

KÖRNYEZETI FIZIKA

Dr. Ujfaludi László

ELŐJÁRÓBAN

Napjaink globális környezeti problémái mindenki számára ismereteseek. Az üvegházhatás, az ózonréteg elvékonyodása, egyes fajok kihalása, az erdőirtások okozta károk, a környezet elsavanyodása és egy sor kisebb, helyi környezeti probléma azonban csak megfelelő természettudományos háttérismeret birtokában érthető meg, még inkább érvényes ez az egyes környezeti problémák elhárítását célzó törekvésekre.

Másrészt a környezeti problémák tipikusan interdiszciplináris jellegűek, amelyek megértése, kezelése csak több tudományág együttműködése révén lehetséges. A probléma komplexitásától függően megközelítéséhez szükséges lehet egyes természettudományok (fizika, kémia, biológia, ökológia stb.), sőt társadalomtudományok (szociológia, közgazdaságtan stb.) ismerete is. Komplex problémák megoldása természetesen csak az összes érintett szakterület együttműködése révén képzelhető el. A problémák többsége azonban már egyszerűbb eszközökkel is kezelhető, ennek megfelelően alakultak ki a már hagyományosnak nevezhető környezet-orientált tudományágak, mint pl. a környezetfizika, környezetkémia, környezetbiológia stb.

Jelen összeállítás a környezeti problémák természettudományos alapjait ismerteti röviden, a közérthetőség szem előtt tartásával. Az anyag tárgyalása során azt az alapelvet követtük, hogy a fizika a természeti jelenségek legáltalánosabb (legegyszerűbb) törvényeit tartalmazza, vagyis azokat, amelyek egy magasabb szinten jelennek meg a kémiában, biológiában stb. A problémák komplex jellege miatt azonban a tárgyalásmód természetesen nem maradhat meg a tisztán fizikai szemléletnél, óhatatlanul megjelennek bizonyos "áthallások" a biológia, kémia, sőt még a társadalomtudomány irányában is.

A könyv fontos fejezete a rendszerek általános tulajdonságainak elemzése, valamint a rendszerek és a modellek kapcsolatának, a modellek típusainak vizsgálata. Ezzel a témával a bevezető fejezet foglalkozik, az itt elmondottak alkalmazása a környezeti rendszerekkel foglalkozó 1. fejezetben jelenik meg. Jelentős helyet foglal el az anyagban az energiaipar és annak környezeti problémái (2. fejezet). Fontosnak tartottuk ezen belül a megújuló energiaforrások tárgyalását, mivel a globális környezeti problémák súlyosbodása és a hagyományos energiahordozók kimerülése miatt valószínűleg ezek jelentik majd az emberiség legfőbb jövőbeli energiaforrásait.

BEVEZETÉS. RENDSZER ÉS MODELL

Rendszerek

A *rendszer* általánosan ismert és kiterjedten használt fogalom, pl. ennek a jegyzetnek az olvasója valószínűleg egy oktatási rendszer tagja. A szoba, ahol tartózkodunk, rendelkezik fűtési-, esetleg légkondicionáló rendszerrel. Amikor utazunk, a közlekedési rendszert terheljük. Valamennyiünk szervezetében működik a vérkeringési- és emésztőrendszer, amelyek működését az idegrendszer szabályozza. Mit is jelent hát a "rendszer" fogalom? Hogyan lehetséges, hogy ennyi féle, egymástól különböző dologra ugyanazt a szót használjuk? A "rendszer" fogalmának értelmezését néhány, a könyvtárakban könnyen hozzáférhető enciklopédia alapján az alábbiakban idézzük:

1. "Természeti jelenségeknek, anyagi részecskéknek bizonyos törvényszerű összefüggések alapján egy zárt egészbe tartozó összessége." (A Magyar Nyelv Értelmező Szótára)
2. "Egymással meghatározott összefüggésben lévő elemek egységes egészet képező összessége. A rendszer jellegű objektum nem redukálható egyes elemeire és a közöttük fennálló egyes viszonyokra. A rendszer jellegű objektum sajátos egység a környezettel, többnyire más, magasabb szintű rendszer eleme, saját alkotóelemei pedig alacsonyabb szintű rendszert képeznek." (Filozófiai Kislexikon)
3. "Egymással meghatározott viszonyban lévő elemek egységes egészet képező halmaza. Alkatrészeinek kapcsolódási módja adja a rendszer szerkezetét. A rendszer, mint egész olyan integratív sajátosságokkal is rendelkezik, amelyeket alkatrészei (alrendszerei, elemei) nem mutatnak... A rendszerek hierarchiát alkotnak és alrendszerekre bonthatók." (Jövőkutató Fogalomtár)
4. "Anyagi rendszer: azon, egymással kölcsönhatásban lévő anyagi testek összessége, amelyeket sajátoságaik tanulmányozása céljából elkülönítünk a környező világ többi tárgyától. Mindent, ami nem számít a rendszerhez, környezetnek nevezünk." (Természettudományi Lexikon)

