

Energetika a középiskolák számára

DOKTORI ÉRTEKEZÉS

Gärtner István

Témavezető: Dr. Kiss Ádám
professzor emeritus

Fizika Doktori Iskola

Vezető: Dr. Gubicza Jenő egyetemi tanár

Fizika Tanítása Doktori Program

Vezető: Dr. Nguyen Quang Chinh egyetemi tanár



Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar

2022

DOI: 10.15476/ELTE.2022.107

Tartalomjegyzék

Bevezetés	4
1. Az energia és az emberi társadalmak kapcsolata	6
1.1. Az energia ismert mértékegységei, felhasználási területei	6
1.2. Az emberi társadalmak energiafelhasználása a történelem során.....	9
2. A jelenlegi energiaellátás rendszere, jövője	11
2.1. A világ energiafogyasztásának alakulása az elmúlt évtizedekben	11
2.2. A Föld energiaháztartása.....	14
2.3. A Föld jelenlegi fosszilis energiaforrásai	15
2.4. A fosszilis energiahordozókból származó energiatermelés felmerülő problémái, ezek kísérleti bizonyítéka	21
3. Energiatakarékosság kérdése fizikatanári szemmel	26
4. Megújuló energiák	29
4.1. A Napenergia közvetlen felhasználása	29
4.2. A Napenergia közvetett felhasználása	35
4.2.1. Vízenenergia	35
4.2.2. Szélenergia	38
4.2.3. Biotömeg	41
4.2.4. Hullámenergia.....	45
4.3. Árapály energia	45
4.4. Geotermikus energia	46
5. Nukleáris energia	52
5.1. Maghasadás	53
5.1.1. A jelenség ismertetése.....	53
5.1.2. Láncreakció, energiatermelés reaktorokkal	55
5.1.3. Nukleáris fűtőanyagciklus.....	58
5.1.4. A jövő reaktorai.....	61
5.1.5. A Paksi Atomerőmű története, jelene, jövője	62

5.2. Magfúzió	66
6. Az energiapolitika jövője	69
7. Energiatermelő létesítmények látogatásainak tapasztalatai, ezek felhasználása a középiskolai fizikatanításban	71
Összegzés	75
Köszönetnyilvánítás.....	76
Summary	77
Irodalomjegyzék	78
Saját publikációk.....	80
Függelék.....	81

Bevezetés

Doktori értekezésem alapjául a 2019-ben megírt, és azóta könyv formájában is megjelent elektronikus jegyzetemben [S1] leírtakat használom fel. A dokumentum ismeretanyagának jelentős része Professzor Dr. Kiss Ádám az ELTE Fizika Doktori Iskola „Energiatermelés és környezet” előadásain elhangzottakból származik. Ebben a dolgozatban ezek az információk kiegészítésre kerülnek, egyrészt az azóta összegyűjtött és frissített adatokkal, illetve a témához kapcsolódó újabb ismeretekkel, másrészt olyan további információkkal, melyek elősegíthetik, hogy az energetika közelebb kerülhessen a középiskolás korosztályhoz is.

A két és fél évvel ezelőtt megírt jegyzet célja az energetika témakörének megismertetése volt, és elsősorban a természettudományos tantárgyakat (tehát nemcsak a fizikát) tanító tanárokhoz, másodsorban az érdeklődő, középiskolás, illetve egyetemista diákokhoz szólt. Ezt a célt a tanárok számára a hasznos információk, a diákok részére a hiteles ismeretek átadásával szerettem volna elérni. A megjelenés után több helyről is olyan megerősítést kaptam, hogy sikerült megvalósítani a kitűzött célt, mert erre az ismeretanyagra mind a tanároknak, mind a diákoknak valóban nagy szüksége van. Ezt alátámasztja az a tény is, hogy a mostani fizika tankönyvekben ez a téma elég kevés figyelmet kap, a kapcsolódó információk, illetve az adatok sokszor hiányosak, pontatlanok, és általában nem naprakészek, így a jegyzet egyfajta hiánypótló szerepet is betölt. Sok olyan ismeretet, az Interneten is megtalálható adatot és külső webcímekre történő hivatkozást, tehát magát a böngészés lehetőségét is tartalmazza, melyek jobban elősegíthetik az érdeklődőknek az energetika témájában való elmélyülést. Ezeknek a további kutatásoknak az is lehet a hozadéka, hogy tanárok is és diákok is tisztábban fogják látni a saját életükben megvalósuló energiatermelés lehetőségeit és ennek kapcsolatát a mindenkori energiafelhasználással.

A jegyzet megírásának ötletét, az előadáson elhangzottak mellett, a saját tapasztalatom is adta. 2019. júniusban a 11. osztályos diákok körében végeztem egy energetikához kapcsolódó felmérést [Függelék][46], melynek eredménye nagyon elgondolkodtató volt. Ebben azzal szembesültem, hogy diákjaim nagy hiányosságokkal, illetve a témakörhöz kapcsolódó hibás ismeretekkel rendelkeznek. Ezen tapasztalatok egy részének bemutatása szerepelt a GIREP 2019-es budapesti konferencián tartott előadásomban is [S2], ahol akkor már utaltam a jegyzet megírásának lehetőségére. A megjelenés utáni pozitív visszajelzések alapján most úgy látom, hogy ezt az energetikai felmérést a 2021-22-es tanév végén, a fizikát éppen befejező 11.-es osztállyal ismét meg fogom tenni. Érdekes lesz összehasonlítani az akkori és az új

eredményeket, mivel mindkét diákcsoport 5 évig csak tőlem tanulta iskolai szinten a fizikát. Az első csoport felmérésének negatív tapasztalatai után, az idei évben vizsgálandó csoport esetében, az utóbbi években már próbáltam több energetikával kapcsolatos információt is az óráimhoz csatolni, és bár még nem számítok jelentős különbségre, azért reménykedem némi előrelépésben.

Közel négy évtizedes tanári tapasztalatom és a személyes meggyőződésem alapján is azt vallom, hogy az energetika ismerete is részét kell, hogy képezze az általános természettudományos műveltségnek. Ez utóbbi fogalom sajnos az elmúlt két évtizedben jelentősen háttérbe szorult, mára eljutottunk oda, hogy egyes társadalmi rétegek véleménye következtében jelentéktelenné, sőt szinte feleslegessé is vált. Gyakorló tanárként ennek éppen az ellenkezője mellett próbálok érvelni, úgy vélem a jövő nemzedékének a technika folyamatos fejlődése miatt még nagyobb szüksége lesz a helyes természettudományos szemléletre, mint a jelenleginek, és ebben a látásmódban az energetikai ismeretek pontos tudása is kulcsszerepet fog játszani.

Dolgozatomban, az eredeti jegyzetben szereplő adatok frissítése és kiegészítése mellett, röviden kitérek azoknak a tapasztalatoknak a bemutatására is, melyeket családommal, illetve esetenként diákjaim kíséretében akkor szereztünk meg, amikor energiatermeléshez kapcsolódó létesítményeket kerestünk fel. Ezeknek a látogatásoknak a célja, az ismeretek megszerzése mellett, az is volt, hogy az iskolában történő fizikai háttér megismerése után a tanuló a gyakorlatban is találkozzon azzal, amiről tanult. Általános tapasztalatom, hogy megéri időt fordítani erre is, mert a diák így össze tudja kapcsolni a két területet, és jobban meg tudja érteni az energiatermelő berendezések szerepét és fontosságát. Az összekapcsolódás mellett maga a látogatás is olyan élmény nyújt, mely mind tanárnak, mind diáknak egy életre megmarad.

1. Az energia és az emberi társadalmak kapcsolata

Energia vagy energetika? Ugyanazt takarja ez a két szó, vagy van lényeges különbség közöttük? A válasz nem könnyű, mert van hasonlatosság is, de eltérés is. Az energia egy konkrét fizikai fogalom és munkavégző képességet jelent, az energetika a társadalom energiatermelésével kapcsolatos kifejezés és a gazdasági, társadalmi élet önálló területeként jelenik meg. Tény, hogy az energetika nem kizárólag a fizikához kötődik, de témaköre alapján talán ehhez áll a legközelebb. Ennek oka, hogy mindkettőhöz szorosan kapcsolódik a fizika legalapvetőbb törvényszerűsége, az energia-megmaradás törvénye. Az oktatásban ezt valószínűleg a fizikatanárok tudják a legjobban tanítani, és erre napjainkban is, és a közeli illetve a távolabbi jövőben is igen nagy szükség lesz. Tudomásul kell venni, hogy az energetika mára az emberiség jövőjét meghatározó, alapvető sorskérdéssé vált, és célszerűnek látszik, ha a társadalom felnövekvő rétege olyan személyektől szerzi be az ismereteket, akik ebben a kérdésben hitelesnek tekinthetők. Sajnálatos módon a jelenlegi magyarországi középiskolai fizikaoktatásban ez témakör még mindig csak minimális mértékben kerül megemlítésre, a kapcsolódó fizikai magyarázatokkal, illetve a témához kötődő jelenségek, fogalmak fizikai hátterével a diákok tananyagszinten alig találkoznak, így ismereteik meglehetősen hiányosak.

1.1. Az energia ismert mértékegységei, felhasználási területei

Az energia általánosan használt mértékegysége a joule (J), de elsősorban a hőtani vonatkozásokban előfordulnak még a kalória ($1 \text{ cal} \approx 4,2 \text{ J}$), az elektromossággal kapcsolatos energiaegységként a kilowattóra ($1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ}$), illetve az angolszász területeken a BTU (British Thermal Unit) mértékegységek is. Ez utóbbi megfelel 1 font víz hőmérsékletének 59°F -ról 60°F -ra való emeléséhez szükséges hőmennyiség értékének. (Jelentése az Európai Unióban: $0,4536 \text{ kg}$ víz hőmérsékletének 15°C -ról $15,6^\circ\text{C}$ -ra való emeléséhez szükséges energiaérték. Ennek alapján $1 \text{ BTU} \approx 1056 \text{ J}$, illetve $1 \text{ kWh} \approx 3400 \text{ BTU}$.) Az energetika, mivel energiatermelést jelent, természetesen szorosan kötődik az energia mértékegységéhez, így célszerű ehhez a fogalomhoz kapcsolódóan is minden energiaértéket joule-ban megadni (1.1. táblázat). Az említésre kerülő mennyiségek nagysága viszont indokolja a magas hatványoknak megfelelő prefixumok (exa (10^{18}) = E, peta (10^{15}) = P, tera (10^{12}) = T, giga (10^9) = G) bevezetését is.

1 cal	$\approx 4,2 \text{ J}$
1 Kal (kcal)	$\approx 4,2 \cdot 10^3 \text{ J}$
1 BTU	$\approx 1056 \text{ J}$
1 kWh	$= 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$
1 Quad	$\approx 10^{18} \text{ J}$

1.1. táblázat: Energia mértékegységek összehasonlítása

Ezek nemcsak a joule-hoz, mint alapegységhez társulhatnak, hanem az angolszász területen használt BTU egységhez is, sőt ott megjelenik egy más névvel ellátott, speciálisan az energetikában, konkrétan az energiafogyasztásban használt energia mértékegység, melynek neve Quad. (1 Quad = 10^{15} BTU, és így mintegy 5%-os pontossággal 1 Quad \approx 1 EJ.)

Az energiatermeléshez szükséges energiahordozók energiataralma nagyon változó, függhet a helytől, az adott tüzelőanyag összetételétől, illetve például földgáz esetén még olyan külső tényezőktől is, mint a nyomás vagy a hőmérséklet. Összességében 1 EJ \approx 1 Quad energia egyenértékű \approx 36 millió ETA (Egyezményes Tüzelőanyag) tonna szénből, vagy 190 millió hordó olajból vagy 25 milliárd m^3 normálállapotú földgázból származó energia értékével. Ezekhez az adatokhoz felhasználtam az adott energiahordozókra jellemző átlagos fűtőértékeket, melyek szerint 1 ETA t szén esetében az energiataralom \approx 30 GJ-nak, 1 t olajnál (közelítőleg 8 hordó) \approx 44 GJ-nak, és 1 m^3 normálállapotú földgáznál pedig \approx 40 MJ értéknek feleltethető meg (1.2. táblázat). Ezek a számok is csak átlagosan becsült értékeknek tekinthetők, így az ebben a dolgozatban szereplő energia adatok is tartalmaznak mintegy 15-20 % bizonytalanságot.

1 tonna ETA szén	$\approx 30 \text{ GJ}$
1 tonna nyersolaj	$\approx 44 \text{ GJ}$
1 m^3 normálállapotú földgáz	$\approx 40 \text{ MJ}$

1.2. táblázat: Energiahordozók energia tartalma

Miért van szükségünk az energiára? Mi történne, ha akadozni kezdene, esetleg egyik napról a másikra teljesen megszűnne az energiaellátás? Milyen területeken okozna ez gondot, mik lennének a következmények?

Energiaellátás nélkül valószínűleg rövid időn belül gyökeresen átalakulna, majd visszafejlődne, sőt esetleg meg is szűnne az emberi társadalom. Ennek oka az, hogy az energiaellátás hiányában a társadalom egyetlen közössége sem lehet működőképes, összességében nyugodt szívvel állíthatjuk, hogy az energia szerepe minden emberi tevékenységben megjelenik.

Tekintsük át tehát konkrétan azokat a legfontosabb területeket, ahol a társadalom energiaigényei megnyilvánulnak! Az igények elsőként természetesen a megfelelő mennyiségű élelem, illetve tiszta ivóvíz biztosításában, majd a lakhatás megoldásában, illetve ennek fenntartásában jelentkeznek. Másodsorban nagyon jelentős az ipar szükséglete, hiszen minden ember által előállított terméknek energia tartalma van. További jelentős igénye van a közlekedésnek, illetve a szállításnak, de nem felejtkezhetünk el olyan, egyáltalán nem jelentéktelen területekről sem, mint például a hulladékkezelés, vagy a különböző szolgáltatások biztosítása, és ez a lista természetesen még messze nem lett teljes.

Az embercsoportok általános igény szintje nyilvánvalóan különbözik egymástól, ez általában függ a társadalom fejlettségétől, valamint a felépítettségétől, ami abban nyilvánul meg, hogy maguk az energiafogyasztók milyen társadalmi rétegekből kerülnek ki. Összességében viszont biztosan nem található olyan terület, illetve réteg, amely ne jelentkezne valamekkora energiaigénnyel. Ezek után persze rögtön felmerül a kérdés, akkor miért nem termeli meg az emberiség a szükséges energiát emberi erővel, vagyis mechanikai munka árán? Erre a kérdésre is egyértelmű a válasz: egyszerűen nem képes rá, mivel az összes energiaigény nagyságrendekkel nagyobb, mint ami az ember által végzett munkával, mechanikai úton megtermelhető! Ezt az állítást egy egyszerű számítással szeretném igazolni:

Egy átlagos fizikummal rendelkező ember hosszabb távon naponta körülbelül 100 W [1] teljesítményre képes. Ez azt jelenti, hogy így a napi 8 órás munkavégzéssel $0,8 \text{ kWh} = 2,88 \text{ MJ}$ energia „termelhető meg”, feltételezve, hogy a hatásfok 100%. A Föld népessége jelenleg $\approx 7,8$ milliárd fő [2], ha mindenki (csecsemőtől az aggastyánig!) ily módon naponta megtermelné az említett $2,88 \text{ MJ}$ energiát, akkor ez egy év alatt $\approx 8,2 \text{ EJ}$ értéket adna. A Föld lakosságának éves energiafogyasztása viszont 2020-ban 581 EJ [3] volt, tehát a különbség a 100 %-os hatásfokot feltételezve is több mint 70-szeres, a reálisan alacsonyabb hatásfok esetén, körülbelül két nagyságrendnyinek tekinthető.

Milyen területeken használunk fel energiát? Az energiafelhasználást szektorok szerint lehet csoportosítani és ennek alapján 4 szektor különíthető el: az ipari-, a szállítási-, a lakossági- és a közösségi szektorok. A szektorok energiafelhasználásának részesedése természetesen nem egyezik meg, az arányoknak az egyenletes elosztástól való eltérése több tényezőtől is függ.

Ilyen lehet például az adott ország gazdasági fejlettsége, népessége, illetve földrajzi körülményei (éghajlata, területe, domborzati viszonyai), viszont a százalékos arányokban nem található nagyságrendi eltolódások, minden százalékérték kétszámjegyű. Magyarország esetében ezek az értékek a következők: ipari- 27%, szállítási- 20%, lakossági- 34% és szolgáltatási- 19%.

1. 2. Az emberi társadalmak energiafelhasználása a történelem során

Milyen szerepet játszott az energia az emberi társadalmakban az emberiség története során? Hogyan alakult az egy főre jutó energiafelhasználás a különböző közösségekben? Érdemes ezt konkrét számok segítségével is elemezni, mivel a civilizációs változások és az egy főre jutó energiaérték egymással mindig szoros kapcsolatban álltak. Ehhez szükséges lesz segítségül hívni néhány becslést, illetve több, már rendelkezésre álló, tehát valósnak tekinthető adatot, melyekkel összehasonlíthatóak az egyes történelmi korszakokban az energiafelhasználások. Az 1.1. ábrán szereplő táblázatot a témavezetőmmel történt személyes konzultációim alapján használok fel, a benne szereplő adatok, különösen a régebbi korokra vonatkozóak, természetesen mind becslést értékek, melyek esetleg 15-20%-os eltérést is tartalmazhatnak. A táblázat első és második sora az ősemberi társadalomra, illetve az ókori Mezopotámiára vonatkoznak, ezekből az időszakokból leírt energiaértékeket nem ismerünk. A harmadik, a negyedik és az ötödik sor, melyek rendre Németalföld, Anglia (Viktoriánus korszak) és napjaink társadalmihoz kapcsolódó energiafelhasználás értékeit jelenítik meg, már meglévő ismereteinkből származó, a feljegyzések és a kutatások alapján megbecsült értékeként kerültek a megfelelő sorokba. A táblázat sorai időben mintegy 10.000 évet fognak át, ez az emberiség 300-400 generációját takarja le. Ekkora időtartam alatt nem alakulhatott ki irányított válogatás, nem változhatott meg az emberi faj (*homo sapiens*), ez tehát azt jelenti, hogy az emberek ugyanolyanok a jelenkorban is, mint évezredekkel ezelőtt. Így a táblázatban szereplő számok egyértelműen az adott társadalmakra vonatkoznak, és a bennük levő egyének azonos energiafogyasztásúnak tekinthetők.

Hogyan értelmezhető maga a táblázat, milyen következtetések vonhatók le belőle? Az alap energiaegységnek, tehát a táblázat hatodik oszlopában szereplő 1 számmal jelölt értéknek az ember napi energiaszükségletének megfelelő, régebben 2000 Kal (kcal) értéként megismert számot tekintjük. Mivel ez a mértékegység ma már hivatalosan nem használható, ennek jelenleg érvényes megfelelője került az első oszlop első sorába, ez közelítőleg 8,4 MJ.

ENERGIAFOGYASZTÁS ÉS CIVILIZÁCIÓ

Egység: MJ/fő/nap 4,2 MJ = 1000 Kal	élelem (ember + állatok)	háztartás, kereskedelem	ipar, mezőgazdaság	szállítás, híradás	X
Vadásztársadalom (8000 B.C.)	8.4				1
Földművelő társ. (3000 B.C.)	15	10			3
Középkor (XV. - XVI. szd.)	25	55	40	5	15
Ipari társadalom (Anglia, 1900)	30	140	140	70	45
Információs társ. (USA, XXI. szd.)	35	225	300	200	90

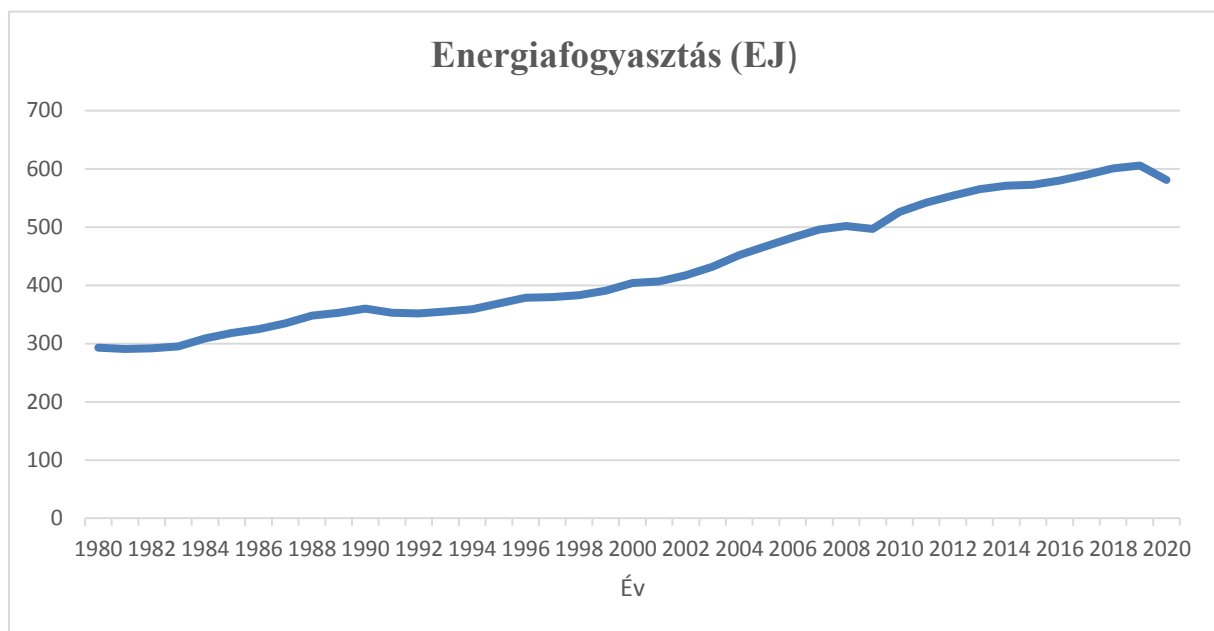
1.1. ábra: Társadalmak energiafogyasztása

Látható, hogy az energiafogyasztás szoros kapcsolatban van azzal, hogyan alakult át a társadalom az idők során, például az ősemberi társadalomban éppen csak annyi energiára volt szükség, ami az élelmezéshez kellett. A fejlődés maga után vont, hogy újabb olyan területek jelentek meg, melyek további energiaigénnyel rendelkeztek, előbb a kereskedelem, majd később a mezőgazdaság, az ipar, illetve a szállítás és a híradás. Észrevehető továbbá az is, hogy bár a kezdeti energiamennyiség az eltelt mintegy 10.000 év alatt a 90-szeresére növekedett, ennek üteme egyáltalán nem volt egyenletes. Az őskor, az ókor és a középkor időszakában az energiafogyasztás háromszorosára történő emelkedése csak évezredek alatt következett be, az újkorban ehhez már évszázadok is elegendőek voltak, és bár az újabb háromszorozódás még nem történt meg, de látható, hogy a legújabb kor esetében alig több mint 100 év alatt a duplázódás már megvalósult.

2. A jelenlegi energiaellátás rendszere, jövője

Ahhoz, hogy a jövőt illetően ebben a témában előre tudjunk gondolkozni, célszerű megismerni egyrészt az energiafogyasztás alakulását az elmúlt évtizedekben, másrészt a jelenlegi energiaellátás lényeges paramétereit.

2.1. A világ energiafogyasztásának alakulása az elmúlt évtizedekben

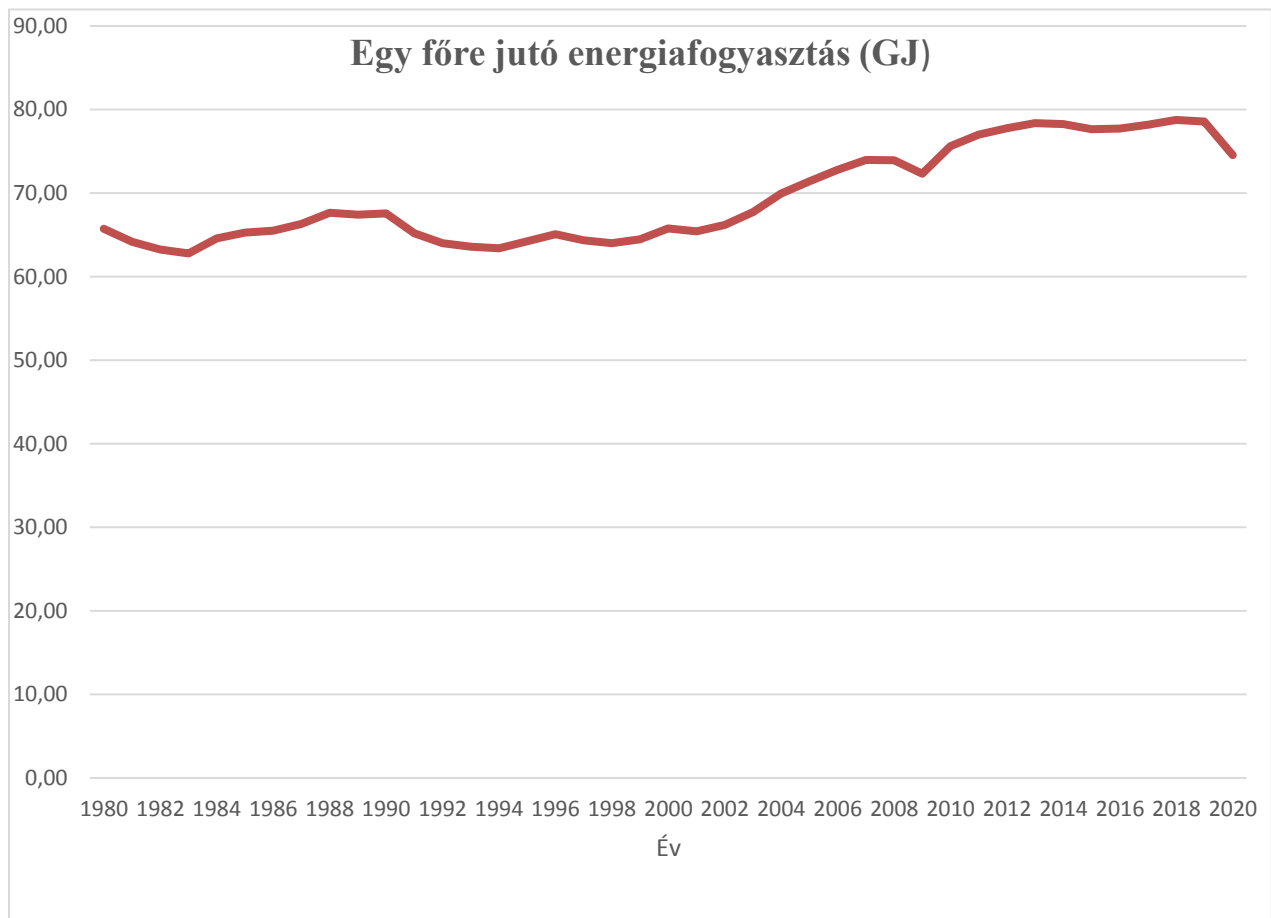


2.1. ábra: A Földi társadalmak évenkénti energiafogyasztása

Az energiafogyasztás alakulását érdemes összességében, illetve egy főre vonatkoztatva is megvizsgálni. A 2.1. ábra grafikonján, mely az 1980-2020 közötti időszak teljes energiafogyasztását mutatja be [S1][3], látható hogy az energiafogyasztás 2019-ig gyakorlatilag monoton növekvő tendenciát mutat, a Föld lakossága által éves szinten felhasznált energia ez idő alatt megkétszereződött. A 2020-as évben viszont 4 %-os csökkenés tapasztalható [3], ez a jelentős visszaesés feltételezhetően a COVID-19 világjárvány hatásának tudható be.

A 2.2. ábra grafikonja [S1][3] az éves energiafogyasztások egy főre vonatkoztatott értékeit jeleníti meg. Az eddigi legnagyobb érték 2018-ban volt 78,76 GJ/fő értékkel, ez a következő évben, a COVID-19 világjárvány kezdetekor, még csak minimálisan (78,57 GJ), viszont a

pandémia kiteljesedésének évében már nagymértékben csökkent, 2020-ban 74,53 GJ-ra esett vissza.



2.2. ábra: Egy főre jutó energiafogyasztás

A Föld népessége 1980-ban 4,458 milliárd fő [2], 2020-ban 7,795 milliárd fő [2] volt, tehát a népesség az elmúlt négy évtized alatt közel 75%-kal növekedett. Szembetűnő viszont, hogy az egy főre jutó energiaérték ez idő alatt csak kevesebb, mint 20%-kal emelkedett, vagyis ennek a mennyiségnek növekedése sokkal kisebb mértékű, mint a népességé. Az energiaérték változása leginkább a társadalmak fejlődésének tudható be, ami abban nyilvánult meg, hogy az eltelt 40 év során jelentősen átalakultak a fogyasztási szokások, és magasabb lett az energiaigény. Ez viszont így egyben azt is jelenti, hogy a Föld energiafogyasztása egyértelműen a népesség-növekedésével korrelál, és figyelembe véve az évenkénti mintegy 80 milliós népesség-növekedést, várhatóan még tovább fog növekedni. A növekedés mértékének az arányok alapján 1% körül kellene lennie, de a valóság ennél magasabb. A növekedési ráta 2000-2018 között végig 2% körüli volt és bár a 2019-es évben a növekedési folyamat lelassult 0,8 %-ra [3], sőt 2020-ban bekövetkezett néhány százalékos csökkenés is,

feltételezhető, hogy ezek a visszalépések csak a világjárvánnyal összefüggésben történtek meg. Valószínűsíthető, hogy ennek elmúltával a jövőben továbbra is a növekvő tendencia fog érvényesülni.

