ügynökség évente nyilvánosságra hozott jelentésében (IEA-WEO: International Energy Association World Energy Outlook) a világ energiataralékainak és energiaszükségleteinek alakulását becsüli az elkövetkező évtizedekre. A párizsi székhelyű szervezet szerint a világ népességének 1,7 milliárd fővel történő növekedése várható 2010 és 2035 között. Így 2035-ben a Föld lakóinak száma már jelentősen meghaladja majd a 8,5 milliárd főt. A népességnövekedés jelentős része Ázsiából és Afrikából származik. Például India lakosainak száma – az előrejelzések szerint – meghaladhatja majd az 1,5 milliárd főt, nagy valószínűséggel megelőzve ezzel Kínát is 2025 körül. Természetesen a népesség vázolt ütemű növekedése magával vonja a világ energiaigényének jelentős növekedését is. Ezt a folyamatot tovább erősíti, hogy a népességnövekedéssel párhuzamosan várhatóan az urbanizációs ráta értéke, azaz a városiasodás mértéke is jelentősen emelkedik.

Az energiára vonatkozó előrejelzések egy másik sarkalatos pontja az energiaárak alakulása. A jövőben várható változások elemzésére három különböző forgatókönyvet állítottak fel: (1) napjaink energiapolitikája nem változik, (2) az energiapolitika jelentősen megváltozik, (3) az energiaszektor szinte teljesen átalakul. Az előrejelzések értelmében az energiaárak az elkövetkező 25 évben rendre jelentős emelkedést, gyenge növekedést, illetve csökkenést mutatnak az egyes scenáriók függvényében (IEA-WEO, 2012).

A világ primer energiaigénye 2010 és 2035 között várhatóan 25–42%-kal növekszik. Ez az igény a leggyorsabb emelkedést mutató, napjaink energiapolitikájára épülő forgatókönyv szerint évente 1,5%-kal, az energiapolitika megváltozását feltételező forgatókönyv szerint 1,2%-kal, az energiaszektor jelentős átalakítását előrevetítő scenárió szerint pedig csupán 0,6%-kal emelkedik. Ezek alapján a globális energiaigény elmúlt két évtizedben tapasztalt évi 1,6%-os növekedési ütemében jelentős mértékű lassulás várható (IEA-WEO, 2012).

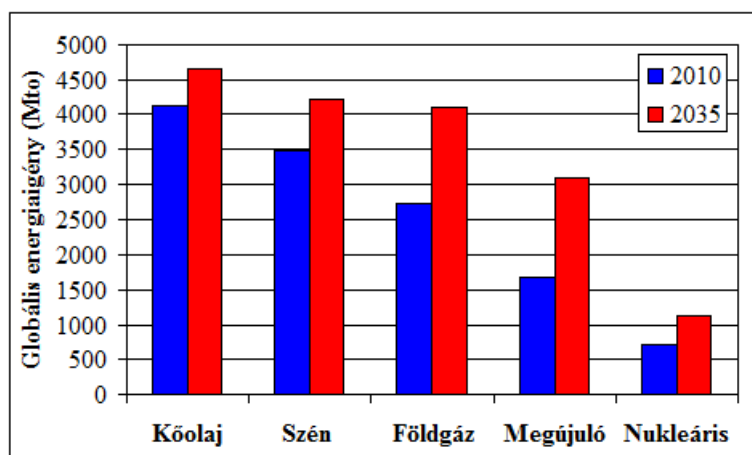
A közepesnek mondható, új energiapolitikát feltételező forgatókönyv szerint a jövőben várható energiaigény 59%-át a fosszilis energiahordozók biztosítják (10.1. táblázat). Az energiaforrások közül továbbra is a kőolaj tölti be a legfontosabb szerepet (10.1. ábra), de részaránya a 2010-es 35%-os értékről 2035-re 27%-ra csökken. A szénalapú energiatermelés növekedési üteme is várhatóan fokozatosan lelassul az elkövetkező 25 évben. Ezzel párhuzamosan jelentős emelkedés várható a földgáz felhasználásában.

10.1. táblázat: A világ energiaigényének növekedése Mt olajkvivalens egységben (forrás: IEA-WEO, 2012)

	1990	2010	2015	2020	2030	2035	Az átlagos növekedési ütem a teljes 2010-2035 időszakra
Szén	2231	3474	3945	4082	4180	4218	0,8%
Kőolaj	3230	4113	4352	4457	4578	4656	0,5%
Földgáz	1668	2740	2993	3266	3820	4106	1,6%
Nukleáris	526	719	751	898	1073	1138	1,9%
Víz	184	295	340	388	458	488	2,0%
Biomassza és hulladék	903	1277	1408	1532	1755	1881	1,6%
Más megújuló	36	112	200	299	554	710	7,7%
Összesen	8779	12730	13989	14922	16417	17917	1,2%

Az előrejelzések szerint 2035-re a megújuló energiaforrások részaránya a 2010-es 13%-ról 2035-re eléri a 18%-ot. A várható gyors emelkedési ütem a fosszilis energiahordozók drágulásával és a megújuló technológiák árának jelentős csökkenésével magyarázható.

A globális energiafelhasználás 12%-át a nukleáris energia biztosíthatja 2035-ben. Az addig üzembe helyezett erőművek összteljesítménye 580 GW-ra tehető, melynek jelentős részét (116 GW-ot) a kínai fejlesztések teszik ki. Várhatóan Korea, India és Oroszország is jelentősen növeli a nukleáris energiatermelését. A 2011 márciusában Fukushima-ban történt baleset miatt azonban ezen előrejelzések pontossága megkérdőjelezhető, hiszen a történet hatására több ország lépéseket tett nukleáris energiatermelésének beszüntetésére.



10.1. ábra: A világ energiaigényének változása 2010 és 2035 között Mt olajkvivalens egységben (IEA-WEO, 2012 nyomán) - animáció

10.2. A fenntarthatóság fogalma

A fenntartható fejlődés fogalma különböző közelítések közül – az ENSZ, a közgazdaságtani szempontok és a környezetpolitika irányából – vizsgálható, melyeket az alábbiakban sorra veszünk.

10.2.1. Az ENSZ álláspontja

A modern értelemben vett fenntartható fejlődés kérdése a politikai, közéleti és tudományos körökben 1972-ben jelent meg az ENSZ által szervezett, Stockholmban tartott, az Emberi Környezetről elnevezésű konferencián. A konferencia központi kérdésköre a gazdasági növekedés és a környezetváltozás volt. Mint a legtöbb ilyen jellegű konferencián, a szegény és gazdag országok nézőpontjainak különbözősége nem vezetett célra. Előbbi a szegénységet nevezte meg a környezetkárosítás fő okaként, ezért az ipari fejlődést tekintették kiútként. Ezzel szemben a gazdagabb

országok természetesnek vették a fejlődéssel együtt járó környezeti romlást. Mindezek ellenére a két nézőpont két tényezőben megegyezésre jutott: (1) ipari fejlődésre szükség van, (2) az ehhez társuló környezetkárosítás azonban túlzó mértéket ölt. Utóbbi fontosságának kiemelésére június 5-ét a Környezetvédelem világnapjaként jelölték ki. Érdemi változásokat nem hozott a konferencia (Gyulai, 2008), a fejlődő országok gazdasági felzárkózásának hatására a környezeti problémák globális mértékűvé váltak. Az ENSZ a problémák lehetséges orvoslásának előzményeként felállította a Környezet és Fejlődés Világbizottságát 1983-ban, melynek célja a környezetkárosítás fő okának feltárása, vezetője pedig az akkori norvég miniszterelnök-asszony Gro Harlem Brundtland lett.

A Brundtland-jelentés végül 1987-ben jelent meg. Ebben felismerték, hogy a növekvő emberi populáció egyre növekvő energiaszükséglettel jár, melyet nem biztos, hogy képesek vagyunk fedezni a jövőben. A fenntartható fejlődést úgy definiálják, hogy úgy kell kielégíteni a jelen generációk szükségleteit, hogy az a jövő generációk számára ne korlátozza a saját igényeik kielégítését (UN, 1987; Bojő et al., 1992). Környezetvédelmi szempontból kiemelendő, hogy már ekkor aggályokat fogalmaztak meg a fosszilis energiaforrások környezetszennyezésével kapcsolatban (Gyulai, 2008). Ennek ellenére a jelentés súlyos megállapításra jut: mivel a szegények túlzott mértékben használják környezetüket, ezért a világ egyre inkább fenntarthatatlan lesz, a szegénység felszámolásának eszközül pedig a gazdasági növekedést nevezi meg. Napjainkban a gazdasági világválság közben/után mindenhol a további gazdasági fejlődést látják kiútként, bár ez a mennyiségi jellegű növekedés csak rövidtávon jelenthet megoldást. Hosszútávon minőségi jellegű, technológiai és gazdasági fejlődés lenne célravezető, ugyanis a népesség növekedése miatt a terjeszkedő gazdasági fejlődés környezetünk fokozott felhasználását, tönkretételét eredményezi.

10.2.2. Közgazdaságtani közelítés

A Brundtland-jelentést többen bírálták azért, mert a fenntarthatóság definíciója nem pontos, céljainktól függően értelmezhetjük, és elvei alapján nem lehet egységes törvényeket hozni. Ezért a közgazdaságtan területén is igyekeztek meghatározni e fogalmat, melyben megkülönböztetnek erős és gyenge fenntarthatósági kritériumokat.

Gyenge fenntarthatóság a gazdaság rugalmasságát feltételezi, melyben a tőkejavak egymással helyettesíthetők. Hartwick (1990) megmutatta, hogy annak a nemzetnek, mely a nem megújuló, természetes energiaforrásoktól (pl. kőolaj) erősen függ, újra be kell fektetnie (legyen az tudás, épületek, utak) az erőforrás kinyeréséből eredő nyereséget ahhoz, hogy a nem megújuló energiaforrás mennyiségének csökkenését gazdaságilag ellensúlyozza. Solow (1986) megmutatta, hogy a Hartwick-szabály tulajdonképpen annak a feltétele, hogy az időben állandó fogyasztást elérjük, melyhez a tőke állandó szinten tartása szükséges. Ez a kettős szabályrendszer párhuzamba állítható Hicks (1946) bevétel és Page (1977) gazdasági hatékonyság definíciójával.

A három fő tőke típus (Pearce és Atkinson, 1992): (1) az ember által létrehozott tőke, például épületek, utak (K_m), (2) az emberi tőke, például tudás (K_h), (3) a természeti tőke, például természetes javak, biodiverzitás (K_n). Ha egymással helyettesíthetők a javak, és a Hicks-Page-Hartwick-Solow szabály értelmében a tőke állandó, akkor:

$$\frac{dK}{dt} = \frac{d(K_m + K_h + K_n)}{dt} \geq 0 \quad (10.1)$$

Mivel az emberiség által megszerzett tudás időben nem csökken ($K_h/dt > 0$) ezért Pierce és Atkinson (1992) értelmezésében:

$$Z = \frac{S}{Y} - \frac{\delta_m \cdot K_m}{Y} - \frac{\delta_n \cdot K_n}{Y} \quad (10.2)$$

ahol Y a GDP (bruttó nemzeti össztermék), S a megtakarítás, δ_m és δ_n az ember alkotta és természeti tőke amortizációs rátái. A gazdaság akkor lesz fenntartható, ha $Z > 0$.

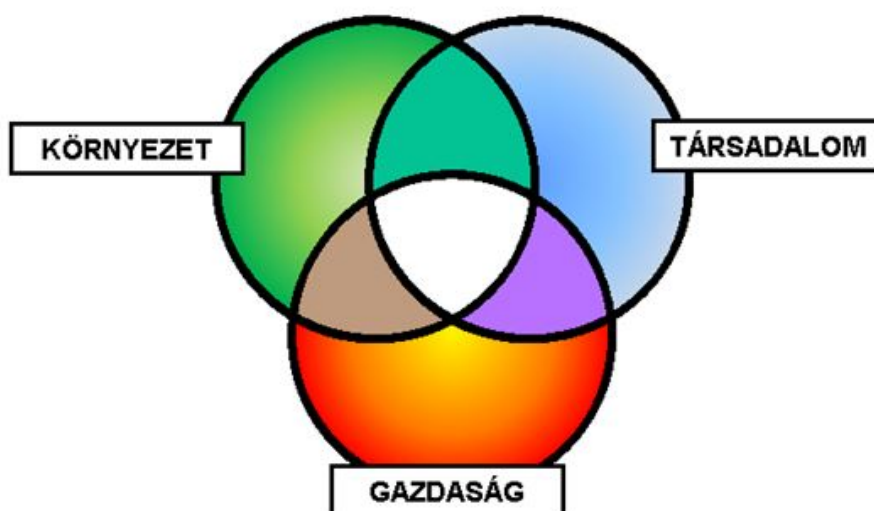
Ha feltesszük, hogy az egyes tőkék nem helyettesíthetők egymással, akkor erős feltételt szabunk a fenntarthatóságnak. További szigorítással élhetünk azzal a kikötéssel, hogy a természeti tőke értéke időben nem változhat (azaz a (10.2) egyenlet utolsó tagja negatív).

Ökológiai szempontból még a szigorú fenntarthatósági elmélet sem elég szigorú, ugyanis a tőkén belül átváltások lehetségesek (például fák ültetésével növeljük egy adott faj populációját, ugyanakkor csökkentjük a térség biodiverzitását). Az ökológiai-közgazdaságtani szemléletben újabb feltételként jelenik meg, hogy a természetbe

irreverzibilis – például fajkihaláshoz vezető – módon nem avatkozhatunk be (Kerekes, 2012). Összegezve a fenti feltételeket, közgazdaságtanilag a fenntarthatóság olyan gazdasági fejlődés, mely a GDP-ben kifejezett átlagos egy lakosra jutó „jólétet” nem csökkenti. Ennek az értelmezésnek két jellemző problémája van: (1) a jólétet GDP-ben méri, melyet arányosnak vél az életminőséggel, (2) feltételezi, hogy egyik tőke típus sem szűkös. Előbbi nem minden tekintetben tükrözi a tényleges jólétet, utóbbi pedig kisebb régióként nézve egyáltalán nem igaz.