A fenti definíciók együttesen fejezik ki a rendszer fogalom jelentését, külön-külön (talán a 3. definíciót kivéve) csak részleges tulajdonságokat világítanak meg. Lássuk most a problémának egy másik közelítését.

A fejezet elején említett rendszerek nagyon különböző alkotórészekből állnak: diákokból, tantermekből, laboratóriumokból, elektromos vezetékekből, kapcsolókból, járművekből, izomszövetekből, idegrostokból, stb. A *rendszer* szó kapcsolatot teremt ezek között a különböző dolgok között, ily módon egy általános jelentést hordoz.

A *rendszer* fogalomnak egy mélyebb értelme is kiviláglik a fenti konkrét példákból: az, hogy ezek a rendszerek valamilyen módon működnek. Pl. a közlekedési rendszer embereket vagy árut szállít, a fűtési rendszer melegvizet vagy levegőt szállít és fűti a hozzákapcsolt helyiségeket, stb. Tehát nyilvánvalóan minden egyes említett rendszerben fennáll egy anyagáramlás. Ennek természetes feltétele, hogy mindegyiküknek kell energiaforrással rendelkeznie. A fentiekhez hasonló rendszerek listáját és azok működésének leírását bárki folytathatja gondolatban; minél több példát gondolunk végig, annál inkább nyilvánvaló lesz, hogy valamennyi rendszer nagyjából a következő általános tulajdonságokkal jellemezhető:

- elemekből, részekből áll, amelyek között funkcionális kapcsolat van;
- szerkezet és szervezethez jellemző;
- működése során anyagáramlás történik;
- az anyagáramlás létrehozásához és fenntartásához a rendszer energiaforrással rendelkezik.

A rendszerekben tehát anyag- és energiaáramlás történik; bonyolultabb, magasabb szervezettségű rendszereknél ehhez még információáramlás is járul.

A környezeti rendszerek összetett termodinamikai rendszerek, amelyek működésének legáltalánosabb törvényeit a fizika fogalmazza meg. Másfajta szóhasználatnál ezeket a rendszereket energia-rendszereknek is szokás nevezni, hangsúlyozva az energia fontosságát. Az alábbiakban a rendszerek néhány általános jellemvonását foglaljuk össze; az elemzések elsősorban környezeti rendszerekre érvényesek.

A rendszerek többsége jól körülhatárolható területen, vagy térfogatban foglal helyet. Ezt valamilyen határolás veszi körül, amelyen keresztül a rendszernek a környezettel való kapcsolata lejátszódik. Ilyen rendszer pl. egy sejt, egy vízgyűjtőterület, egy lombik a laboratóriumban, vagy akár egy felhő az égen (bár az utóbbi határolása meglehetősen bizonytalan).

A határoláson belül helyezkednek el mindenekelőtt a rendszer elemei, pl. atomok, molekulák, homokszemcsék, esőcseppek, vagy akár élőlények: nyulak, rókák stb., amelyek mind térben és időben léteznek. Minden elem rendelkezik egy sor tulajdonsággal és állapottal. Két vagy több elem között, vagy az elemek különböző állapotai között kapcsolatok, összefüggések állnak fenn, amelyek együttesen a rendszer szervezési sémáját alkotják. A rendszernek egy pillanatnyi állapotát úgy jellemezhetjük, hogy akkor annak összes elemei, azok egyes tulajdonságai és a közöttük lévő kapcsolatok függvényei meghatározott értékkel rendelkeznek.

Egy rendszerben lejátszódó folyamatok, ill. a rendszer minden egyes állapota erősen függ a határok tulajdonságaitól. Ebből a szempontból három féle rendszert különböztetünk meg (**B.1 ábra**).