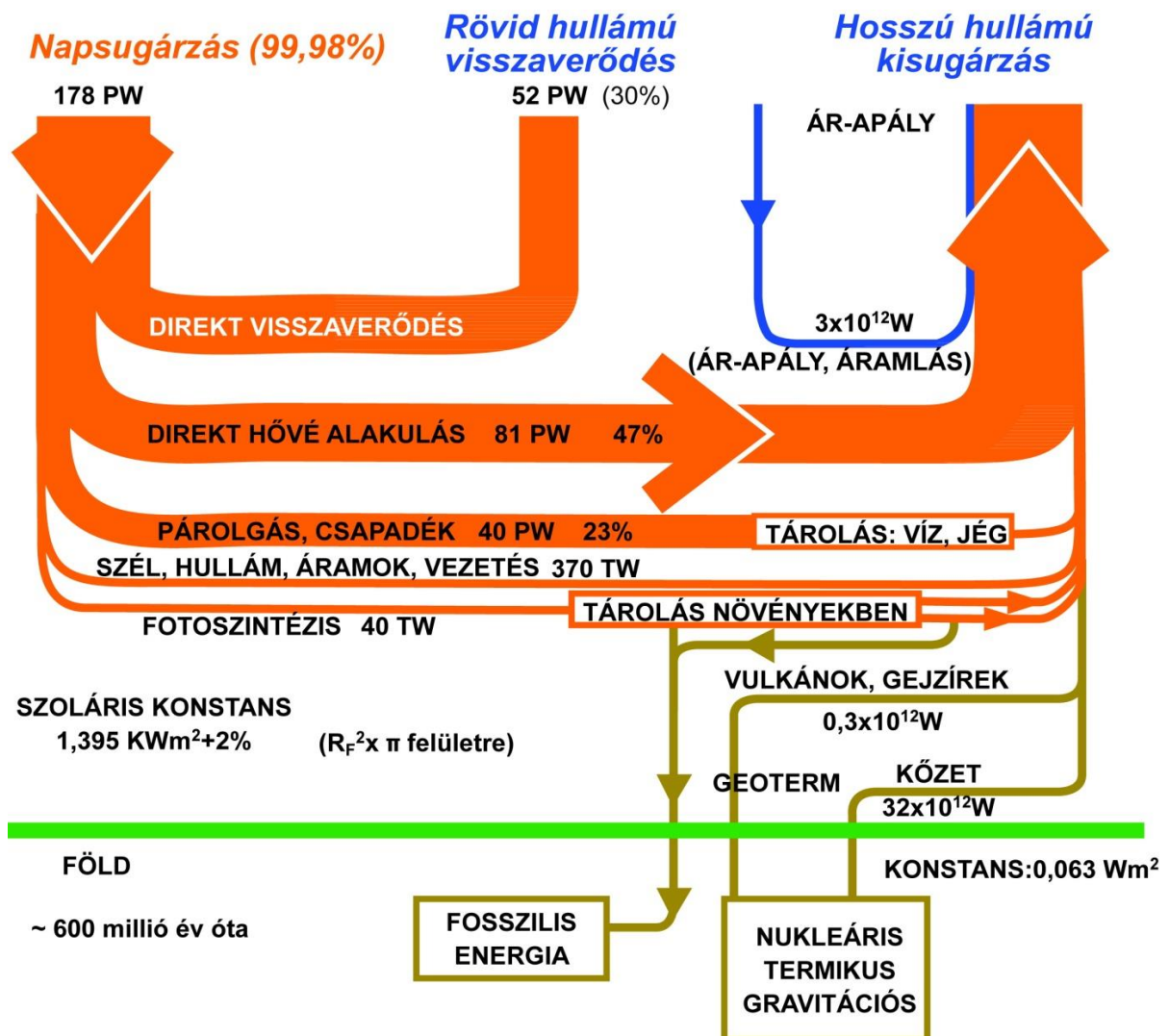
Érdemes a jelentős különbségek miatt külön-külön is kiszámolni a három legnagyobb energiafogyasztó ország esetében az egy főre jutó energia értékeket és ezt összehasonlítani az emberiségre vonatkoztatott egy főre jutó energiafelhasználás adatával. 2020-ban a Föld legnagyobb energiafogyasztója Kína volt ≈ 139 EJ [3] értékkel, ez, figyelembe véve az 1403 millió [4] fő lakosságot, ≈ 99 GJ/fő energia értéket ad, ami mintegy 32%-kal magasabb a 2020. évi 74,53 GJ világszínvonalhoz képest. Az USA esetében az összes felhasznált energia értéke ≈ 84 EJ [3], lakossága 334 millió [4] fő, az egy főre jutó energia értéke ≈ 252 GJ, ez már több mint háromszorosa a világszínvonalnak. Végül India, aki a harmadik helyen áll ≈ 37 EJ [3] értékkel, lakossága 1389 millió [4] fő, így az egy főre jutó energia érték ≈ 27 GJ, ez viszont csak alig több mint egyharmada a világszínvonalnak és mindösszesen 10,7 %-a az USA átlagának.

A három legjelentősebb energiafogyasztó mellett nézzük meg érdekességként Magyarország adatait is! A 2020-as évben a Központi Statisztikai Hivatal (KSH) szerint Magyarország éves energiafogyasztása 1103,1 PJ [5], lakossága 9,731 millió fő [6] volt, így az egy főre jutó energia érték ≈ 113 GJ, mely másfélszerese a világszínvonalnak.

Kiemelt figyelmet érdemel az összes energiafogyasztásban az elektromos energia felhasználásának emelkedése is, mely az elmúlt 4 évtizedben mindig nagyobb arányú volt, mint az összes energiafogyasztás növekedése. Az elektromos energia-felhasználás egyre nagyobb részévé válik a teljes energia-felhasználásnak, míg az 1980-as években az emberiség által felhasznált elektromos energia még csak mintegy 8,5 %-át tette ki az összes energiának, ez az arány 2019-re már 14%-ra nőtt. [7] A 2020-as évben, bár világszinten az összesen felhasznált elektromos energia több mint 1 %-kal csökkent [8], de a teljes felhasznált energiához viszonyított részarány a COVID-19 járvány negatív hatása ellenére sem változott, sőt kis mértékben inkább még növekedett is. Ez az állapot, köszönhetően az egyre több elektromos energiát igénylő eszközt használó társadalmunknak, vélhetően az elkövetkező években is fennmarad.

Jogosan merülhet fel mindenki az a kérdés, hogy vajon fenntartható-e hosszú távon, és minden ország számára megfelelően a világ energiaellátásának jelenlegi rendszere? Ahhoz, hogy erre a kérdésre válaszolhassunk, mindenképp tisztában kell lennünk a Föld energiaháztartásával, és meg kell ismernünk számszerűen is azokat a paramétereket, melyek Földünk energiaellátását biztosítják.

2.2. A Föld energiaháztartása



2.3. ábra: A Föld energiaháztartása

A 2.3. ábra [9] alapján látható, hogy Földünk energiája három tényezőnek köszönhető, melyek a napsugárzásból, a Föld geotermikus energiájából, és a Föld-Hold gravitációs kölcsönhatásból származnak. A három közül a Nap által időegység alatt átadott energia a domináns, ez 99,98 %-a a teljes mennyiségnek. Értéke bár kissé változó, de számszerűen átlagosan 178 PW teljesítménynek felel meg. Emellett a másik két tényezőtől származó értékek, tehát a geotermikus energiából származó 32-40 TW, és a Föld-Hold gravitációs kölcsönhatásból adódó 3 TW teljesítmények csak elenyésző mennyiségeknek számítanak.

Mekkorák ezek a teljesítményértékek, ha a Föld lakosságának éves energiafogyasztását szeretnénk velük kapcsolatba hozni? Az első fejezetben említett, 2020. évre vonatkozó 581 EJ energiafogyasztásnak megfelelő energia csak a Nap sugárzását figyelembe véve körülbelül 54

perc alatt jutna el a Föld légkörének határáig és 10%-os határfokot tekintve 9 óra alatt a Föld felszínéig. Sajnos a Nap energiájának jelenleg csak egy töredékét tudja az emberiség a saját energiatermelésében hasznosítani, erre egy későbbi fejezetben, a megújuló energiaforrásoknál fogok kitérni, így bár a Naptól származó sugárzás kevesebb, mint fél nap alatt fedzné a Föld éves energiaszükségletét, ez az út jelenleg nem járható.

Miből állítható akkor elő az éves energiaszükséglet, melyek a Föld társadalmainak energiaforrásai? Elsőként az ásványi energiaforrásokkal szeretnék foglalkozni, mivel ezeknek a szerepe az elmúlt században és jelenleg is meghatározó a Föld energiatermelésében. Arányuk évtizedek óta 85 % körül mozog [10], és bár minden politikai és gazdasági hatalom hangzatosan ennek drasztikus csökkentését kívánja megvalósítani és egyben a megújuló energiaforrások szerepét jelentősen növelni, ebben érdemi változás valószínűleg az elkövetkező évtizedekben (30 - 40 év távlatában) sem várható. Ennek véleményem szerint több oka is van, az egyik ok egyértelműen gazdasági jellegű. A fosszilis energiahordozók kiváltása, például a megújuló energiaforrások alkalmazásával, jelentős beruházásokat igényel, ezek megtérülése egyrészt kétséges, másrészt biztosan hosszú időbe telik. A másik ok inkább politikai jellegű, de ez sem látszik könnyen megoldhatónak. Azok az országok, illetve az országokon belüli érdekcsoportok, akik rendelkeznek ezekkel az ásványi forrásokkal, gazdasági és politikai hatalommal is bírnak, és ezt nem kívánják másokkal megosztani.

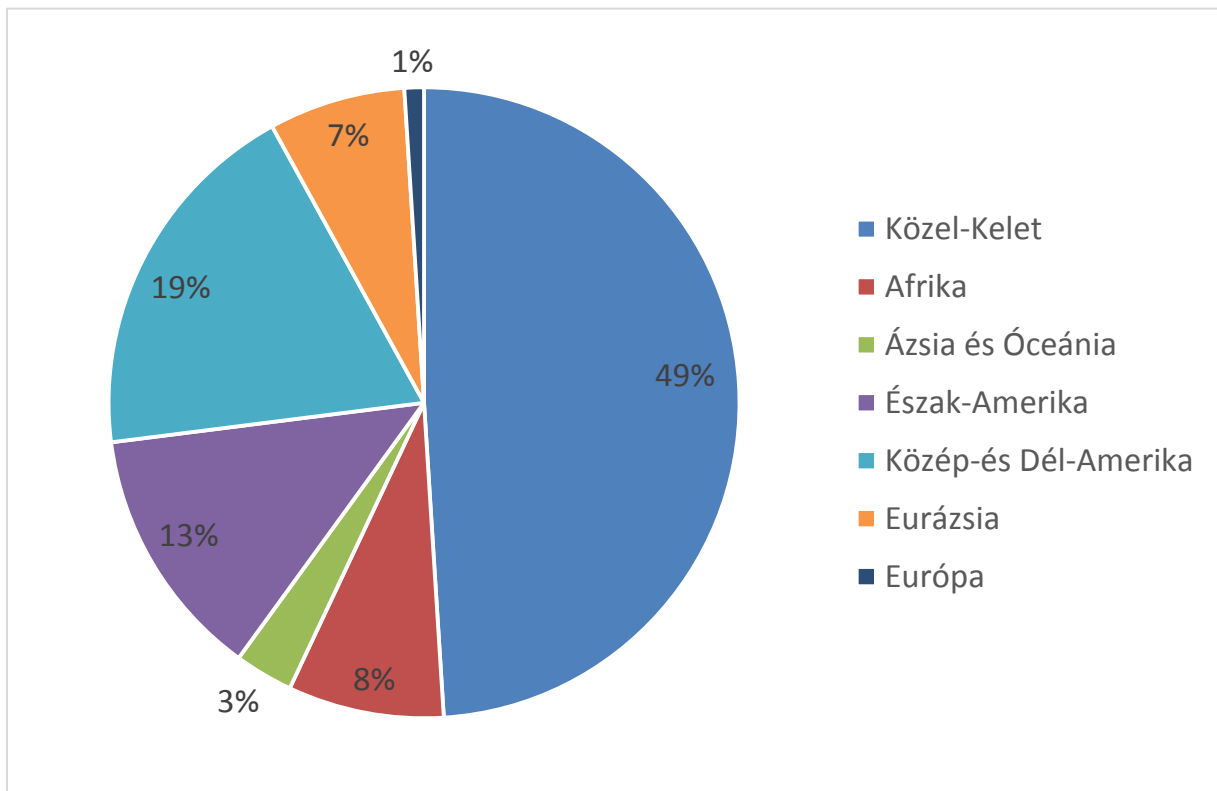
2.3. A Föld jelenlegi fosszilis energiaforrásai

A jobb megértés végett érdemes elemezni külön-külön is az egyes ásványi energiahordozókat, megvizsgálva energiataralmuk nagyságát, kontinensenkénti, illetve ezeken belüli területi eloszlásukat a Földön, valamint azokat a problémákat, amelyek a belőlük származó energiatermelést nehezé tehetik.

a) Kőolaj

A kőolaj szerves eredetű ásványkincs, több száz millió évvel ezelőtt élt élőlényekből jött létre. A Föld teljes kőolaj vagyonát pontosan nem ismerjük, a bizonyított készlet körülbelül 140 milliárd tonna, ennek energiataralma valamivel több, mint 6000 EJ. A pontos készlet mennyiségére csak becslések állnak rendelkezésre, a feltételezések szerint ez a bizonyított készlet 2-3 szorosa lehet. A bizonytalanságot többek között az is okozza, hogy a közölt adatok hitelességeért általában csak a közlő szavatol, és az adatok természetéből adódóan nyilvánvaló, hogy az adott ország a saját gazdasági érdekének megfelelően fog ásványkincsekre vonatkozó információkat közzé tenni. Emellett az is a bizonytalanságot

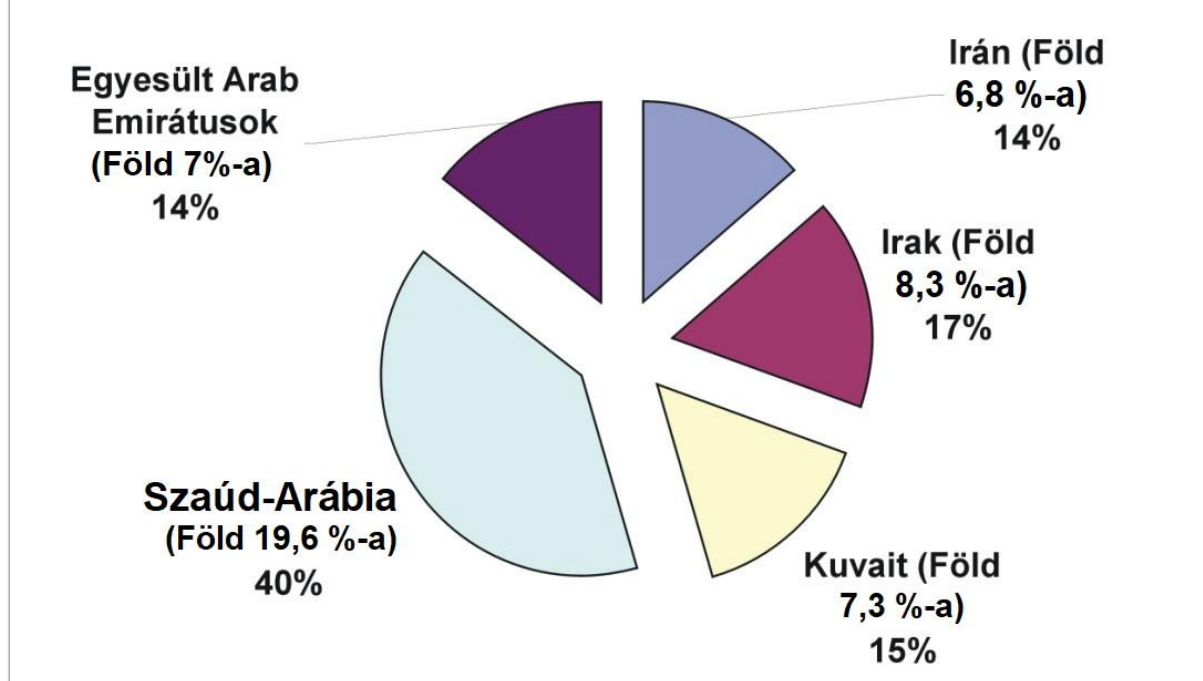
fokozó tényezők közé tartozik, hogy egyes országok feltételezhetően még jelentős, de kiaknázatlan mennyiséggel rendelkeznek. Ezen az országok közé tartozik például Venezuela, ahol az olajvagyon valós értékét így legfeljebb csak megbecsülni lehet.



2.4. ábra: A Föld olajvagyonja – US Energy Information Administration 2013

Olajlelőhelyek minden földrészen megtalálhatók (2.4. ábra) [S1], de az olajkészlet jelentős része – közel a fele - a Közel-Kelet országaiban van. Itt viszont gyakorlatilag csak 5 ország osztozik ezen az olajvagyonon, ők Szaúd-Arábia, Irak, Kuvait, az Egyesült Arab Emírátságok és Irán (2.5. ábra) [9]. Az említett országok és még 10 másik olajkitermelő ország a tagjai az 1960-ban létrehozott OPEC-nek (Organization of Petroleum Exporting Countries), amely szervezetnek fő célja a tagországok nyersolaj kitermelésének koordinálása és az olajkereskedelemnek a számukra legelőnyösebb megvalósítása. Mivel az OPEC országai a Föld olajkitermelésének több mint a felét adják, természetes, hogy az olaj pillanatnyi árának, és ezért közvetve az energia árának meghatározásában is döntő szerepük van, mely jelentős gazdasági fölényt is biztosít.

Olajtartalékok a Közel-Keleten



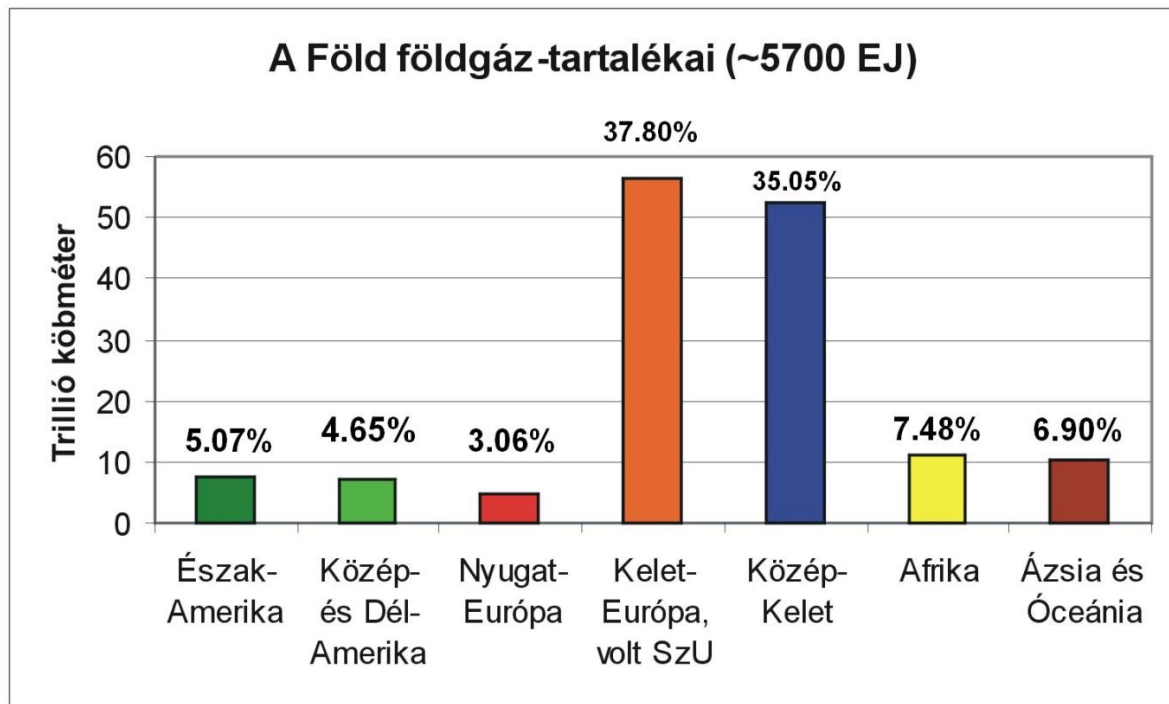
2.5. ábra: Közel-Kelet olajvagyon, az egyes államokra és a Föld egészére számított arányai

b) Földgáz

Bolygónk földgáz készlete a geológusok feltételezése szintén szerves eredetű, de nincs egyértelműen bizonyítva, hogy mindenütt együtt keletkezhetett a kőolajjal, bár mindkét energiahordozó gyakran található meg együtt kis kiterjedésű helyeken, az úgynevezett redőteknőkben (szinklinálisokban).

A földgáz eloszlása sem egyenletes az egyes kontinenseken, az ásványkincs több mint 70 %-a a volt Szovjetunió területén és a Közel-Keleten található meg (2.6. ábra) [9]. A teljes földgáz mennyiség becslés értéke körülbelül $160 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$, energiataralma $\approx 5700 \text{ EJ}$, ez közelítőleg megegyezik a kőolaj energiataralmával. A földgáz pontos mennyiségének meghatározásában is van egyfajta bizonytalanság, ezt az is alátámasztja, hogy az utóbbi évtizedben több új földgázmező felfedezéséről érkeztek jelentések. Ezek az újonnan feltárt területeken jelentősebb mennyiségű földgáz előfordulása vélelmezhető, és ez kisebb mértékben befolyásolhatja a teljes földgáz mennyiség becslés értékét. 2015-2021 között a Földközi

tengeren, Egyiptom közelében, Oroszország szibériai részén, Jakutföldön, és Kínában, Szecsuan tartományban találtak kimagaslóan nagy mennyiséget tartalmazó gázmezőket. [11] [12] [13]



2.6. ábra: Bolygónk földgáz készlete

A földgáz mellett említést kell tenni az utóbbi időben egyre több sajtóvisszhangot kiváltó úgynevezett „palagáz”-ról (pontosabban fogalmazva nem hagyományos földgázzal). Valójában ugyanolyan földgázzal van szó, mint a mindenki által ismert, például fűtőanyagként is felhasznált szénhidrogéntípus, de elégetésekor ez kevésbé szennyezi a környezetet. Ennek a gázfajtának a földrétegekben belüli elhelyezkedése viszont eltér a klasszikus földgáztól. A klasszikus földgáz képződése után elvándorol, és alacsony áteresztőképességű földtani rétegek alatt becsapdázódik, így kitermelése a rétegek függőleges átfúrásával könnyen megoldható. A „palagáz” viszont a gázképződés után a palarétegek repedéseiben reked meg, így kitermelése nem oldható meg hagyományos módszerrel, kinyeréséhez speciális technológia szükséges. (2.7. ábra) [14] Ezt az eljárást hidraulikus rétegreperesztésnek nevezik, melynek lényege, hogy előbb függőleges, majd a gázt tartalmazó réteget elérve, vízszintes fúrással nagy nyomású víz és homok, valamint különböző vegyi anyagok keverékét juttatják le a több ezer méter mélységű rétegbe. Ez a nagy nyomású keverék megpereszti a mélységben levő kőzetet (pala, márga), ezáltal a rétegen belül a repedések száma jelentősen megnövekszik és így a gázt tartalmazó üregek összeköttetésbe

kerülhetnek egymással. A bevezetett folyadék nyomásának csökkentésével és visszaszivattyúzásával a repedésekben levő gáz a felszínre vezethető. Az eljárást már 70 éve alkalmazzák, jelenleg elsősorban az USA-ban és Kanadában. Európában eddig még nem került erre sor, ennek oka az, hogy az Európai Unió környezetvédelmi szempontok miatt hosszú ideig nem támogatta, mivel bányászati eljárása jelentősen környezetszennyezőbb, mint a hagyományos földgáz kinyerése. Az utóbbi évtizedben viszont, felismerve a nem hagyományos szénhidrogének energiaellátásban betöltendő jövőbeni szerepét, megváltozott az EU álláspontja. 2014-ben az Európai Bizottság egy ajánlást fogalmazott meg a palagázra vonatkozó minimumelvekről [15], mely segítséget ad az egyes országokban a környezeti és egészséggel kapcsolatos lakossági aggályok elosztatásához és ezáltal a kereskedelmi célú kitermelés megkezdéséhez.

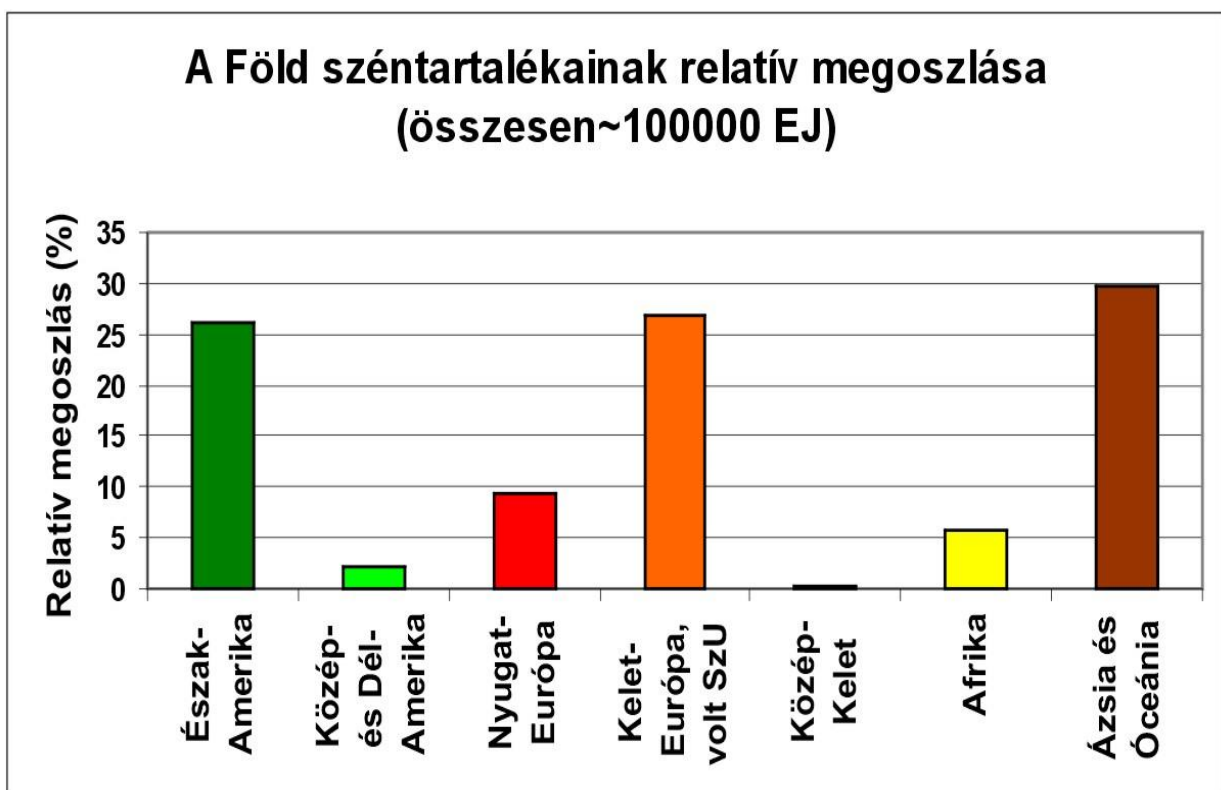


2.7. ábra: *Hagyományos és nem hagyományos földgáz lelőhelyek*

A Föld „palagáz” készlete az U.S. Energy Information Administration (EIA) 2015. szeptemberi jelentése szerint, amely egy-két kivételtől eltekintve 2013-as adatokat tartalmaz, $7576,6 \cdot 10^{12}$ cf (cubic feet) [16], átszámítva $\approx 215 \cdot 10^{12}$ m³ normálállapotú térfogatnak felel meg. Ez energiatartalomban, 40 MJ/m³-rel számolva, közelítőleg 8600 EJ energiát takar, ami körülbelül másfélszerese a hagyományos földgázból kinyerhető energiának. Az említett

jelentés az öt kontinensen 46 olyan országot sorol fel, ahol bizonyítottak a készletek, a legnagyobb mennyiségek Kínában, Argentínában, Algériában, az USA-ban és Kanadában vannak. Az európai országok közül Lengyelország és Franciaország készletei jelentősebbek, de a kitermelés még csak Lengyelországban indult el. Geológiai felmérések szerint Magyarország is rendelkezik nagyobb mennyiségű palagázzal („makói földgázvagyon”), de ennek kiaknázása nem várható az elkövetkező évtizedekben. Ennek oka az, hogy az ásványkincs rendkívül mélyen, 6-7000 méteren található, és jelenleg még nem áll rendelkezésre olyan technológia, amivel ilyen mélységből ezt gazdaságosan ki lehetne nyerni.

c) Szén



2.8. ábra: A Föld széntartalékai

Földünk szénkészlete viszonylag jól megbecsülhető, mivel lelőhelyei nagy kiterjedésű rétegekben találhatóak, és ezek geológiai felmérése nagy pontossággal elvégezhető. A becsült mennyiség $3 \cdot 10^{13}$ ETA tonna, melynek energiataralma körülbelül 100.000 EJ. Ez közel ötször akkora értékű, mint a kőolajból és hagyományos, illetve nem hagyományos földgázból kinyerhető összes energia.

Bolygónkon a szén is minden földrészen megtalálható, de valójában csak három kontinensen van jelentős szénvagyon, Észak-Amerikában, Kelet-Európában és Ázsiában, ez a három terület a Föld szénvagyonának több mint 85 %-át birtokolja (2.8. ábra) [9].