10.2.3. Környezetpolitikai közelítés

Egy harmadik értelmezés alapján a fenntarthatóság a gazdaság, a környezet és a társadalom egyensúlyát jelenti (Sathaye et al., 2007; BMU, 1998). A három pilléren (10.2. ábra) alapuló modell elfogadja a fenntarthatóság szektorokat átfedő szerkezetét és a fenntarthatósági problémák kategorizálására ad lehetőséget. Az ENSZ ezen elv alapján igyekszik olyan direktívákat előírni, melyek a gazdasági-szociális fejlődést és a környezetvédelmet együttesen segítik elő. Ilyen például a fosszilis erőforrások megújuló energiaforrásokra való cseréje (Sathaye et al., 2007). A fenntarthatóság számszerű jellemzése olyan különböző indikátorokkal adható meg, melyek a három pillér valamelyikébe (vagy azok kombinációjába) tartoznak. A következő alfejezetben áttekintjük e hármas elmélet alapján használt indikátorok jellegét és fajtáit.



10.2. ábra: A fenntartható fejlődés célhalmazai.

10.3. Fenntarthatósági indikátorok

Az ENSZ Rio de Janeiróban tartott, a Környezetről és Fejlődésről szóló konferenciájának (1992) keretében egy akciótervet dolgoztak ki a fenntartható fejlődésre (UN, 1992b). Ezen belül az OECD (OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development), az UNESCO/SCOPE (SCOPE: Scientific Committee on Problems of the Environment), az UNEP/RIVM (United Nations Environmental Programme/National Institute of Public Health and the Environment in the Netherlands), a Világbank és a Világ Erőforrás Intézetének, a WHO (WHO: World Health Organisation, Egészségügyi Világszervezet) és egyéb más szervezetek közreműködésével különböző indikátorokat dolgoztak ki, hogy a környezeti változásokat nyomon tudják követni (Schirnding, 2002). Az intézmények saját működési céljaikkal párhuzamosan készítették el indikátor gyűjteményüket. Az OECD például az országok környezeti teljesítményére definiált mutatókat, a Világ Erőforrás Intézete olyan módszert dolgozott ki, amellyel egy környezeti szabályozás hatékonyságát lehet mérni a fenntarthatóság tükrében, a WHO pedig az emberiség egészségi állapotát meghatározó, illetve befolyásoló indikátorokat állított össze.

10.3.1 A fenntartható fejlődés indikátorainak elvi követelményei

A környezet, a gazdaság és a társadalom mutatóinak száma igen terjedelmes, de ahhoz, hogy a fenntartható fejlődést számszerűsíteni tudjuk, bizonyos feltételeknek meg kell felelniük (Bossel, 1999):

- 1) Az indikátorok a fenntarthatóság diagnosztikai eszközöként segítséget kell, hogy nyújtsanak a törvénykezések és gazdasági döntések meghozatalában a társadalom minden rétegére vetítve.
- 2) Az indikátoroknak minden fontos problémát le kell tudni írniuk. Egy ad hoc alapon kitalált indikátor csoport, amely csak az adott tárgyat érinti, nem elegendő; szisztematikusan kell felépíteni az indikátorok csoportjait.
- 3) Az indikátorok számának a lehető legkevesebbnek kell lennie, de nem kevesebbnek, mint amennyi szükséges.
- 4) Az indikátorhalmaz előállítását konszenzussal kell megtalálni, mely biztosítja a közösség vagy régió értékeinek és céljainak pontos leírását.
- 5) Az indikátoroknak pontosan meghatározottnak, megismételhetőnek, egyértelműnek, érthetőnek és gyakorlatiasnak kell lenniük. Minden érintett érdekeit és szempontját jól kell tükrözniük.
- 6) Az indikátorok rövid elemzésével pontos képet kell kapnunk a jelenlegi fejlődés életképességéről és fenntarthatóságáról, valamint összehasonlítást kell, hogy adjanak alternatív fejlődési útvonalakhoz.
- 7) Az indikátor csoportok meghatározásához jól definiált keretrendszer, folyamat- és kritériumrendszer szükséges.
- 8) Az indikátorok meghatározásához használt adatsoroknak széles körben és hosszabb távon kell megbízhatóan rendelkezésre állniuk.

10.3.2 Főbb indikátorok

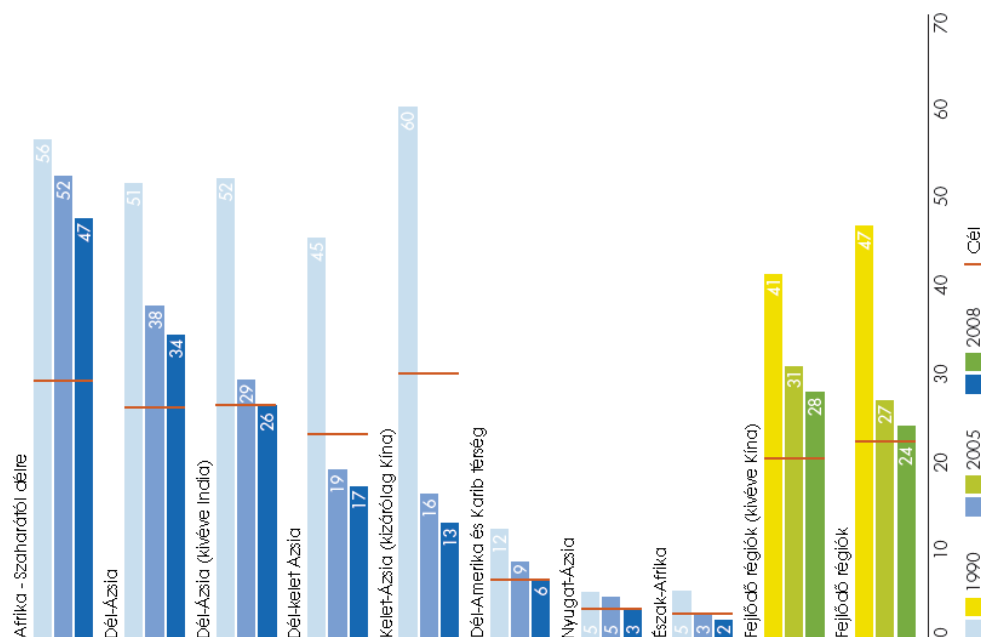
Az egyes indikátorcsoportokat és a csoporton belüli indikátorok számát jellemzően az összeállítást végző szervezetben felállított keretrendszer határozza meg. Ezen belül tematikák szerint lehet csoportosítani az indikátorokat. A tematikák a három fő csoport – a társadalom, környezet és gazdaság – halmazain belül helyezhetők el. Az ENSZ keretegyezményét követve mutatjuk be a következőkben a jellemző indikátorokat (UNDESA, 2007). Az ENSZ Fenntartható Fejlődési Bizottsága 1994 és 2000 között több indikátort is meghatározott, azonban számuk meghaladta a 200-at, így le kellett csökkenteni. 2007-ben a fő indikátorok száma már csak 50 volt, melyek egy nagyobb, 96 elemből álló indikátor csoport részét képezték. A főindikátorok három feltételnek tesznek eleget. Egyrészt csak a fenntarthatóság szempontjából lényeges kérdésekkel foglalkoznak. Másrészt olyan kritikus információt tartalmaznak, mely a többi főindikátorból nem előállítható. Harmadrészt, olyan adatokat igényelnek, melyek a legtöbb országban már elérhetők, vagy minimális költségráfordítással meghatározhatók.

A társadalomra vonatkozó indikátorok tematikája lefedi a szegénység, állami vezetés, egészség, oktatás és demográfia kérdéskörét. A környezeti indikátorok a természetes veszélyeket, a légkört, a földfelszínt, az óceánokat és tengereket, az ivóvizet, valamint a biodiverzitást vizsgálják. Gazdaság tekintetében három átfogó témára adnak indikátorokat, a gazdasági fejlődésre, a globális gazdasági kapcsolatokra, továbbá a fogyasztási és termelési szokásokra (UNDESA, 2007).

Szegénység

Láthattuk, hogy a Brundtland-jelentés a szegénység felszámolását nevezte meg elsődleges célként a fenntartható fejlődés érdekében. A szegénységet különböző irányból közelíthetjük meg. Fő indikátorként a lakosság azon arányát jelenti, amely a nemzeti szegénységi vonal alatti bevételből él. Hasonló indikátor a napi 1 amerikai dollárnál kevesebb pénzből élők aránya. Előbbi előnye, hogy adott ország gazdasági teljesítőképességéhez mérten ad relatív képet a szegénységről. Utóbbi azonban a fejlettebb országokban élők számára is információt nyújt a globális értelemben vett szegények számát illetően. A szegénység nem csak a környezetre, hanem a gazdaságra is negatív hatással van. Minél kisebb bevétellel rendelkezik egy háztartás, annál kevesebbet tud félretenni. Amennyiben nem rendelkeznek pénzügyi tartalékokkal, úgy befektetni sem tudják – a befektetés materiális javak (például ház) vásárlását jelenti. Befektetési hajlandóság nélkül a gazdaság nem tud fellendülni, mely a szegénység állandóságát eredményezi. Ebből az ördögi körből külső segítség vagy új erőforrások felfedezése nélkül lehetetlen kikerülni (Soubbotina, 2004). A világ országait tekintve a napi 1 amerikai dollárnál kevesebből élők (jelenlegi árfolyamon havi mintegy 6600 Ft) száma Afrikában és Indiában volt a legnagyobb a XXI. század első évtizedében, ahol a lakosság több mint 40%-a tartozik ebbe a kategóriába (Soubbotina, 2004). Egyes országokban, mint például az USA-ban, Kanadában, Ausztráliában, Új-Zélandon, valamint az Európai Unió nyugati felében ez az arány 0%. Az ENSZ adatai (UNData) alapján az 1990–2000 időszakban azokat az országokat tekintve, ahol vannak napi 1 amerikai dollárnál kevesebből élők, az átlagos szegénység 28% volt, ez az arány a 2000–2010 időszakra 24,5%-

ra csökkent. A változás mértéke országonként eltérő: egyes afrikai országokban akár 10%-kal is tovább növekedett az egyébként is nagy szegénység, de szerencsésebb helyzetű – polgárháborúktól mentes – országokban 20–30%-os csökkenés is tapasztalható volt. Megjegyezzük, hogy ez utóbbi országokban a szegénység még így is a lakosság 30–50%-át érinti (10.3. ábra) (UN, 2012).



10.3. ábra: A napi 1,25 amerikai dollárnál kevesebb bevételből élők aránya [%] 1990, 2005 és 2008-ban (UN, 2012).

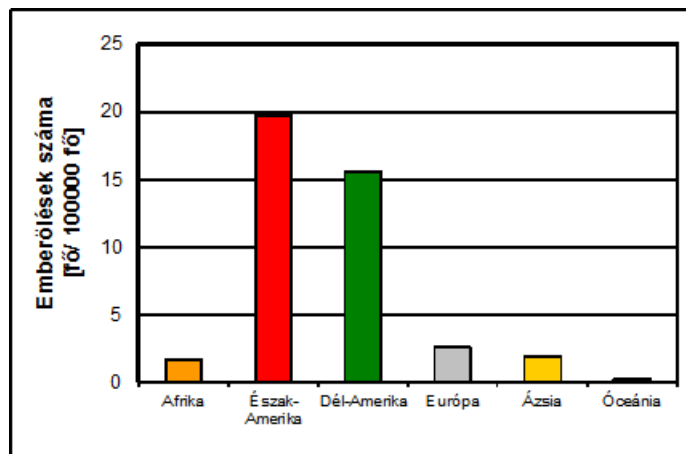
1990, 2005 és 2008-ban]

A szegénység mértékének tekintik továbbá az ivóvízhez való hozzáférés és az alultáplált emberek arányát is. Habár a szegénység az alultápláltsággal és tiszta ivóvízhez való hozzáféréssel általában együtt mozog, mégis lehetnek eltérések. Az 1990–2000 időszakban egy ország lakosainak átlagosan csak mintegy 81%-a jutott megfelelő ivóvízhez, mely a 2000–2010 időszakra csak 5%-kal emelkedett. Az afrikai és ázsiai országok e mutatók szerint is a legrosszabb helyen állnak. A két kontinens területén rendre 50%, illetve 70% alatt van a tiszta ivóvízhez hozzájutó emberek aránya. Tíz év alatt valamennyi javulás történt ezen a téren: a legkisebb arányú ivóvíz ellátottságot 12%-ról 29%-ra sikerült emelni (UNData). Ez persze nem a Föld teljes lakosságára vonatkozik, hanem egy-egy állam lakosaira. Az alultápláltság tekintetében 10 év alatt csupán néhány százalékkal sikerült csökkenteni az éhezők számát, mely csak relatív csökkenést jelent, hiszen a Föld népessége nagymértékben nőtt. A FAO adatai alapján a 2000-es évek elején mintegy 800 millió éhező ember volt a világon, mely 850 millióra emelkedett 2008-ban (UN, 2012). Az alultápláltság a szegénységhez hasonlóan nem csak a társadalmi fenntarthatóságra van hatással, hanem a gazdaságra is. Az alultápláltság rossz egészségi körülményeket teremt, mely alacsony termeléshez vezet. Az alacsony termelés a szegénységet és az alultápláltságot tovább növeli.