Izolált rendszereknél a rendszer és környezete között semmilyen kölcsönhatás nincs. (A termodinamikában az ilyen rendszereket gyakran zárt rendszereknek nevezik.) Ilyeneket csak laboratóriumban tudunk létrehozni, fontosságuk mégis igen nagy a tiszta, idealizált folyamatok vizsgálatában.

Zárt rendszerek határolásán át energia áramolhat a környezetbe és a környezetből a rendszerbe. Természeti rendszereknél szintén ritka.

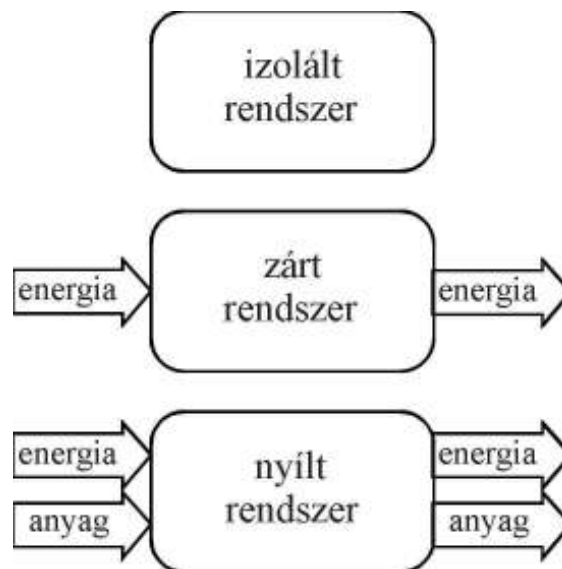
Nyílt rendszerek esetén a környezet és a rendszer között energia- és anyagáramlás történhet a határoló felületen keresztül. Az anyagáramláson kívül itt kémiai energia, sugárzási energia, stb. áramolhat. Lényegében az összes környezeti rendszer nyílt rendszer és működése az állandó energia- és anyagáramlás révén valósul meg.

A rendszerben bekövetkezett változások egy meghatározott *kezdeti állapotból* egy *végállapotba* való átmenet révén mennek végbe, eközben valamilyen *útvonalon* haladnak végig. A változásoknak ezt a sorozatát a rendszer *folyamatainak* nevezzük.

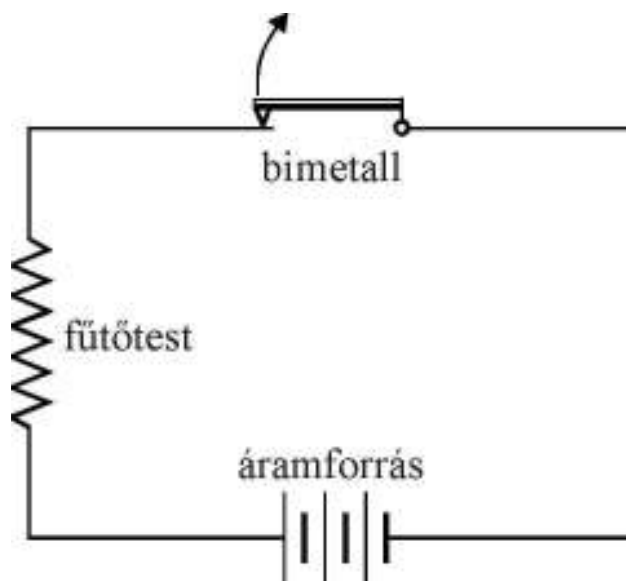
Szabályozások

A rendszerek többsége működés közben valamilyen viszonylag állandósult, egyensúlyi állapotokat valósít meg. A környezeti rendszerek esetében ez az egyensúly sohasem statikus (tehát állandó paraméterekkel jellemezhető), hanem egy ún. dinamikus egyensúlyi állapot, amely egy közelítőleg állandó középérték körüli ingadozásokból áll. A középértéktől történő szélsőségesen nagy eltérést a **negatív visszacsatolás** mérsékli.

A negatív visszacsatoláson alapuló szabályozás legegyszerűbb példája a termosztát (**B.2 ábra**). Az itt ábrázolt fűtési rendszer termosztátja egy bimetall, amely a hőmérséklet emelkedésekor meggömbül és a kapcsolót nyitja. Ha a hőmérséklet időközben lecsökken, a bimetall visszanyeri eredeti alakját, zárja az áramkört és a fűtés újra indul. A hőmérséklet nem szigorúan állandó értéken áll, hanem egy állandó érték körül ingadozik.