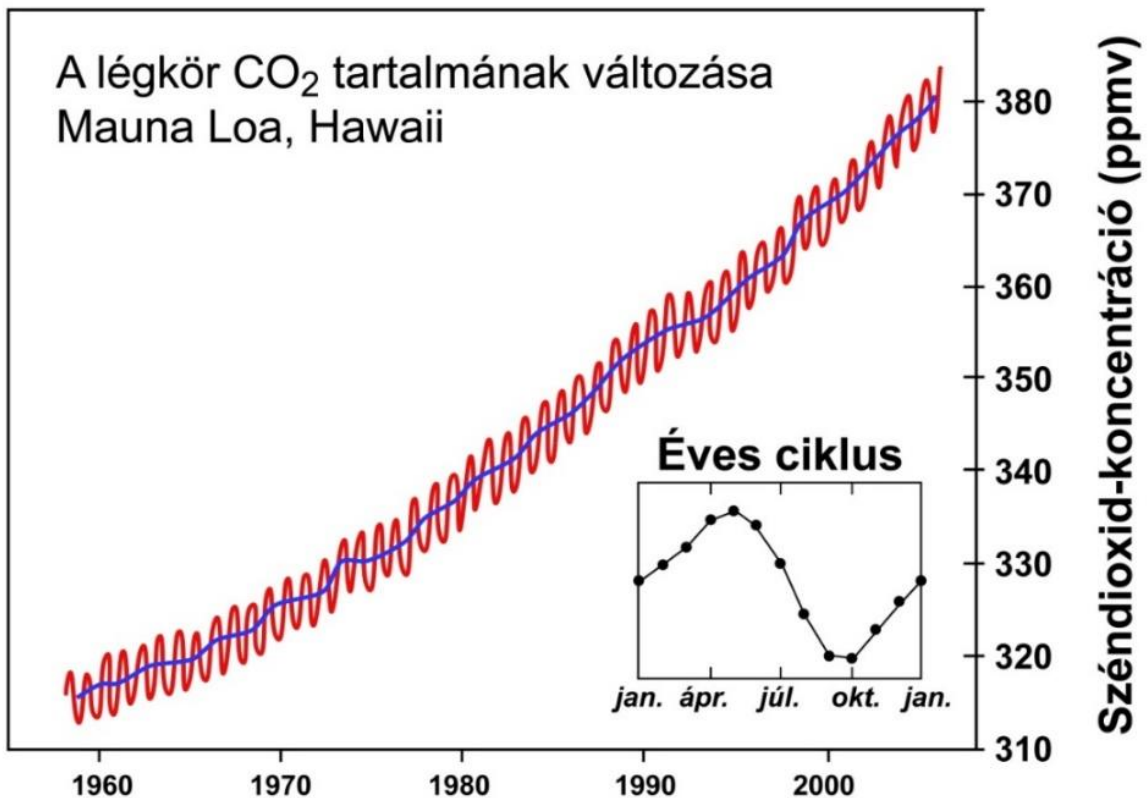
2.4. A fosszilis energiahordozókból származó energiatermelés felmerülő problémái, és ezek kísérleti bizonyítéka

Mivel ez a három energiahordozó az összes energiatermelés több mint négyötödét adja, így mindenképpen említést kell tenni a felhasználásukból adódó problémákról is.

Talán a legfontosabb probléma, amivel az energiatermelés során szembesülünk, a fosszilis energiahordozók felhasználásából származó környezetszennyezés. Ez egyrészt a jelentős mennyiségű széndioxid kibocsátásban, másrészt a légkörbe és a talajvízbe kerülő egyéb szennyeződések (kén-dioxid, nitrogén-dioxid, illetve nehézfémek és radioaktív elemek) megjelenésében nyilvánul meg.

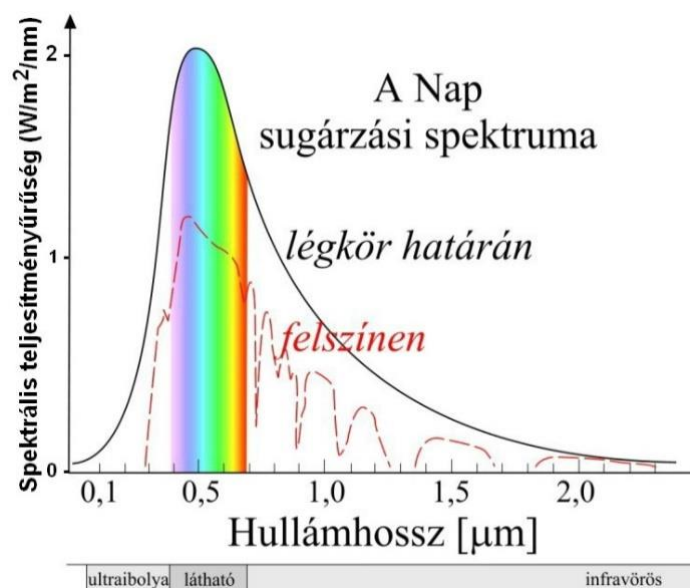
A fosszilis energiahordozók közül az azonos energiartalmú barnaszén elégetése juttatja a legtöbb széndioxidot a légkörbe, ugyanez az érték földgáz esetében már csak kevesebb, mint feleakkora. A levegőben levő széndioxid aránya a 78% nitrogén és 21% oxigén mellett jelenleg mintegy 0,04 %-ot tesz ki. Ennek értéke viszont folyamatosan növekszik, és ez a folyamat egyértelműen az emberi tevékenységeknek tudható be. A növekedést konkrét mérések is bizonyítják, ezt a Hawaii-szigeteken levő Mauna Loa obszervatórium adatai mutatják meg, melyek az elmúlt század második felétől 50 éven keresztül gyűjtött széndioxid koncentráció értékeket tartalmazzák (2. 9. ábra) [9].

A nagyobbik ábra jeleníti meg a fél évszázadra vonatkozó teljes folyamatot, a kisebbik rész pedig az egy éven belüli periodicitást. A téli időszakban, körülbelül májusig emelkedik a koncentráció, a második félévben viszont a fotoszintézis miatt a széndioxid beépül a növényekbe, így októberig a mennyisége folyamatosan csökken. Az ábrán a piros görbe a mért értékeket, a kék az éves átlagokat adja. Összességében azonnal szembetűnik, hogy a koncentráció a 1950-es évek második felében mért 315 ppmv (parts per million by volume) értékről 2006-ra 380 ppmv értékre emelkedett, már ez is 20%-os változás, de az azóta eltelt másfél évtizedben további növekedés történt, 2021. májusban már 419 ppmv volt a széndioxid koncentráció értéke. Miért okoz ez problémát, mi lehet, illetve mi lesz ennek a következménye?



2.9. ábra: CO₂ koncentráció növekedése 1956-2006

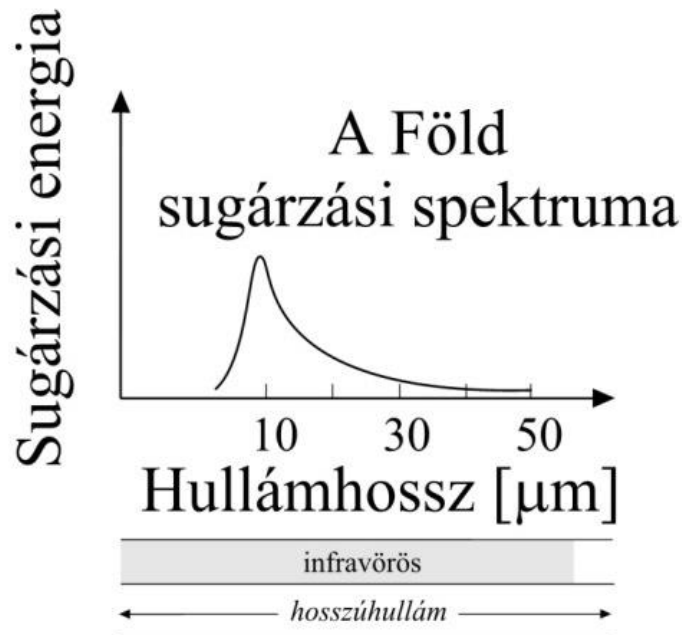
A széndioxid koncentráció emelkedését tartják a kutatók az üvegházhatás egyik felelősének. Az üvegházgázok (széndioxid, metán, vízgőz) hőmérsékletnövekedéssel hatnak a Föld klímájára, melynek kiváltó oka abban lehet fel, hogy a Föld felszínén valójában frekvencia transzformáció történik.



2.10. ábra: A Nap sugárzási spektruma

A Nap sugárzásából származó energia rövid hullámhosszú hullámok formájában érkezik a Földre (2.10. ábra) [S1] és az ilyen hullámok számára a légkör átlátszó, így képesek lejutni a Föld felszínére, melyet felmelegítenek.

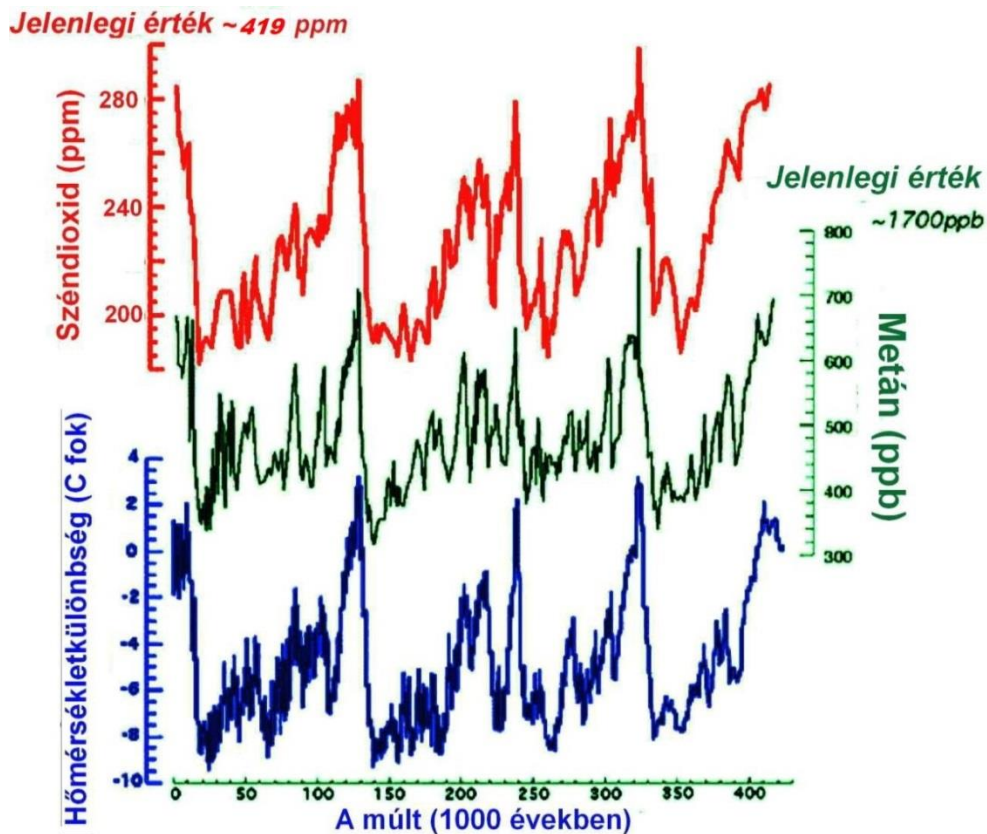
A Föld az elnyelt sugárzást viszont mintegy 20-as szorzó faktoral nagyobb hullámhosszú sugarak formájában juttatja vissza (2.11. ábra) [S1], de ezek számára sem a széndioxid, sem a metán nem átlátszó, így ez közvetve hőmérsékletnövekedést okoz, tehát jelentős szerepet játszik az esetleges klímaváltozásban.



2.11. ábra: A Föld sugárzási spektruma

Azt, hogy a klímaváltozás elkerülhető-e vagy sem, ezt jelenleg a kutatók még konkrétan bizonyítani nem tudják. Ezt több tényező is befolyásolhatja, és a természet a segítségükre sietett ebben egy „kísérlet” elvégzésével. Ez a Vosztok-jégmag minta kísérlete, mely az Antarktisz keleti részén levő Vosztok állomás mérésének eredményeit tartalmazza (2.12. ábra) [17]. Ebben a mintában az elmúlt ≈ 420.000 év éghajlati és légköri története rajzolódik ki. A kísérlet lényege, hogy a jégben néhány százezer évre visszamenően megjelenik a csapadék kiválaskori légkör széndioxid és metántartalma. Ezt a sarki jégfűrész magjának a vizsgálata tükrözi, az ábrán feltüntetett adatok ennek az eredményeit mutatják. A vizsgálat során a jégmag korára a hó éves lerakódásából lehet következtetni, a széndioxid, illetve a metán tartalom pedig közvetlen méréssel meghatározható. A hőmérsékletváltozásra a vízjégben levő oxigén 16-os és 18-as tömegszámú izotópjainak aránya utal, magasabb hőmérséklet több 18-as tömegszámú oxigénizotópot feltételez. Látható az ábra alapján, hogy

az elmúlt évezredek során a hőmérséklet több alkalommal is jelentősen változott, továbbá az is, hogy az üvegház gázok koncentrációi és a hőmérséklet-változás értékei párhuzamosan futottak egymás mellett, a magasabb szén-dioxid és metán koncentráció magasabb hőmérsékletet eredményezett.



2.12 ábra: Vosztok-jégmag minta

Ez viszont egyben azt is jelenti, hogy valószínűleg a jövőben is ez a tendencia fog érvényesülni, tehát a tovább emelkedő széndioxid és metán kibocsátás erőteljesebb hőmérséklet-növekedéshez fog vezetni. Ennek megjósolható következményeit a 2. 13. ábrán [S1] jelenítem meg, sajnos ezek közül már több az utóbbi évtizedben be is következett. Ezek közé tartozik például a fagyott altalaj olvadása Szibériában és Alaszkában, ahol ez az átalakulás komolyan veszélyezteti a kifejezetten permafrosztra épült épületek, illetve az utak és egyéb építmények stabilitását. Oroszországban 2025-ig több olyan megfigyelőállomás fog létesülni, melynek feladata az olvadás megfigyelése lesz. Ennek elsősorban gazdasági célja van, ez konkrétan a területen levő szénhidrogén kitermelésben az olvadás miatt keletkező károk csökkentése [18].

A gazdasági károk mellett éghajlati károk is adódnak, mivel az is az olvadás következményének tudható be, hogy növekszik a légkörbe került szén-dioxid és metán

mennyisége is, melyek mindketten bizonyítottan a Föld átlaghőmérsékletének emelkedésért felelősek.



2.13. ábra: A klímaváltozás előjelei

A környezetszennyezés problémája mellett más, elsősorban gazdasági jellegű kérdések is felmerülnek. Az ásványkincs készletek korlátozottak és kitermelésük, illetve az ehhez kapcsolódó szállítás, sok esetben körülményes és természetesen rendkívül költséges, így e tevékenységek gazdaságossága állandó elemzést igényel. Ehhez kapcsolódik az a sokak által felvetett kérdés is, hogy megfelelő módon kap-e szerepet a vegyipar a kitermelt ásványkincsek felhasználásában, hiszen csak hőtermelésre fordítani az energiát valószínűleg nem gazdaságos.

Végezetül, de nem utolsósorban, szembe kell nézni azzal a ténnyel is, hogy Földünkön az ásványkincsek egyenetlen eloszlása komoly politikai, illetve gazdasági függések rendszerét hozza létre, amely az egyes országok között jelentős feszültségekhez vezethet. Ezekre az elmúlt évtizedek történelme számos bizonyítékot adott, sajnos az ásványkincsek véges mennyisége miatt ennek a lehetősége a jövőben is fennáll.

3. Az energiatakarékosság kérdése

fizikatanári szemmel

Az első fejezetben már említésre került, hogy milyen következményekkel járna, ha akadozni kezdene, esetleg meg is szűnne az energiaellátás. Bár a történelmi tapasztalatok azt mutatták, hogy az egyének az idők során viszonylag kevés energiafelhasználással is tudtak boldogulni, a jelenkor embere ma már nem fogadna el az energiafelhasználásban semmilyen mértékű csökkenést. Az évenként növekvő energiafelhasználási mutatók, illetve a fogyasztás trendje is azt jelzik, hogy a társadalmak nem kívánnak ebben visszalépni. Ugyanakkor azt is látni kell, hogy ez a növekvő energiafelhasználási folyamat biztosan nem tartható fenn. Ezt az a tény is alátámasztja, hogy az úgynevezett „Túlfogyasztás Napja”, tehát az adott naptári évben az a nap, amikor az emberiség feléli a Föld arra az évre jutó természeti erőforrásait, egyre korábbi időpontra esik. A „túlfogyasztás” ilyen értelmű fogalmát 1970 óta ismerjük, akkor jelent meg először, abban az évben december 29-re esett ez a nap. Sajnos 50 év elteltével mára ott tart az emberiség, hogy már nem egészen 7 hónap alatt elfogyasztja azt a természeti erőforrás mennyiséget, amit a Föld csak egy év alatt képes regenerálni. Az utóbbi 5 évben, a 2020-as év, a járvány első, már teljes évének kivételével, mindig július utolsó napjainak egyikén volt a „Túlfogyasztás Napja” [19].

Érdeemes észrevenni viszont, hogy 2020-as évben „csak” augusztus 22-re esett, és bár ez a három hetes csúszás minden bizonnyal a COVID-19 járvány miatti lezárásoknak tudható be, egyben azt is jelzi, hogy a folyamat megállítható, sőt talán vissza is fordítható! A cél a termelés és a fogyasztás fenntarthatóvá tétele, és vágyott életminőség eléréséhez tudatos fogyasztói felelősség kialakítása, mind egyéni, mind társadalmi szinten. Ehhez kapcsolódóan világossá kell válnia annak is az emberiség számára, hogy a Föld jövője, valamint utódaik létének biztosítása érdekében, szükségessé válik a következő évtizedekben a mostaninál komolyabb mértékű energiatakarékosság is. Ez esetünkben valószínűleg azt fogja jelenteni, hogy a társadalmak jelenlegi és jövőbeli igényeinek megfelelő szolgáltatások az energiafelhasználás szempontjából jobb hatásfokkal fognak megvalósulni, feltételezhető, hogy az egyénekenkénti energiafelhasználás érdemben alig fog csökkenni. Milyen tényezőktől is függ pontosan a társadalom energiaigénye?

Az energiaigényt három tényező határozza meg: a társadalomban élő emberek száma, a társadalom szociális állapota, illetve ennek gazdasági és technikai fejlettsége. A felhasznált energia mennyisége értelemszerűen akkor fog csökkenni, ha maguk a tényezők csökkennek.

Természetesen mindhárom nem fog csökkenni, köztudott, hogy a Föld lakossága évenként mintegy 80 millió fővel növekszik, így ennek a tényezőnek a pozitív irányú változását is a másik kettőnek kellene kiegyenlíteni.

A másik két tényező közül a társadalmak szociális állapota a fejenkénti szolgáltatásigényt, a gazdasági és technikai fejlettség az igényelt szolgáltatásokhoz tartozó energia mennyiségét jelenti. A kettő közül az utóbbi csökkentésének van nagyobb lehetősége, az előbbi csak abban az esetben változhat negatív irányba, ha a társadalom tagjai felismerik, hogy pontosan melyek is azok a szolgáltatások, melyekre mindenképpen szükségük van, és amikre nincs szükségük, azokat elhagyják. Az emberek energiaigénye viszont több tényezőtől is függ, ilyenek például a tényleges fizikai igények, a fogyasztási szokások, a vágyott életszínvonal, illetve az erkölcsi értékrend, de azt mindenkinek világosan kell látni, hogy az energiatakarékosság a teljes társadalomra kell, hogy vonatkozzon.

Az említett energiamennyiségek csökkentéséhez nem elegendők kizárólag a technikai fejlesztések, az energiatakarékos fejlesztésekhez beruházásokra van szükség, melyekhez a politikai akarat mellett jelentős tőkeigény is tartozik. Az ezekből a beruházásokból származó gazdasági haszon viszont általában csak időkéssel jelentkezik, így a piac gyakran nem támogatja az energiatakarékos megoldásokat, tehát a jövőre vonatkozó kilátások ebből a szempontból nem kedvezőek. Összességében az valószínűsíthető, hogy az egy főre jutó energiafogyasztás csökkenésére van némi esély, de csak abban az esetben, ha a társadalom tagjai a jövőjük érdekében megértik az energiatakarékosság fontosságát és hajlandók alárendelni ennek fogyasztási szokásaikat.

Melyek azok a területek, ahol adódnak lehetőségek a megtakarításra? A cél minden területen a hatékonyság növelése. Ez vagy a hatásfok növelésében, vagy a hatékony termelés kiszélesítésében tud megnyilvánulni. Elsőként nézzük meg, hol lehet a hatásfokot növelni! Nagyon sok ilyen terület található, de próbáljunk meg a legfontosabbakra összpontosítani!

Kezdjük a térfűtésből adódó lehetőségekkel! Jelenleg az összes energiafelhasználás mintegy ötödét adja a térfűtéshez szükséges energia. Ez az érték a terek jobb szigetelésével, a kazánok hatásfokának növelésével jelentősen csökkenthető, akár 10% alá is levihető. Második terület az elektromos hálózatok veszteségei. Mivel ezek százalékban kétszámjegyűek is lehetnek (Magyarországon 15% körüli), így már egy kis javulás is hozhat jelentősebb megtakarítást. Harmadikként említeném meg a személy és áruszállítás területét, ezen belül is például a tömegközlekedés kérdését, melynek racionalizálása és ezáltal a hatásfok növelése szintén komolyabb mértékben hozzájárulhat az energia megtakarításhoz.

Miben nyilvánulhat meg a hatékony termelés kiszélesítése? Ennek egyik paramétere a technikai-műszaki fejlesztés, mely a termékek előállításában új megoldásokat ad és így csökkenti az előállításához szükséges energiát. A másik potenciális paraméter lehet az anyagtakarékosság, mely elérhető ésszerű szervezéssel, illetve az anyagok újrahasznosításával. Ez utóbbi ugyan erősen függ a társadalom környezeti érzékenységétől, illetve gazdasági ösztönzőktől, de önmagában is adhat néhány százalékos megtakarítást.

Hol van ezekhez kapcsolódóan a fizikatanárnak feladata? Az első és talán a legfontosabb teendője a környezettudatos energia felhasználásra történő nevelés. Ez azt jelenti, hogy fel kell hívni diákjainak a figyelmét azokra a hétköznapi életben fellelhető megtakarítási lehetőségekre, melyekkel nap, mint nap találkozhatnak. Ezek elsősorban a világítással és a fűtéssel kapcsolatos lehetőségekben nyilvánulnak meg. Ide tartozik például az energiatakarékos izzók használata, a helyes szellőztetés, illetve a túlfűtés kérdése, a megfelelő szigetelés alkalmazása, de akár olyan teljesen hétköznapi jelenség is, hogy a hűtőszekrény motorja ne legyen letakarva.

Második feladata az ismeretek pontos átadása. Meg kell tanítani a tanulóknak a saját értelmi szintjükön a berendezések működésének fizikáját, és meg kell őket ismertetni az energiafelhasználáshoz kapcsolódó tevékenységek hatásfokával is, éppen azért, hogy a tevékenységek gazdaságosságának kérdésében is világosan lássanak. Végezetül komoly szerepe van abban is, hogy bemutassa az Interneten, illetve a médiában, a különböző fórumokon megjelenő, az energia megtakarításra vonatkozó ötletek valós fizikai tartalmát. Neki kell elmagyarázni a diákoknak, ha áltudományos, esetleg a fizika törvényeinek is ellentmondó, csak üzleti érdekeket preferáló lehetőséggel szembesülnek, hogy azt az ötletet hogyan kell értelmezniük, illetve milyen buktatók lehetnek a megoldásban.

4. Megújuló energiák

Mit is jelent maga ez a fogalom, mely energiaforrásokat nevezünk megújulóknak, mi jellemzi ezeket? A megújuló energiaforrások olyan energiaforrások, melyek a történelmi időskálán belül (≈ 10.000 év) képesek folyamatosan pótlódni. Elemezve őket, a legfontosabb általános jellemzőjük az alacsony energiasűrűség, ami azt jelenti, hogy a hasznosításnak vagy jelentős a területigénye, vagy hatalmas anyagtömegeket kell megmozgatni, vagy nagy térségben kell változást létrehozni ahhoz, hogy megfelelő mennyiségű energiát lehessen megtermelni.

Emellett mindenképpen említést kell tenni arról is, hogy a napenergiát és a szélenergiát felhasználó berendezések esetében a megtermelt energia tárolása jelenleg még nincs megoldva. Ez a hiány viszont hosszabb távon megkérdőjelezheti az üzemeltetés gazdaságosságát.

Alkalmazásuk esetében más jellegű problémák is felmerülnek. Az egyik ilyen, annak a kérdésnek a meggondolása, hogy az energiatermeléshez szükséges beruházás technikailag, illetve gazdaságilag megvalósítható-e. A másik probléma a társadalom technológiai felvevő képességéből adódhat, vajon elfogadják-e az emberek ezt a változást. De nem szabad elfelejteni ezeken kívül azt sem, hogy a megújuló energiaforrásokkal történő energiatermelés komoly környezeti problémákat is felvet. Ez megjelenhet az élővilágba való közvetlen beavatkozás területén, vagy a környezet esztétikai átalakítása okán, és a felhasznált anyagoknak az energiatermelő berendezések leszerelésekor történő végső hulladékkezelése miatt is.

Jelenleg a megújuló energiaforrások a Föld teljes energiatermelésének valamivel több, mint 10%-át adják [10]. Bár az utóbbi évtizedben az energiatermelésben a megújulók arányának növekedése állandósult, de százalékban kifejezve ez továbbra is csak egy viszonylag alacsony értéket jelent. A reális elemzések alapján belátható, hogy az elkövetkező évtizedekben a megújulók nehezen tudják teljesen megoldani a Föld lakosságának energia problémáit, a számítások szerint az összes energiaszükségletnek csak mintegy 25-35%-a fedezhető belőlük. A hiányzó mennyiséget továbbra is a fosszilis, illetve nukleáris energiahordozók segítségével fogja megtermelni az emberiség.

4.1. A Napenergia közvetlen felhasználása

A 2.2. fejezetben már említésre került, hogy az emberiség ma még csak egy rendkívül kis részét tudja hasznosítani a Nap energiájának, és ez döntően elektromos energiafelhasználás

formájában realizálódik. Ennek mértéke a jövőben várhatóan jelentősen növekedni fog, és erre az emelkedő tendenciát mutató energiafelhasználási adatok alapján szükség is lesz, mivel 2020-as évben a Föld teljes elektromos energiafogyasztásának még csak 3,7 %-át [20] sikerült a Napsugárzás közvetlen felhasználásával előállítani.

Melyek azok a lehetőségek, amelyek segítségével a Napsugárzás energiáját közvetlenül hasznosítani tudjuk? Három mód adódik erre, az egyik az elektromos energia közvetlen előállítása fotovoltaikus berendezések segítségével. A fotovoltaikus rendszerek jelenleg a világon az egyik leggyorsabban fejlődő elektromos energiát előállító rendszerek, folyamatosan történnek híradások újabb naperőművek tervezéséről, illetve átadásáról. A jelenleg futó projektek közül a legnagyobb léptékű az észak ausztráliai Elliott mellett létesítendő napelem park, melynek területe mintegy 16.000 focihálya (12.000 ha = 120 km²) és a tervezett névleges kapacitása 10 GW lesz. Ennek külön érdekessége még, hogy az erőmű által megtermelt elektromos energiát az onnan 3700 (!) km-re levő Szingapúrba tenger alatti kábelen kívánják eljuttatni.[21]

Pillanatnyilag (2022-ben) a legnagyobb működő naperőmű az Indiában található Bhadla Solar Park (4.1 ábra), melynek névleges kapacitása 2250 MW, és 40 km²-nyi területet fed le [22].

Összehasonlításként érdemes itt a legnagyobb magyar naperőmű adatait is megemlíteni. Ez a 2021-ben átadott létesítmény Kaposvár határában van, névleges kapacitása 100 MW, és 2,2 km² területen található. [23]

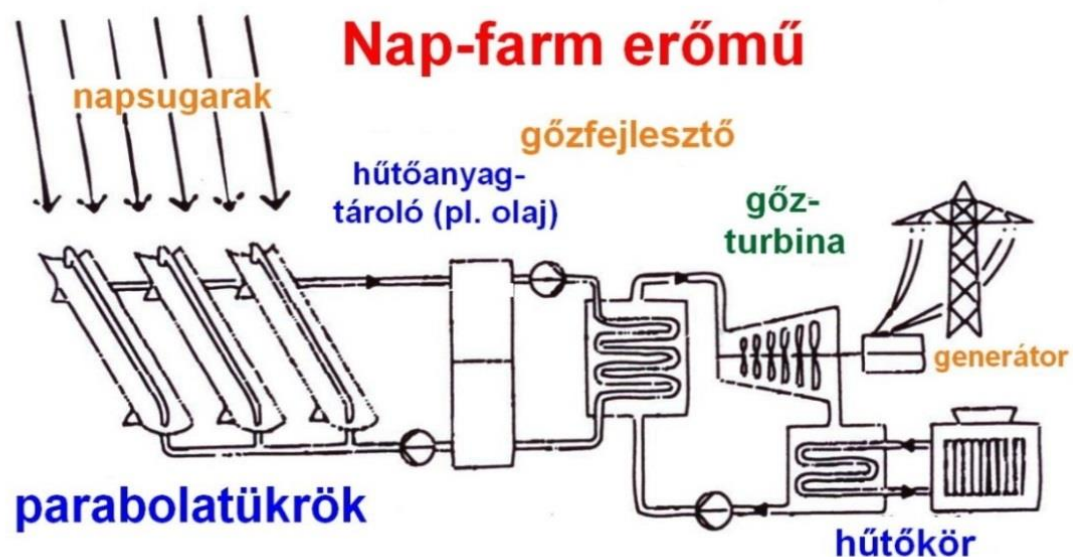


4.1 ábra: Bhadla Solar Park – Rajasthan-India

A naperőművekben található napelemek hatásfoka függ a beépített anyagoktól, a hőmérséklettől, illetve az esetleges speciális megoldásoktól, értékük 20-40 % között mozog. Emellett fontos paraméter az energiatermelés szempontjából az adott területekre jellemző napsütéses órák száma is, összességében az erőművek tényleges elektromos teljesítménye a névleges kapacitáshoz viszonyítva jelentősen kisebb, csak mintegy hatoda-nyolcada.