Állami berendezkedés

A szegénységben és a jobb életkörülmények között élők közti szociális feszültség politikai instabilitáshoz és bűnözéshez vezet. Az instabil politikai és közbiztonsági környezet kedvezőtlen a nemzeti és külföldi befektetőknek, amely a gazdaságra további negatív hatással van és visszahat a szegénységre is. Ezért kulcsindikátorként az egyes országok vezetését objektíven a korrupció és a szándékos emberölések 100.000 lakosra vetített arányával jellemezhetjük. A korrupció mértékének csökkenése a különböző szociális rétegek közti különbségek mérsékléséhez és a gazdasági stabilitás irányába visz. A közbiztonság csökkenése az igazságügyi és büntetőrendszerek alulfinanszírozása, valamint korrupciója miatt következhet be. Hiányában az emberéletet követelő bűnesetek száma gyorsan növekszik. Közbiztonság hiányában sem a társadalom, sem pedig a gazdaság nem üzemelhet biztonságosan, mely anarchiához, a nemzet egységének felbomlásához és szélsőséges esetben akár polgárháborúhoz is vezethet. Ilyen jellegű rendszer soha sem lehet fenntartható, hiszen pusztán közgazdasági szempontból tekintve ebben a rendszerben mind a természeti javak, mind az ember alkotta tőke csökken. A 10.4. ábrán a 2008-ban elkövetett

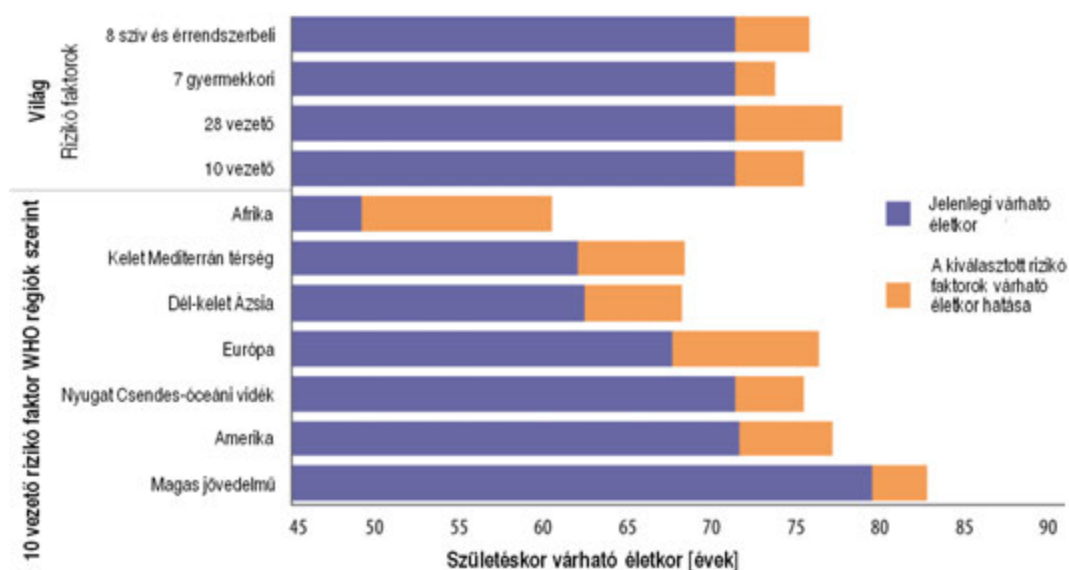
szándékos emberölések 100.000 főre vonatkoztatott száma látható kontinensenként (UNODC, 2011). Időbeli változásukat tekintve: míg Európában lassan csökken, addig mindkét amerikai kontinensen drasztikusan emelkedik. Afrikáról általában nincs sok információ, mert onnan az UNODC-hez kevés adat érkezik, másrészt a háborúk áldozatait nem számolják bele az emberölések közé, mely tovább torzítja a közölt értéket. Általánosságban elmondható, hogy a drogkereskedelemből adódóan az amerikai kontinensen kiemelkedően magas az emberölések száma.



10.4. ábra: A szándékosan elkövetett emberölések 100.000 főre jutó átlagos száma 2008-ban (UNODC, 2011 alapján).

Egészség

Az emberi egészségi állapot felmérésére a WHO régióként megkülönböztetve több mint 40 indikátort használ. Közülük fő indikátorként tekintjük a születéskori várható élettartamot és az olyan fertőző betegségek, mint a HIV/AIDS, malária és tuberkulózis halálozási rátáját (Schirnding, 2002). A várható élettartam azon átlagos évek számát fejezi ki, amennyit egy újszülött élhet, ha a korosztályokra jellemző halálozásokat figyelembe vesszük (a háborúktól eltekintve). Az életkortól függő morbiditás az egyén életkörülményeitől, életvitelétől, orvosi ellátásától, a nemzet egészségügyi finanszírozásától is függ. Részindikátorként külön meg szokták határozni az 5 éves kor alatti halálozási arányt is. Jellemzően a kiskorú halálozás csökkentésével a várható élettartam jelentősen növelhető. Az átlagos élettartam az alacsony és közepes jövedelmű országokban a XX. század közepi 40 évről a XX. század végére 65 évre nőtt (Soubotina, 2004), miközben a kiskorú halandóság 280-ról 79-re csökkent 1000 élveszületésre nézve (WHO, 2013). A magas jövedelmű országokban már a XX. század végén 78 év volt a várható élettartam. A Szaharától délre fekvő afrikai országokban ugyanakkor a várható életkor még ma is 50 év alatti (10.5. ábra). A kiskorú halandóság az eurázsiai régióban a volt Független Államok Közösségének országaiban a legnagyobb: 50–63/1000 élveszületés. Afrikában 50–180, Ázsiában 10–60, Amerikában 10–50 5 éves kor alatti haláleset jut 1000 gyerekre. (WHO, 2013).



10.5. ábra: A születéskori várható élettartam az egyes régiókban (WHO, 2004 nyomán).

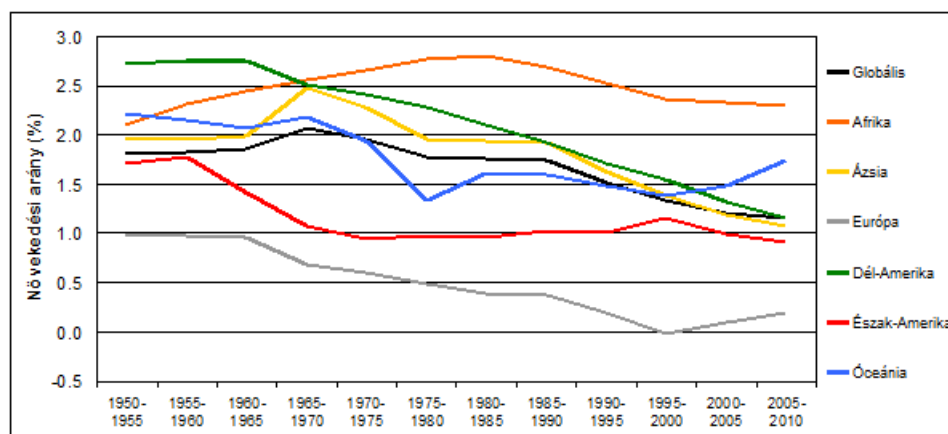
A HIV/AIDS, malária és tüdőbetegség jellemzően az alacsony közegészségügyi szint következménye. Elsősorban azokon a területeken jelent nagy problémát, ahol tiszta ivóvíz vagy kellő mennyiségű élelem sem áll rendelkezésre. A HIV vírusfertőzéstől eredő halálozások száma az elmúlt néhány évben ugyan csökkent, de egyre többen élnek együtt a betegséggel. A fertőzött betegek és halálozások közel 70%-a Afrikában található (rendre 23 millió, illetve 1,2 millió 2011-ben), a maradék több mint 11 millió beteg 65%-a Ázsiában és Amerikában él (Ázsiában nagyobb a halálozás aránya, mint Amerikában). Évente 2,5 millió új fertőzött beteget regisztrálnak. A tuberkulózissal fertőzött betegek száma az afrikai és csendes-óceáni vidékeken határozott csökkenő tendenciát mutat. A többi régióban nem változik, illetve gyengén csökken a számuk (WHO, 2013).

Oktatás

Minél magasabb szintű alaptudással rendelkezik egy nép, annál inkább képes kifejleszteni és elsajátítani az újabb környezetkímélő technológiákat. A gazdaságilag megfontolt döntésekhez szintén fejlett oktatási színvonal szükséges. Tehát az oktatás a gazdasági és a környezeti főcsoportra egyaránt kihat. Indikátorai közé soroljuk például az írástudást. Legalacsonyabb az írástudás a teljes felnőtt populációra nézve Afrika legszegényebb országaiban (<60%), közülük Csádban a legkisebb, ahol csupán 33%. A gazdaságilag közepes szinten lévő afrikai és amerikai államokban az írástudatlanság már csak 15% körüli, a fejlett országokban pedig 3%-nál is kisebb. A Föld összes országára számított átlagos írástudási arány – az afrikai országok nagy száma miatt – 83% volt 2010-ben (UNData).

Demográfia

A szegénység mellett a fenntarthatóság kulcsfontja a bolygón élő emberek száma, melynek szükségleteit fedezni kell. Eppen ezért a népesség növekedési üteme fontos jellemzője a fenntarthatóságnak. A növekedési ütem a népesség számának százalékos megváltozását fejezi ki. Amint láthatjuk a 10.6. ábrán, az átlagos növekedési ütem csökkenő tendenciát mutat az 1970-es végétől kezdve. Egyes kontinenseken – mint például Európában is – ez drasztikus csökkenést jelent. Az utóbbi öt évben a népesség csökkenése a volt keleti blokk országait érintette. A népességnövekedési arány jelentős csökkenése mutatkozik Dél-Amerikában is. A legoptimistább becslések alapján 2035-re, a legpesszimistább becsléssel 2022-re érjük el Földünk eltartó képességének elvi határát, a 8 milliárd főt (UNData, UNDESA, 2011).



10.6. ábra: A Föld népesség növekedési arányának változása régióként 1950–2010 (UNData).

Légkör

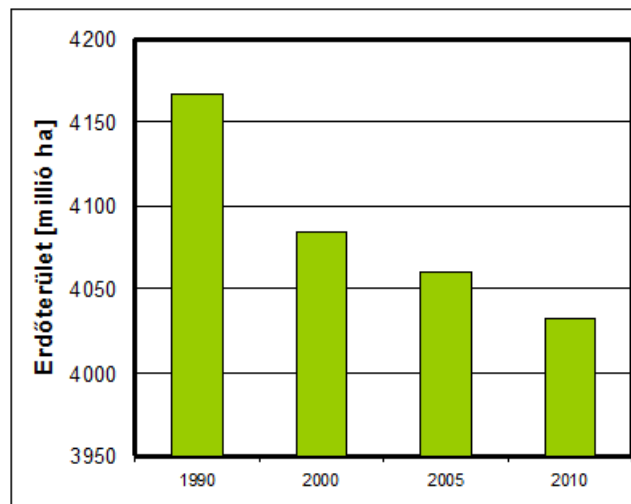
Ha a környezetünk szennyezéséről van szó, akkor a leggyakrabban a légköri CO₂ koncentráció riasztó mértékű növekedéséről hallunk. A fosszilis energiaforrások használatával ezen üvegházgáz koncentrációját jelentősen növeljük, ezért egyik legfontosabb kulcsindikátorként a CO₂, illetve CO₂-ekvivalens kibocsátás mennyiségét tekintik. A CO₂ kibocsátást tekinthetjük az összes iparágra együttesen, illetve kizárólag a fosszilis tüzelőanyagokhoz kapcsolódóan. További lehetőség a jellemzésre az egy főre, illetve a teljes lakosságra vonatkozó elemzése. A 10.2. táblázatban a fosszilis tüzelőanyagokból eredő CO₂ kibocsátás egy főre és a teljes lakosságra számított értékeit láthatjuk a 15 legtöbbet kibocsátó országra vonatkozóan. Míg egy főre vetítve a legnagyobb kibocsátással az olajtermelő országok rendelkeznek, addig a teljes lakosságra nézve a legnépesebb országok. A teljes népességgel számolva az első 15 ország a globális szén-dioxid kibocsátás 75%-át adja. Az elmúlt 20 évben az egy főre jutó CO₂ kibocsátás 720 tCO₂/fő-ről 1000 tCO₂/fő-re emelkedett. A növekedés nem folyamatos, az utóbbi néhány évben csak kicsit emelkedett, mert a fejlett országok üvegházgáz kibocsátása csökkent (UNData).

	ország	t CO ₂ /fő	ország	Mt CO ₂
1	Katar	53,47	Kína	6649
2	Kuvait	35,16	Amerikai Egyesült Államok	6002
3	Trinidad és Tobago	27,92	India	1754
4	Egyesült Arab Emírátsok	25,05	Oroszország	1545
5	Bahrein	24,25	Japán	1241
6	Aruba	22,99	Németország	788
7	Luxemburg	22,57	Kanada	574
8	Brunei	20,13	Egyesült Királyság	548
9	Amerikai Egyesült Államok	19,34	Irán	513
10	Ausztrália	17,74	Dél-Korea	500
11	Kanada	16,89	Mexikó	489
12	Szaúd-Arábia	15,77	Olaszország	465
13	Észtország	15,25	Dél-Afrikai Köztársaság	450
14	Kazahsztán	14,67	Szaúd-Arábia	433
15	Omán	14,56	Indonézia	409
			Globális összeg	30247

10.2. táblázat: A fosszilis tüzelőanyagok égetéséből és a cementgyártáshoz kapcsolódó CO₂ kibocsátás mértéke 2007-ben, a 15 legtöbbet kibocsátó (egy főre, illetve teljes népességre jutó) országra nézve.