*B.1 ábra
A rendszerek osztályozása környezetükkel való kapcsolatuk szerint*



*B.2 ábra
A termosztát felépítése és működése*

Egy másik példa a negatív visszacsatolásra az élőlények un. homeosztázisa. (A *homeosztázis* az élőlényeknek az a képessége, hogy a külső paraméterek viszonylag tág határok közötti változása ellenére belső paramétereiket állandó értéken képesek tartani.) Az itt érvényesülő tendenciákat a **B.3 ábrán** vázoltuk. A koordináta-rendszer vízszintes tengelyén egy külső stressz (pl. hőmérsékletváltozás, pH-változás, stb.) mértékét, a függőleges tengelyen az élő szervezet egy belső paraméterének (pl. testhőmérséklet, gyomorsav pH-ja, stb.) változását ábrázoltuk. A stressznek egy bizonyos intervallumában a működés a homeosztázis-platóval jellemezhető. Ebben az esetben a negatív visszacsatolás a stabilitást biztosítani tudja. A stressz szélsőséges értéke (pl. túlságosan magas, vagy alacsony hőmérséklet) esetén azonban a stabilitás már nem biztosítható tovább, a szervezet működése rohamosan eltávolodik a normálistól; szélsőséges esetekben ez az egyed halálát is jelentheti. Ebben a tartományban már **pozitív visszacsatolás** érvényesül, vagyis a működés paraméterei egyre nagyobb mértékben eltérnek az egyensúlyi állapotától.

Egy másik példa a pozitív visszacsatolásra a földfelszín és a légkör egymásra hatása jéggel borított felszín (pl. gleccserek) esetén. A lehetséges folyamatokat a **B.4 ábrán** vázoltuk.

Tegyük fel, hogy kiinduláskor a légköri hőmérséklet csökken (pl. az ősztől évszaktól). Ennek hatására a jégtakaró mérete nő. A jéggel borított területek növekedése az albedo (a terület sugárzásra vonatkozó visszaverő képessége, pontos definícióját ld. az 1. fejezet 1.5. egyenleténél) növekedését eredményezi, vagyis nő a visszavert sugárzás hányada. Emiatt a hőmérséklet a felszínen tovább csökken, ami a jégtakaró további növekedését eredményezi (bal alsó ábra). Az ellenkező esetben (pl. a tél-tavas átmenetkor) ugyanez a folyamat fordított előjellel megy végbe: a hőmérséklet növekedésével a jégtakaró mérete csökken, ez az albedo csökkenését eredményezi, tehát csökken a visszavert, nő az elnyelt sugárzás mértéke, ami a hőmérséklet további emelkedését okozza. A jobb alsó ábrának megfelelő pozitív visszacsatolás jön létre jelenleg – elsősorban az Északi-tengeren – a globális felmelegedés következtében; ennek a folyamatnak további részleteit az Antropogén hatások az atmoszférában c. fejezetben tárgyaljuk.

A rendszerek szabályozását a **B.5 ábrán** vázolt séma alapján magyarázhatjuk. A rendszer részét képező jel-érzékelő (receptor) érzékeli a külvilág valamilyen jellemző paraméterét. Ennek értékétől függően üzenetet továbbít egy szabályozó elemnek, ahonnan további üzenet halad a végrehajtó elemhez. Ez utóbbi a változás jellegétől függően az adott paraméter növekedését, vagy csökkenését kezdeményezi a rendszeren belül.