Az üzemeléssel kapcsolatosan további problémák is felmerülnek. A nagy területigényből rögtön adódik, hogy már a létesítéshez is komoly tőkeerőre van szükség, de emellett két más hátrányos jelenség is fellép. Az egyik a terület lefedése miatt létrejövő elsivatagosodás, gyakorlatilag megszűnik ott az élővilág, a másik a területet érő káros meteorológiai hatások, például a szélviharok megjelenése. Az üzemeltetéssel kapcsolatosan is van két megoldandó feladat, az egyik az állandó karbantartásigény, a másik a beépített anyagok miatt felmerülő környezeti aggályok megválaszolása. A gondok mellett azért mindenképpen meg kell említeni egy komoly előnyt is, ez pedig a decentralizált egységek alkalmazása, tehát a függetlenség az országos elektromos hálózattól, ez például Afrikában óriási jelentőségű lehet.

A második mód a napsugárzás hőforrásként történő felhasználása. Ebben az esetben a Nap hőhatását hasznosítják úgynevezett szolártermikus farmerőművek segítségével. A 4.2. ábra [9] alapján látható, hogy működése hasonló a fosszilis energiahordozókkal elektromos energiát előállító erőművekhez, de itt a csővezetékben keringetett nagy hőkapacitású folyadékot (szintetikus olaj vagy só olvadék) a napsugárzás melegíti fel.



4.2. ábra: Nap-farm erőmű

Ez történhet közvetlenül, napkollektorok alkalmazásával, vagy oly módon, hogy tükrök segítségével a Nap sugarait egy központi helyre fókuszálják és az ottani tartályban levő folyadékot melegítik fel magas hőmérsékletre. Utóbbira példa Franciaországban, a Kelet-Pireneusokban található Odeillo napkemence (4.3. ábra) [24], melyben 9500 tükörlapból felépített parabola tükör segítségével jut el a Nap sugárzása a sötét bevonatú külső felületre. A kemence belsejében a hőmérséklet igen magas, 3800 °C is lehet, ezt a hőmérsékletet normál kazánban nem tudnák elérni, a létrejövő hőteljesítmény 1 MW értékű.



4.3. ábra: Odeillo napkemence – Franciaország

Az egyik legújabb megvalósítási lehetőség a spanyolországi Manzanares-ben található napkémény (4.4. ábra) [25], amelynek fotóját és a működésének rövid leírását felhasználva, jelenségelemző feladat is készült a 2019. májusi középszintű fizika írásbeli érettségire [26].

A kémény valójában egy torony, mely egy átlátszó tetővel lefedett földterület közepén áll. A napsütés hatására a tető alatt levő levegő felmelegszik, a kémény felé áramlik, közben turbina lapátokat forgat meg, így egy generátor segítségével energiát termel, majd a kéményen keresztül felszáll. A levegő állandó áramlását, és ezáltal a folyamatos energiatermelést úgy biztosítják, hogy a talajra vízzel telt csöveket fektetnek, melyek nappal felmelegsznek, éjjel pedig leadják a felvett hőt [26].



4.4. ábra: Napkémény – Manzanares – Spanyolország

A Nap hőhatásának ilyen módon történő alkalmazásával szemben viszont több aggály is felmerül. Az egyik a hatalmas területigény, mely mindegyik megoldásnál jelentkezik, és az egyébként elengedhetetlen karbantartást jelentősen megnehezíti. A másik a magas beruházási költségek mellett létrejövő, de összességében alacsonynak mondható elektromos energiatermelő képesség, mely a megkérdőjelezi a gazdaságosságot. Harmadikként pedig az esetlegesen fellépő káros környezeti hatásokat kell megemlíteni, melyek mind a tájképet, mind a növény-, illetve állatvilágot is érinthetik.

A napsugárzás közvetlen hasznosítására a harmadik lehetőség a „kisléptékű” közvetlen felhasználás. Ez a napenergiának napkollektorokkal történő „csapdázását” jelenti, melynek segítségével használati meleg víz állítható elő lakóházak, illetve más intézmények számára, sőt télen a fűtés rásegítéseként is tud működni (4.5. ábra) [S1]. Nem szabad elfelejteni viszont azt sem, hogy a mérsékelt égövben a téli napsütéses órák száma kevesebb, így emiatt csak legfeljebb 50 %-a váltható ki így a fűtésnek, vagyis mindenképpen szükséges valamilyen hagyományos fűtési rendszer kiépítése is. Ez azt jelenti, hogy a napkollektorok telepítése, valamint a szükséges karbantartás plusz költségeket jelent, melynek megtérülése a jelenlegi energiaárak mellett biztosan 10 év feletti. A mezőgazdaságban viszont, ahol az üvegházak,

illetve állatistállók fűtésére meleg vizet használnak, komoly szerep juthatna ennek az alkalmazásnak, és jelentős mennyiségű fosszilis energiahordozót lehetne vele kiváltani.



4.5. ábra: Napelemek (középen), illetve napkollektorok (jobb oldalt) lakóház tetején

Érdeemes külön is beszélni ebben a témában Magyarország helyzetéről, illetve pillanatnyi és jövőbeni lehetőségeiről! Hazánk az utóbbi években komoly erőfeszítéseket tesz a napenergiával történő energiatermelés érdekében. Ez elsődlegesen abban nyilvánul meg, hogy jelentős állami támogatással segítik azokat a magán-, illetve állami szférában induló beruházásokat, melyek a napenergiával történő energiatermelést választják. A folyamat már elindult, de fontos tudni, hogy Magyarországon a napsütéses órák száma csak az ország egy bizonyos területén (Alföld), és csak a május-október közötti időszakban kedvező mértékű, az év hátralevő részében, illetve az ország többi részén ennél lényegesen kisebb. Jelenleg az összes felhasznált energiának alig több mint 1%-t állítja elő hazánk napenergia segítségével. Magyarország a tervek szerint a következő években 110 naperőművet épít, így ez az érték jelentősen növekedni fog, de a számítások szerint is csak körülbelül egy évtized múlva tudja elérni a 10%-t. Fentiek alapján az prognosztizálható, hogy az ország energiaproblémáit a napenergia felhasználásával csak kismértékben lehet majd csökkenteni.

4.2. A Napenergia közvetett felhasználása

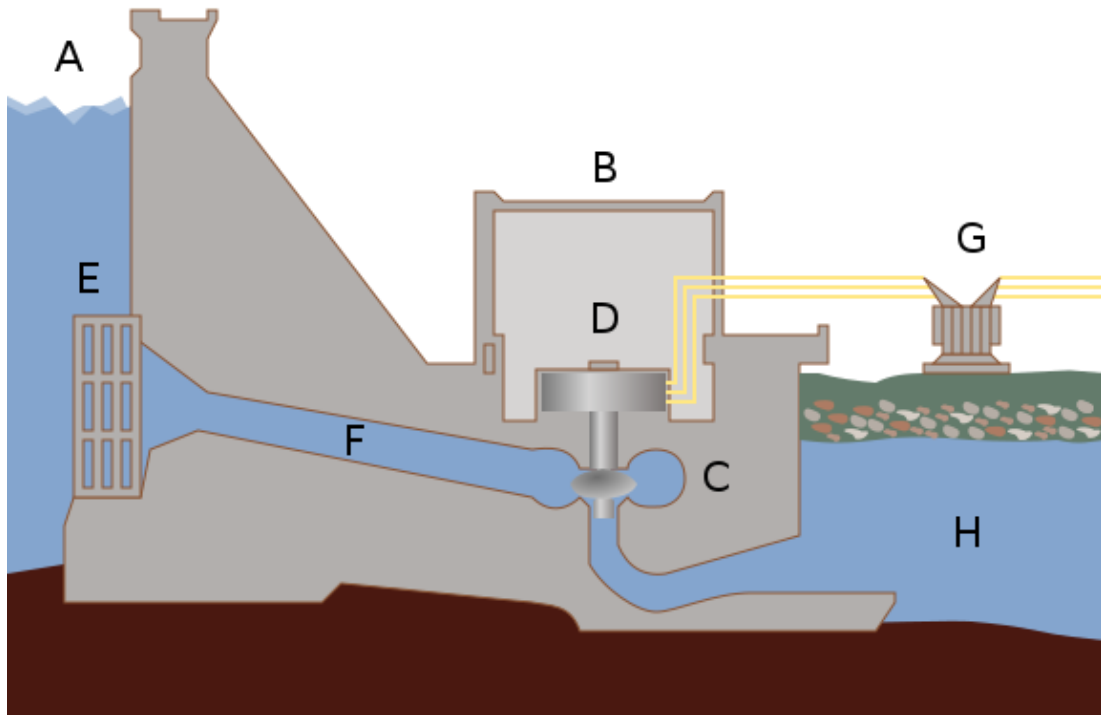
A napsugárzás energiájának felhasználása nemcsak közvetlenül, de közvetett módon is megvalósulhat, tehát olyan típusú energiaátalakításával, aminek „létrejöttét” maga a Nap idézte elő. Melyek is ezek, nézzük meg egyesével a belőlük származó energiatermelés lehetőségeit! Kezdjük elsőként azzal, amelyiket az emberiség legrégebben, több mint 4000 éve használ, ez a vízenergia!

4.2.1. Vízenergia

A vízkörforgást a Nap biztosítja, így a vízenergia igazi megújuló energiának számít. Felhasználása régebben több területen is megjelent, a vízimalmok, vízikerekek alkalmazása nagymértékben megkönnyítette az emberek fizikai munkavégzését. Ma a felhasználás gyakorlatilag csak az elektromos energiatermelésre korlátozódik, jelenleg (2020-ban) a világ elektromos energia termelésének 16,5 %-át a vízerőművekben megtermelt energia adja [27]. Ez az érték az utóbbi 5 évben alig változott, összesen csak 9%-kal nőtt, de köszönhetően a létesítendő új, és a felújítás előtt álló régebbi erőműveknek, a tervek szerint a következő 10 évben több mint 30 %-kal fog emelkedni [28].

A Földön a legnagyobb vízerőmű Kínában, a Jangce folyón van, ez a 2009-ben átadott Három-szurdok-gát, (Three Gorges Dam) melynek teljesítménye 22,5 GW [29]. Európai területen a legnagyobb ilyen létesítmény Oroszországban, Volgograd mellett található, teljesítménye 2,5 GW [29]. Európa a vízenergia kihasználtság szempontjából telítettnek mondható, itt a közeli jövőben nem várható érdemleges változás. A többi földrészen, ezen belül is elsősorban Ázsiában, Afrikában, illetve Dél-Amerikában viszont még sok lehetőség van újabb vízerőművek telepítésére és az említett jövőbeli beruházások ezeken a területeken fognak megvalósulni. (2022-ben kerül átadásra a Baihetan vízerőmű Kínában, már tervezés alatt van az Inga III. vízerőmű Afrikában, a Kongó folyón, és több kisebb erőmű létesítését tervezi a brazil kormány az Amazonason.)

A vízerőművek energiatermelése megvalósítható a földrajzi szintkülönbség kihasználása alapján vagy szivattyúk működtetésével. Az előbbi megoldás történhet duzzasztással, magasabb gátakkal (4.6. ábra) [30], illetve eltereléssel, alacsonyabb gátakkal, vagy akár ezek alkalmazása nélkül is. Mindkét esetben a folyó vizének mozgási és helyzeti energiája alakul át turbina és generátor segítségével elektromos energiává.



4.6. ábra: Duzzasztásos vízerőmű

Részei: A - víztározó, B - erőműház, C – turbina, D – generátor,
E – zsilip, F – üzemvíz csatorna, G – elektromos távvezeték, H – folyó



4.7 ábra: Szivattyús vízerőmű

A szivattyús erőműveknek (4.7 ábra) [31] szabályozó szerepük van az elektromos energiatermelésben, ezek biztosítják az elektromos energiarendszer „finomhangolását”. Ez a

valóságban azt jelenti, hogy amikor a rendszerben az alaperőművek által megtermelt elektromos energia nem elegendő, akkor a szivattyús erőművet is bekapcsolják, és a tározókban levő víz leeresztésével biztosítanak további elektromos energiát.

Milyen előnyökkel, illetve hátrányokkal jár a vízerőművek telepítése? Mindenképpen az előnyök közé kell sorolni az emberiség vízkezelésben megszerzett évezredek tapasztalatait, annak ellenére is, hogy azok a vízerőművek, melyek az elektromos energiatermelést biztosítják, csak mintegy száz évesek. További előny, hogy a már megépített erőműnek a megtermelt értékhez képest csekély költsége van, és üzemeltetését kevés ember is el tudja látni. A vízerőmű környezetkímélő, nincs káros kibocsátása, élettartama száz évnél is hosszabb lehet, ez többszöröse a más típusú erőművek élettartamának. Az erőmű mellett, hogy optimalizálja az elektromos rendszert, megújítja a vízgazdálkodást, szerepe van az árvízvédelemben, illetve a hajózásban is.

Természetesen beszélni kell a hátrányokról is! Az erőmű építése rendkívül költséges és hosszú folyamat. A létesítés együtt jár több száz, sőt esetenként több ezer km²-nyi terület elárasztásával, mely maga után vonja az ott lakók teljes kitelepítését, illetve az ottani szárazföldi élővilág megszűnését. Az említett Három-szurdok-gát esetében 632 km² volt az elárasztott terület nagysága (ez nagyobb, mint a Balaton) és 1,3 millió embert kellett kitelepíteni! Az előnyök között feltüntetett környezetre gyakorolt hatást sajnos a hátrányok között is meg kell említeni, mert ugyan az erőmű környezetkímélő, de ugyanakkor tájromboló is. Az esztétikai negatívum mellett vannak más kedvezőtlen környezeti hatások is, nézzünk néhány példát ezek közül is! Megváltozik a talajvízszint, a folyó sebessége, illetve a vízminősége, jelentőssé válik a hordalék lerakódás, így állandó kotrás válik szükségessé, korlátozódik a halak vándorlási területe, ezáltal gyökeres változás következik be a vizes helyek élővilágában is, vagyis nagyon sokféle ökológiai kár is adódhat.

Végezetül tekintsük át Magyarország lehetőségeit a vízenergia hasznosítás szempontjából! Magyarország földrajzi adottságai nem kedvezőek az ilyen típusú energiatermeléshez, mivel a két legfontosabb folyónknak, a Dunának, illetve a Tiszának, melyeknek vízhozama jóval nagyobb a többi folyónál, kicsi az esése az ország területén. A két legnagyobb vízerőmű a Tiszán található, Kiskörén és Tiszalökön, kapacitásuk 28 MW, illetve 13 MW, a Duna magyarországi szakaszán egyetlen vízerőmű sincs! Az országban 2019-ban 15 vízerőmű működött, összes beépített kapacitásuk 57 MW, az ezekből származó elektromos energia 213 GWh volt, ez az éves elektromos energiatermelésnek mindössze 0,64 %-a [32].

Sajnálatos módon ez a mennyiség a jövőben sem lesz érdemben magasabb. Ennek oka a kedvezőtlen földrajzi adottságok mellett az is, hogy hazánk vélhetően hosszú időre lemondott

a vízenergia hasznosításáról. A folyamat még a XX. század utolsó évtizedeiben kezdődött azzal, hogy Magyarország felmondta a Bős-Nagymaros vízerőművek létesítéséről szóló megállapodást, és visszalépett a szerződéstől. Ennek következményeként az ország körülbelül akkora mennyiségű elektromos energiától esett el, mint amennyit a Paksi Atomerőmű egy blokkja képes megtermelni. A helyzet fonákságát viszont jól jelzi, hogy az elektromos energia szükségessége miatt Magyarország jelenleg megveszi a szlovák oldalon felépített erőműben megtermelt elektromos energiát. Újabb, nagyobb teljesítményű vízerőművek építése még a tervezés szintjén sincs kilátásba helyezve, így elég egyértelműnek tűnik, hogy a megújulóknak ez a fajtája sem fog segíteni a jövőben az itthoni energiagondok megoldásában.

4.2.2. Szélerőenergia

A szélerőenergia is a Naptól származó megújuló energia, melyet az emberiség évszázadok óta hasznosít. Ez eleinte vitorlák segítségével a hajózásban, később, körülbelül a 12. századtól, szélmalomok, szélkerekek alkalmazásával az ember fizikai munkavégzésének segítségével is megnyilvánult. Ma a szélerőenergiát energetikai szempontból már csak elektromos energia előállítására használják oly módon, hogy az áramló szél egy rotort megforgatva az ahhoz kapcsolódó generátor segítségével elektromos feszültséget indukál. Milyen tényezőktől függ, hogy mekkora munkát képes végezni a szél, és mekkora lehet az energiatermelés nagysága? Végezzünk el erre egy közelítő becslést! Egyszerű számítások alapján bizonyítható, hogy a szél felületegységre vonatkoztatott teljesítménye (P/A) a szélerősebesség harmadik hatványával egyenesen arányos, az arányossági tényező a levegő sűrűségének fele. Ennek alapján normálállapotú levegőben 10 m/s szélerősebesség esetén az egységnyi felületre eső teljesítmény körülbelül 650 W/m^2 . Ez teljesítmény szempontjából elég alacsony értéknek számít, így ha a nagy teljesítmény elérése a cél, akkor nagy felületű lapátokat kell alkalmazni. Napjainkban a szélerőművekben használt lapátok mintegy 50 m hosszúságúak, a teljes rotor felület a lapátok számától függően körülbelül ezer négyzetméter nagyságú. Ilyen nagy felület esetén viszont jelentős erőhatások lépnek fel, ezek értéke szélerősebességtől függően akár több százezer newton is lehet. Ezt a lapátokra ható hatalmas erőt a szélerőmű oszlopának kell kompenzálni, ez indokolja, hogy magasabb szélerősebesség esetén ($>25 \text{ m/s}$) leállítják a szélerőművet.

A szélkerék működésének fizikája a Bernoulli törvényhez kapcsolódik, a lapátok profilját úgy alakítják ki, hogy nyomáskülönbség alakuljon ki a lapát két oldalán, melynek következtében a lapát profiljára merőleges erő lép fel. Matematikai számítások alapján a szélkerekek maximális hatásfoka 59 % (Betz-limit), megmutatható, hogy ez akkor érhető el, ha a

szélkerék utáni szélesebb harmada az eredeti sebességnek. Ezt az értéket legjobban a három lapátos rotorok tudják megközelíteni, ezért leggyakrabban ezeket alkalmazzák.

A szélenergia-termelési potenciálját az adott földrajzi helyen több tényező is befolyásolja. A folyamatos működéshez szükséges, hogy a szél egyenletesen és megfelelő erősséggel fújjon. Ez a Földön elsősorban a tengerpartokon valósul meg, a kontinensek belsejében a szél sebessége jelentősen kisebb, és egyenetlenebb is. Ez utóbbi viszont a teljesítmény ingadozásához vezet, mely a hálózatra csatlakozásnál gondot okoz. Az eddigi tapasztalatok azt mutatják, hogy oda érdemes szélenergiát telepíteni, ahol a rendelkezésre állás ideje 20% feletti. Ez az érték az adott névleges teljesítményű berendezés által valószínűleg megtermelt és az éves szinten, a lehetőségek alapján megtermelhető energia mennyiségek hányadosa. A kiemelkedően széles területeken, például a brit, a dán vagy az észak-német tengerpartokon ez 45-50% között mozog, ugyanakkor Magyarországon csak néhány helyen éri el a 25%-t, az ország területének jelentős részén 20% alatti.

A szél sebessége függ a talajszinttől mért távolságtól is, magasabban nagyobb az értéke. Ez magyarázza, hogy a modern szélkerekek magassága a lapátokkal együtt körülbelül 150 m, de ebből adódóan ezek beruházási költsége is rendkívül magas. A jelentős költségek mellett más problémák is felmerülnek a szélkerekek nagyszámú telepítésével kapcsolatban.

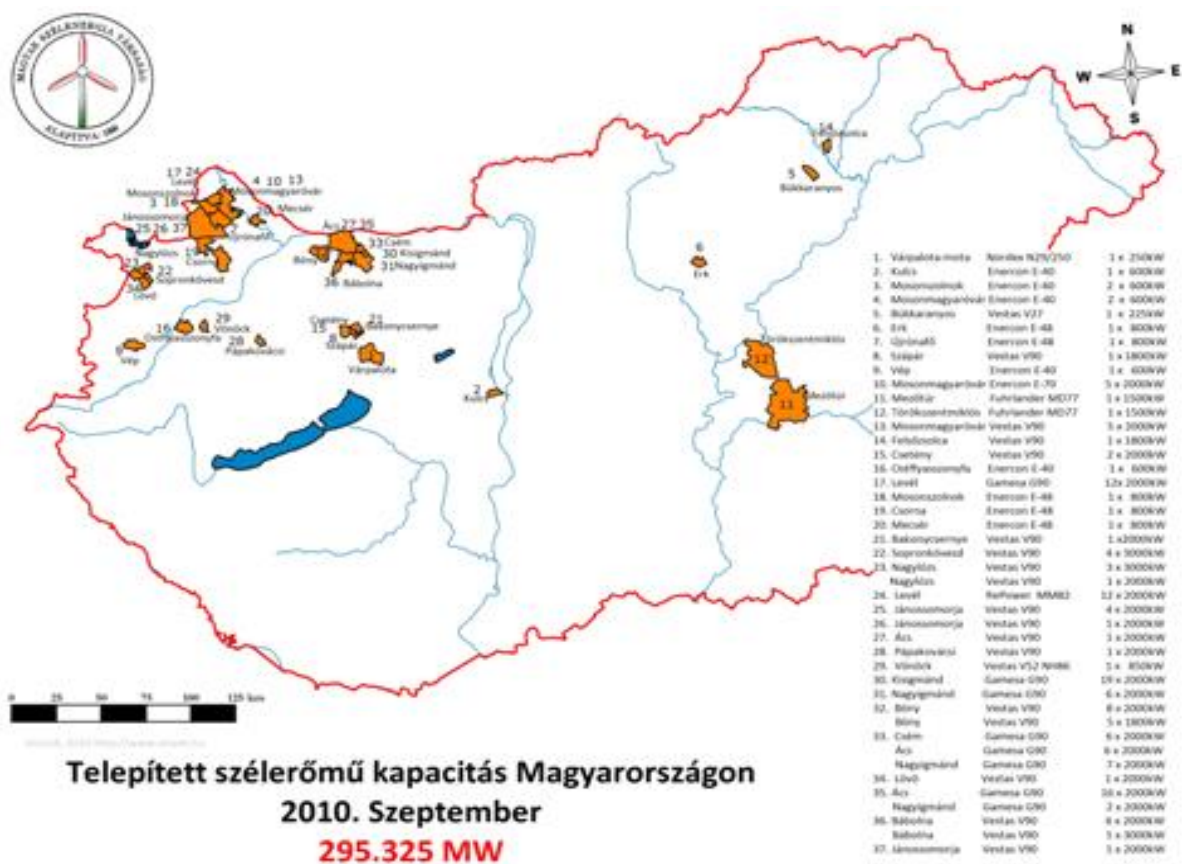


4.8. ábra: Szélenergia-termelési potenciál Mosonszolnokon (saját felvétel)

Az egyik ilyen a már említett ingadozó teljesítmény, mely a változó szélesebb miatt jön létre. Ez mind frekvencia, mind feszültség szempontjából plusz feladatot ad az elektromos

hálózatra csatlakozásnál. A másik probléma a természetvédelemmel kapcsolatos. A szélerőmű tájidegen, esztétikailag sem illik a környezetbe. Ennek következtében nagyon sok helyen nem is engedélyezik a létesítést, és ezek nemcsak a települések belterületei lehetnek, hanem például turisztikai megfontolások miatt a természetvédelmi területek, a nemzeti parkok is.

Mi a helyzet Magyarország szélenergia hasznosításával, mik a lehetőségek, illetve milyen a megvalósítás? Magyarország a kontinens belsejében helyezkedik el, ez a földrajzi helyzet azonnal meghatározza a lehetőségeket. Legjelentősebb szeles területünk az ország északnyugati része, Vas, Győr-Moson-Sopron, illetve Komárom megye egyes területei, ezért legnagyobb számban itt található meg hazánkban a szélerőművek (4.8. ábra).



4.9. ábra: Szélerőművek Magyarországon

Az ország más területein, egy-két kivételtől eltekintve, ennél sokkal rosszabb a helyzet, a 4. 9. ábra [S1] adataival együtt mutatja a 2010 szeptemberéig telepített összes szélerőművet. Az azóta eltelt több mint egy évtizedben csak 2011-ben, a Vas megyei Ikerváron történt új szélerőmű létesítés, melynek kapacitása 34 MW. Az ábrán az is jól látható, hogy ilyen típusú beruházást az országban csak egy-két helyen volt értelme végrehajtani. Elsősorban a már említett okok miatt a Kisalföldön, illetve az Alföldön, a Kiskunság – Tiszazug – Körös-szög

háromszögben, valamint egy-két egyedi területen, ahol a számítások szerint a rendelkezésre álló idő elérheti a 25%-os küszöbértéket, és a szél átlagsebessége is megfelelő az energiatermelésre. Az erőművek az optimális rendelkezésre álló idő megvalósulása esetén is csak körülbelül 12 m/s állandó szélesség esetén válnak nyereségessé, Magyarországon ez a feltétel éves szinten csak viszonylag kevés napon és kevés helyen teljesül [33].

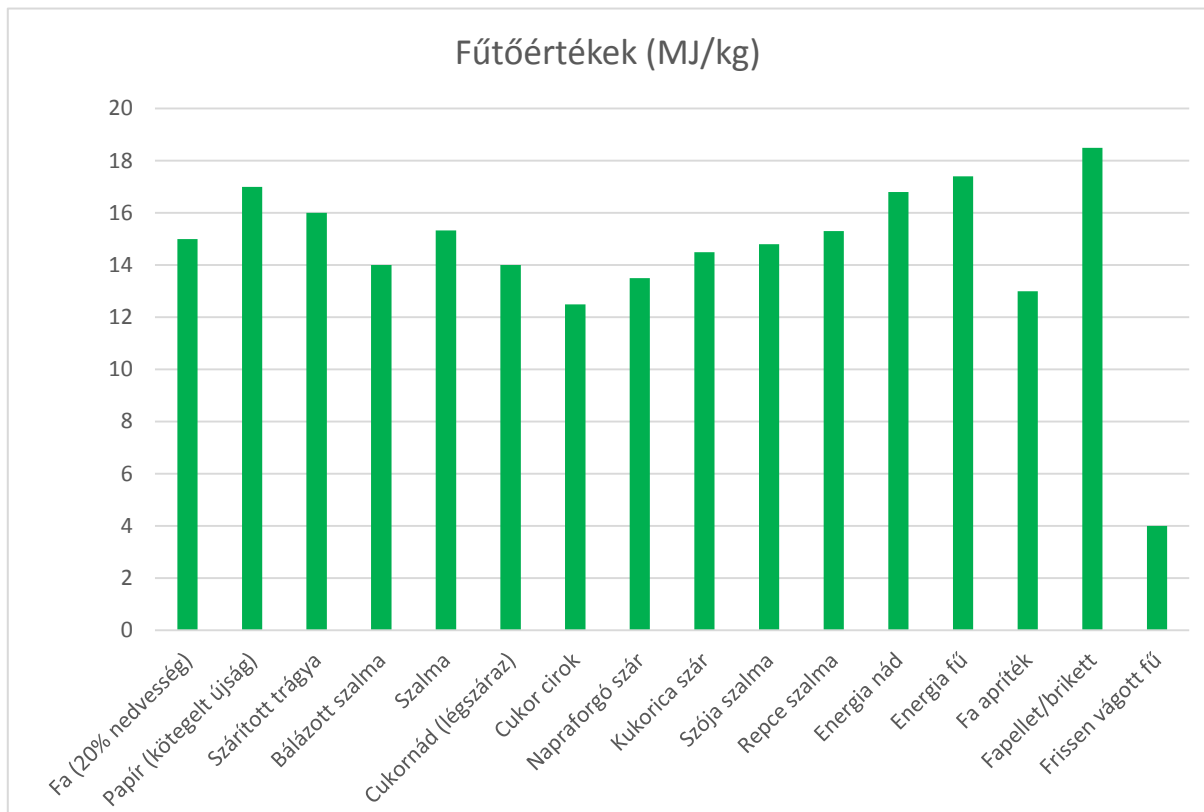
Az ábrán szereplő 295 MW kapacitás érték alig változott, 2011-ben még emelkedett, de azóta már nem, jelenleg (2020-ban) Magyarországon 34 szél erőmű, 171 szél turbinával, 329 MW kapacitással képes részt venni az energiatermelésben. Magyarország átlagos elektromos teljesítmény igénye 5,3 GW, az említett szél erőművi kapacitás ennek mindössze 6,2%-a. A szélenergia részaránya az elektromos energiatermelésben 2020-ban alig haladta meg az 1%-t, és ez az érték az elkövetkező évtizedben várhatóan nem is fog növekedni. Ennek oka az, hogy a jelenlegi (2016-ban hozott) törvényi szabályozás lehetetlenné teszi új szél erőművek létesítését. Egyrészt a szél erőművek telepítésénél olyan védő távolságértékeket ír elő (lakott terület esetén 12 km-en belül nem lehet szél erőművet telepíteni), melyeknek az ország területén gyakorlatilag sehol nem lehet eleget tenni, másrészt olyan műszaki feltételeket határoz meg, melyek mára teljesen elavultnak számítanak. A már meglévő szél erőművek átlagéletkora 15-20 év körül van, élettartamuk 25-30 év. Így néhány éven belül szükségessé válik annak az újragondolása, hogy a hazai meteorológiai viszonyok között, illetve ilyen törvényi szabályozás, és az ismert környezeti feltételek mellett, gazdaságos lesz-e egyáltalán a jövőben Magyarország számára a szélenergiával történő villamos energiatermelés. A 2019-ben kiadott Nemzeti Energia- és Klímaterv a megújuló energiaforrások közül a napenergiának és a biomasszáknak szán kiemelkedő szerepet, a szélenergia, mint energiatermelési lehetőség a terv szerint csaknem teljesen megszűnik [33].