Földhasználat

A növekvő népesség számára egyre több élelemre van szükség, melyet a természetes növényzet folyamatos átalakításával érünk el. Az átalakítás következményeként fajok pusztulnak ki, csökken a biodiverzitás, romlik a talaj minősége. Az indikátorok ezért a mezőgazdasággal és az erdőborítottsággal vannak kapcsolatban. A két fő indikátor: a művelhető és művelt területek aránya a teljes ország területéhez képest, valamint az erdők területi lefedettségének aránya. A teljes erdőterület 1990-ben 4167 millió hektár volt, mely 2010-re 135 millió hektárral csökkent (10.7. ábra). Habár a fejlett országokban az erdőterületek nagysága enyhén növekvő tendenciát mutat, mégis egyes fejlődő országok erdőirtásai miatt csökken a globális tendencia. A 135 millió hektár erdőterületből 55, illetve 24 milliót Braziliában és Indonéziában vágtak ki. Ugyanakkor példamutató Kína és India, ahol rendre 50, illetve 4,4 millió hektárral nőtt az erdőterületek nagysága (UNData).

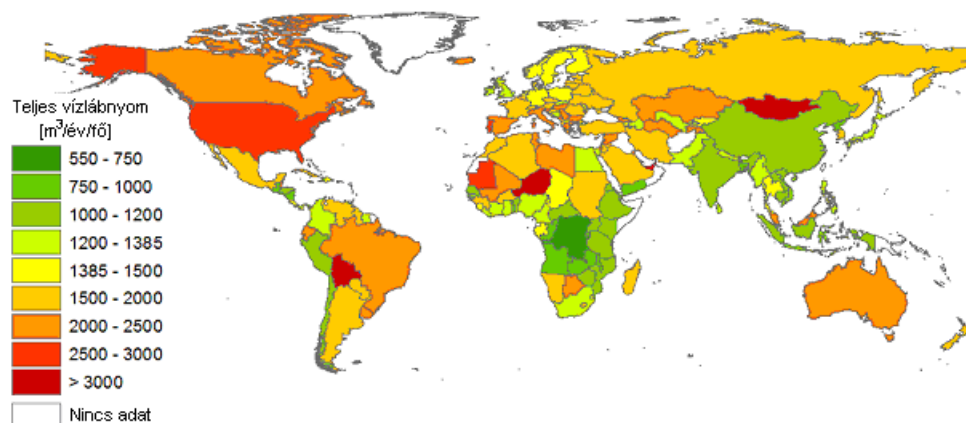


10.7. ábra: A Föld 217 országából számított globális erdőborítottság [millió ha] időbeli változása (UNData).

időbeli változása 1990 és 2010 között]

Édesvizek

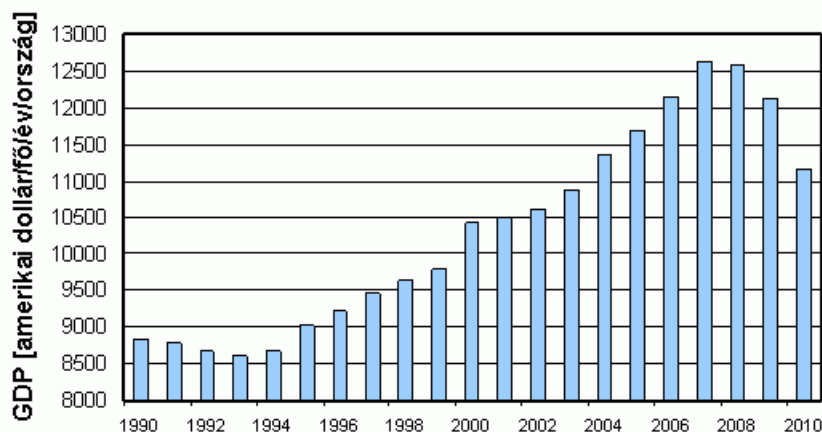
Habár bolygónk felszínét mintegy 70%-ban víz borítja, a földfelszíni élethez édesvízre van szükség, mely a teljes vízkészletnek csupán néhány százaléka. Az édesvíz jelentős részét különböző gazdasági célokra – nem hatékonyan – is használják, mely egyes régiókban a tartalékok veszélyes mértékű csökkenéséhez vezetett (gondoljunk az Aral-tó kiszáradásának problémájára). Egyes esetekben a változó éghajlat miatt lehetetlenül el egy-egy terület lakosainak élete, pl. a Himalájában, ahol az olvadó jég által táplált patakok adták a szükséges vizet. A zsugorodó gleccserek miatt azonban a kis falvak lakóinak át kellett települnie. Az édesvizek készleteinek indikátoraként a vízlábnyomot (Chapagain és Hoekstra, 2004) használják, mely tulajdonképpen a gazdasági aktivitás általi vízhasználatot jelenti. A vízlábnyom meghatározó eleme – azaz hogy a háztartásokban mit fogyasztunk – korántsem érvényes az egész országra általánosan. Például Mongólia rendelkezik az egyik legnagyobb vízlábnyommal (10.8. ábra), ami azzal magyarázható, hogy az állattenyésztés jelentős nagyságú vízlábnyommal rendelkezik, például 1 kg marhahús előállításához több mint 15.000 l vízre van szükség. A legtöbb fejlett ország vízlábnyoma nagyobb, mint a globális átlag (1240 m³/év/fő), de az EU-n belül a környezettudatosabb életmód, valamint a halászat kisebb vízhasználatot eredményez. A jellemzően mezőgazdaságból és halászatból élő államok vízlábnyoma (Chile, Kína, Indonézia) szintén kisebb, mint a globális átlag.



10.8. ábra: Az egy főre kifejezett vízlábnyom országokénti megoszlása az 1996–2005 időszakban (Mekkonen és Hoekstra, 2011).

Gazdasági fejlődés

A gazdasági fejlődésnek több mérőszáma is lehetséges. Leginkább a már korábban is említett GDP egy főre jutó értékét tekintik fő indikátorként. Emellett ide szokták még sorolni a foglalkoztatottság arányát, valamint az internet használat 100 főre vetített értékét. Az egy főre számított, egy országra átlagosan eső GDP értéke (10.9. ábra) – a 2005-ös amerikai dollár árfolyamon – az 1990-es évek elejétől folyamatosan növekedett 2007-ig, ahonnan a gazdasági világválságot követően erőteljes csökkenésnek indult. A legszegényebb országok Afrika területéről kerülnek ki: Kongó, Burundi, Libéria, Eritrea, ahol az éves GDP összege 2007-ben nem érte el a 600 amerikai dollárt – ami a 2007-es 185 Ft-os középárfolyammal számolva havi 9000 Ft-nál kevesebb bruttó (adózás előtti) bért jelent. A leggazdagabb országok (Luxemburg, Katar, Makaó, Szingapúr, Kuvait) évi GDP-je 50.000–75.000 amerikai dollár (azaz évi 9–13 millió forint) között mozgott egy lakosra számolva (UNData).



10.9. ábra: A Föld 186 országának egy főre jutó évenkénti átlagos bruttó nemzeti összterméke (GDP), 1990–2010. (UNData nyomán)

10.3.3. Indikátorok módszertana

A különböző indikátorcsoportok céljukat tekintve jellemzően két osztályba sorolhatók: (1) a rendszer jelenlegi állapotát és életképességét leíró, (2) a vizsgált indikátorra épülő rendszerekre gyakorolt hatását mutatják (például a GDP mekkora részét fordítják oktatásra).

Maguk az indikátorok valamilyen mennyiséget mutatnak (például szegények száma, GDP). Számszerű mivoltuk miatt a legegyszerűbben trendjüket vizsgálhatjuk, majd pedig a legfontosabbnak vélt indikátorok trendjeinek összessége alapján véleményt alkothatunk egy ország fejlődésének irányáról.

Alkothatunk összetettebb indexeket is, melyek a vizsgált rendszer egyensúlyát mutatják. Az egyensúlyt a régió/ország vizsgált tőkéje, a tőke felhasználása, importja, exportja adja. Ilyenek a különböző „lábnyom” típusú indexek (pl.: ökológiai, víz, karbon lábnyom). Példaként a 10.10. ábra alapján a virtuális vízegyenleghez, azaz a vízlábnyomhoz kapcsolódó fontosabb elemeket tekintjük át (Marjainé és Kocsis, 2012).

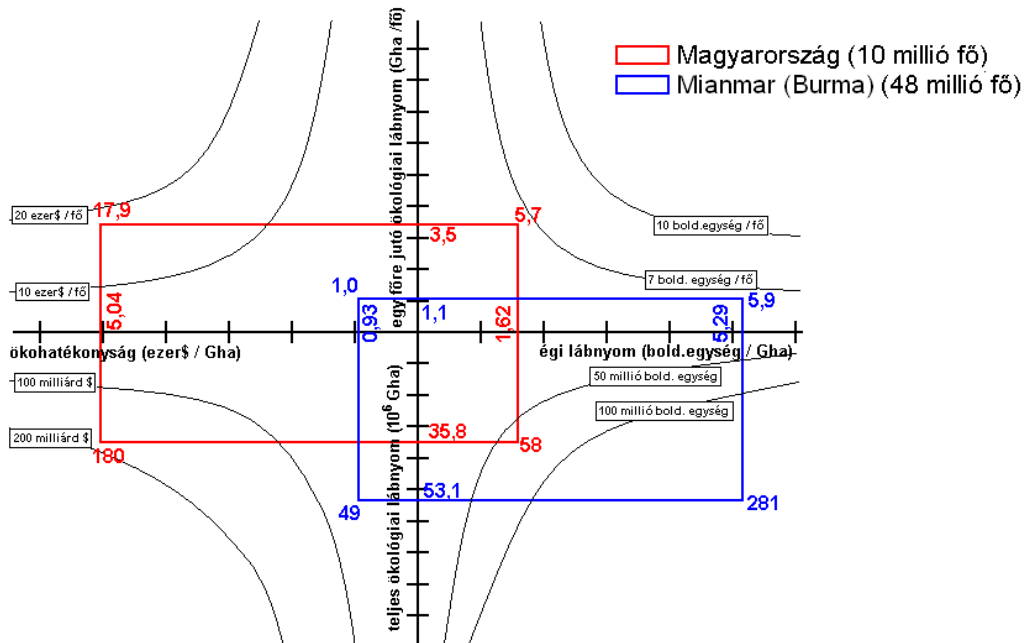


10.10. ábra: A virtuális víz és vízlábnyom összefüggései (Marjainé és Kocsis, 2012).

A különböző „lábnyomok” meghatározásakor azt kell figyelembe venni, hogy egy átlagos háztartásnak mekkora a fogyasztása, a fogyasztott termékek járulékos – a lábnyomot módosító – mennyisége és ezt milyen tőkebefektetéssel érik el. A lábnyomot befolyásoló mennyiség – például a vízlábnyom esetén – a háztartásokban elfogyasztott hús mennyisége. Attól függően, hogy milyen hústerméket vásárolunk, 1 kg hús előállításához szükséges víz mennyisége jelentősen különbözik, például a marha-, a sertés- és a csirkehúsról nézve rendre 15.415, 5988, illetve 4325 l/kg (Mekonnen és Hoekstra, 2010) a vízlábnyom.

Olyan összetett indikátor is készíthető, mely több szempontból elemzi a fenntarthatóság kérdését. Ilyen például a társadalmi fejlettségi index (Human Development Index – HDI) (UNDP, 1998), mely magában foglalja az egy főre jutó vásárlási erőt (amerikai dollár/fő), az írástudatlanságot és a várható élettartamot. Mivel ez a három fő szociális tényező gazdasági alapokon nyugszik, alkalmazásukkal összetett képet kaphatunk a fejlődés állapotáról.