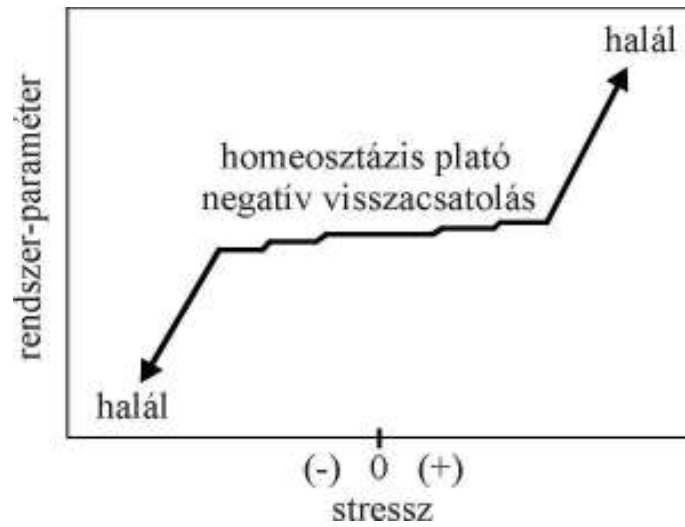
Bonyolult szabályozási folyamatok működnek egy ökoszisztémán belül, pl. két élőlény-csoport egymásra hatásakor. A **B.6 ábrán** egy ragadozó-zsákmány rendszer folyamatait mutatjuk be. A nyulak populációjának növekedése növeli a rókák populációját, a rókák számának növekedése viszont a nyulak számának csökkenését eredményezi (a ábra).

Ha az egyedszámok változását az idő függvényében ábrázoljuk, a b ábra szerinti periodikus változást kapjuk (az ábra grafikonja Kanadában a prémvadászok által beszolgáltatott hiúz- és nyúlprémek számának ingadozását ábrázolja). Nyilvánvaló a görbék menetéből a két faj szoros kölcsönhatása.