4.2.3. Biotömeg

A biotömeg valamely élettérben jelenlevő szerves anyagok összessége, melyet a történelem során az emberiség mindig felhasznált az energiatermelésre. A szárazföldi területeken is, és az óceánokban, illetve a tengerekben is létrejön, de a jelenleg még csak a termőföldeken keletkező biotömegnek van az energiatermelésben szerepe. Az utóbbi néhány évben viszont ígéretes kutatások kezdődtek az óceánok hínár-, illetve alga mennyiségének bioüzemanyagként, illetve annak adalékként történő hasznosítására. Az ilyen módon előállított üzemanyag adalék alkalmazásával csökkenthető a járművek légkörbe kibocsátott

szén-dioxid mennyisége, mely több más üvegházgázzal együtt a Föld átlaghőmérsékletének növekedésért is felelős [34].

Mindkét biotömeg forrása a fotoszintézis, vagyis a napenergia közvetlen felhasználásából adódnak, de a 2.2. fejezetben említett 178 PW sugárzási teljesítményből csak 40-100 TW fordítódik erre ami, az egészhez viszonyítva, jelentéktelennek mondható. Megújuló energiaforrásnak tekintjük, mert a fotoszintézis folyamatosan újratermeli, de ennek ellenére megítélése több szempontból is ellentmondásos. Melyek is ezek a szempontok?



4.10. ábra: Bioanyagok fűtőértéke

A biotömeget is, mint az összes megújuló energiaforrást, az alacsony energiasűrűség jellemzi, a jelentős energia megtermeléshez nagy területek megművelésére van szükség. Végezzünk ennek igazolására egy rövid számolást, felhasználva a 4.10. ábra [9] adatait, melyek néhány légszárz (maximum 20 % nedvességtartalmú) növény energia tartalmát mutatják!

Az ábrán látható, hogy a feltüntetett növények fűtőértékei egy kivételtől eltekintve 12-18 MJ/kg értékűek, számoljunk az átlagos 15 MJ/kg értékkel, ez mintegy fele a szén fűtőértékének. A hektáronkénti termésátlagok, növénytől függően, 3-9 tonna nagyságúak, a szárítás után ez a 90 százalékára csökken. Így egy hektár területen a növények felhasználásával összesen $\approx 40-120$ GJ energia termelhető meg. Ez 45 %-os hatásfokú energia

átalakítást figyelembe véve 18-54 GJ (5-15 MWh) elektromos energiát eredményez éves szinten, ami folyamatos működést feltételezve $\approx 0,6-1,8$ kW teljesítményt takar. Természetesen nem felejtkezhetünk el a szállításhoz, illetve magához a termeléshez, a betakarításhoz és a feldolgozáshoz kapcsolódó energiaigényről sem, ami viszont csökkenti ezt az energia-nyereséget.

Komoly probléma ezen kívül az energiatermelés fenntarthatóságának kérdése. A folyamatos működéshez, mely a biotömeg segítségével energiát termelő erőművek esetében körülbelül 30 év, szükséges a teljes időtartamra vonatkozó egyenletes ellátás. Ez két okból is bizonytalan lehet. Az egyik ok az, hogy előfordulhatnak olyan körülmények, amelyek egyfajta rablógazdálkodáshoz (például erdők tarvágása) vezethetnek. Az erőművek maximális kapacitással való működéséhez ugyanis elengedhetetlen a nagy mennyiségű biotömeg beszerzése, ezt mindenféleképpen biztosítani kell, akár más területekről történő felvásárlással is. A másik ok az adott földterületek tulajdonjogának kérdése, ami az évek során változhat, így semmi garancia nincs arra, hogy a folyamatos ellátás fennmarad az említett 30 év során. Látható az előbbiekből az is, hogy nem érdemes nagy teljesítményű erőművet telepíteni, a pontosabb kalkulációk szerint az optimális energiatermelő egység maximum 30 MW teljesítményű. Az ehhez kapcsolódó területigény az előbbi számítások alapján 167-500 km² lenne, mely egy $\approx 7-13$ km sugarú kör területének felelne meg. (Összehasonlítás és a továbbgondolkodás szempontjából érdemes itt két konkrét magyarországi adatot is megjegyezni. Az egyik Budapest, a főváros területe, mely 525 km², a másik a magyarországi elektromos energiatermelésének körülbelül felét biztosító Paksi Atomerőmű teljesítménye, mely 2000 MW!)

A biotömeg az energetikai felhasználás mellett természetesen főleg élelmiszer előállításra, illetve ipari felhasználásra alkalmas. Ez viszont újabb kérdéseket vethet fel, amelyek már etikai oldalról közelítik meg ezt a problémát. Mi a lényegesebb az emberiség számára? Jusson mindenkinek megfelelő mennyiségű étel, vagy termeljünk vele energiát, akár annak az árán is, hogy esetleg éhínség alakulhat ki?

Beszélni kell még a sokak által félreismert szén-dioxid semlegesség, illetve a valóságban is fellépő környezeti ártalmak kérdéséről is! A biotömeg energetikai felhasználása csak akkor tekinthető szén-dioxid semlegesnek, ha kizárólag a keletkezési, illetve a felhasználási folyamatokat tekintjük, összességében ez a teljes folyamatra nézve, amely tartalmazza a szállítást, a betakarítást és a feldolgozást is, már egyáltalán nem érvényes! Az említett környezeti ártalmak a környezet terheléséből adódnak, mivel az égetéskor szilárd, illetve légnemű halmazállapotú szennyező anyagok is bekerülnek a légkörbe.

Vizsgáljuk meg, hogy milyen célokra lehet a biotömeget energetikai szempontból felhasználni! A hasznosítás történhet a biotömeg direkt eltüzelésével, amely így közvetlenül hőenergiát, illetve közvetve elektromos energiát eredményez. A másik lehetőség gépek hajtóanyagának megtermelése bioetanol, biodízel, illetve biogáz formájában. Ez utóbbi másra is, például hőenergia, illetve elektromos energia termelésére is használható. Mindhárom termék előállítása energiaigényes folyamat, külső költségekkel jár, sajnos azt is meg kell jegyezni, hogy a megújuló energiaforrások közül a biotömeggel előállított elektromos energia a legdrágább. További problémaként merül fel, hogy a folyékony hajtóanyagok (pl. biodízel) paraméterei lényegesen rosszabbak, mint a tradicionálisan előállított üzemanyagoké, így használatuk esetén a motor átalakítása is szükségessé válik, ami szintén megkérdőjelezi az alkalmazás gazdaságosságát.

Végezetül összegezzük a biotömegeből származó energiatermelés előnyeit, illetve hátrányait! A legnagyobb előny a mezőgazdaság átalakításában mutatkozik, több olyan tényező is előkerül, ami ezt alátámasztja. Melyek is ezek? Felhasználja a mezőgazdasági hulladékot, fiatalítja az erdőket, nem maradnak parlagon a földek, munkahely teremtő hatása van, az előállított folyékony hajtóanyag jól hasznosítható a mezőgazdasági gépek esetében.

Az előnyök mellett persze említést kell tenni a hátrányokról is, amelyek viszont már nemcsak a mezőgazdaságban jelentkeznek. Ezek a teljesség igénye nélkül következők lehetnek:

Az energiatermelő folyamatok egyrészt környezet-szennyezők, másrészt maguk is energiaigényesek, így a jövedelmezőségük megkérdőjelezhető. Az energianövények termesztése talajminőség romlást okoz, csökkenti a biodiverzitást, monokultúrák kialakulásához vezet, invazív fajok telepedhetnek meg, melyek segítségével könnyebben kialakulnak a genetikai szennyezések, behurcolásra kerülnek a betegségek, illetve megjelennek a kártevők.

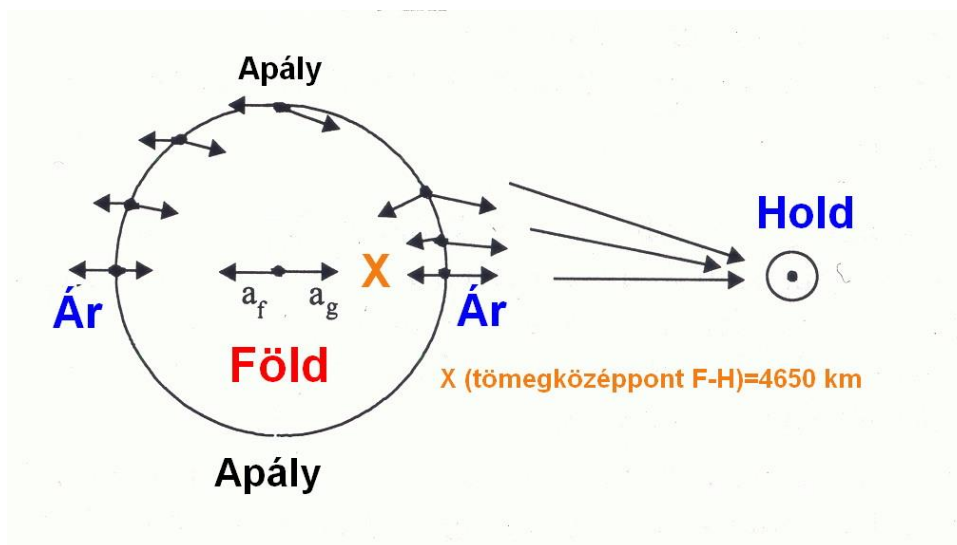
Magyarország 2020-ra az összes energiafogyasztás megújulókkal történő megtermelésének részarányát 13%-ra vállalta. Ezt sikeresen teljesítette, ennek jelentős része (körülbelül 9 %-a) biotömeg segítségével működő erőművek által került előállításra. Jelenleg több ilyen erőmű is üzemel hazánkban, ezek hőenergia, illetve elektromos energia előállítására vannak beállítva, kapacitásuk 2-50 MW között változik. A legnagyobb közülük a pécsi erőmű, melyben két tisztán biotömeg tüzelésű kazán termel hő-, illetve elektromos energiát, egyikben faapríték, a másikban bálázott lágyszárú mezőgazdasági melléktermékek segítségével. A megtermelt hőmennyiség 31500 lakás és 460 egyéb fogyasztó (kórház, iskola, bevásárlóközpont) távfűtés igényét biztosítja, a létrejött elektromos energia pedig az országos villamos energia hálózatban kerül felhasználásra [35].

4.2.4. Hullámenergia

Az óceánok, tengerek felszínén létrejött hullámok a szél hatására keletkeznek, tehát közvetve ezek is a Nap sugárzásának következményei. A Föld egyes területein magasságuk akár a 10 métert is meghaladhatja, a viharos Északi-tengeren, a Skóciához tartozó Külső-Hebridáknál a hullámok teljesítménye elérheti a 70 kW/m értéket [9]. Az emberiséget már régóta foglalkoztatja az a gondolat, hogy milyen módon lehetne ezt hasznosítani. A cél az lenne, hogy a hullámok segítségével közvetlenül, vagy közvetve forgómozgást hozzanak létre turbinákban, mellyel így egy generátor alkalmazásával elektromos energia termelhető. Erre alapozva jelenleg több különböző technológiával működő példa is van a világban. Portugáliában egy víz felszínén úszó eszköz segítségével, Ausztráliában pedig a tengerfenékhez rögzített bóják alkalmazásával használják fel a hullámozgás energiáját elektromos energia termelésére. Az általuk megtermelt elektromos energia mennyisége egyelőre még jelentéktelen az összes energiához képest, de ez a jövőben várhatóan számottevően növekedni fog, mivel más ötletek is felmerülnek a hullámozgásban rejlő hatalmas energiamennyiség kinyerésére [36].

4.3. Árapály energia

Az árapály jelenség része a Föld energiaháztartásának, bár a benne szereplő teljesítmény kevesebb, mint 2 század részét teszi ki a napsugárzás teljesítmény értékének (2.3. ábra). Maga a jelenség a Föld-Hold gravitációs kölcsönhatásából származik, melyhez kisebb mértékben a Nap gravitációs hatása is hozzájárul erősítés, illetve gyengítés formájában.



4.11 ábra: Árapály jelenség a Földön

Lényegét a 4. 11. ábra [9] mutatja be, melyen látható, hogy a Földet a Holddal összekötő egyenes mentén a Föld mindkét oldalán valamivel több, mint 12 órás periódussal vízszintemelkedés jön létre, melynek okai egyrészt a Föld-Hold közötti gravitációs kölcsönhatásnak, másrészt a Föld forgásának tudhatók be. Ennek mértéke átlagosan 1 méter körül van, de az adott földrajzi környezetben mozgó víz rezonancia jelenséget produkálhat az árapályaival, így a vízszintemelkedés nagysága sokszorosára növekedhet. Találhatóak olyan helyek a Földön, például Kanada északkeleti részén a Fundy-öbölben, ahol ez az érték több mint 21 méter, de Európában is tapasztalható hasonló, a bretagne-i partoknál 13,5 m az árapály jelenség.

Hol és hogyan hasznosítható mindez energiatermelésre? A lehetőség fizikai alapja abból adódik, hogy a megemelkedő víznek megváltozik a helyzeti energiája, így egy gáttal elzárt öböl segítségével biztosítható, hogy a víz a különböző szintkülönbségű helyek között áramolhasson, dagálykor az öböl feltöltődik, apálykor kiürül. A víz mindkét irányú áramlását generátorral összekapcsolt turbinákon átvezetve elektromos energia termelhető, egy árapály erőmű hozható létre. Természetesen nagyon fontos szempont a rendkívül költséges építésnél a gátak megfelelő elhelyezése, mert a rosszul elhelyezett létesítmény több méterrel is csökkentheti a rezonancia miatt kialakuló árapály különbséget. A gátépítésnél a magas költségek mellett másik problémaként fellép a környezetbe való beavatkozás is, egyrészt az erőművek megzavarják az ökoszisztémát, másrészt eliszaposodik a tengeröböl.

Földünk jelenleg legnagyobb árapály erőműve Dél-Koreában található, ez a 2011-ben átadott Sihwa-tavi erőmű (Sihwa Tidal Power Plant), melyben 10 turbina működik, névleges kapacitása 254 MW. Európában a legnagyobb, és egyben a világon a legrégebbi (1966 óta üzemelő) árapály erőmű Franciaországban, a bretagne-i partoknál van, ez a La Rance erőmű, névleges kapacitása 240 MW, és 24 turbina valamint generátorok segítségével állítja elő az elektromos energiát. Néhány éven belül további két nagyteljesítményű, de jelenleg még építés alatt álló árapály erőmű fogja segíteni az elektromos energiatermelést. Az egyik Wales-ben a Swansea-öbölben létesül, mely 240 MW teljesítménnyel már megközelíti a Sihwa-tavi erőmű teljesítményét, míg a másik, a skóciai MeyGen árapály erőmű a víz alatti turbinák alkalmazásának köszönhetően, 398 MW-tal jelentősen meg is haladja azt [37].

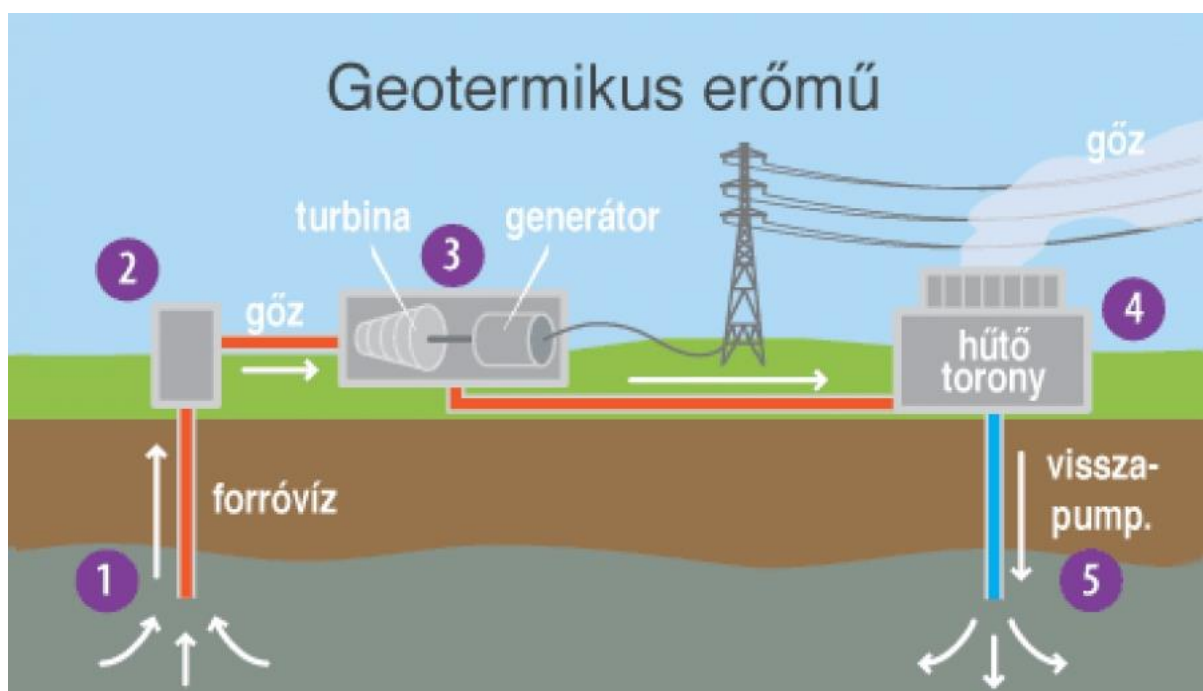
4.4. Geotermikus energia

A geotermikus energia, más néven a földhő, az árapály energiához hasonlóan részét képezi a Föld energiaháztartásának (2.3. ábra), de teljesítményértéke a számítások szerint körülbelül

egy nagyságrenddel nagyobb annál. Értékét teljes pontossággal még nem ismerjük, mai ismereteink szerint, az energia a hosszú felezési idejű radioaktív izotópok, elsősorban a ^{40}K , a ^{232}Th , valamint a ^{238}U izotópok bomlásából származik. Ezek mind megtalálhatók a földkéregben, és valószínűsíthető, hogy a hőáram jelentős részét bomlásaikkal ők biztosítják.

A földhő területegységekre vonatkozó eloszlása a Földön nem egyenletes, a 2.3. ábrán szereplő 63 mW/m^2 teljesítményáram konstans is csak átlagértéknek tekinthető. A tektonikai lemezek találkozásánál, a törésvonalak mentén található övezetek, illetve a vulkánok környéke számít geotermikus szempontból melegebb területeknek. Eltérések vannak viszont adott kontinensen belül is, Európában például a Pannon-medencében körülbelül másfélszer nagyobb az egységnyi felületre jutó hőteljesítmény, mint az előbb említett átlag, értéke $80\text{--}110 \text{ mW/m}^2$ között mozog. Általánosságban elmondható, hogy minél ősbibb a kőzet, annál kisebb ez a hőfluxus.

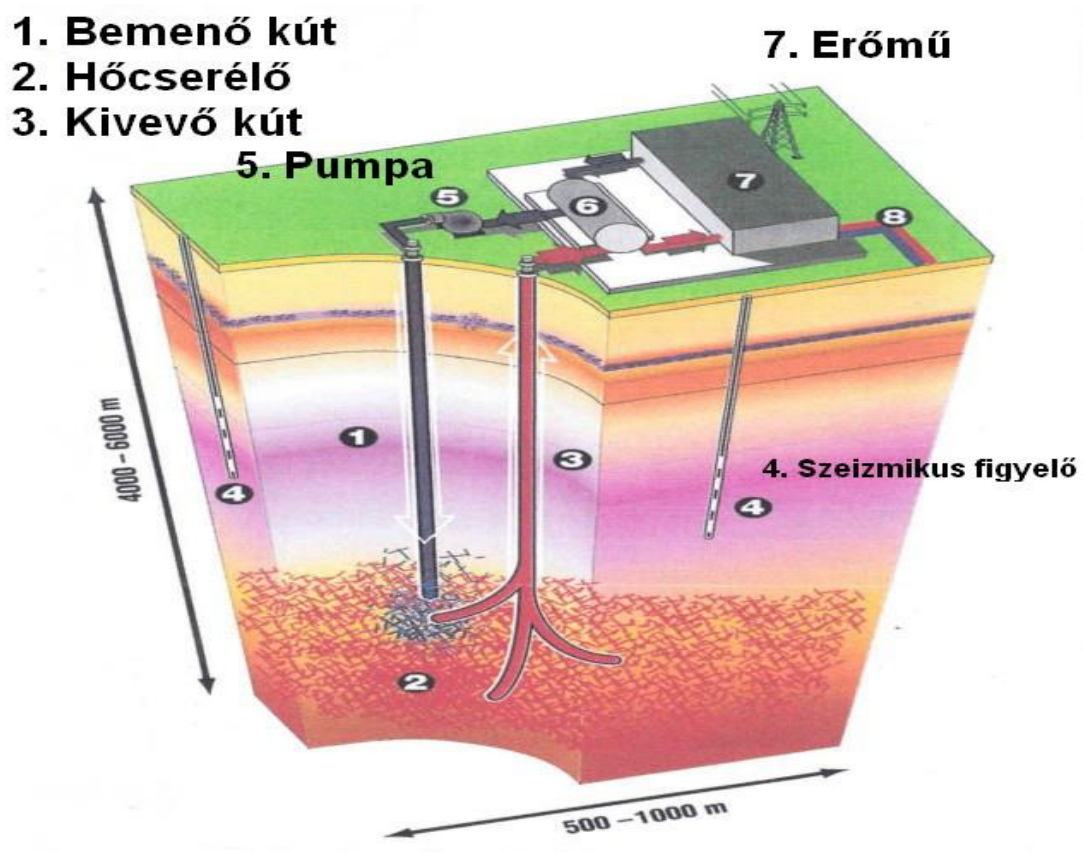
A geotermikus energia hasznosítása kétféleképpen történik, vagy elektromos energia előállítására, vagy a hőenergia felhasználása formájában. Az elektromos energia előállítására is két lehetőség adódik. Az egyik a geotermikus tárolókban levő, a kőzetek hézagterfogatait kitöltő, elegendően meleg ($>150^\circ\text{C}$), nagy nyomású termásvíz alkalmazása hőcserélőkkel, gőzfejlesztéssel (4.12. ábra) [S1], illetve környezetvédelmi okokból és a rétegyomás fenntartása miatt, a lehűlt víz visszasajtolásával.



4.12. ábra: Geotermikus erőmű működése

Az ábrán látható alkalmazásra a Földön számos példa akad, például a „geotermikus nagyhatalmaknak” számító Izlandon, illetve Új-Zélandon, de 2018 óta már Magyarországon a Pest megyei Turán [38] is működik egy ilyen jellegű geotermikus kísérőmű. Az első ilyen jellegű beruházást azóta egy újabb követte, 2020 novembere óta a mátészalkai távfűtési rendszer is geotermikus energiát hasznosít, és ezzel közel 1400 lakás és több közintézmény fűtését és használati meleg víz ellátását biztosítja [39].

A 2022-es év második felében kerül átadásra Európa második legnagyobb geotermikus lakossági távhőszolgáltató rendszere Szegeden. Ennek segítségével a városban a távfűtéshez használt gáz és a kibocsátott szén-dioxid mennyisége az elkövetkező 4 év alatt várhatóan a felére fog csökkenni [40].



4.13. ábra: EGS technológiával működő geotermikus erőmű

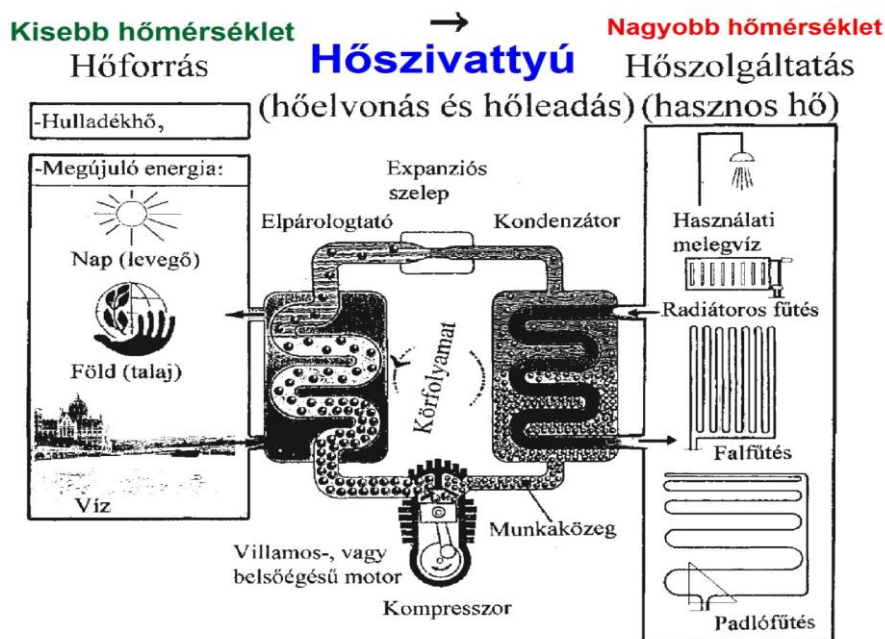
6 – Hőcserélő, 8 - Vízelvezetés

A másik lehetőség az elektromos energia előállítására az EGS (Enhanced Geothermal System) technológia. Ezt az alkalmazást az 1970-es évek végén kezdték el az USA-ban akkor még

HDR (Hot Dry Rock) eljárás néven, és azt használja ki, hogy a nagy mélységben levő, vizet nem tartalmazó, alacsony porozitású kőzetömegek energiataralma sokkal jelentősebb, mint a geotermikus tárolókban levő vízé. Így, ha ezekbe a rétegekbe mesterségesen lejtatják, cirkuláltatják, majd újra felhozzák a folyadékot, akkor jelentős energianyereség adódik, mert a folyadékkal felhozott hőmennyiség sokszorosa annak a bevitt energiának, ami a pumpáláshoz szükséges (4.13. ábra) [9].

Jelenleg 7 ilyen típusú projekt fut Európában, kettő-kettő Franciaországban, illetve Németországban, valamint egy-egy Svédországban, Nagy-Britanniában és Svájcban. Mindegyik esetben a legnagyobb gondot az okozza, hogy az eljárások alkalmazásakor a kőzet nagyon hamar lehűl, ugyanakkor a hő-utánpótlás viszont időben rendkívül hosszú folyamat, mivel a mélységi kőzetek (gránit) hővezetése alacsony. Emellett további problémaként merül fel az is, hogy a kemény kőzetek miatt a fúrás nehéz és rendkívül költséges, így a megvalósításhoz új technológiákra is szükség van.

A földhő hasznosításának másik módja a hőenergia közvetlen felhasználása, melyre leginkább a 100-120 °C-nál nem melegebb vizek alkalmasak. Erre több példa is van főleg a mezőgazdaságban, például az üvegházak fűtése vagy a terményszárítás esetében, de ma már sok helyen a családi házak, illetve a közintézmények térfűtése is geotermikus energia segítségével van biztosítva. Meg kell említeni azt is, hogy legegyszerűbb megoldásként a gyógyfürdőkben maga a meleg víz kerül közvetlenül felhasználásra.

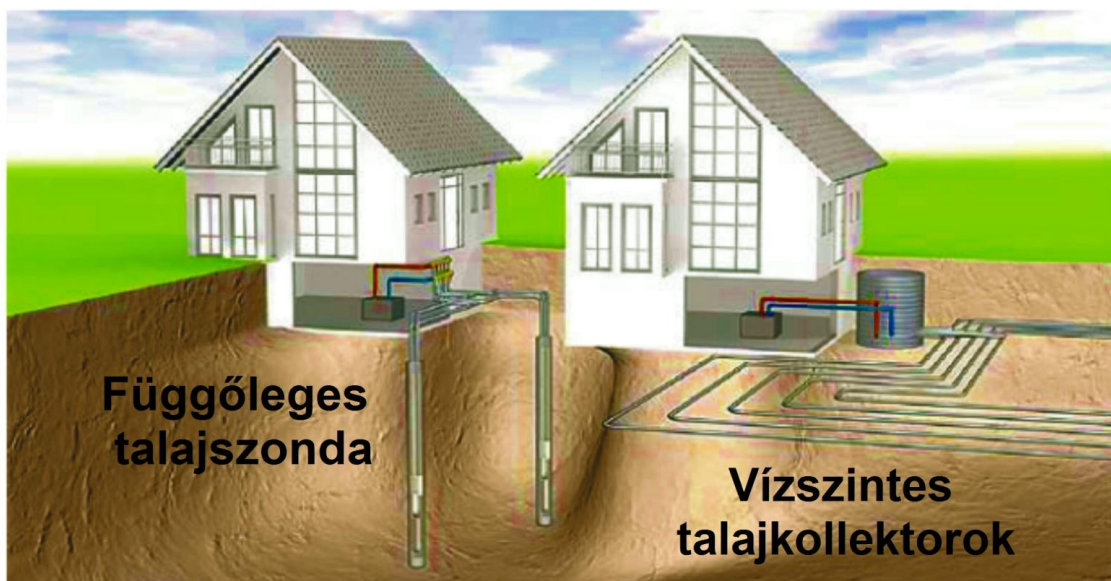


4.14. ábra: Hőszivattyú működése

Érdeemes külön is beszélni a geotermikus energia „kisléptékű” felhasználásáról is, a „geotermikus” hőszivattyú alkalmazásáról. Maga a hőszivattyú berendezés gyakorlatilag nem más, mint egy fordított irányban működő hűtő, ami egy alacsonyabb hőmérsékletű tartályból munkavégzés segítségével juttat hőt egy magasabb hőmérsékletű tartályba. Működése a 4.14. ábrán [9] látható, fűtésre és használati meleg víz előállítására is alkalmas, lakóépületek, illetve kisebb ipari létesítmények esetén használatos. Hatékonyságának mérőszáma a COP (Coefficient of Performance), magyarul jósági tényező, ami a hasznos hőnek és bevitt munkának a hányadosa. A működés a mai energiaárak mellett akkor lehet gazdaságos, ha a COP értéke a 3-5 tartományba esik.

A gyakorlatban három típusa terjedt el, a levegő-víz, a víz-víz, és a földszondás hőszivattyú, de negyedikként meg kell említeni a levegő-levegő hőszivattyút is, amit a klímarendezések esetén használnak. A felsoroltak közül a földszondás hőszivattyú hasznosítja a geotermikus energiát, ezt a változatot elsősorban a lakóházak, illetve kisebb közösségi épületek fűtésének biztosítására alkalmazzák.