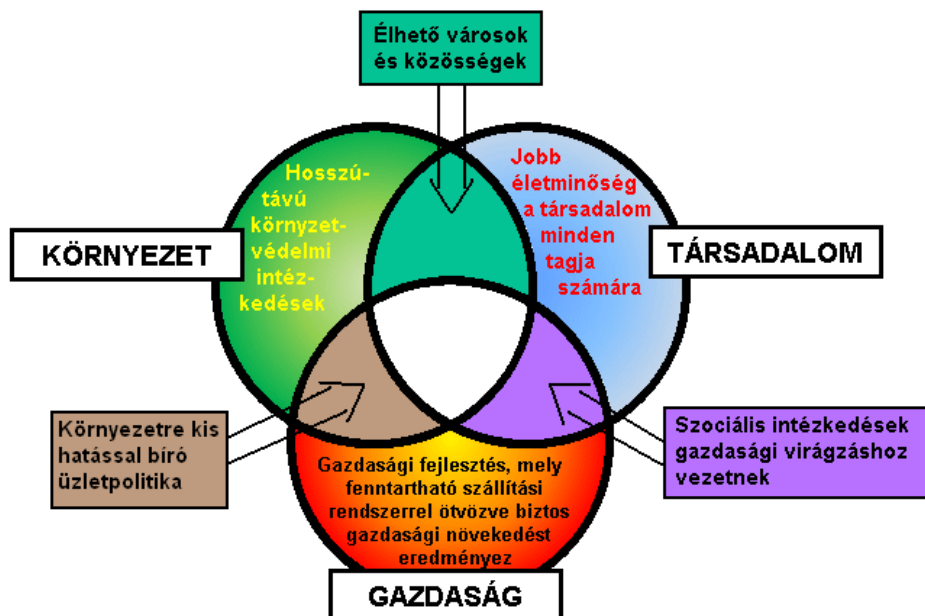
Ha nem egyetlen indikátor segítségével szeretnénk egy komplex rendszert leírni, hanem több indikátort vizsgálunk, akkor alkalmazhatjuk az adategyeztetés módszerét (Kocsis, 2012). Az adategyeztetés segítségével 4 indikátor egymáshoz viszonyított helyzetét adhatjuk meg, mely régiókra és országokra nézve is összevethető. Az egyes indikátorok súlyai pedig könnyen szemléltethetők, melyekből a fejlődés célra vezető irányára kaphatunk választ. A figyelembevett négy indikátort jól kell megválasztanunk, hogy egyensúlyuk a fenntarthatóság irányába mutasson. Kocsis (2012) munkájában példaként a GDP, az ökológiai lábnyom, az összboldogság – kérdőívek alapján –, és a népességszám mutatóira alkalmazza. A GDP általánosan használt mennyiség a „jólét” fogalmának mérésére, azonban korántsem utal a humán és környezeti problémákra. Éppen ezért ennek korlátozására vezették be az ún. összboldogság mennyiségét, mely szubjektív, a lakosok véleményét tükrözi. Annak érdekében, hogy az összefüggéseket 2 dimenzióban lehessen ábrázolni, a negyedik dimenziót, a népességet csak implicit módon veszi figyelembe. Az ábrázolást derékszögű koordináta rendszerben végzik (10.11. ábra). A koordináta rendszer függőleges tengelye a rendelkezésre álló tőkében bekövetkező változást írja le (ökológiai lábnyom). A vízszintes tengelyen a GDP és a boldogság ökológiai lábnyomhoz vett aránya áll. Előbbi úgy értelmezhetjük, mint az ökohatékonyságot, utóbbit pedig „égi lábnyomként”, vagyis a kinyert gazdasági nyereség milyen mértékben vette igénybe a természetes javakat, valamint a jólét mekkora terheléssel bír környezetünkre. A koordinátarendszer alsó térfelében bal oldalon a teljes gazdaságra jutó GDP, valamint ökológiai lábnyom található. A felső térfelében e két tényező egy főre számított mennyisége van (itt lép be implicit módon a lakosság). A 10.11. ábrán Magyarországra vonatkozó értékeket tüntettünk fel, valamint az összehasonlítás kedvéért Mianmart (Burmát) is. Az adategyeztetés ábrázolásakor egy referencia négyzet (origóbeli középpontú, egyenlő oldalhosszúságú) oldalhosszát meg kell választanunk. Ez esetben a függőleges oldalhossz 10 millió fős lakosság, a vízszintes pedig 7/8 boldogságegység/1000 amerikai dollár. A 10 milliós lakosságot referenciaként Magyarországra vetítve a négyzet a koordinátarendszer felső és alsó részének kb. ugyanakkora részét teszi ki. Nagyobb lakosság esetén (Mianmar népessége 48 millió fő) a négyzet nagyobb fele az alsó térfelén lesz. Habár a két ország átlagosan egyformán elégedett (5,9 boldogságegység), a „boldogsághoz vezető út” Magyarországon háromszor nagyobb környezeti igénybevétellel jár (3,5 Gha/fő). A környezeti igénybevételre nézve a 2,06 Gha az a mennyiség globálisan, amely fenntartható. A hazánkra vonatkozó adategyeztetés jelentős része a koordinátarendszer bal oldali térfelére esik, mely a Mianmarhoz képest magas GDP-nek köszönhető.



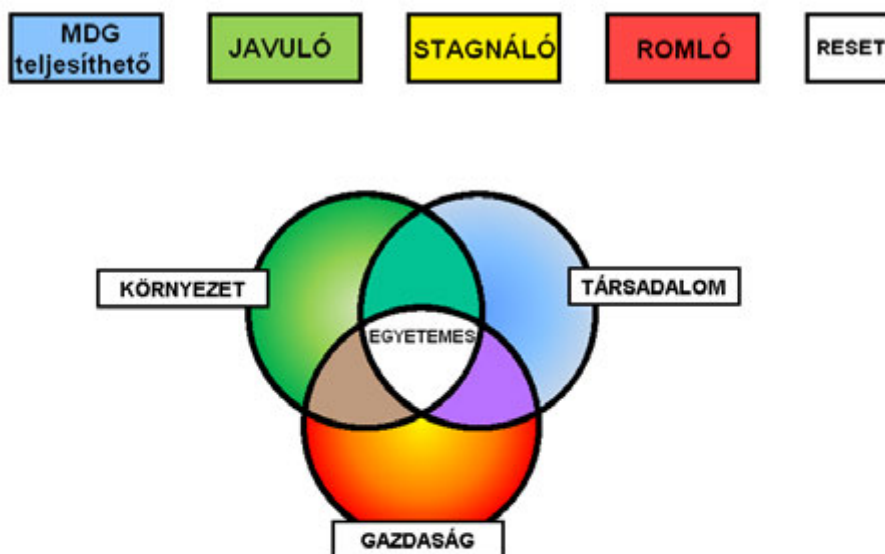
10.11. ábra: Az adatnégyzetek módszerének alkalmazása Kocsis (2012) módszere és Abdallah et al. (2009) adatai alapján Magyarországra és Mianmarra (1989 előtt Burma) nézve.

Egyes indikátorok valamilyen elv szerint (pl. életkor, lakosság száma) sorrendbe rendezhetők, így vizsgálhatjuk eloszlásukat. Ehhez a gazdasági vizsgálatokban elterjedt ún. Lorenz-görbét alkalmazzák (Jacobson et al., 2005). A görbe lényegében egy kumulált eloszlás görbe, melynél a vízszintes tengelyen a valamilyen elv szerint felállított sorrendben található százalékos megoszlásban a populáció, míg a függőleges tengelyen a vizsgált mennyiség kumulált százalékos megoszlása van. Amennyiben az eloszlás egyenletes – azaz például mindenki ugyanannyi pénzt keres –, a görbe az ábra átlóját adja meg. Minél nagyobb az egyenlőtlenség az egyes osztályok között, a görbe annál homorúbb lesz. Az egyes kategóriák közti egyenlőtlenség számszerűsítésére az ún. Gini-indexet használják, mely megadja az egyenlő eloszlástól vett különbséget. A Lorenz-görbét felhasználva veszük az egyenlőséget kifejező vonalat és a kirajzolt görbe közötti területet, majd elosztják az egyenlőségi vonal alatti teljes területtel. Így ha teljes egyenlőség van, akkor a Gini-index értéke 0. Minél nagyobb a különbség az egyes csoportok között, annál nagyobb lesz az index értéke. Ha a Brundtland-jelentés fő célpontját, a szegénységet vesszük alapul, akkor cél, hogy a szegény és gazdag lakosság közötti egyenlőtlenséget csökkentjük a fenntarthatóság érdekében.

A különböző indikátorok segítségével nyomon követhető fejlődésünk iránya. Segítségükkel meg lehet határozni a szükséges gazdasági és kormányzati intézkedéseket, melyek nem a Raskin et al. (2002) által vázolt, a társadalmi problémák (túlnépesedésből eredő szegénység és káosz) következményeként kialakuló barbarizmus (vagy anarchia), hanem a globálisan működőképes és önfenntartó társadalom irányába lendítik a jelenlegi helyzetet (10.12. ábra). A különböző indikátorokkal jellemzett jelenlegi globális fenntarthatóság helyzetét a 10.1. interaktív animáció szemlélteti. Az egyes kategóriák fölé helyezve a kurzort láthatjuk az indikátorok irányát, melyet négy különböző színű háttér jelez. Ahhoz, hogy a globálisan működőképes és önfenntartó társadalom irányába haladjunk, arra lenne szükség, hogy úgy javítsuk a Föld népességének életkörülményeit, hogy a környezetben a legkisebb kárt okozzuk a jobb körülmények megteremtéséhez szükséges gazdasági lépésekkel. Minthogy a megújuló energia alapú technológiák a környezetet a legkevésbé károsítják, elterjedésük elsődleges a környezeti tőke terheltségének csökkentése és a szegényebb országok gazdasági helyzetének javításának érdekében. A következő alfejezetben a fenntarthatóság céljának eléréséhez szükséges intézményes törekvéseket, továbbá a megújuló energiaforrások fenntarthatóságban betöltött szerepét mutatjuk be röviden.



10.12. ábra: A fenntartható fejlődés célhalmazainak teljesítéséhez szükséges intézkedések elvei.



10.1. interaktív animáció: Különböző indikátorok fenntarthatósági iránya. Az egyes csoportokat jelölő szövegek fölé helyezve a kurzort megjelennek a csoportokhoz tartozó fenntarthatósági indikátorok. A nem fenntartható állapotot piros, a változatlant sárga, a javuló tendenciájúakat pedig zöld háttérrel jelöltük. Amennyiben a MDG célok teljesíthetők egy indikátor jellemzése alapján, úgy azt kék színnel emeltük ki.

10.4. Lépések a fenntarthatóság irányába

A fenntarthatóság és klímaváltozás szoros összefüggésével már az 1992-es riói ENSZ konferencián is foglalkoztak, az üvegházgázok biztonságos szinten tartásával kapcsolatban. Eredményeképpen az IPCC FAR (First Assessment Report – első helyzetértékelő jelentés, 1990) a költséghatékony klímamegőrzéssel és a használható technológiákkal foglalkozott, a második helyzetértékelő jelentésben (1996) a szociális és egyenlőségi problémákat is felvetették. A harmadik jelentés (2001) már a teljes globális fenntarthatóságra fordította a figyelmet. Az utolsó, negyedik jelentésben (2007) a megújuló energiahasználatnak és technológiáknak kiemelt szerepe volt, ugyanakkor a fenntarthatóságra gyakorolt hatásukat is számba vették (Le Blanc et al., 2012). A Riói konferencia állásfoglalásait és azok következményeit a Rio+10 konferencián egyesítették Johannesburgban [10.1, 10.2]. Itt pontosították a fenntarthatóságot az ún. millenniumi fejlődési célok (Millennium Development Goals – MDG) leírásával. Az MDG-ben 8 elsődleges célt jelöltek meg 2015-re: (1) megszüntetni (legalább megfelelni) a szélsőséges szegénységet és éhezést, (2) az általános iskolát végezze el mindenki, (3) a nemek közti egyenlőség és nők jogainak növelése, (4) a gyermekkori halálozás csökkentése, (5) az anyák egészségének javítása, (6) a HIV/AIDS, a malária és egyéb halálos fertőző megbetegedések csökkentése, (7) a környezeti fenntarthatóság biztosítása, (8) globális együttműködés a fejlődés érdekében (szegény országok megsegítése). Egyes pontokban (iskolázottság, gyermekkori halálozás) sikerült javulást elérni, de korántsem olyan mértékben, mint ahogyan azt célul tűzték ki. Másokban – mint például az éhezés kérdésében – arányaiban csökkent az alultápláltság, de összességében növekedett az éhezõ emberek száma. Az MDG-ben erre nézve a cél az, hogy az 1990-es állapothoz képest 2015-re a felére csökkenteni az alultápláltak számát, majd 2040-re ismét megfelelni. Sajnos a tényleges csökkenés mértéke nem közelíti meg ezeket a terveket. A globális együttműködést a Koppenhágai Konferencián (2009) tovább erősítették, melyben a klímaváltozás mérséklésére további külön keretet biztosítanak a tehetősebb országok. Habár az MDG céljai első pillantásra inkább szociális irányokat mutatnak, elérésükhöz a gazdasági fejlődés elengedhetetlen. Ahhoz azonban, hogy a gazdasági fejlődés ne rontsa tovább a környezetet, más technológiai utakat kell találni.

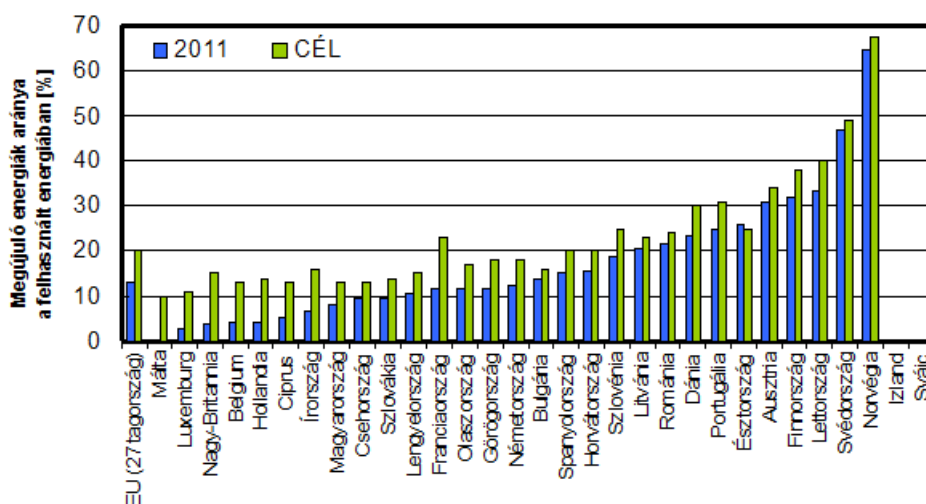
A megújuló energiaforrások a három fő fenntarthatósági ágat egyaránt támogatják: a környezeti és egészségügyi hatások mérséklésével, az energia-hozzáférés és az energiabiztonság növelésével, a szociális és gazdasági fejlődés elősegítésével, valamint a klímaváltozás (CO₂ ekvivalens kibocsátás) csökkentésével. Gazdasági szempontból a nem megújuló energiaforrások használata közvetlenül a természetes tőkét fogyasztja. A megújulók ezzel szemben mindaddig megtartják a természeti tőkét, amíg a forrásuk nem csökkenti a potenciális jövőbeli kitermelést (Sathaye, 2007).

Az új erőforrások alkalmazása több szempontból is előnyös. Egyrészt a vidéki, ritkán lakott területeken is megoldott lehet segítségükkel az elektromos áramellátás. Erre nagy szükség lenne, hiszen 2010-ben a népesség mintegy 20%-ának nem elérhető a központi elektromos hálózatra való csatlakozás. A népesség közel 40%-a használ tradicionális biomasszát (azaz tűzifát) fűtésre és főzésre, mely nem fenntartható (IEA, 2010b). A fosszilis tüzelőanyagokkal szemben sokkal egyenletesebb energiasűrűséget lehet elérni a megújuló energiák használatával. Ezek biztosítják a szükséges energiát, javítják az életkörülményeket és segítségükkel csökkenthetők az energiaszállításból eredő veszteségek lényegesen kisebb környezeti terhelés mellett. Továbbá a lokális lehetőségek kihasználásával az országok gazdaságai kisebb mértékben kiszolgáltatottak az erőforrások világpiaci helyzetének, ezáltal stabilabb lehet gazdaságuk. Ugyanakkor egyfajta megújuló energiaforrásból nem lehet folyamatosan fenntartani egy energia hálózatot, így több technológia együttes használatára van szükség.

Gondoljunk itt egy egyszerű példára, tekintsünk egy közép-afrikai falut! Lokális megújuló energia technológiaként használhatnak napelemeket, az állattenyésztésből és növénytermelésből származó hulladékokra épülő biomassza generátort, szélmalmost, illetve szélturbinát. A szélturbinák, a biomassza generátor, valamint a napelemek biztosítják az elektromos áramot, mellyel a falu lakói a különböző munkaeszközöket működtethetik. Akár az elektromos áramból, akár a biomassza erőműből termelt hő esetén szükségtelenné válik a fatüzelésű tűzhelyek alkalmazása. Ennek következményeképpen a szilárd tüzelőanyag égetéséből származó szennyezőanyagok (pl. CO, korom) nem károsítják a házban élők egészségét, nem növelik a légköri CO₂ koncentrációját. A tűzifagyűjtésre szánt fáradságos órák (GDP-t növelő) hasznos munkával, gyerekek esetén tanulással is eltölthetők, és nem utolsó sorban a környezetkárosítás is elmarad. A szélenergia segítségével a fűt kutakból kiemelt víz eljuthat a faluba. A vízgyűjtés így nem tart órákig, és a megtisztított ivóvíz segít az egészség megőrzésében, például a tisztálkodás, illetve a fertőzések csökkentése révén.

Mivel a megújuló energiaforrások kézzelfoghatók, törvényi szabályozásuk lehetséges, a legtöbb ország rajtuk keresztül építette be a fenntarthatóságra irányuló törekvéseket a jogrendjébe. Az EU 2007-ben elindította a 20/20-

as irányelvet (EU, 2010), mely az 1990-es szinthez képest 2020-ra 20%-kal kívánja csökkenteni az üvegházgázok kibocsátását, 20%-ra növelni az energiatermelésben a megújuló energiaforrások részarányát, és 20%-kal növelni az energiahatékonyságot. 2011-ben az EU 27 országából 11-ben a felhasznált megújuló energia részarányára nézve a 20%-ot már elérték, és a többi országban is évről-évre növekszik részesedése (10.13. ábra).



10.13. ábra: A megújuló energiaforrások részaránya az EU országokban 2011-ben, valamint a 20/20-as irányelv, azaz a 2009/28/EK direktíva által kitűzött cél alapján [10.3].

A megújuló energiaforrásokon alapuló technológiák alkalmazásához a fejlődő országoknak segílyre van szükségük. Az AGENDA 21-et követően évente a fejlett országok mintegy 625 milliárd amerikai dollárt adnak át az ENSZ gondozásába. Ebből a szegény nemzetek számára elérhető a Fejlesztési Alap (Official Development Aid), melynek kerete kezdetben évi 60 milliárd amerikai dollár volt. A Monterrey-ben 2002-ben megrendezett Gazdaság a Fejlesztésért Konferencián a résztvevő nemzetek megegyeztek abban, hogy országuk GDP-jének 0,7%-át az Alap részére juttatják, de 2003-ban ezt csak 5 ország teljesítette, így végül 2007-et követően nőtt az Alap éves költségvetése 120 milliárd amerikai dollár fölé (Le Blanc et al., 2012). Ez az összeg még egyáltalán nem elegendő ahhoz, hogy a fejlődő országok megvalósíthassák az MDG-ben foglalt fenntartható fejlődést. Az UNDESA WESS (World Economic and Social Survey) 2011-es elemzése szerint ehhez évente mintegy 1100 milliárd amerikai dollárra lenne szükség. A rendelkezésre álló becslések szerint összességében a humanitárius segílyekkel együtt a globális GDP mintegy 5–7%-a elegendő lenne Földünk fenntarthatóságának megőrzésére. Ennek forrásai azonban még nem tisztázottak.

A. függelék - Függelék

Fontosabb fizikai mennyiségek, mértékegységek, összefüggések, jelölések

J (joule): az energia mértékegysége

$3600 \text{ J} = 1 \text{ Wh}$

MW_{vill} vagy MW_e : Villamos teljesítmény, MW-ban kifejezve.

MW_h : Hőteljesítmény, MW-ban kifejezve.

Nagyságrendek:

Jele Előtag Szorzó hatvánnyal

E exa- 10^{18}

P peta- 10^{15}

T tera- 10^{12}

G giga- 10^9

M mega- 10^6

k kilo- 10^3

– – 10^0

m milli- 10^{-3}

μ mikro- 10^{-6}

n nano- 10^{-9}

p piko- 10^{-12}

f femto- 10^{-15}

a atto- 10^{-18}

A jegyzetben előforduló szervezetek rövidítései

FAO (Food and Agricultural Organization of the UN):

<http://www.fao.org>

FAO — Statistical Databases:

<http://apps.fao.org>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change):

<http://www.ipcc.ch>

OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development):

<http://www.oecd.org/>

UNCSD (United Nations Commission on Sustainable Development):

www.un.org/esa/sustdev/csd

UNDESA (United Nations Department of Economic and Social Affairs):

<http://www.un.org/esa/desa.htm>

UNEP (United Nations Environment Programme):

<http://www.unep.org/>

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change):

<http://www.unfccc.int>

UNODC (United Nations Office on Drugs and Crime):

<http://www.unodc.org>

UNSD (United Nations Statistics Division):

<http://www.un.org/Depts/unsd>

WHO (World Health Organization):

<http://www.who.org>

World Resources Institute:

<http://www.wri.org/>

WSSD (World Summit on Sustainable Development):

<http://www.johannesburgsummit.org/>

UNData:

<http://data.un.org/DataMartInfo.aspx>

Fogalomtár

Aceton: vegyiparban az oldószerek egyik alapanyaga, képlete: $\text{CH}_3\text{-CO-CH}_3$.

Alkánok (paraffinok): nyílt láncú telített szénhidrogének csoportja, szerves oldószerekben jól oldódnak, égésükkor CO_2 és víz keletkezik; a magasabb rendű alkánok CH_2 csoportban különböznek egymástól, általános képletük: $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$.

Hidrolízis: olyan folyamat melynek eredményeképpen víz keletkezik és a vízmolekula új vegyületeket alkot a bomlás további termékeivel.

Amiláz: enzimsalád, mely a keményítőt cukorra bontja.

Aminosav: olyan vegyület, melyben amino- ($-\text{NH}_2$) és karboxilcsoport ($-\text{COOH}$) egyaránt van, a fehérjék alapja.

Cellulóz: a növények vázanyagát képező glükóz alapú összetett szénhidrát, képlete: $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$. Mivel láncmolekulái között hidrogénkötés van, ezért bontásához speciális enzimekre vagy tömény savra van szükség.

Cetánszám: az Otto-motorok (szikramentes) üzemanyagára felállított empirikus mértéke az öngyulladásnak, egyben minőségi jelző is. Értéke 100-ban maximalizált, ekkor rendelkezik az üzemanyag a legkedvezőbb tulajdonságokkal. A cetán maga a 16 szénatomos paraffin.

Cukor: szénhidrát, más néven szacharóz, képlete: $\text{C}_n\text{H}_{2n}\text{O}_n$.

Dehidráció: vízelvonás (kémiai, fizikai vagy biológiai).

Elszappanosítás: zsírok, zsírsavak szappanná alakítása lúgokkal vagy alkáli karbonátokkal.

Endoterm: hő felvétellel járó kémiai folyamat.

Enzim: olyan fehérjék, melyek biológiai katalizátorként működnek.

Észter: oxigén tartalmú szerves vegyület, alkoholokból vagy savakból keletkezik egy molekula víz kilépésével.

Észterezés: észterek előállítása, a növényi összetevők katalizátor és metanol segítségével bonthatók.

Fémkarbonil: fém molekula karbonil (kettős kötésű CO) csoporthoz kapcsolódik.

Glicerín: lipidek fő alkotó eleme, képlete: $\text{HOCH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{OH}$.

Hemicellulóz: a növények sejtfalát alkotó egyik polimer, különböző glükóz módosulatokból áll.

Hidrogénezés: a telítetlen szerves vegyületek telítetté alakítása hidrogénnel (kettős kötések felbontásával a szabadgyökök helyére hidrogén kerül).

Katalizátor: a kémiai reakciók gyorsítására szolgáló anyag, mely azonban nem lép reakcióba a komponensekkel.

Keményítő: szénhidrát, poliszacharid, arányában kevesebb cukorból áll, mint a cellulóz.

Ligandumok: központi atomhoz/molekulához kapcsolódó atomok.

Lipid: zsírmolekula, glicerinből és zsírsavakból álló molekula, a szén- és hidrogénatomok száma nagyobb, mint a szénhidrátokban.

Metanogén: olyan baktériumtörzs, mely a hidrogén anaerob oxidációjával nyer energiát (a hidrogén bontáskor pedig metán keletkezik).

PAN: peroxi-acetil-nitrát, $\text{C}_2\text{H}_3\text{NO}_5$.

Szacharizáció: poliszacharid lebontása cukormolekulákká.

VOC (volatile organic compound): illékony szerves vegyület.

11. fejezet - Felhasznált irodalom

Abdallah, S., Thompson, S., Michaelson, J., Marks, N., Steuer, N., 2009: The (un)Happy Planet Index2.0. Why good lives don't have to cost the Earth. New Economic Foundation, London. 64p. (ISBN 9781904882558)

Ádám, B., 2012: Sekély földhő hasznosítása hőszivattyúval, projekt tapasztalatok alapján. Esélyek, lehetőségek. Új utak a földtudományban, előadás, Budapest, 2012.03.21., <http://www.mageof.hu/arch/12adam.pdf>

Ambrózy, P., Tárkányi, Zs., 1981: Az energiagazdálkodással összefüggő meteorológiai kérdések. Kézirat. MTA Meteorológiai Tudományos Bizottsága, Budapest.

Arrhenius, S., 1896: On the Influence of Carbonic Acid in the Air Upon the Temperature of the Ground. *Philosophical Magazine*. 1896(41), pp. 237–276.

Arvizu, D., Balaya, P., Cabeza, L., Hollands, T., Jager-Waldau, A., Kondo, M., Konseibo, C., Meleshko, V., Stein, W., Tamaura, Y., Xu, H., Zilles, R., 2011: Direct Solar Energy. In: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [eds. Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlomer, S., von Stechow, C.], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Aspliden, C.I., Elliott, D.L., Wendell, L.L., 1986: Resource assessment methods, siting and performance evaluation. *Physical Climatology for Solar and Wind Energy*, pp. 321–376.

Aujeszký, L., 1949: Meteorológiai előmunkálatok a magasépítésben végzendő szélterhelés számításokhoz. *Időjárás*, 53, pp. 15–25.

Aujeszký, L., 1951: A szélsébség négyzetes és köbös átlagainak kiszámítása energiahasznosítási kérdések megítéléséhez. *Időjárás*, 55, pp. 79–81.

Bacsó, N., Kakas, J., Takács, L., 1953: Magyarország éghajlata. OMI kiadványa, XVII. Kötet, Budapest, 225p.

Bárány, I., Vörös, E., Wágner, R., 1970: The influence of the wind conditions of the Hungarian Alföld on the geographical distribution of mills. *Acta Climatologica*, Tom. IX, fasc. 1-4, pp. 73–81.

Bauen, A., Berndes, G., Junginger, M., Londo, M., Vuille, F., 2009: Bio-energy - a sustainable and reliable energy source. A review of status and prospects. IEA Bioenergy, Whakarewarewa (New Zealand), 108p.

Bertani, R., 2010: Geothermal Power Generation in the World 2005–2010 Update Report. In: *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25–30 April 2010*, 41p.

Bessoni, J., 1578: *Theatrum Instrimentorum et Machinarum*, Apud Barth. Vincentinum, Lugduni, 154p.

Blahó, M., Marshall, J., 1993: Wind energy in Hungary. In: *Proceedings of ISES Solar Word Congress, Volume 8: Biomass, Agriculture, Wind*, pp. 213–218.

BMU, 1998: Nachhaltige Entwicklung in Deutschland, Entwurf eines umweltpolitischen Schwerpunktprogramms. Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Bonn, Germany. 147p.

Bojö, J., Maler, K.-G., Unemo, L., 1992: *Environment and Development: An Economic Approach*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands and Boston, MA, USA. 175p. (ISBN 9780792318781)

Boross, L., Czinder, J., 2004: A cirkulációs fluidtüzelés hazai kutatásai – kénlekötés és tüzelőanyag minőség kapcsolata. *Magyar Energetika*, 11(3), pp. 33–42.