Megvalósításának két fajtáját a 4. 15. ábra [S1] jeleníti meg. Az egyik lehetőség a talajszondás rendszer, melynél a felszínre merőlegesen fúrnak le 50-200 méterig, és a furatba egy 15 cm-es U alakú csövet helyeznek el hőcserélővel kiegészítve. A másik opció a talajkollektoros rendszer, ahol a csöveket vízszintesen helyezik el 1-2 méterrel a felszín alá. Itt a csövek által lefedett terület 2-3-szor akkora, mint a fűtendő terület, tehát területigénye az első változathoz képest jelentősen nagyobb [9].



4.15. ábra: Hőszivattyú gyakorlati alkalmazásai

Melyek azok a környezeti hatások, melyek felmerülnek a geotermikus rendszerek alkalmazásakor? Ezek között nem mindegyik tekinthető negatívnak, vannak közöttük olyanok is, melyek kifejezetten előnyösnek és gazdaságilag is hasznosnak mondhatók.

Ezeknél a rendszereknél a káros gázkibocsátás a többi erőműtípushoz képest elhanyagolható mértékben van jelen, csak a hidrotermális erőműveknek van minimális mértékű szén-dioxid, illetve kén-dioxid kibocsátása. Ezzel szemben a vízszennyezés jelentős lehet, a magasabb hőmérsékletű folyadék több oldott anyagot tartalmaz és a felszínre kerülő víz bór és arzén tartalma veszélyeztetheti az élővilágot, sőt egy esetlegesen bekövetkező csőtörés az ivóvízbázist is. A víz felszínre hozatalával viszont oldott állapotban szilárd anyag is felkerül, ami nyersanyagként hasznosítható, ilyenek lehetnek különféle ásványok, de emellett nehézfémek is, például cink vagy ólom.

Egy működő geotermikus rendszer 75-80 dB zajterhelést jelent a környezetének, ez körülbelül egy forgalmas utca zajának felel meg, fűráskor ez az érték magasabb, akkor elérheti a 80-100 dB-t is.

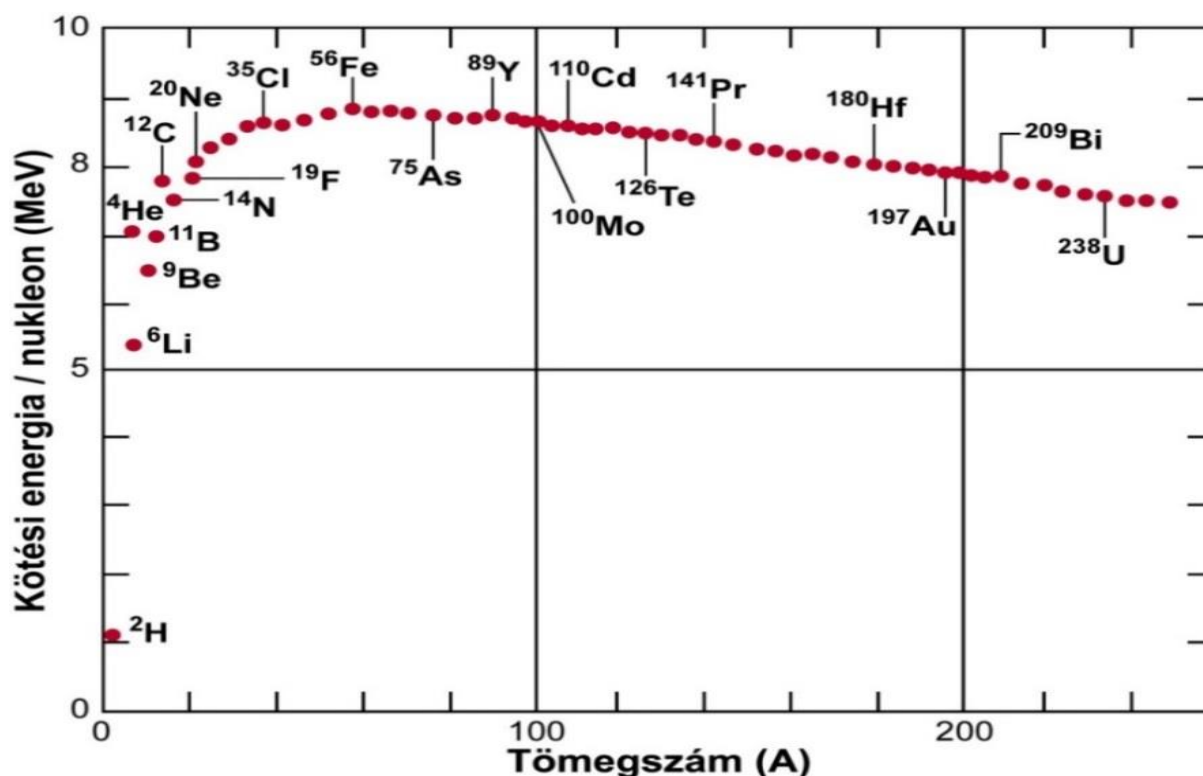
A geotermikus rendszerek területigénye csekély, alig több mint 1000 m², ez akár egy fosszilis, akár egy fotovoltaiikus erőmű területigényéhez képest jelentéktelennek számít. A beruházás létesítésének ugyan komoly költségei vannak (fűrás megoldása, jelentős vízigény) de a működő rendszer üzemeltetése már olcsónak mondható, igaz a hidrotermális erőművek esetében a víz visszasajtolás, ami hatósági előírás, szintén igényel még anyagi forrást.

A fűrásnak lehetnek járulékos negatív hatásai is, egyrészt megzavarhatja a természetes hidrotermális rendszereket, másrészt befolyásolhatja az ökoszisztémát, harmadrészt veszélyessége miatt, súlyos balesetek forrása is lehet. Ez utóbbira már Magyarországon is volt konkrét példa, 1985-ben a fábiánsebestyényi kútkitörés sajnos halálos áldozatot is követelt. A baleset emellett jelentős gazdasági károkat is okozott, a 3400 méter mélyről feltörő nagy nyomású és rendkívül magas (180°C) hőmérsékletű víz elzárását másfél hónapos erőfeszítések után csak úgy sikerült megoldani, hogy a kút véglegesen lezárásra került.

Magyarországon jelenleg az összes energiatermelésnek mintegy 1%-a származik a geotermikus energia felhasználásából, az utóbbi években kisebb mértékű növekedés tapasztalható, így köszönhetően a fejlesztéseknek, ez az érték várhatóan az elkövetkező évtizedekben 2-3-szorosára fog emelkedni.

5. Nukleáris energia

A nukleáris szó jelentése az atommaghoz kapcsolódik, a nukleáris energia olyan energiát feltételez, amely az atommag átalakításából származik. Ennek két fajtája van, a maghasadás, illetve a magfúzió, a hasadás egy nagyobb atommag több kisebb magra bomlását, a fúzió több kisebb atommag egy nagyobbá egyesülését jelenti. Mindkét jelenség fizikai hátterének megértését segíti az 5. 1. ábra [9], mely az atommagok fajlagos (egy nukleonra jutó) kötési energiáját ábrázolja a tömegszám függvényében.



5.1. ábra: Fajlagos kötési energia

Az ábra alapján látható, hogy a legmagasabb fajlagos kötési energiával a vas rendelkezik, a grafikonon a könnyű atommagoktól a vasig emelkedést, onnan a nehezebb atommagok felé enyhe csökkenést tapasztalunk. Energia-felszabadítás két esetben jöhet létre, az egyik, ha a könnyű atommagok egyesülnek, a másik, ha a nehéz atommagok szétválnak. Az ábráról az is leolvasható, hogy mindkét esetben a keletkező új atommagok a fajlagos energia szempontjából magasabb energiájú állapotba kerülnek, mint az eredeti atommagok. Ez adja a fizikai magyarázatát a két folyamatból származó energianyereségnek, melyeket az alábbiakban fogok ismertetni.

5.1. Maghasadás

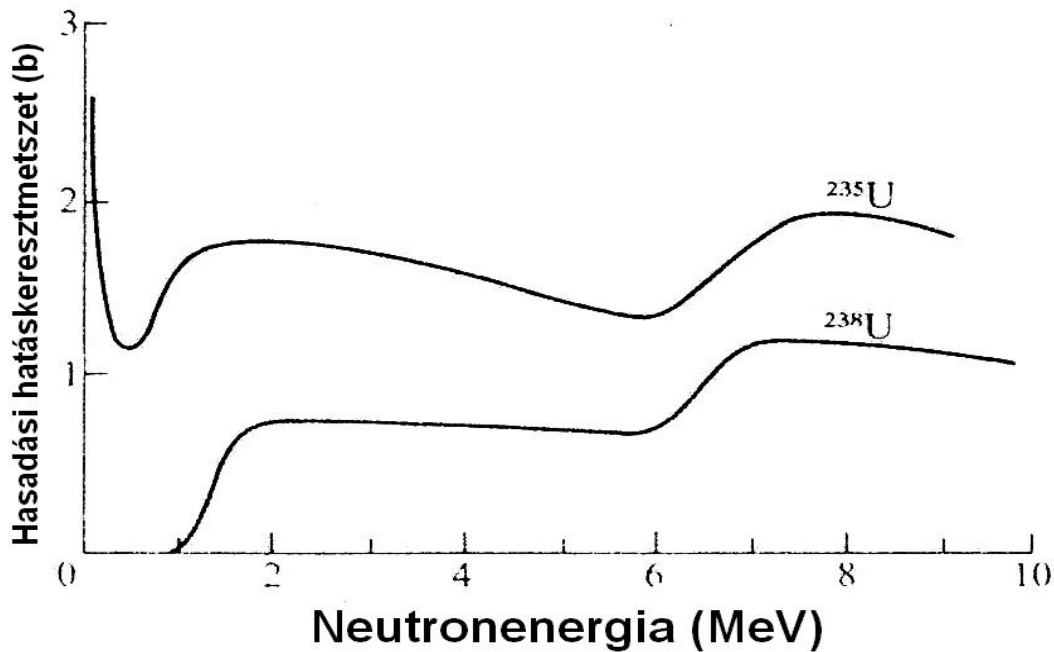
A maghasadás jelenségét Otto Hahn és Friedrich Strassman német fizikusok ismerték fel 1939-ben. A felfedezést követő években ennek az ismeretnek a felhasználása sajnos csak az atomfegyverek készítésére korlátozódott, a békés célú felhasználás, ami az energiatermelésben nyilvánult meg, csak a II. világháború befejezése után kezdődött el. A nukleáris energia kezdeti rendkívül pozitív megítélése, egyrészt az 1986-os csernobili, másrészt a 2011-es fukusimai atomerőművekben történt nukleáris balesetek miatt mára jelentősen visszaesett. Jelenleg a Föld teljes energiatermelésének mintegy 5%-át biztosítják a maghasadásból származó energiával. Tény, hogy világszerte megmaradtak, sőt talán még kissé növekedtek is az atomenergiával kapcsolatos aggályok és ellenérzések, de ez az érték véleményem szerint nem is fog a jövőben csökkenni, ha csak az atomenergia tudja majd megoldani az elkövetkező években a már most látszó energiaellátási problémákat.

5.1.1. A jelenség ismertetése

A nehéz atommagok hasadásakor két kisebb tömegszámú új atommag jön létre, melyeknek fajlagos kötési energiája magasabb az eredeti atommag fajlagos kötési energiájánál. Ez kétféleképpen is megvalósulhat, vagy spontán, vagy indukált hasadás formájában. A spontán hasadás bekövetkezésének valószínűsége rendkívül csekély, az energiatermelés megvalósítása indukált hasadással történik.

A hasadás akkor következik be, ha a nehéz atommagot részecskével bombázzuk. Ez lehet proton, neutron, de akár α -részecske vagy γ -kvantum is, általánosan igaz, hogy a bemenő energia sokkal kisebb, mint a hasadáskor felszabaduló energia mennyiség. A hasadás előtti atommag potenciálgáttal rendelkezik, melyet a magerők és a Coulomb-kölcsönhatás alakít ki, de a bemenő részecske energiájával (az úgynevezett aktivációs energiával) átléphető ez a potenciálgát. Ilyenkor a mag a közölt energia hatására rezgésbe jön, alakja megváltozik, hasadvány magokra esik szét, és ezeket a Coulomb-taszítás egymástól eltávolítja.

A hasadás valószínűségét a hasadási keresztmetszet fejezi ki. Az 5.2. ábrán [9] látható, hogy ugyanannak az elemnek két izotópja (^{235}U és ^{238}U) egészen más valószínűséggel hasad. A kisebb tömegszámú urán atommag, különösen az alacsonyabb energiájú neutronok esetében, sokkal jobban hasítódik, mint a nagyobb tömegszámú, sőt ez utóbbinál található olyan „küszöbenergia” érték is (1,2 MeV), mely alatt csak nagyon kis valószínűséggel következik be a hasadás.

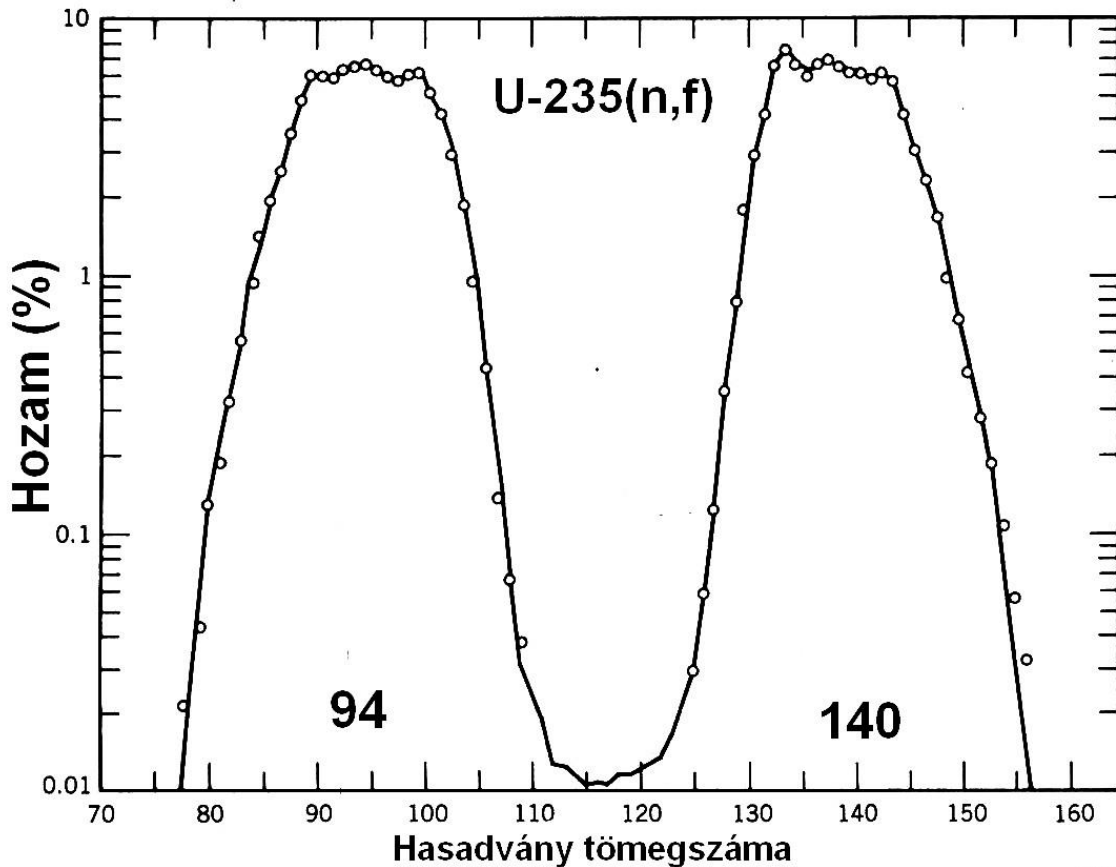


5.2. ábra: Urán atommagok hasadási valószínűségének összehasonlítása

Általánosan érvényes, hogy a páratlan tömegszámú izotópok jobban hasadnak, mint a páros tömegszámúak. Ennek oka abban áll, hogy az atommagon belül a nukleonok párokba rendeződnek, ezáltal erősebben vannak kötve, így nagyobb lesz a mag kötési energiája. Ha tehát egy páratlan neutronszámú atommagba csapódik egy újabb neutron, akkor ezután az atommag már a párenergiával nagyobb gerjesztettséggel fog rendelkezni, és így könnyebben tud hasadni.

Az ^{235}U hasadásakor a legnagyobb számban olyan hasadványok jönnek létre, melyeknek tömegszáma 90, illetve 140 körüli, a szimmetrikus hasadás valószínűsége kicsi (5.3. ábra) [9]. Hasadásakor mindig van neutron kilépés is, ez általában 2-4, átlagosan 2,5 neutront jelent. Ennek oka az, hogy a keletkezett új magokban túl sok neutron maradna az eredeti atommaghoz képest, és az új mag a neutronok kiléptetésével csökkenti az energiáját.

A neutronok nem mind egyszerre hagyják el az atommagot, mintegy 0,6%-uk képviseli a „természet csodájának” is nevezhető úgynevezett késő neutronokat. Ezek a hasadást követően több másodperces késéssel lépnek ki abban az időtartamban, amikor a hasadásakor létrejött új atommag hosszú felezési idejű β bomlással tovább bomlik egy olyan magra, amiben az egyik neutron nem kötött, így kibocsát egy neutront. Jelentős szerepük van az atomreaktorok biztonságos működésénél, a szabályozott láncreakciónál ezekkel a késő neutronokkal kiváltott hasadási folyamatokkal lehet önfenntartóvá tenni az energiatermelést.



5.3. ábra: ^{235}U atommagok hasadási hozama

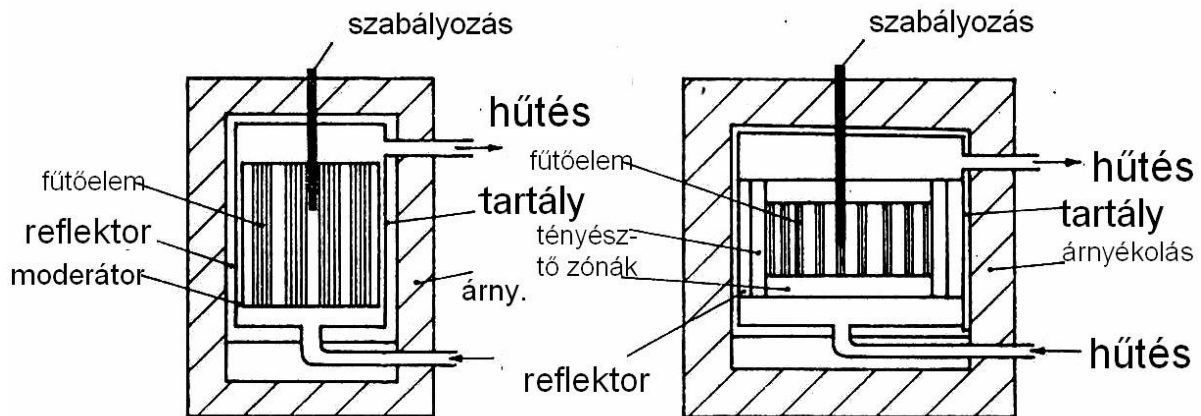
5.1.2. Lánreakció, energiatermelés reaktorokkal

A természetben az uránnak gyakorlatilag csak két izotópjá fordul elő, de előfordulási arányukban jelentős különbség van, a 238-as tömegszámú 99,3%-ban, míg a 235-ös csak 0,7%-ban található meg. (Elhanyagolható mértékben, 0,005%-ban, előfordulhat még ^{234}U izotóp is, ez a ^{238}U izotóp leányeleme.) Ennek oka a felezési idejükben meglévő közel egy nagyságrendnyi különbség, a ^{235}U felezési ideje $7,1 \cdot 10^8$ év, míg a ^{238}U felezési ideje $4,5 \cdot 10^9$ év. A Föld becsült életkora nagyjából a magasabb tömegszámú urán felezési idejével egyezik meg ($4,6 \cdot 10^9$ év), így mivel az uránizotópok feltételezhetően mindannyian együtt keletkeztek a Világegyetem létrejöttkor, mára a kisebb tömegszámú uránizotóp jelentős része elbomlott.

A hasadáskor nagy energiájú (≈ 2 MeV), gyors neutronok keletkeznek, ezek kétféle folyamatot indíthatnak el, újabb hasadást, vagy sugárzásos neutron befogást. A számítások a két izotóp részaránya, illetve tulajdonságai alapján viszont azt igazolják, hogy a hasadáskor létrejövő, átlagosan 2,5 gyors neutron nem elegendő ahhoz, hogy a lánreakció spontán

megvalósuljon. A hasadás valószínűsége túl alacsony, a ^{238}U egyszerűen elnyeli a neutronokat. A gyors neutron nem hasít, le kell lassítani. Ezenfelül a láncreakció beindulásához még egy további feltételnek is teljesülnie kell, ez pedig a megfelelő mennyiségű hasadóanyag, a kritikus tömeg jelenléte, ennek hiányában az energiatermelés folyamata leáll. Melyek tehát azok a megoldások, amelyekkel az uránt energiatermelésre lehet felhasználni?

Két lehetőség adódik erre, az egyik a termalizálás, a másik a dúsítás. A termalizálás a gyors neutronok lelassítását jelenti, mely által a neutronok energiája több nagyságrenddel kisebb lesz (25 meV), és amint az 5.2. ábra is mutatja, ezek a ^{238}U izotópot nem, csak a ^{235}U izotópot hasítják. A hasadás valószínűsége ezekre a lassú neutronokra viszont nagyságrendekkel nagyobb. A dúsítás a ^{235}U izotóp adott urántömbben való megnövelését jelenti, ilyenkor a hasadás valószínűsége, szintén az 5.2. ábra alapján, jelentősen megnövekszik.



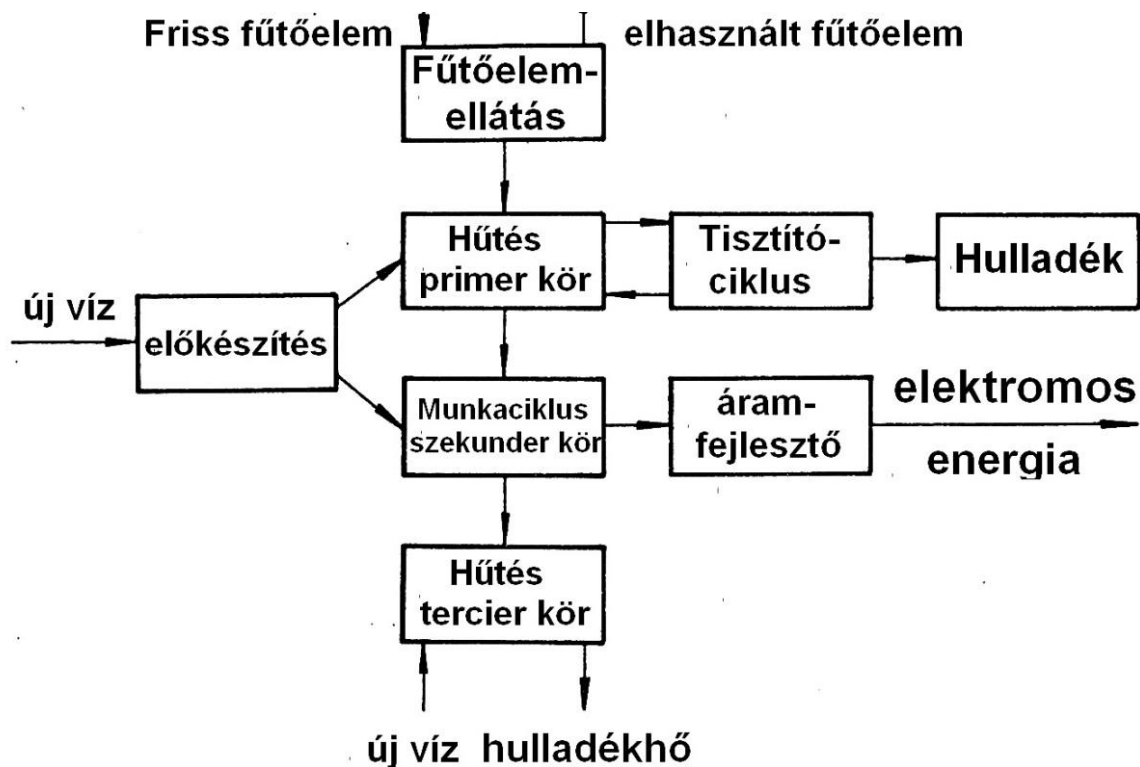
5.4. ábra: Termikus, illetve tenyésztő reaktorok

A fenti lehetőségek megvalósítása két különböző reaktortípussal történik (5.4. ábra) [9]. Látható az ábrán, hogy mindkét típus felépítése hasonló, amiben különböznek, az egyrészt a moderátor, ami a neutronlassító szerepét tölti be, másrészt a tenyésztőzónák.

A bal oldali ábra jeleníti meg az úgynevezett termikus reaktort, melyben a moderált termikus neutronok biztosítják a hasadást, és a reaktor fűtőanyagaként használt urán csak kis mértékben (3-5%) dúsított. A világon jelenleg üzemelő reaktorok döntő többsége ilyen típusú. Ennek az oka, hogy az ennél használt technológia sokkal biztonságosabb, itt a keletkező neutronok másodpercenként ugyanannyi hasadást okoznak, így az energiatermelés folyamatos és a láncreakció is szabályozott.

A másik típus a gyors, vagy másképpen szaporító (tenyésztő) reaktor, melynek fűtőanyaga 100%-ban ^{235}U izotóp, itt nem történik neutronlassítás, nincs moderáló közeg. A reaktormagot

ennél a típusnál ^{238}U tenyésztőzóna veszi körül. A neutron elnyelése után kialakuló ^{239}U -ból két bétabomlás után a páratlan tömegszámú ^{239}Pu keletkezik, amely 24 ezer éves felezési idejű hasadóanyag. Ezzel az eljárással tehát az energiatermelés mellett hasadóanyagot is termelünk, melynek mennyisége a jól megtervezett reaktor esetén jelentősen nagyobb, mint amennyit a reaktor felhasznál. Ezeknél a reaktoroknál az elsődleges cél olyan mesterségesen tenyésztett hasadóanyagok, azaz páratlan tömegszámú izotópok létrehozása, melyek könnyen hasadnak. Jelenleg a Földön, a lényegesen bonyolultabb és kevésbé biztonságos megoldási lehetőségek miatt, mindössze egy ilyen típusú, kereskedelmi célra is termelő reaktor működik. A reaktorokban történő energiatermelés folyamatát az 5.5. ábra [9] mutatja be. Minden reaktor esetén alapvető szabályozó elv, hogy a neutronok számának állandónak kell lennie. Ezt a termikus reaktorokban moderátorokkal és abszorpciós (neutronelnyelő) rudakkal valósítják meg, a tenyésztő reaktorokban csak abszorpciós rudakat alkalmaznak. Moderátorként vizet, nehézvizet, illetve grafitot, abszorbeáló anyagként pedig bórt, illetve kadmiumot használnak, az abszorpciós rudaknak a reaktor leállításánál van szerepe.



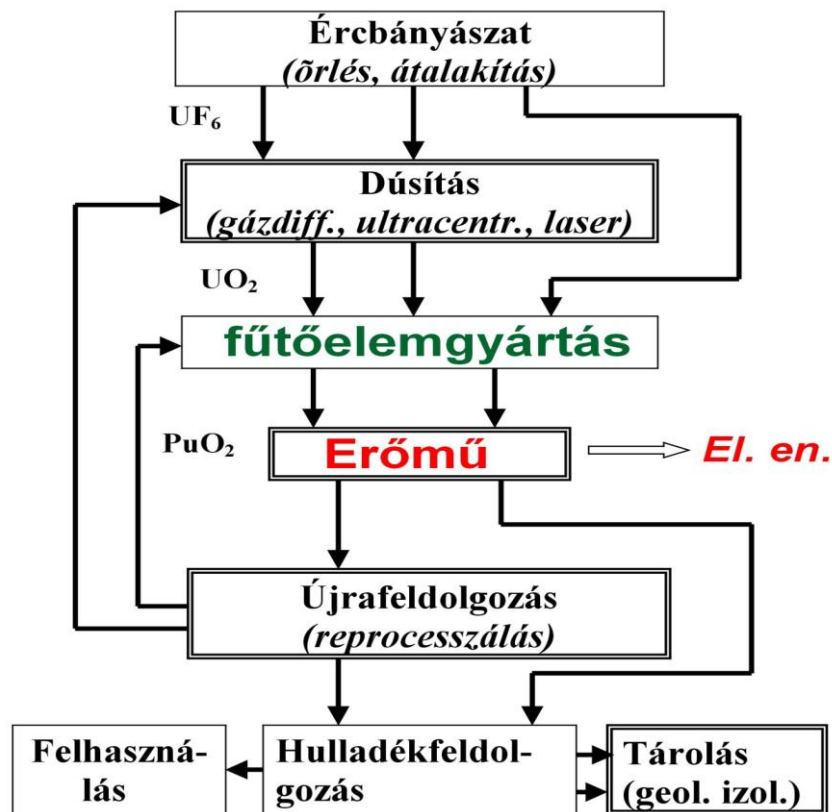
5.5. ábra: Az energiatermelés folyamata

A fűtőelemeket rudakba rendezik, ezek melegednek a reaktor működése során, a keletkezett hővel gőz fejleszthető, melyet turbinákra vezetve, generátor segítségével elektromos energia

állítható elő. A rendszer hűtése folyadék (víz), vagy gáz (hélium), esetleg olvadt fém (ólom) alkalmazásával történik.