Bossel, H., 1999: *Indicators for Sustainable Development: Theory, Method, Applications. A Report to the Balaton Group*, IISD, Winnipeg, Canada. 138p. (ISBN 1895536138)

Büki, G., 2010: *Köztisztviselői Stratégia Programok, Megújuló energiák hasznosítása*, Magyar Tudományos Akadémia, Budapest). 142p. ISBN 978-963-508-599-6

- Butti, K., Perlin, J., 1980: A golden thread: 2500 years of solar architecture and technology. Chesire Books, 289p.
- Callendar, G.S., 1938: The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 64, pp. 223–240.
- Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y., 2004: Water footprints of nations. Volume 1: Main Report, Value of Water Research Series No. 16, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands. 80p.
- Cheng, J.J., Timilsina, G.R., 2010: Advanced Biofuel Technologies: Status and Barriers. World Bank Policy Research Working Paper No. WPS 5411, Sept 2010. 45p.
- Chum, H., Faaij, A., Moreira, J., Berndes, G., Dhamija, P., Dong, H., Gabrielle, B., Goss Eng, A., Lucht, W., Mapako, M., Masera Cerutti, O., McIntyre, T., Minowa, T., Pingoud, K., 2007: Bioenergy, in: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [eds. Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlomer, S., von Stechow, C.], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. pp. 209–332. (ISBN 9781107607101)
- Costa Gomez, C., 2006: Notwendige Rahmenbedingungen für die Nutzung von Biogas als Kraftstoff in Deutschland. Presentation at the „4. Internationaler Fachkongress: Kraftstoffe der Zukunft des BBE und der UFOP“, 27./28. November 2006, ICC Berlin.
- Crucible Carbon, 2008: Biomass Technology Review: Processing for Energy and Materials, Crucible Carbon Consulting, Victoria (Australia). 34p.
- Czelnai, L., 1953: A szélenergia felhasználásának néhány elméleti kérdése és lehetőségei hazánkban. Időjárás, 57, pp. 221–227.
- Debeir, J.C., Deléage, J.P. és Hémerly D., 1991: Energy and Civilization Through the Ages. In: Servitude of Power. Zed Books, London, 64p.
- DEFRA (Department for Environment Food and Rural Affairs), 2004: Growing short rotation coppice. Best practice guidelines for applicants to Defra's Energy Crops Scheme. 32p.
- Dobesch, H., Kury, G. (szerk.), 1997: Wind Atlas for the Central European Countries of Austria, Croatia, Czech Republic, Hungary, Slovak Republic, and Slovenia. Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik, Heft 16, ZAMG, Wien, 105p.
- Dobesh, H., Kury, G., 1999: Basic meteorological concepts and recommendations for the exploitation of wind energy in the atmospheric boundary layer. Working report, Vienna, 117p.
- Dobi, I. (szerk.), 2006: Magyarországi szél és napenergia kutatás eredményei. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 148p.
- Dövényi, P., Horváth, F., Drahos, D., 2002: Hungary. In: Atlas of Geothermal Resources in Europe (eds. Hurter, S., Haenel, R.). Publication No. 17811 of the European Commission, Office for Official Publications of the European Communities. L-2985, Luxembourg, pp. 36–38.
- EC, 2013: Energy challenges and policy. Commission contribution to the European Council of 22 May 2013. ec.europa.eu/europe2020/pdf/energy2_en.pdf, 26p.
- Elders, W.A., Friðleifsson, G.Ó., Zierenberg, R.A., Pope, E.C., Mortensen, A.K., Guðmundsson, A., Lowenstern, J.B., Marks, N.E., Owens, L., Bird, D.K., Reed, M., Olsen, N.J., Schiffman, P., 2011: Origin of a rhyolite that intruded a geothermal well while drilling at the Krafla volcano, Iceland. Geology, 39(3), pp. 231–234.
- Energia Központ, 2000: Csináljuk jól! Villamosenergia-termelés szélenergiával. Energiahatékonysági és Energetikai Környezetvédelmi Ügynökség, Budapest, 16p.
- Erdélyi G., 1984: Tés. Szélmalmok. Tájak Korok Múzeumok Kiskönyvtára 181, Budapest, 16p.

- EU, 2010: Communication from the Commission Europe 2012: A strategy for smart sustainable and inclusive growth, 35p. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:2020:FIN:EN:PDF>
- European Commission, 2005: Biomass. Green energy for Europe. Directorate-General for Research. Sustainable Energy Systems (ISBN 9289484667), 48p.
- Eurostat, 2012: Energy balance sheets 2009-2010. Eurostat statistical books. 526p. http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-EN-12-001/EN/KS-EN-12-001-EN.PDF
- FAO Report-44, 2010: Algae-based biofuels Applications and Co-products. 107p. (ISBN 9789251066232)
- Faragó, T., Nagy, B. (szerk.), 2005: Nemzetközi környezet- és természetvédelmi egyezmények jóváhagyása és végrehajtása Magyarországon. Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, ELTE Állam és Jogtudományi Kar, 189p.
- Faragó, T., 2012: A nemzetközi klímapolitikai együttműködés fordulópontja? Ma és Holnap, XII/6, pp. 10–13.
- Filep, A., 1981a: Széldaráló. In: Magyar Néprajzi Lexikon 4 (szerk.: Ortutay, Gy.), Akadémiai Kiadó, Budapest, pp. 627–628.
- Filep, A., 1981b: Szélmalom. In: Magyar Néprajzi Lexikon 4 (szerk.: Ortutay, Gy.), Akadémiai Kiadó, Budapest, pp. 631–634.
- Frode, W., 1987: Windmühlen. Ellert & Richter, Hamburg, 12p.
- Gasch, R., 1991: Windkraftanlagen. Teubner-Verlag Stuttgart, 370p.
- Gipe, P., 1995: Wind Energy Comes of Age. John Wiley & Sons, Inc., 481p.
- Goldstein, B., Hiriart, G., Bertani, R., Bromley, C., Gutierrez-Negrin, L., Huenges, E., Muraoka, H., Ragnarsson, A., Tester, J., Zui, V., 2011: Geothermal Energy. In: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [eds. Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlomer, S., von Stechow, C.], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 36p.
- Graaf, D., Fendler, R., 2010: Biogas production in Germany. Federal Environment Agency. Dessau-Rosslau, 29p.
- GWEC, 2013: Global Wind Report 2012, Global Wind Energy Council, 72p.
- Gyulai, I., 2008: Kérdések és válaszok a fenntartható fejlődésről. Magyar Természetvédők Szövetsége, Budapest, 30 p. (ISBN 9789639802032)
- Hall, D., Rosillo-Calle, F., 1999: The Multifunctional Character of Agriculture and Land: the energy function (Background Paper 2: Bioenergy), in Background Papers: FAO/Netherlands Conference on the Multifunctional Character of Agriculture and Land, (Ed.) Trenchard, R., Rome (FAO).
- Hartwick, J.M., 1990: Natural Resources, National Accounts, and Economic Depreciation, Journal of Public Economics, 43, pp. 291–304.
- Hau, E., 1996: Windkraftanlagen. Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. Springer Verlag, 792p.
- Hegyföky, K., 1894: A szél iránya a Magyar Szent Korona országaiban. Királyi Magyar Természettudományi Társulat, Budapest.
- Hicks, J.R., 1946: Value and Capital, 2nd edition, Oxford University Press, Oxford. 352p.
- Hille, A., 1932: A szélsébség gyakorisági értékei Budapesten. Időjárás, 36, pp. 12–19.
- Hills, R.L., 1994: Power from Wind. Cambridge University Press, 311p.

Hinderling, T., 2008: Solar islands: A new concept for low-cost solar energy at very large scale. Published online at „The Oil Drum” 20-05-2008. <http://europe.theoil Drum.com/node/4002>

Hiriart, G., Prol-Ledesma, R.M., Alcocer, S., Espindola, S., 2010: Submarine geothermics: Hydrothermal vents and electricity generation. In: Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April, 2010. Available at: <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/3704.pdf>.

Hunyár, M., Schmidt, I., Veszprémi, K., Vincze, Gy., 2001: A megújuló és környezetbarát energetika villamos gépei és szabályozásuk. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 340p.

IEA, 2009: World Energy Outlook 2009, OECD, Paris. 698p. (ISBN 9789264061309)

IEA, 2010a: Renewable Energy Essentials: Hydropower. International Energy Agency, Paris. 4p. [www.iea.org, Hydropower_Essentials.pdf](http://www.iea.org/Hydropower_Essentials.pdf)

IEA, 2010b: World Energy Outlook 2010. International Energy Agency, Paris, France, 736p. (ISBN 9789264086241)

IEA, 2011: Renewables Information 2011, OECD/IEA, Paris. 498p.

IEA, 2012a: Technology Roadmap: Hydropower. International Energy Agency, Paris. 68p. [www.iea.org, 2012_Hydropower_Roadmap.pdf](http://www.iea.org/2012_Hydropower_Roadmap.pdf)

IEA, 2012b: Technology Roadmap – Bioenergy for heat and power. OECD/IEA, Paris. 68p.

IEA, 2012c: Key world energy statistics. Paris. 80p.

IEA-WEO, 2012: World Energy Outlook 2012, Renewable Energy Outlook, International Energy Agency, 32p.

IPCC, 2011: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [eds. Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlomer, S., von Stechow, C.], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 24p.

Jacobson, A., Milman, A.D., Kammen, D.M., 2005: Letting the (energy) Gini out of the bottle: Lorenz curves of cumulative electricity consumption and Gini coefficients as metrics of energy distribution and equity. Energy Policy, 33, pp. 1825–1832.

Jánosi, I., 2010: Geotermikus energia – Nem kívánt mellékhatások. Természet Világa, 141(8), pp. 304–307.

Justus, C.G., 1985: Wind energy. In: Handbook of applied meteorology (ed.: Houghton, D.D.), Wiley Interscience Publication, John Wiley and Sons, New York, pp. 915–944.

Kaboldy, 2009: http://hu.wikipedia.org/wiki/Fájl:Perzsa_malom.svg

Kakas, J., 1947: Repülőterek szélirány-gyakorisága. Időjárás, 51, pp. 58–68.

Kakas, J., 1952: Adatok hazánk évszakonkénti szélgyakoriságához. Időjárás, 56, pp. 22–35.

Kakas, J., Mezösi, M., 1956: Szélviszonyaink vizsgálata és az országos energiagazdálkodás. Időjárás, 60, pp. 350–364.

Kerekes, S., 2012: A fenntartható fejlődésről válság idején. In: Fenntartható fejlődés, élhető régió, élhető települési táj 1. (Szerk.: Kerekes, S., Jámor, I.). Budapesti Corvinus Egyetem, Budapest. pp. 15–36.

Kereszturi, Á., 2008: Szélsőséges élőlények és élőhelyek a Földön - asztrobiológia kurzus IV. rész. <http://www.origo.hu/tudomany/vilagur/20080102-asztrobiologia-szelsoseges-elolenyek-es-elohelyek-a-foldon.html?pldx=1>

Kiss, G., 2008: A biomassza energetikai hasznosítása Magyarországon. Szakdolgozat, Debreceni Egyetem, 75p.

Kitani, O., Jungbluth, T., Peart, R.M., Ramdani, A., 1999: CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Vol, V, Energy and Biomass Engineering. ASAE publication, ST Joseph, MI. 351p. (ISBN 0929355970)

- Kocsis, T., 2012: Föld és ég. Az ember és a természeti környezet közötti kapcsolat jellemzése az adatnégyzetek módszerével. In: Fenntartható fejlődés, élhető régió, élhető települési táj 1. (Szerk.: Kerekes, S., Jámor, I.). Budapesti Corvinus Egyetem, Budapest. pp. 37–62.
- Koppány, Gy., 1989: Légköri erőforrások. Egyetemi jegyzet, JATE TTK, Szeged.
- Krohn, S., 2001: Ipari sikertörténet: a dán szélturbinák. Környezetvédelem, 2001/1, pp. 26–27.
- Ladanai S., Vinterbäck, J., 2009: Global potential of Sustainable Biomass for Energy. Swedish University of Agricultural Science, Department of Energy and Technology, Report 013. 32p.
- Láng, I., 2002: Környezet- és természetvédelmi lexikon I. (főszerkesztő: Láng, I.) Akadémiai Kiadó, Budapest. 664p. (ISBN 630578476)
- Le Blanc, D., Liu, W., O'Connor, D., Zubcevic, I., 2012: Development cooperation in the light of sustainable development and the SDGs: Preliminary exploration of the issues, UNDESA: Rio+20 working papers. 23p.
- Ledács Kiss, A., 1966: A szélenergia felhasználása országos energiaellátásra. Energia és Atomtechnika, 19, pp. 340–345.
- van Loo, S., Koppejan, J., 2008: The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing. London, United Kingdom. Earthscan. 465p. (ISBN 1849711046)
- Lund, J.W., 2007: Characteristics, development and utilization of geothermal resources. GHC Bulletin, 9p.
- Lund, J.W., Freeston, D.H., Boyd, T.L., 2010: Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. In: Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25–30 April 2010, 23p.
- Mádlné Szőnyi, J., 2006: A geotermikus energia – Készletek, kutatás, hasznosítás. Grafon Kiadó, Nagykovácsi, 144p.
- Mádlné Szőnyi, J., 2008: A geotermikus energiahasznosítás nemzetközi és hazai helyzete, jövőbeni lehetőségei Magyarországon – Ajánlások a hasznosítást előmozdító kormányzati lépésekre és háttér tanulmány. Magyar Tudományos Akadémia, Budapest, 105p.
- Marjainé Szerényi, Zs., Kocsis, T., 2012: Vízlábnyom: a fenntarthatóság egy új mérőszáma? In: Fenntartható fejlődés, élhető régió, élhető települési táj 1. (Szerk.: Kerekes, S., Jámor, I.). Budapesti Corvinus Egyetem, Budapest. pp. 63–76.
- McKay, H., 2011. Introduction. In Forest Research. Short rotation forestry. Review of growth and environmental impacts. Forest Research Monograph, 2, Forest Research, Surrey, 212p. (ISBN 978-0-85538-827-0)
- McKendry, P., 2002: Energy production from biomass (part 2): conversion technologies, Bioresource Technology, 83(1), pp. 47–54.
- Megújuló Energia – Magyarország Megújuló Energia Hasznosítási Cselekvési Terve 2010–2020. Nemzeti Fejlesztési Minisztérium, Budapest, 2011, [http://www.kormany.hu/download/2/b9/30000/Megújuló Energia_Magyarország Megújuló Energia Hasznosítási Cselekvési terve 2010_2020 kiadvány.pdf](http://www.kormany.hu/download/2/b9/30000/Megujulo_Energia_Magyarorszag_Megujulo_Energia_Hasznositasi_Cselekvesi_terve_2010_2020_kiadvany.pdf), ISBN 978-963-89328-0-8, 115p.
- MEH, 2012: Beszámoló a megújuló alapú és a kapcsolt villamosenergia-termelés, valamint a kötelező átvételi rendszer 2011. évi alakulásáról. Magyar Energia Hivatal, Budapest, http://www.mekh.hu/gcpdocs/49/MEH_KÁT_beszámoló_2011.pdf, 56p.
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y., 2010: The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products, Value of Water Research Report Series No.48, UNESCO-IHE, 50p.
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y., 2011: National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption, Value of Water Research Report Series No.50, UNESCO-IHE. 42p.

- Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., Meyer, L.A., 2007: Summary for Policy-makers, Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 24p.
- Molly, J.P., 1990: Windenergie. Theorie und Praxis. C.F. Müller, Kalsruhe.
- Munkácsy, B., Krassován, K., 2011: A környezeti hő felhasználásának lehetőségei 2050-ig. In: Erre van előre! Egy fenntartható energiarendszer keretei Magyarországon (szerk.: Munkácsy, B.), pp. 103–107.
- MVM, 1992: Tanulmány a magyarországi szélenergia viszonyokról. Az MVM Rt. (jogelődje: MVMT) megbízása alapján az Energo-Control kivitelezésében.
- Nan, L., Best, G., de Carvalho Neto, C.C., 1994: Integrated Energy Systems in China: The Cold Northeastern Experience. UN-FAO, Rome.
- NCsT, 2011: Magyarország Megújuló Energia Hasznosítási Cselekvési Terve, 2010-2020. Nemzeti Fejlesztési Minisztérium, Budapest, 220p.
- Northrup Jr., C.J.M., Gerlach, T.M., Modreski, P.J., Galt, J.K., 1978: Magma: A potential source of fuels. International Journal of Hydrogen Energy. 3(1), pp. 1–10.
- Norton, B., 2011: Solar Energy. <http://www.thermopedia.com/content/1136/>. DOI: 10.1615/AtoZ.s.solar_energy.
- Page, T., 1977: Conservation and Economic Efficiency, Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD. 266p.
- Paul, N., Kemnitz, D., 2006: Biofuels - Plants, Raw Materials Products. Fachagentur, Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR): WPR communications, Berlin, 43p.
- Pearce, D.W., Atkinson, G., 1992: Are National economies sustainable? Measuring Sustainable Development CSERGE Working Paper GEC92-11, Centre for Socio-Economic Research on the Global Environment, University College, London, 15p.
- Péliné N., Cs., Radics, K., Bartholy, J., 2011: Seasonal variability of wind climate in Hungary. Acta Silvatica et Lignaria Hungarica, 7, pp. 39–48.
- Perlin, J., 1999: From space to Earth: The story of solar electricity. Aatec publications, 221p.
- Pollack, H.N., Hurter, S.J., Johnson, J.R., 1993: Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set. Rev. Geophys., 31(3), pp. 267–280.
- Radics, K., 2004: A szélenergia hasznosításának lehetőségei Magyarországon: hazánk szélklímája, a rendelkezésre álló szélenergia becslése és modellezése. Doktori értekezés, ELTE, Budapest, 137p.
- Radics, K., Bartholy, J., 2008: Estimating and modelling the wind resource of Hungary. Renewable and Sustainable Energy Reviews 12, pp. 874–882.
- Radics, K., Bartholy, J., Péliné N., Cs., 2010: Regional tendencies of extreme wind characteristics in Hungary. Advances in Science and Research, 4, pp. 43–46.
- Ranalli, P., 2007: Improvement of Crop Plants for Industrial End Use, P. Ranalli (Ed.), Springer, Heidelberg, Germany. 542p. (ISBN 978-1-4020-5486-0)
- Raskin, P., Banuri, T., Gallopín, G., Gutman, P., Hammond, A., Kates, R.W., Swart, R., 2002: Great Transition: The Promise and Lure of the Times Ahead. Stockholm Environment Institute, Boston. 45 p.
- REN21, 2013: Renewables 2013 Global Status Report. REN21 Secretariat, Paris. 178p.
- Réthly, A., Bacsó N., 1938: Időjárás-éghajlat és Magyarország éghajlata. A Magy. Met. Társ. Kiadv. 3, Budapest, pp. 337–342.

- Revelle, R., Suess, H.E., 1957: Carbon Dioxide Exchange Between Atmosphere and Ocean and the Question of an Increase of Atmospheric CO₂ during the Past Decades. *Tellus* 9(1), pp. 18–27.
- Riedel, M., 1985: Volt rá energiánk, lesz rá energiánk? Gondolat Zsebkönyvek, Gondolat Könyvkiadó, Budapest, 128p.
- Riva, G., Foppapedretti, E., de Carolis, C., Giakoumelos, E., Malamatenios, C., Signanini, P., Giancarlo, C., Di Fazio, M., Gajdoš, J., Ručinský, R., 2012: A megújuló energiaforrások kézikönyve [ford. és szerk. Laczó, D.], Budapest, ISBN 978-963-08-3749-1, 150p.
- Rutz, D., Janssen, R., 2008: Biofuel marketplace - Biofuel Technology Handbook, WIP Renewable Energies, München. 152p.
- Rybach, L., 2005: The advance of geothermal heat pumps world-wide. International Energy Agency (IEA) Heat Pump Centre Newsletter, 23, pp. 13–18.
- Sathaye, J., Najam, A., Cocklin, C., Heller, T., Lecocq, F., Llanes-Regueiro, J., Pan, J., Petschel-Held, G., Rayner, S., Robinson, J., Schaeffer, R., Sokona, Y., Swart, R., Winkler, H., 2007: Sustainable Development and Mitigation. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Eds.: Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., Meyer, L.A.], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. pp. 707–798. (ISBN 9780521705981)
- Sawin, J.L., Bhattachary, S.C., Galán, E.M., McCrone, A., Moomaw, W., Sims, R., Sverrisson, F., 2012: Renewables 2012 global status report, Paris. 172 p.
- Schirnding, Y., 2002: Health in sustainable development: The role of indicators. WHO, Geneva, 148p.
- Shapiro, N.M., Ritzwoller, M.H., 2004: Inferring surface heat flux distributions guided by a global seismic model: particular application to Antarctica. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 223, pp. 213–224.
- Shepherd, D.G., 1990: Historical Development of the Windmill. NASA, Lewis Research Center, Ohio, 11p.
- Shepherd, D.G., 1994: Historical Development of the Windmill. In: *Wind Turbine Technology*. ASME Press, New York, pp. 1–46.
- Simon, L., Szabó, B., Vágvolgyi, S., 2010: “Tisza” Wood Chops Producers Productive Group Cooperative, Hungary. European Union FP - 7 - regions - 2009 - 01 programme, 245449 project „Biomass Mobilization”. Work Package 2. Task 2.1. - 2.2. (case report). Study prepared in College of Nyíregyháza, Hungary, pp. 1–16.
- Sims, R.E.H., Taylor, M., Saddler, J.N., Mabee, W.E., 2008: From 1st- to 2nd-generation biofuel technologies: An overview of current industry and RD&D activities. International Energy Agency, Paris, France. 124p.
- Solow, R.M., 1986: On the Intergenerational Allocation of Resources, *Scandinavian Journal of Economics*, 88, pp. 141–149.
- Sørensen, B., 2000: Renewable Energy. Academic Press, London, 912p.
- Soubotina, T.P., 2004: Beyond Economic Growth: An Introduction to Sustainable Development , The World Bank, 2nd Edition , Washington, D.C., 211p.
- Statisztikai Tükör, 2009: Fosszilis és nem fosszilis energiaforrások. KSH, Budapest, 2009/107, 2p.
- Steiner, L., 1923: Egy kis szélstatisztika. *Időjárás*, 27, pp. 1–5.
- Szabóné P. É., 1962: Szélirányeloszlás Magyarországon 30 évi átlagok alapján (1921-1950). In: *Beszámolók az 1961-ben végzett tudományos kutatásokról*, OMI Hivatalos Kiadványai, XXV. Kötet, Budapest, pp. 238–243.
- Szebik, A., 2009: http://hu.wikipedia.org/wiki/Geotermikus_erőmű

- Szokol, Gy., 1964: A szélenergia hasznosításának kérdései Magyarországon. In: Beszámolók az 1963-ban végzett tudományos kutatásokról, II. rész, OMI Hivatalos kiadványai, XXVII. Kötet, Budapest, pp. 89–94.
- Tar, K., 1991: Magyarország szélklímájának komplett statisztikai elemzése. OMSz Kisebbségi Kiadványai 67, Budapest, 124p.
- Tar, K., Keveiné, B.I., Tóth, P., Vágvolgyi, S., 2001a: A szélenergia hasznosíthatóságának lehetőségei Magyarországon. In: A légköri erőforrások hasznosításának meteorológiai alapjai (szerk.: Mika, J.), a Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa, OMSZ, Budapest, pp. 41–54.
- Tar, K., Makra, L., Horváth, Sz., Kircsi, A., 2001b: Temporal change of some statistical characteristics of wind speed over the Great Hungarian Plain. *Theor. Appl. Climatol.* 69, pp. 69–79.
- Tester, J.W., Anderson, B.J., Batchelor, A.S., Blackwell, D.D., DiPippo, R., Drake, E.M., Garnish, J., Livesay, B., Moore, M.C., Nichols, K., Petty, S., Toksöks, M.N., Veatch Jr., R.W., 2006: *The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems on the United States in the 21st Century*. Washington, DC, USA, 358p.
- Tomia, wikipedia: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydroelectric_dam-letters.svg
- Troen, I., Petersen, L., 1989: *European Wind Atlas*. Risø Nat. Labs, Roskilde, Denmark, 656p.
- UN, 1987: *Our Common Future*, Report of the World Commission on Environment and Development, United Nations, New York. 247p.
- UN, 1992a: Report of the United Nations Conference on Environment and Development. <http://www.un.org/documents/ga/conf151/aconf15126-1annex1.htm>
- UN, 1992b: Agenda 21: Programme of Action for Sustainable Development, adopted at the United Nations Conference on Environment and Development (UNCED), Rio de Janeiro, <http://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf>
- UN, 2012: *Millennium Development Goals Report 2012*, United Nations, New York. 72p. (ISBN 9789211012583)
- UNData: <http://data.un.org/DataMartInfo.aspx>
- UNDESA, 2007: *Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies — Third Edition*, 99p. (ISBN 9789211045772)
- UNDESA, 2011: *World Economic and Social Survey*, United Nations, New York, 213p. (ISBN 9789211091632)
- UNDP, 1998: *Human Development Report*. Oxford University Press, Oxford. 228p.
- UNFCCC, 1992: *United Nations Framework Convention on Climate Change*. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>, 25p.
- UNODC, 2011: *Global Study on Homicide*. Vienna. 128p.
- Vajda, Gy., 1999: *Energiaforrások*. Magyar Tudomány, 6, pp. 645–675.
- Vis, M.W., Van Der Berg D., 2010: *Harmonization of biomass resource assessments. Volume I: Best Practices and Methods Handbook*. BEE project. 220p.
- Wágner, M., Papp, É., 1984: A szél néhány statisztikai jellemzője. In: OMSZ Hiv. Kiadv. LVII. Budapest, pp. 108–117.
- WEC, 2010a: *Hydropower*. In: *2010 Survey of Energy Resources*. World Energy Council, London, UK. pp. 287–336. http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2012/09/ser_2010_report_1.pdf
- WEC, 2010b: *Ocean Thermal Energy Conversion*. In: *2010 Survey of Energy Resources*. World Energy Council, London, UK. pp. 588–602. http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2012/09/ser_2010_report_1.pdf

Westermarck, M., 2006: Swedish plants with integration of absorption cooling and flue gas condensation. AESymposium, December 2006.

WHO, 2004: Global health risks: Mortality and burden of disease attributable to selected major risks. ISBN 9789241563871. 62p.

WHO, 2013: World Health Statistics, ISBN 9789241564588, 172p.
http://www.who.int/gho/publications/world_health_statistics/EN_WHS2013_Full.pdf

Internetes hivatkozás:

[7.1] www.eubia.org/

[7.2] <http://www.centreforenergy.com/AboutEnergy/Biomass/History.asp>

[7.3] <http://zoldtech.hu/cikkek/20130103-kazanprogram>

[10.1] http://www.johannesburgsummit.org/html/documents/summit_docs/2309_planfinal.htm

[10.2] <http://www.un.org/millenniumgoals/>

[10.3] <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>