5.1.3. Nukleáris fűtőanyagciklus

Az energiaforrások által megtermelt energiát akkor lehet korrekten összehasonlítani, tehát az energiatermelés előnyeit, illetve hátrányait is elemezni, ha ugyanakkora megtermelt mennyiségű energiára a teljes fűtőanyagciklust vizsgáljuk, vagyis minden energiatermeléssel kapcsolatos lépést végignézünk. Az atomenergia volt az első az energiaforrások közül, melyre ezt a részletes elemzést elvégezték. Az 5. 6. ábrán [9] a nukleáris fűtőanyagciklust követhetjük nyomon az érc kibányászásától a hulladék feldolgozásáig.



5.6. ábra: Nukleáris fűtőanyagciklus

Az ábrán kettős vonallal keretezett téglalapokban megnevezett tevékenységek azokat a területeket jelzik, amelyek jelenleg is nukleáris vita tárgyát képezik a társadalomban. Ezek a dúsítás, az erőmű esetleges üzemzavarai, az újrafeldolgozás és a hulladéktárolás (5.1. táblázat) [S1].

<i>Nukleáris vita tárgya</i>	<i>Oka</i>
Dúsítás	Atomfegyverek gyártásának lehetősége
Erőmű működése	Nagy energiasűrűség – folyamatos hűtés szükségessége
Újrafeldolgozás	Nagy aktivitás mellett elvégzendő kémiai eljárás – plutónium kinyerése aggályos
Radioaktív hulladék elhelyezése	Nagy aktivitású radioaktív hulladék végleges tárolása nem megoldott

5.1. táblázat: A nukleáris energiatermelés fő problémái

A nukleáris fűtőanyagciklus első fázisa, az ércbányászat nem tartozik a különösebben problémás lépések közé, a bányászati eljárás nagyjából azonos a más ásványkincsek kibányászásánál alkalmazott eljárással. Egyedül a radon koncentráció növekedése okoz a mélyművelésű bányákban megoldandó feladatot, de ez a bányák intenzív szellőztetésével megoldható.

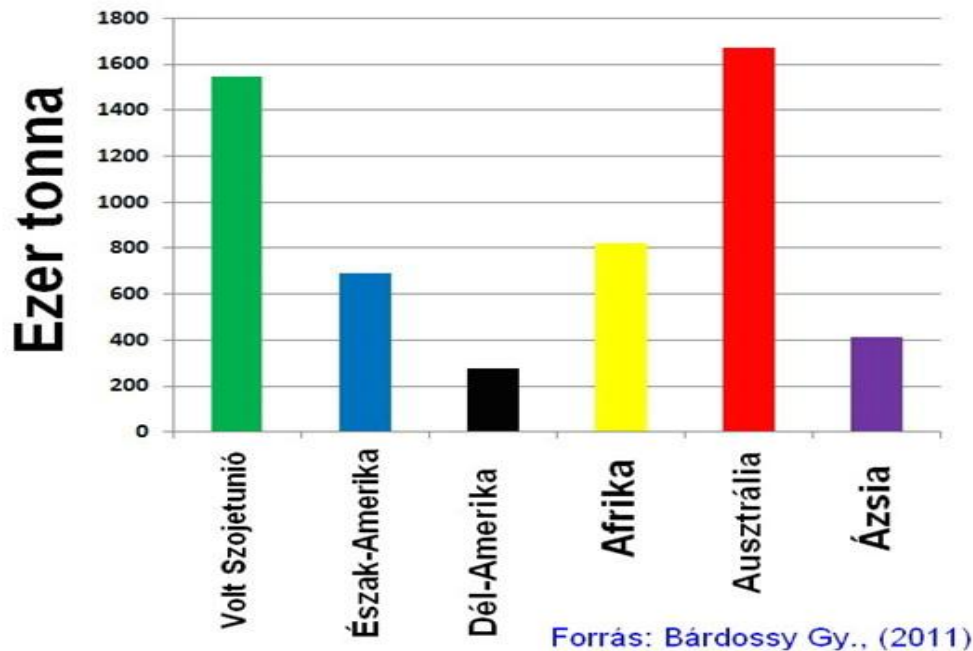
Az urán az egyik legelterjedtebb elemek közé tartozik, szinte mindenütt megtalálható a földkéregben, sőt kisebb mennyiségben még az óceánokban is. Bányászatát ott érdemes folytatni, ahol a kőzet uránban gazdag, ez mintegy 3-5 ezreléknyi koncentrációt jelent.

A Föld ismert, gazdaságosan kitermelhető uránvagyonát 5,6 millió tonnára becsülik, a legjelentősebb lelőhelyek a volt Szovjetunió és Ausztrália területén találhatók, de minden földrészen van kisebb-nagyobb mennyiség (5.7. ábra) [9][47]. Magyarországon is működtek uránbányák 1957-1997 között a Mecsekben, de a kőzet alacsony urán tartalma (≈ 1 ezrelék) miatt megszüntették a gazdaságtalan bányászatot. Az utóbbi években ennek ellenére is többször is újra felmerült a bányanyitásának lehetősége, egy ausztrál vállalat, majd ennek magyar jogutódja kezdeményezte több ízben is a folyamatot, de mindegyik esetben elutasításra kerültek a tervek [41].

Az uránvagyonnak az energiataralma attól függ, hogy milyen reaktorban történik meg a felhasználása. Ha ez könnyűvízes termikus reaktorban valósul meg, akkor körülbelül 6000 EJ-nak, tehát nagyjából a kőolaj energiataralmának megfelelő értékű, és néhány évtizeden belül várhatóan kimerül. Ha viszont termikus-tenyésztő reaktorok rendszerébe kerül, mint fűtőanyag, akkor ennél sokkal nagyobb, esetleg egy nagyságrenddel is több energia mennyiséget lehet belőle kinyerni [9].

A Föld ismert uránvagyona

Összesen ~ 5 600 000 t



5.7. ábra: A Föld uránvagyónának földrajzi megoszlása

A fűtőanyagciklus második lépése a dúsítás, amely mint már említésre került, a ^{235}U izotóp részarányának növelését jelenti. A folyamathoz alkalmazott eljárások (gázdifúziós, illetve ultracentrifugás eljárások) mindegyikének az a fizikai alapja, hogy a 3 neutronnyi tömegkülönbség miatt a 238-as és a 235-ös izotóp egymástól jól elkülöníthető. Ezek az eljárások komoly technológiai felkészültséget igényelnek. Ezért is került be az 5.1. táblázatban szereplő, a nukleáris vita tárgyát képező pontok közé, mert amelyik ország képes a dúsításra, az atomfegyvert is elő tud állítani.

A harmadik fázis a fűtőelem gyártás, mely egy normál kémiai eljárás. Ennek során a fűtőanyagot olyan formába hozzák, hogy az a reaktorban felhasználható legyen, ez leggyakrabban urán-dioxid. Az erőmű aktív zónájában (5.4. ábra), ahová a fűtőelemek kerülnek, a láncreakció során a nagy hőteljesítmény mellett rendkívül nagy radioaktivitás is felépül, és ennek a bioszférába való kijutását mindenképpen meg kell akadályozni. Ezért a folyamatos hűtést a láncreakció leállása után is fenn kell tartani, ellenkező esetben a reaktormag megolvadhat, és nagy mennyiségű radioaktív anyag juthat a környezetbe. (Ez a sajnálatos esemény történt meg 2011-ben a fukusimai atomreaktor baleseténél, ahol a

földrengés által kiváltott cunami tönkretette a hűtést biztosító berendezéseket, így a reaktorok hűtése megszűnt.)

A negyedik lépés az újrafeldolgozás, melyben a felhasznált fűtőelemek urán és transzurán részét elválasztják a hasadványoktól. Az eljárás során létrejövő és az 5.6. ábrán is megjelenő plutónium kinyerése a nukleáris energiát ellenzőknek jogosan adhat okot a félelemre, mivel fennállhat annak a lehetősége, hogy ez a hasadóanyag illetéktelen kezekbe kerülhet.

Végezetül az utolsó mozzanata a fűtőanyagciklusnak a hulladékfeldolgozás, a radioaktív hulladékok végső elhelyezése olyan területekre, ahol nem jelentenek veszélyt a környezetükre. Az atomerőműben keletkezett hulladékokat két csoportra osztjuk, kis és közepes aktivitású, valamint nagy aktivitású hulladékokra. Az előbbi elhelyezése minden ország esetében nemzeti ügy, és elvileg is és gyakorlatilag is már teljesen megoldottnak tekinthető. Magyarország esetében a Tolna megyei Bábaapátiban 2012 óta működik a kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok temetője, ahová a Paksi Atomerőmű ilyen aktivitású radioaktív hulladéka kerül. A nagy aktivitású hulladékok biztonságos elhelyezése viszont a világon jelenleg még sehol sincs megoldva, ezek most is csak átmeneti tárolókban vannak elhelyezve, jelenleg még csak a lehetséges helyszínek felkutatásánál tart a világ. Így ebből a szempontból is megalapozottnak mondható a társadalom nukleáris energiával szembeni aggodalma.

5.1.4. A jövő reaktorai

2019-ben a Föld országaiban összesen 442 reaktor működött, összes elektromos teljesítményük 318 GW, a megtermelt elektromos energia 2,79 PWh volt, mely a Föld teljes elektromos energiafelhasználásának körülbelül 10%-a [42]. Ez egy elég jelentős hányad, erre a mennyiségre az emberiségnek a jövőben is biztosan szüksége lesz. Az utóbbi évtizedekben viszont a nukleáris energiát komoly bírálatok érik, melyek több okot is tartalmaznak. Ezek között szerepelnek a balesetektől, illetve az atomfegyverek gyártásától való félelmek, a nukleáris hulladékok elhelyezésével, illetve a kiapadó urán készletekkel kapcsolatos aggodalmak, valamint azok a gazdasági kockázatok, melyek az atomreaktorok létrehozásával, illetve leszerelésével függenek össze. Mi tehát a jövő reaktorainak a feladata?

Talán a legfontosabb feladat a fenntarthatóság biztosítása, mely egyrészt az urán és a tórium leghatékonyabb felhasználását jelenti, másrészt megoldja az összes nukleáris hulladék végleges és az egész emberiség számára is megnyugtató elhelyezését. A fenntarthatóság biztosítása mellett azt is világossá kell tenni mindenkinek, hogy mik az előnyei a nukleáris

energiának más energiatermelési módokkal szemben, akár gazdasági, akár környezetvédelmi szempontokat tekintünk. Megoldandó feladat annak megvalósítása is, hogy miként lehet alkalmassá tenni az atomerőműveket nemcsak elektromos energia, hanem például a folyamathő vagy hidrogén előállítására. Nagyon fontos további szempont, különösen a már bekövetkezett nukleáris katasztrófák (Csernobil 1986, Fukushima 2011) után, az erőművek biztonsági kérdése. Ez abban kell, hogy megnyilvánuljon, hogy a reaktorok belső biztonságát olyan fizikai törvényeknek kell szabályozniuk, amelyek minimálisra csökkentik a reaktormag sérülésének veszélyét. Végezetül egy, az utóbbi időkben meglehetősen fontossá vált szempont lesz az is, hogy a létesítmény legyen felkészült és a lehető legkevésbé sebezhető az esetlegesen bekövetkező terrortámadásokkal szemben is.

5.1.5. A Paksi Atomerőmű története, jelene, jövője

Magyarország csak egyetlen atomerőművel rendelkezik, de ez meghatározó mennyiségű elektromos energiát termel. A következő sorokban néhány mondattal bemutatom az erőművet, ismertetem múltját, jelenét, valamint a jövőjére vonatkozó terveket (5.8. ábra) [S1].



5.8. ábra: Paksi Atomerőmű (Google fotó)

A Paksi Atomerőmű alaperőműként funkcionál, rendelkezésre állási ideje magas, átlagosan 90-95% között mozog. Üzemzavarok igen ritkán fordulnak elő, egy-egy reaktor csak az előre meghatározott időnként esedékes karbantartások idejére áll le. Feladata az ország elektromos energiatermelésének segítése és az állandó mennyiségű villamos energia biztosítása. Az erőműben 4 blokk üzemel, az általuk megtermelt elektromos energiamennyiség az ország

villamos energiatermelésének az utóbbi 6-8 évben átlagosan a felét fedezte, 2019-ben ez az érték 48% volt, de olyan év is volt az elmúlt évtizedben, amikor az érték 50% fölé került [43]. Története az 1960-as évekre nyúlik vissza, 1966-ban született meg a döntés arról, hogy Magyarországon atomerőmű épülhet. Az építkezés 1974-ben kezdődött, a jelenlegi vállalat jogelődjét 1976-ban hozták létre. Az erőmű I. reaktorblokkja 1982. decemberben, a negyedik 1987. augusztusban kezdte meg a termelést, és mind a négy blokk 30 éves időtartamra kapta meg az engedélyt az üzemelésre.

2012-ben először az első, majd folyamatosan a másik három blokk is további 20 éves üzemidő hosszabbítást kapott, így az erőmű reaktorai, összesen 2000 MW maximális teljesítménnyel, 2032-2037-ig termelhetnek energiát [44]. A 2014-ben bejelentett magyar-orosz megállapodás értelmében a Paksi Atomerőmű bővítésére kerül sor, jelen állás szerint, melyben az eredeti tervekhez képest már 2 év csúszás van, a 2020-as évek végén újabb két, az eddigiekhez képest jóval nagyobb teljesítményű (2*1200 MW) reaktor kezdi majd meg az energiatermelést.

Az előző fejezetben megemlített, a nukleáris energia hasznosításával szemben fellépő, a média által is gerjesztett aggodalmak a magyarországi társadalomban is jelen vannak, több érdekcsoport politikai céljainak eléréséhez megpróbál belőle tőkét kovácsolni. De vajon mennyit tud a társadalom és ezen belül például egy középiskolai diák magáról a nukleáris energiatermelés témájáról, mennyire érti meg a fizikáját, és ennek alapján mennyire tud reális, a média befolyásától független képet alkotni? Ennek a folyamatnak az elősegítése a teljes társadalom esetében a megbízható, szakmai háttérrel rendelkező források feladata, ez általában meg is történik, a megfelelő információk mindenki számára hozzáférhetők. Tény viszont, hogy utánajárást igényelnek, ami sokszor nem valósul meg. Sajnos a média befolyásának itt óriási szerepe van, mert a társadalom döntő része kizárólag a médiában található információkhoz jut hozzá, és ha ezek szándékosan félrevezetőek, akkor komoly befolyásoló hatással lehetnek az egyénekre. A középiskolás diákoknál valamivel jobb a helyzet, mert bár ők is elsősorban a médiából tájékozódnak, de a szakmailag és az emberileg is hitelesnek tartott tanáruk véleményét egyöntetűen elfogadják. Ebből következik, hogy a középiskolás diákoknál ezeknek az információknak a hiteles és pontos közlését, és a kapcsolódó tudományos alapok megadását elsősorban a fizikatanárnak kell elvégeznie.

Ebben némi segítségére van, hogy mind a maghasadás fizikája, mind az atomreaktor működése szerepel a középiskolás tananyagban. A jelenlegi tanterv (2020) alapján viszont ezek csak a fizikatanítás szempontjából legutolsó tanévben és elég csekély mértékben jelennek meg. A 2020-as Nemzeti Alaptanterv szerint a minden diáknak kötelező

fizikatanulás utolsó évfolyama a 10. évfolyam, ez ebben a kérdésben azért okozhat gondot, mert sok tanuló életkorából adódóan még nem elég érett a probléma mélyebb megértésére.

Ugyanakkor a diákok nagy többségét viszont komolyabban is érdekelné ez a téma, és ha megfelelő, és számukra is világos ismeretekhez jutnak, akkor tökéletesen meg tudják érteni fizikai hátteret is. Tekintsük át röviden, melyek is ezek a középiskolás tananyagra épülő információk!

A nukleáris energiatermelés megismeréséhez szükségesek a magfizikai alapok, melyeknek egy kisebb része a kémiai tantárgy keretein belül a korábbi években már előkerült. Ezeket kell a fizika tantárgynak kiegészíteni azokkal az ismeretekkel, melyek lehetővé teszik, hogy a diák megértse a maghasadás fizikáját is. Ezután kerülhet sor a jelenség gyakorlatban történő alkalmazásának bemutatására, vagyis az atomerőművek működésének részletes ismertetésére. Itt különösen a biztonság kérdésének vizsgálatánál célszerű a sugárzások áthatolóképességénél tanultak alapján azt is tisztázni, hogy mivel lehet védekezni a különböző sugárzások ellen és ez a védekezés konkrétan Pakson hogyan valósul meg.

Mindenképpen érdemes az energiatermelés gazdaságosságát is kielemezni, ehhez meg kell adni, hogy az elektromos energia előállításához szükséges költségek az eltérő energiaforrásokkal termelő erőművek esetén milyen tényezőkből tevődhetnek össze. Bár a különböző típusú energiatermelő berendezésekkel előállított egységnyi energia pontos értékére vonatkozó adatok általában nem állnak rendelkezésre, azt mindenképpen szükséges megemlíteni, hogy Paks esetében, a helyben kapott információk szerint, a nukleáris energiánál jelenleg ez az összeg ~12 Ft/kWh (2018-as adat), amely európai szinten is egyedülállóan alacsonynak számít. Ráadásul, szintén ottani közlés alapján, ez az összeg már azokat a költségeket is tartalmazza, amelyek a radioaktív hulladékok tárolókba történő elhelyezésével kapcsolatosak, illetve az atomerőmű majdani végleges leállításánál felmerülnek.

Beszélni kell harmadikként az energiastabilitás problémájáról is, ami azt jelenti, hogy a különböző típusú erőművek, illetve energiatermelő berendezések mekkora rendelkezésre álló idővel működnek, mennyire képesek folyamatosan az energiatermelésre. A Paksi Atomerőmű, mint alaperőmű esetében a már említett magas rendelkezésre álló idő hatalmas jelentőségű és egyben meghatározó szerepű. Természetesen a többi magyarországi erőmű közül is vannak olyanok, (például a Visontán működő széntüzelésű Mátrai Erőmű) melyek szintén alaperőműnek tekinthetők, így Pakssal együtt biztosítani tudják a villamos energiarendszer alapvető stabilitását. Mellettük vannak olyan erőművek is, amelyek gyakran csak akkor üzemelnek, ha az energia ellátó rendszernek éppen szüksége van rá. Ez előállhat egyrészt a váratlanul megnövekedett energiaigény miatt (nyári kánikula – megnövekedett

légkondicionáló működtetés), vagy csupán abból az okból, hogy az elektromos energiarendszerbe termelő megújuló energiaforrások közül néhánynak a működési feltételei nem adottak (szélcsendes vagy borús idő, napszakok váltakozása). Az alaperőművek esetében a működtetés költségei tervezhetők, de ez utóbbi típusú, mondhatni „kiegészítő” erőművek üzemeltetése olyan többletköltséget okozhat, mely előre pontosan nem meghatározható. Sőt a megújulók esetében olyan, az előzőhöz képest fordított állapot is előállhat, amikor energia túltermelés jönne létre az energiaellátó rendszerben. Az energiátárolás jelenleg még nem megoldott, de ha a jövőben megoldásra kerül, akkor mekkora lesz ennek a járulékos költsége? A Paksi Atomerőmű bővítésével kapcsolatos, a médiában is megjelenő információk természetesen a középiskolás diákokhoz is eljutnak. Ez a kérdés is komolyan foglalkoztatja ezt a korosztályt, és szerencsére nemcsak azokat a tanulókat, akik egyébként is nagyobb érdeklődést mutatnak a fizika iránt, hanem a többieket is. Itt ismét nagyon fontos szerep hárul a fizikatanárra, mert az ő feladata az, hogy a diákoknak reális, tehát mindenféle politikai és ideológiai szemlélettől mentes képük legyen erről a folyamatról is. Mindenképpen célszerű a diákokkal együtt végignézni, hogy mik lehetnek a bővítésnek a rövid távú, illetve hosszú távú előnyei, illetve ugyanígy a hátrányai.

Az első csoportnál, a rövid távú előnyök között kell megemlíteni, hogy az atomerőmű környezetbarát, nem bocsát ki sem port, sem széndioxidot, illetve más üvegházhatású gázokat. Alkalmazása biztonságos, az üzemanyag szállítása és készletezése is egyszerű, mivel az éves szinten felhasznált fűtőanyag mennyisége (ez Paks esetében 42 tonna) csak töredéke egy más típusú erőműének. Üzemszerű működése esetén, a magas rendelkezésre állási ideje miatt, folyamatosan képes az energiatermelést biztosítani, és így a későbbiekben a megnövekedett kapacitásnak köszönhetően, csökkentheti az ország energiainport-függését.

A hosszú távú előnyök között kell szerepeltetni a gazdaságosság kérdését, felhívva a figyelmet arra, hogy az üzemelő atomerőmű jelentősen kisebb költséggel termeli meg ugyanazt a mennyiségű energiát, mint más erőművek. Ugyancsak a hosszú távú előnyök között érdemes a munkahely teremtés előnyéről is beszélni, ami az adott térség fejlesztéséhez járulhat hozzá.

Az előnyök mellett mindenképpen fel kell hívni a figyelmet a hátrányokra, illetve az ebből adódó hosszú távú problémákra is. Az első a létesítés rendkívül jelentős beruházásigénye, melyhez a szükséges tőke csak külső forrásból biztosítható, és amelynek megtérülése nagyon hosszú időbe fog telni. A második probléma a keletkezett különböző aktivitású hulladékkal kapcsolatos. Ennek mértéke ugyan összehasonlíthatatlanul kisebb, mint például bármelyik szén-erőmű által létrehozott hulladék, de ez radioaktív, tehát megkülönböztetett figyelmet

igényel. Ez azt jelenti, hogy a tárolást olyan helyeken kell biztosítani, ami teljesen sugárzásmentes, és maga a megoldás is hosszú távra szól. Ilyen hely a kis és a közepes aktivitású radioaktív hulladék elhelyezésére már rendelkezésre áll, mint már említésre került ebben a dolgozatban, Magyarországon 2012 óta Bábaapátiban fogadják az ilyen anyagokat, de a nagy aktivitású hulladékok végleges elhelyezésének kérdése még hazánkban is nyitott. A harmadik probléma, amiről szintén beszélni kell, hogy a bővített atomerőmű ugyan munkahelyeket teremt, de a működtetéséhez szükséges személyi feltételek biztosítása a mérnöki szinten jelenleg még nem látszik megoldottnak, kevés az aktív szakember. Ezt súlyosbítja, hogy sajnos az ehhez pályához szükséges mérnökképzésben még résztvevő egyetemi hallgatók száma is alacsony, annak ellenére, hogy az egyetemi képzésük biztosítva lenne. A jelenlegi aggasztó állapot véleményem szerint már egyértelműen annak tudható be, hogy a fizika és többi természettudományos tantárgy az utóbbi 15-20 évben méltatlanul egyre jobban háttérbe szorult. Remélhető, hogy előbb-utóbb a társadalom is végre felismeri, hogy ezt a folyamatot ideje lenne már visszafordítani, meggyőződésem, hogy a felismertetésben a gyakorló középiskolai fizikatanároknak is fontos szerep fog jutni.

5.2. Magfúzió

Láttuk, hogy az atommag átalakításával történő energiatermelés másik lehetősége a magfúzió, amelynél a kis tömegszámú atommagok egyesüléséből energia felszabadulás kíséretében nagyobb tömegszámú atommag jön létre. Ez a jelenség adja a Nap, illetve más csillagok energiáját és hatalmas lehetőség lenne az emberiség számára is, ha sikerülne földi körülmények között békés célra felhasználni. Fegyverkezési, illetve háborús céllal már kísérleti hidrogénbomba robbantások formájában megvalósult, tehát a tudomány számára a magfizikai háttér ismert, de az energiatermelés megoldása világosan még most sem látszik.

A magfúzió létrejöttének feltétele, hogy a folyamat során az atommagoknak le kell győzniük a Coulomb-féle taszítást, különben a magerők révén nem kerülhetnek egymással kölcsönhatásba. Ez akkor jöhet létre, ha a hőmérséklet a 100 millió K nagyságrendjébe esik, ilyenkor az anyag már plazma állapotban van. Az energiatermelés folyamatához ezen az extrém magas hőmérsékleten kell a plazmát egyben tartani.

Ennek két megoldása lehetséges, vagy rövidebb ideig nagy plazmasűrűséggel, vagy hosszabb ideig kisebb sűrűséggel. Az első lehetőséget nagy teljesítményű lézerekkel lehetne megvalósítani, de ezek jelenleg még nem állnak rendelkezésre. (Megemlítem, hogy az USA-

ban már vannak ennek érdekében tett figyelemre méltó eredmények, és ehhez kapcsolódóan került kiírásra egy jelenségelemző feladat a 2022. tavaszi fizika középszintű érettségien [48].) A másik jövőbeli megoldás a kisebb sűrűségű plazma erős mágneses terek segítségével történő egyben tartása. Erre irányuló kísérleteket végeznek majd az ITER-ben (International Thermonuclear Experimental Reactor), melyet nemzetközi együttműködés keretén belül 2007 óta építenek Dél-Franciaországban (5.9. ábra) [45].



5.9. ábra: Épülő fúziós erőmű Dél-Franciaországban (Cadarache)

Az építkezés jelenleg is folyik, az első plazmaműveletek a 2020-as évek második felében várhatóak. A tervek szerint az ITER-t 10 évnnyi kísérleti működés után csak 10-15 évvel követné az első olyan termonukleáris erőmű, mely már energiát is termelne, majd ennek a működésnek a több éves tapasztalatait felhasználva kezdődhetne el a valódi termonukleáris teljesítményreaktor megépítése [9].

A fúziós energiatermelés egyik nagy előnye lenne, hogy a számítások szerint sokkal kisebb környezeti veszélyt jelentene, mint a hasadásos reaktorok. Az itt keletkezett radioaktív hulladékok felezési ideje jelentősen kisebb, mint a hasadásos reaktoroknál keletkezőké, ezáltal a tárolási idejük is megrövidül. További előny a hasadással történő energiatermeléssel szemben az is, hogy a fúzióhoz szükséges nyersanyag, a deutérium a tengervízben megfelelő

mennyiségben rendelkezésre áll, és nem kell attól tartani, hogy egyszer csak elfogy. Bár az emberiség nagyon sokat profitálhatna a fúziós energiatermelésből, sajnos a fentebb említett okok miatt az elkövetkező 30-40 évben még biztosan nem fog megindulni olyan szinten ez a fajta energiatermelés, mely az energiaproblémákra tartós és egyben végleges megoldást adhatna.

6. Az energiapolitika jövője

Az emberiség biztonságos és folyamatos energiaellátása a társadalom működése érdekében alapvető szempont kell, hogy legyen a jövőben, ennek hiányában a működés fenntarthatatlanná fog válni. Nyilvánvaló lett az elmúlt évtizedekben tapasztalható, gyakorlatilag lineáris növekedést mutató energiafogyasztási trendből (2.1 ábra), hogy a Föld lakossága a jövőben sem akar, és nem is fog kevesebb energiát felhasználni, mint eddig, sőt a népesség folyamatos növekedése miatt az energiaigények még tovább fognak nőni. Ahhoz viszont, hogy az energiaellátás egyáltalán megvalósuljon, a társadalomnak fel kell ismernie azokat a jelenlegi tényeket, illetve a jelenre, valamint a jövőre vonatkozó szükséges teendőket, amelyek ezt biztosítani tudják. Elsőként vizsgáljuk meg, melyek a tények!

A fosszilis energiahordozó készletek végesek, és bár teljesen pontos adatok nem állnak rendelkezésre, az valószínűsíthető, hogy legfeljebb csak néhány évtizedre elegendők. A megújuló energiaforrásokkal a teljes energiatermelés legfeljebb 25-35%-a váltható ki, a teljes pótlásra nem képesek, így a fosszilis energiahordozók további alkalmazása mellett ösztársadalmi szinten a nukleáris energiahordozók felhasználása is elkerülhetetlen lesz. Természetesen most is vannak, és lesznek is olyan országok, melyek energiatermelésük jelentős hányadát csak a megújulókkal képesek biztosítani, és a különbséghez csak minimális fosszilis, és nulla nukleáris energiaforrást használnak fel. Az országok többsége azonban nem rendelkezik az ehhez szükséges természeti adottságokkal, számukra továbbra is fontos szempont, hogy mind a három energiatermelési mód lehetőségei tovább fejlődhessenek, és bármelyikkel is történik ez, az a lehető leggazdaságosabb legyen.

A növekvő energiaigény miatt az energiaszerkezet átalakulása várható, ez valószínűleg egy hosszabb folyamat, mely környezeti ártalmakkal, valamint gazdasági és társadalmi következményekkel jár együtt. A folyamatos népességnövekedés miatt emelkedő energiaigény gazdasági, valamint társadalmi és politikai feszültségeket is generál. Ez utóbbit sajnos a 2022. február 24-én kirobbant orosz-ukrán háború is bizonyítja, de ennek következményei már nemcsak a két harcoló fél esetében fognak megnyilvánulni. Már most is látható, hogy ez a konfliktus komoly hatással van egész Európa energiaellátására, és bár ezt senki sem szeretné, az is előre vetíthető, hogy sajnos hasonlóra a jövőben is bármikor sor kerülhet. Az említett problémák miatt a társadalmaknak fel kell készülniük arra, hogy az energia ára az egyre komolyabb technológiai fejlesztések ellenére sem fog csökkenni, sőt véleményem szerint további erőteljes növekedés várható.

Ezt az is alátámasztja, hogy a politikai rendszerek általában rövid távú gondolkodása nem kedvez az energiaellátás hosszú távú tervezést igénylő problémájának megoldásában. A jövő nemzedékeinek energiaellátása jelenleg meglehetősen borús képet mutat. Mik lehetnek mégis azok a teendők, melyek segíthetnek ezt a látványt kedvezőbbé tenni?

Szükséges lesz olyan szervezeti formák kialakítása, melyek az energetika kérdésében hosszú távú döntések meghozatalára képesek és emellett hatással vannak arra is, hogy ezek a döntések betartásra is kerüljenek. Az elkövetkező évtizedek energiaellátását továbbra is csak a tudomány eredményeinek felhasználásával lehet majd biztosítani, kiemelt szerepet kell, hogy kapjon az energetikai kutatások támogatása. Nagyon fontos szempont az is, hogy a társadalom is felismerje az energetika jelentőségét. Ebben a mindenki számára eljuttatandó és központilag irányított, de reális ismeretterjesztés mellett, komoly szerep jut majd a középiskolai természettudományos tantárgyat tanító tanároknak is. Az ő feladatuk lesz a hiteles és közérthető ismeretek átadása annak a generációnak, akik életük során ezekkel majd nap, mint nap szembesülnek, energetikai kérdésekben álláspontokat képviselnek, véleményt mondanak, illetve esetlegesen döntéseket is hoznak. A tanárok felelőssége igen nagy, és maga a feladat sem könnyű, de a nagyon fontos cél érdekében mindent meg kell tenni, hogy ez pontosan megvalósulhasson!

7. Energiatermelő létesítmények látogatásainak tapasztalatai, ezek felhasználása a középiskolai fizikatanításban

Tanári pályám során mindig arra törekedtem, hogy azokat az ismereteket, amelyeket a diákjaimnak átadok, alá is tudjam támasztani az érzékszervek által észlelhető, sőt esetleg kézzel is megfogható gyakorlati bizonyítékokkal. Ez az óráimon általában a kapcsolódó tanári és tanulói kísérletek bemutatásával, az eszközök kézbeadásával, és a tanult jelenségek, törvényszerűségek részletes szöveges magyarázatával történik meg. Ez utóbbihoz rendszerint képek, valamint videó filmek bemutatása is társul, melyeknek az a feladata, hogy a megértést megkönnyítsék és a tananyagot érthetőbbé tegyék.

Véleményem szerint a középiskolai fizikaoktatásban jelenleg az energetika témaköre nem kapja meg a szükséges figyelmet, mellőzöttnek számít. A tankönyvekben levő, a témakörhöz tartozó csekély mennyiségű ismeretanyag főleg általános jellegű, konkrét adatokat a világ, illetve Magyarország esetében is, alig tartalmaznak. Ugyanakkor a diákok közül többen is vannak olyanok, akiket érdekelnének a konkrét számok is, mert szívesen tennének összehasonlító elemzéseket az energetika bizonyos területein. Tapasztalatom azt mutatja, hogy ez egyáltalán nemcsak a matematikából magasabb tudással rendelkezők tanulóira érvényes, úgy látom, hogy aki szeret előre gondolkozni, és tervezni is a jövőjére nézve, az nagyon szívesen foglalkozik ezzel a témával.

Fizikatanárként is, de az ilyen jellegű érdeklődésem miatt is, fontosnak tartom, hogy én is teljesen otthon legyek az energetikában. Ennek érdekében az elmúlt években magánemberként többször is, diákjaim vagy volt diákjaim kíséretében, egy-egy esetben látogatásokat tettünk energiatermelő létesítményekben. 2018-ban az akkori végzős fizika fakultációs csoportommal a Paksi Atomerőműben vettünk részt egy 4 órás bemutató foglalkozáson, ahonnan mindannyian nagyon sok új ismerettel és természetesen meghatározó élményekkel tértünk haza. A 2019-es budapesti GIREP Konferencia résztvevőjeként az egyik szervezett program keretén belül ismét sikerült eljutnom Paksra. Ekkor olyan szakmai információkhoz is hozzájutottam, amiről az előző évben, valószínűleg a csak diákcsoporthoz szóló tájékoztatás miatt, nem hallottam. Sajnos a 2020-as és 2021-es években az újabb látogatások a világjárvány miatt nem valósulhattak meg, de bizakodom abban, hogy 2023-

ban, amikor ismét végzős fakultációs csoportom lesz, újra meg tudom ismertetni a valóságban is a Paksi Atomerőművet az érettségi előtt álló diákokkal.

A nukleáris energia mellett természetesen más, például a megújuló energiaforráson alapuló energiatermelő létesítmények is érdekelnek, feleséggel az elmúlt évtizedekben több vízerőművet is meglátogattunk. Vízitúrásként mind a tiszalöki, mind a kiskörei erőművet közelebbről, közvetlenül a vízről is sikerült megnézni, de eljutottunk a Rábán található, ma már inkább múzeumként működő ikervári erőműbe is, ahol a létesítmény történetét és működését ismertette csak kettőnknek az ottani vízmű gépésze. Három évvel ezelőtt a szlovák oldalon levő bösi erőművet kerestük fel, igen érdekes volt a valóságban is szembesülni azzal, amiről mintegy 30 évvel ezelőtt komoly viták dúltak társadalmunkban, és sajnos azzal is, hogy ez a mostani megoldás összességében végül is Magyarországnak milyen hátrányokat okozott. (Erről ott helyben, a kiírt adatok alapján, minimális számolással magunk is meggyőződhattunk!)

A vízenergia mellett a szélenergia termelésével kapcsolatosan is vannak személyes tapasztalataink, Mosonszolnok közelében több szélerőművet közelebbről is megnéztünk, illetve le is fényképeztünk, ezek a felvételek is mind részét képezik az energetika témaköréhez kapcsolódó tanítási óráimnak.

Napelemmel villamos energiát termelő kiserőmű a lakóhelyem (Piliscsaba) mintegy 50 kilométeres körzetében több is megtalálható (Keszölc, Csákvár), ezek felkeresését diákjaimmal együtt már régóta tervezem. Sajnos ez az utóbbi két évben nem valósulhatott meg, mert az erőművek nem fogadtak látogatókat. Remélhetőleg az idei év őszén, vagy a következő év tavaszán már sikerülni fog, ugyanekkor fog sor kerülni a szintén viszonylag kis távolságban levő turai geotermikus erőmű felkeresésére is.

Mivel fizikatanár mivoltom mellett magánemberként is komolyan érdeklődöm az energetika iránt, így amikor olyan lehetőségem van, hogy újabb ismeretet szerezhetek ebben a témában, akkor ezt nem hagyom ki. 2021 nyarán egy szerencsés véletlen folytán néhány volt tanítványommal eljutottunk az addig számomra teljesen ismeretlen Zselici Csillagparkba. Ez Kaposvártól mintegy 10 kilométerre, a lakott területektől viszonylag távol, az erdő közepén álló létesítmény, melyben egész évben nagyon érdekes, elsősorban csillagászáttal kapcsolatos programokat szerveznek. A programok érdekessége mellett azt is nagyon kellemes meglepetéssel vettük tudomásul, hogy energetikai szempontból is nagyon kedvező, egyedi megoldásokat alkalmaznak az épületekben. Egyrészt a működtetéshez szükséges villamos energia egy jelentős részét napelemek segítségével állítják elő, másrészt a létesítmény fűtését és használati meleg víz ellátását geotermikus energiával biztosítják. A tanítási óráimon

diákjaimnak biztosan említést fogok tenni erről a létesítményről is, egyrészt a csillagászati programok, másrészt az energetikai megoldások miatt. Véleményem szerint ez utóbbi lehetőségek megismerése nagyban elősegítheti bennük a fenntarthatóság fogalmának pontos megértését is.

Az összegyűjtött tapasztalataim tanóráimba történő beépítésének kettős célja van. Az egyik természetesen magának az ismeretanyagnak az átadása, hiszen úgy gondolom, hogy ezek az információk, és esetleg egy-két érdekesebb adat is részét kell, hogy képezze a már említett természettudományos műveltségnek. A másik cél az lenne, hogy az érdeklődő diák a kapott adatok alapján meg tudja becsülni, és így össze tudja hasonlítani, hogy a gazdaságossági és a társadalmi szempontok figyelembe vételével is, mely energiatermelési módok lehetnek kedvezőek, és melyeket nem éri meg Magyarországon hosszabb távon működtetni. Ennek pontos elemzéséhez természetesen szükségesek lennének olyan konkrét adatok is, melyek megadják, hogy az egységnyi villamos-, vagy hőenergia előállítása az egyes energiatermelő létesítmények esetében milyen költséggel jár. Sajnos ilyen számértékek egyelőre még nem állnak rendelkezésemre, így korrekt számszerű elemzéseket diákjaimmal nem tudunk tenni, de véleményt alkotni, érveket és ellenérveket felsorakoztatni igen. Ezek viszont mindenképpen segítik a diákok szemléletének alakulását, biztosan állítható, hogy közelebb kerülnek a témához és több ismerettel fognak rendelkezni. Ezért mindenképpen megéri, hogy időt szánjunk rá!

A középiskolai fizikatanítás lezárásaként minden általam tanított 11. évfolyamos diákkal a tanév utolsó óráján megíratom a bevezetőben megemléltetett „Energiateszt” [Függelék] [46] felmérést, melynek kérdései teljesen az energetika témaköréhez kapcsolódnak. Ennek időtartama 15 perc, így az óra további részében a helyes megoldások is megbeszélésre kerülnek. Ekkor nyílik lehetőség arra is, hogy az energetika témaköréből egy-egy olyan téves információt, félremagyarázást is megbeszéljünk, ami a környezetükben levő külső hatások miatt a diákokban már esetleg tudatosult is. Nagyon jó érzés azt látni, amikor néhány addigi téves gondolat, illetve tévhit, a tanári magyarázat, vagy csak pusztán az ismeretközlés révén végre a helyére kerül!

A tesztet eddig még csak egyszer, 2019-ben sikerült megíratnom, a 2020-as évben a járvány miatt bevezetett digitális oktatás okán sajnos elmaradt, és 2021-ben nem volt olyan osztályom, akik a fizikatanítás szempontjából végzősnek számítottak volna. A mostani, illetve a következő két tanév végén viszont újra lehetőségem nyílik erre, így mindenképpen élni is fogok ezzel. Ennek különösen a 6 évfolyamos osztályoknál lesz nagyobb jelentősége, mivel ők iskolai rendszerű fizika tananyagot csak tőlem tanultak, így én is szembesülhetek

valamennyire azzal, hogy milyen volt tanításomnak a határfoka. Érdekes lesz összehasonlításokat tenni a tanított, de egyébként alapjaiban különböző (reál - humán) érdeklődésű tanulócsoportok között is.

Szeretnék az évek során fejlődést látni és ebből adódóan reményeim szerint egyre javuló eredményeket is elérni. Ha ez megvalósul, akkor úgy érzem, hogy ezek is alátámasztják azt az állásponantomat, hogy a fizika tantárgyon belül az energetika témakörének ismerete létfontosságú lesz a jövőben a középiskolások számára. Sajnos a diákok körében a fizika tantárgy megítélése továbbra is meglehetősen negatív, ezen ez a felmérés önmagában változtatni természetesen nem fog. Viszont ha olyan kérdésekben, melyekkel majd felnőtt korukban fognak szembesülni, pontos ismeretekkel rendelkeznek, és az adott kérdésekben, ha kell, reálisan állást is tudnak foglalni, akkor elértem a célomat. Őszintén remélem, hogy sikerülni fog, ez lenne a végső cél!

Összegzés

Doktori értekezésemben felvázolom egy általam régebben megírt elektronikus jegyzet felhasználásával, hogy milyen elképzeléseim vannak a középiskolába járó diákok energetikai ismereteinek bővítésére, illetve a már megismert információik pontos értelmezésére.

A dolgozatban elsőként az energetika témaköréhez kapcsolódó általános fogalmak, illetve az energiafelhasználás történelmi háttérének ismertetése történik meg, majd konkrét adatok megjelenítésével bemutatom a jelenlegi energiaellátási rendszert. Ebben a részben az adatok elemzése mellett kitérek azokra a problémákra is, amelyek az energiatermelés esetében a környezethez kapcsolódnak.

A következő részben felhívom a figyelmet az energiatakarékosság fontosságára, kiegészítem ezt a megvalósításra vonatkozó néhány ötlettel, illetve megoldási javaslattal. Kiemelem a fizikatanár szerepét, akinek meghatározó feladata van abban, hogy ezt a diákok is megértsék.

Általános tapasztalatom, hogy a diákok nagy érdeklődést mutatnak elsősorban a nukleáris, de a megújuló energiaforrások iránt is. Ennek érdekében mindkettőt részletesen ismertetem, a megújulókat fajtánként külön-külön is tárgyalom. Megvizsgálom mindkét típusal történő energiatermelési mód előnyeit és hátrányait is, egyrészt általánosan a teljes emberiség, másrészt Magyarország vonatkozásában is.

Az utolsó előtti fejezetben az energiapolitika jövőjével kapcsolatos saját véleményemet írom le. Ez tartalmazza a jelenlegi tényeket és jövőbeli teendőket, amelyek egy gyakorló fizikatanár témával kapcsolatos álláspontját képviselik.

Az értekezés végén az energiatermelő létesítményekben tett látogatásaim tapasztalatairól és ezeknek a tanításban történő felhasználásáról adok rövid összefoglalót. Lezárásként megjelölöm azt a célt, amit az elkövetkező években diákjaim energetika témaköréhez kapcsolódó szemléletformálásában elérni kívánok.

Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt szeretném kifejezni köszönetemet témavezetőmnek, Dr. Kiss Ádám Professor Úrnak, aki megjegyzéseivel, ötleteivel és javaslataival hathatósan segítette ennek az értekezésnek a létrejöttét. Köszönöm, hogy megismertetett az önálló tudományos kutatómunkával, hogy az évek során nagy figyelemmel és pontos irányítással követte végig a tevékenységemet, és bármilyen kérdéssel is fordultam hozzá, mindig kaptam megfelelő útbaigazítást.

Köszönöm Dr. Tél Tamás Professor Úrnak a lehetőséget hogy bekapcsolódhattam a Fizika Doktori Iskola Fizika Tanítása Program előadásaiba, illetve hogy előadóként részt vehettem a TPI-15 és GIREP 2019 Fizikatanári Konferenciákon, valamint hogy tagja lehettem az MTA Tantárgy-pedagógia Programjának keretén belül kiírt, 2016-2021 között lezajlott pályázat kutatócsoportjának. Külön köszönet illeti azért is, hogy határozott fellépésével, emlékeztető küldésével folyamatosan figyelt arra, hogy a hosszú évek során ne torpanjon meg a továbbhaladásom.

Köszönet illeti az Óbudai Árpád Gimnázium fizika munkaközösségének tagjait, akik szakmai ötleteikkel segítettek munkámat. Külön köszönetemet fejezem ki, Dr. Nánay Mihály földrajz-történelem szakos kollégámnak, aki könyv ajánlásával, valamint a témakört más megközelítésből bemutató információkkal látott el. Köszönöm az Óbudai Árpád Gimnázium érdeklődő diákjainak, hogy az energetikához kapcsolódó kérdéseikkel, felvetéseikkel engem is folyamatosan serkentettek a további gondolkodásra.

Végezetül hálásan köszönöm feleségemnek, hogy végig szeretettel biztatott, mindig mellettem állt és támogatott, és türelemmel elfogadta, hogy sokszor kevesebb idő jutott rá, mint amennyit szerettem volna.

Summary

In my doctoral dissertation, using an electronic note I wrote earlier, I present my ideas for expanding the energetic knowledge of high school students and for accurately interpreting the information they have already learned.

In my treatise the general concepts related to the topic of energetics and the historical background of energy consumption are described first then I display the current energy supply system with specific data. In this section in addition to analyzing the data I also address the issues related to the environment in case of energy production.

In the next chapter I draw the attention to the importance of energy saving and I supplement it with some ideas for implementation and suggestions for solutions. I emphasize the importance of the physics teacher, who has a key role to play in ensuring that students understand this as well.

My general experience is that students have a serious interest primarily in nuclear but also in renewable energy. Therefore I describe both in detail, and I discuss the renewables separately one by one. I also examine the advantages and disadvantages of both types of energy production, on one hand for humanity in general, and on the other hand for Hungary.

In the penultimate chapter I describe my own views on the future of energy policy. It contains current facts and future actions which represent the opinion of a practicing physics teacher on the topic.

At the end of the dissertation, I will give a brief summary of the experiences of my visits to power generation facilities and their use in teaching. In conclusion I mark the goal I want to achieve in shaping my students' approach to energetics in the coming years.

Irodalomjegyzék:

- [1] <https://www.netfizika.hu/miert-nem-eros-emberek-termelik-az-aramot-hanem-eromuvek>
- [2] <https://www.worldometers.info/population/>
- [3] <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>
- [4] <http://nepesseg.population.city/>
- [5] https://www.ksh.hu/stadat_files/ene/hu/ene0002.html
- [6] https://www.ksh.hu/stadat_files/nep/hu/nep0001.html
- [7] <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-electricity-final-consumption-by-sector-1974-2019>
- [8] <https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html>
- [9] Dr. Kiss Ádám – Dr. Tasnádi Péter: Környezetfizika
- [10] https://ourworldindata.org/grapher/sub-energy-fossil-renewables-nuclear?country=~OWID_WRL
- [11] <https://vs.hu/gazdasag/osszes/oriasi-foldgazmezore-bukkantak-az-egyiptomi-partoknal-0830#!s0>
- [12] <https://www.origo.hu/gazdasag/20210113-oroszorszag-jakutfold-gazmezo.html>
- [13] <https://www.origo.hu/gazdasag/20200609-tobb-mint-ezer-milliard-kobmeter-foldgazkina.html>
- [14] <https://slideplayer.hu/slide/2064588/8/images/6/>
- [15] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/hu/IP_14_55
- [16] <https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/>
- [17] <https://www.nature.com/articles/20859>
- [18] <https://ng.24.hu/fold/2021/12/08/a-permafroszt-olvadasat-figyelo-halozat-letesul/>
- [19] <https://www.overshootday.org/newsroom/past-earth-overshoot-days/>
- [20] https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power_by_country#cite_note-iea-pvps-snapshot-2021-20
- [21] <https://www.globalconstructionreview.com/australia-backs-plan-worlds-biggest-solar-farm-pow/>
- [22] <https://www.nsenergybusiness.com/projects/bhadla-solar-park-rajasthan/>
- [23] <https://www.eu-solar.hu/blog/100-mw-os-napelempark-kezdi-meg-mukodeset-kaposvaron/>
- [24] <https://www.sciencephoto.com/media/341232/view/odeillo-solar-furnace>

- [25] https://www.researchgate.net/figure/Solar-Tower-prototype-in-Manzanares-Spain-The-power-output-of-a-Solar-Tower-is_fig1_282859077
- [26] https://dload-oktatas.educatio.hu/erettsegi/feladatok_2019tavasz_kozep/k_fiz_19maj_fl.pdf
- [27] <https://yearbook.enerdata.net/electricity/world-electricity-production-statistics.html>
- [28] <https://www.iea.org/reports/hydropower>
- [29] https://hu.wikipedia.org/wiki/A_legnagyobb_v%C3%ADzer%C5%91m%C5%B1vek_list%C3%A1ja
- [30] https://hu.wikipedia.org/wiki/V%C3%ADzer%C5%91m%C5%B1#/media/F%C3%A1jl:Hydroelectric_dam-letters.svg
- [31] <https://www.slideserve.com/gaenor/szakmai-k-rnyezetv-delem-meg-jul-energi-k-2>
- [32] <https://xforest.hu/vizenergia/>
- [33] <https://xforest.hu/szeleromu/>
- [34] <https://www.macrofuels.eu/>
- [35] <https://www.veolia.hu/hu/pecsi-eromu>
- [36] <https://www.eia.gov/energyexplained/hydropower/wave-power.php>
- [37] <http://ecolounge.hu/zoldmotor/a-vilag-legnagyobb-arapaly-eromuvei>
- [38] <https://www.mannvit.hu/projektek/tura-geotermikus-eromu/>
- [39] <https://index.hu/belfold/2021/02/16/mateszalka-geotermalis-energia-tavfutes/>
- [40] https://index.hu/gazdasag/2019/09/05/europa_masodik_legnagyobb_geotermikus_tavhorendszerek_epitik_szegeden/
- [41] <https://energiaklub.hu/hirek/uranbanya-a-mecseki-tajvedelmi-korzetben-4657>
- [42] <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>
- [43] https://www.ksh.hu/stadat_files/ene/hu/ene0009.html
- [44] <https://atomeromu.mvm.hu/Rolunk>
- [45] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ITER_site_2018_aerial_view_\(41809720041\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ITER_site_2018_aerial_view_(41809720041).jpg)
- [46] Dr. Juhász András – Nagy Péter: Mit tudnak középiskolások az energiáról? – Egy felmérés eredményei – Természettudomány Tanítása Korszerűen és Vonzóan – Konferencia Kiadvány (Budapest 2011) – 354-363 o.

[47] <http://www.matud.iif.hu/2011-03.pdf>

[48] <https://dload->

oktatas.educatio.hu/erettsegi/feladatok_2022tavasz_kozep/k_fiz_22maj_fl.pdf

Saját publikációk:

[S1] <http://fiztan.phd.elte.hu/kozkincs/szakmhallg/anyagok/energetika.pdf>

[S2] http://fiztan.phd.elte.hu/english/student/energy_supply.pdf

Függelék

Energia teszt

- 1. A legtöbb mai órát apró gomelem energiája működteti. Milyen formában tárolja az energiát a gomelem?**
 - a) Elektromos energia
 - b) Mechanikai energia
 - c) Mágneses energia
 - d) Kémiai energia
 - e) Termikus energia
 - f) Magenergia
 - g) Nem tudom a választ.
- 2. Az óra hosszú idő alatt felemészti az energiát. Hová tűnt a gomelem energiája miután az óra végleg megállt?**
 - a) Elektromos energiává alakul.
 - b) Kémiai energiává alakul.
 - c) Hővé alakul.
 - d) Az alkatrészek mozgási energiájává alakul.
 - e) Mechanikai energiává alakul.
 - f) Elektromágneses sugárzási energia lesz.
 - g) Nem tudom a választ.
- 3. Melyik állítás igaz az alábbiak közül?**
 - a) Az energia a testek körül aurát képez.
 - b) A negatív energia kötött állapotot jelent, melynek „feltépéséhez” munkát kell végezni.
 - c) Az energia ún. csakrákon keresztül áramlik.
 - d) A pozitív energia életbarát („vis vitalis”) jellegű.
 - e) Meditációval negatív energiából pozitív energiát nyerhetünk.
 - f) Az energiamérés módszere az ún. radiesztézia.
 - g) Nem tudom a választ.
- 4. A vízi erőmű elektromos energiát termel. Miből származik a nyert villamos energia?**
 - a) A gáttal felduzzasztott víz helyzeti energiájából.
 - b) A duzzasztott víz termikus energiájából.
 - c) A nagy sebességgel a turbinákra zúduló víz belső súrlódásából.
 - d) A Naptól származó kémiai energiából.
 - e) A víz kémiai energiájából.
 - f) A folyó sebességéből adódó mozgási energiából.
 - g) Nem tudom a választ.
- 5. Milyen fizikai törvényen alapul az erőmű elektromos energiát előállító generátorainak működése?**
 - a) Newton gravitációs törvényén.
 - b) Pascal törvényén.
 - c) Coulomb törvényén.
 - d) A Faraday féle indukciós törvényen.
 - e) Boyle-Mariotte törvényen.

- f) Planck törvényén.
- g) Nem tudom a választ.

6. A bemutatott gázzsámlán néhány tétel elmosódott. A számla látható adatai alapján határozd meg a befizetendő összeget! (Segítség: A befizetendő összeg a bruttó számlaérték; a nettó érték a fogyasztás és az alapdíj összege.)

Információk:		Mérőleolvasás tervezett időpontja:		2008.09.12.		Utolsó leolvasás időpontja:		2007.09.14.		Utolsó leolvasott mérőállás:		24 533 m ³			
												Számla ÁFA összesítője:			
												Nettó számlaérték	ÁFA %	ÁFA összege	Bruttó számlaérték
												389,000	20	77,800	466,800
												Időszaki elszámolás összesen:			
												Bruttó számlaérték:		466,800	
												Támogatás, túlfizetés:		0	
												Késedelmi kamat:		0	
												Fizetendő összesen:		HUF 466,800	
Szolgáltatás megnevezése	Szolgáltatási időszak -tól -ig	Mennyiség (m ³)	Korrekciós tényező	Korrigált menny. (m ³)	Fűtőérték (MJ/m ³)	Elszámolt mennyiség	M.e.	Egységár (Ft/M.e.)	Nettó érték (Ft)	ÁFA kulcs					
Fogyasztás	2008.02.15-2008.03.14	371	1	371	34,10		MJ	2,513	932,000	20%					
Alapdíj	2008.03.-2008.03. hó					1 Hónap	Év/12	4 788,000	399,000	20%					
Nettó számlaérték:												HUF 1 331,000			

- a) 4788 Ft
- b) 932 Ft
- c) 312 Ft
- d) 7131 Ft
- e) 38629 Ft
- f) 47288 Ft
- g) Nem tudom a választ.

7. Einstein híres relativitás-elmélete sok meglepő állítás mellett azt mondja, hogy a tömeg és az energia lényegileg ekvivalens mennyiségek. A tömeg és az energia összefüggését a közismert $E = mc^2$ formula adja meg. Van-e kísérleti bizonyíték a fenti állításra?

- a) Nincs kísérleti bizonyíték, a formula bonyolult levezetés eredménye.
- b) Kísérleti igazolás nincs és nem is várható addig, amíg a technika fejlődése nem teszi lehetővé a fénysebesség megközelítését.
- c) Einstein a speciális relativitás-elmélet kidolgozásakor magától értetődően feltételezte a fenti tétel igazságát és azóta sem gondolkoznak a fizikusok a kísérleti igazoláson.
- d) Einstein állítását a Föld körül geostacionárius pályán keringő műholdakon végzett kísérletek igazolták.
- e) A tétel igazságát kísérletileg igazolja az energia-felszabadulással járó magreakciók esetén kimutatott tömegdefektus.

- f) Einstein összefüggése átlagos kémiai reakciók alapján végzett mérésekkel igazolható.
- g) Nem tudom a választ.
- 8. A téli nap az ablaküvegen keresztül besüt a szobába. Bár az üveg hőmérséklete nem változik, az üveg mögött álló sötét színű fémtárgy hőmérséklete 12°C-ot emelkedik a szobahőmérséklet fölé. Mi okozza a tárgy felmelegedését?**
- a) Az ablak üvegházhatása.
- b) A sötét fémtárgy elnyeli a napsugárzást, ami áthatol az ablak üvegén.
- c) A fém elnyeli az ultraibolya fotonokat és ezek gerjesztik a fém elektronjait.
- d) Az üveg nem engedi át az ultraibolya sugárzást, ezért a sugárzási egyensúly megbomlik.
- e) Az ablak anyaga elnyeli a sugárzás infravörös tartományát.
- f) Az ablak mögötti szobalevegő áramlása.
- g) Nem tudom a választ.
- 9. Mivel magyarázható, hogy az előző feladatban a melegedés értéke maximált (példánkban 12°C) és nem nő tovább folyamatosan?**
- a) Folyamatos melegedés esetén a fémtárgy elolvadna.
- b) A magasabb hőmérsékleten a fém már nem nyeli el az energiát.
- c) Az üveg nem enged át több energiát.
- d) Minden test mindig hőforrásként is viselkedik. Esetünkben a 12°C-kal felmelegített fémtárgy ugyanannyi energiát ad le a környezetének, mint amekkora energiát felvesz a Nap sugárzásából.
- e) A fém fajhője nem lineáris.
- f) A napsugárzás energiája 12°C hőmérsékletemelés után a Planck-féle fotonhipotézisnek megfelelően megváltoztatja a fém elektronszerkezetét.
- g) Nem tudom a választ.
- 10. A Nap energiáját magfúziós folyamatok biztosítják. A Nap másodpercenként $4 \cdot 10^{26}$ J energiát sugároz szét a világűrbe. Mennyit változik egy nap alatt a sugárzás következtében a Nap tömege?**
- a) A Nap tömege nem változik, hiszen a sugárzásnak nincs tömege.
- b) A Nap a csillagfejlődés során a „vörös óriás” állapot felé halad, így a méretével együtt a tömege is nő.
- c) A Nap tömegnövekedése napi 31,5 kg.
- d) A Nap tömege az Einstein által megfogalmazott tömeg-energia ekvivalencia értelmében napi $4 \cdot 10^{14}$ kg-mal csökken.
- e) A Nap sugárzása a magas hőmérsékletének következménye és semmi kapcsolatban nem áll a Nap tömegével, ezért a Nap tömeg napról napra biztosan nem változik.
- f) Az anyagmegmaradás elve értelemben a Nap tömege csak a „napszél” következtében csökken, de ennek kiszámítása a megadottak alapján nem lehetséges.
- g) Nem tudom a választ.

Manapság sokat lehet hallani, illetve olvasni a médiában arról, hogy egy-két évtizeden belül elsősorban megújuló energiák, ezeken belül is leginkább a nap-, a szél-, illetve a vízenergia segítségével fogja megoldani az emberiség az energia problémáit. A Nap energiáját az elektromos energiatermelés mellett hőenergia előállítására is használják, a szél, illetve a víz energiája gyakorlatilag csak az elektromos energia termelésére fordítódik.

A következő teszt kérdések Magyarország energiatermelésére vonatkoznak. Szerinted melyik válaszok adják meg a helyes értékeket?

11. Milyen részarányt képviselnek Magyarország teljes energiatermelésében jelenleg a napenergiát hasznosító berendezések?

- a) 1-2 %
- b) 3-5 %
- c) 8-10 %
- d) 10 % feletti

12. Véleményed szerint átlagosan mekkora hatásfokkal működnek ezek a berendezések?

- a) 15-20 %
- b) 25-30%
- c) 35-40 %
- d) 40 % feletti

13. Milyen részarányt képviselnek Magyarország elektromos energiatermelésében jelenleg a szélenergiát hasznosító berendezések?

- a) kevesebb, mint 0,1 %
- b) 1-2 %
- c) 4-6 %
- d) 10 % feletti

14. Milyen részarányt képviselnek Magyarország elektromos energiatermelésében jelenleg a vízenergiát hasznosító berendezések?

- a) kevesebb, mint 1 %
- b) 3-5 %
- c) 8-10 %
- d) 10 % feletti

15. Milyen részarányt képvisel Magyarország elektromos energiatermelésében jelenleg a Paksi Atomerőmű?

- a) kevesebb, mint 10 %
- b) 15-20 %
- c) 35-40 %
- d) 45-50 %