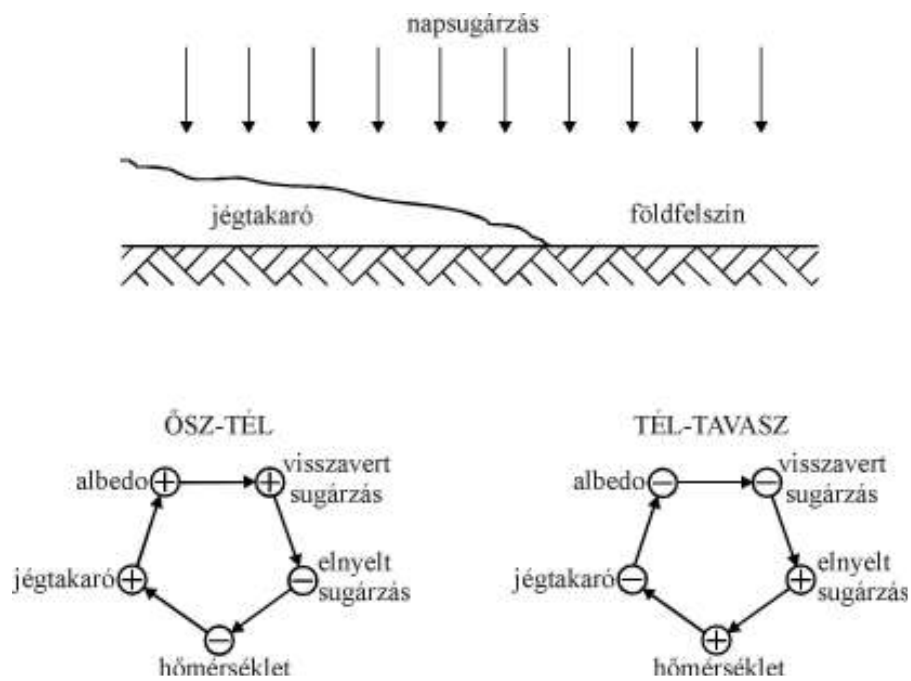
Összetett rendszerek

Rend, rendezetlenség, entrópia

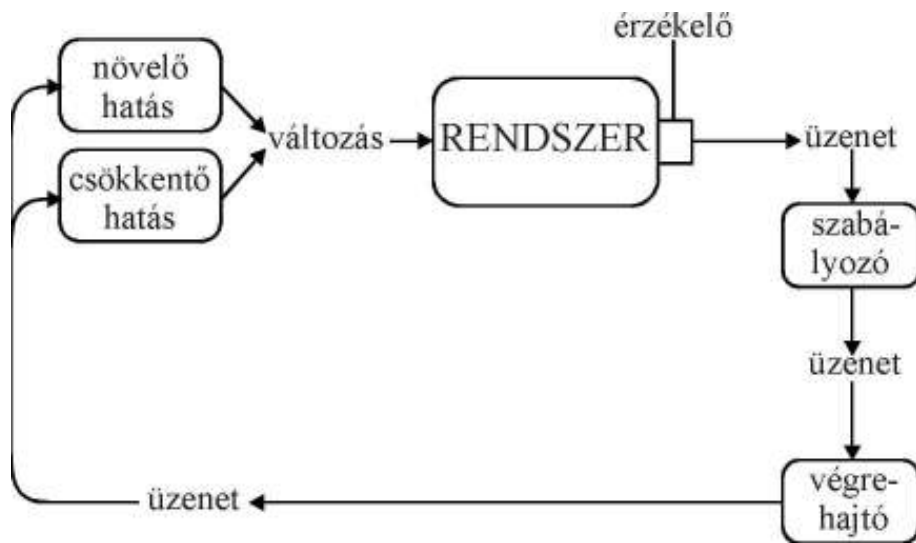
A sok elemből álló, összetett rendszerek elemeinek rendezett, vagy rendezetlen állapotát a fizikában az entrópia fogalmával fejezik ki. Minél rendezettebb egy rendszer, annál kisebb az entrópiája és fordítva: a rendezetlen állapotú rendszerek entrópiája magas. Most már csak a rendezettség, ill. a rendezetlenség fogalmát kell tisztázni. Ha egy rendszer rendezett, akkor érzékeny arra, ha két tetszőleges kis térfogatelemét felcseréljük; rendezetlen rendszerek az ilyen hatásra érzéketlenek.



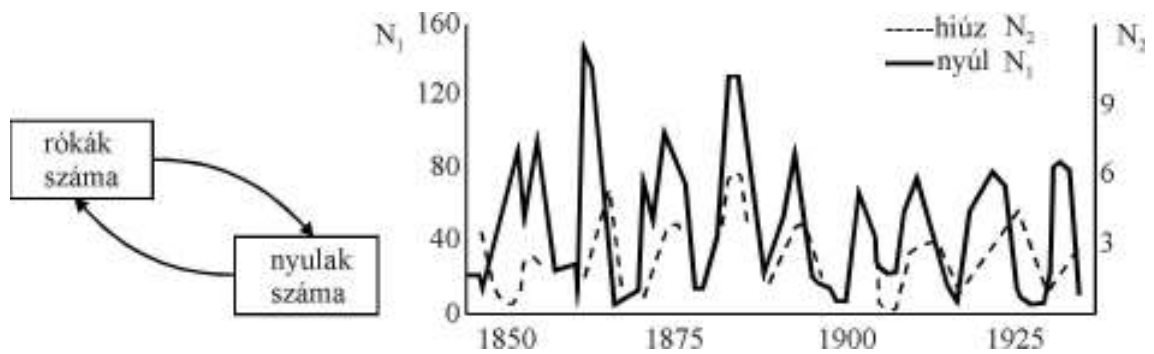
B.3 ábra
Az élő rendszerek homeosztázisa



B.4 ábra
Pozitív visszacsatolások a jégtakaró olvadásakor



B.5 ábra
A szabályozó körök működésének általános vázlata



B.6 ábra
Kölcsönhatások egy ragadozó-zsákmány rendszerben

Például képzeljünk el egy tartályba zárt homogén, állandó hőmérsékletű és nyomású gázt. A gázmolekulák a tartályban egyenletesen oszlanak el, tetszőleges két térfogatelem felcserélése a gáz állapotában semmilyen lényeges változást nem eredményez. Ebben a rendszerben a részecskék (a rendszer elemei) rendezetlenül helyezkednek el, véletlen jelleggel mozognak ide-oda, a rendszer entrópiája nagy. Ha egy élő sejt két kicsiny térfogatelemét cserélnénk fel, például a sejtfal és a sejtmag kicsiny részeit, akkor a sejt működésében igen nagy zavarok keletkeznének, a sejt akár el is pusztulhat. A sejt és az élő anyag igen magas fokon rendezett, alacsony entrópiájú rendszert alkot. Az ilyen rendszereknek igen nagy az információtartalma; ez csak energia befektetés árán valósítható meg. Az energiát a rendszer csakis a környezetéből képes felvenni, az alacsony entrópiájú, magas rendezettségi fokú rendszerek ezért csakis nyílt rendszerek lehetnek. (Az entrópiával kapcsolatos további elemzések a 2. fejezet "Energia átalakítások termodinamikája" c. szakaszában találhatók.)

Linearitás, nemlinearitás

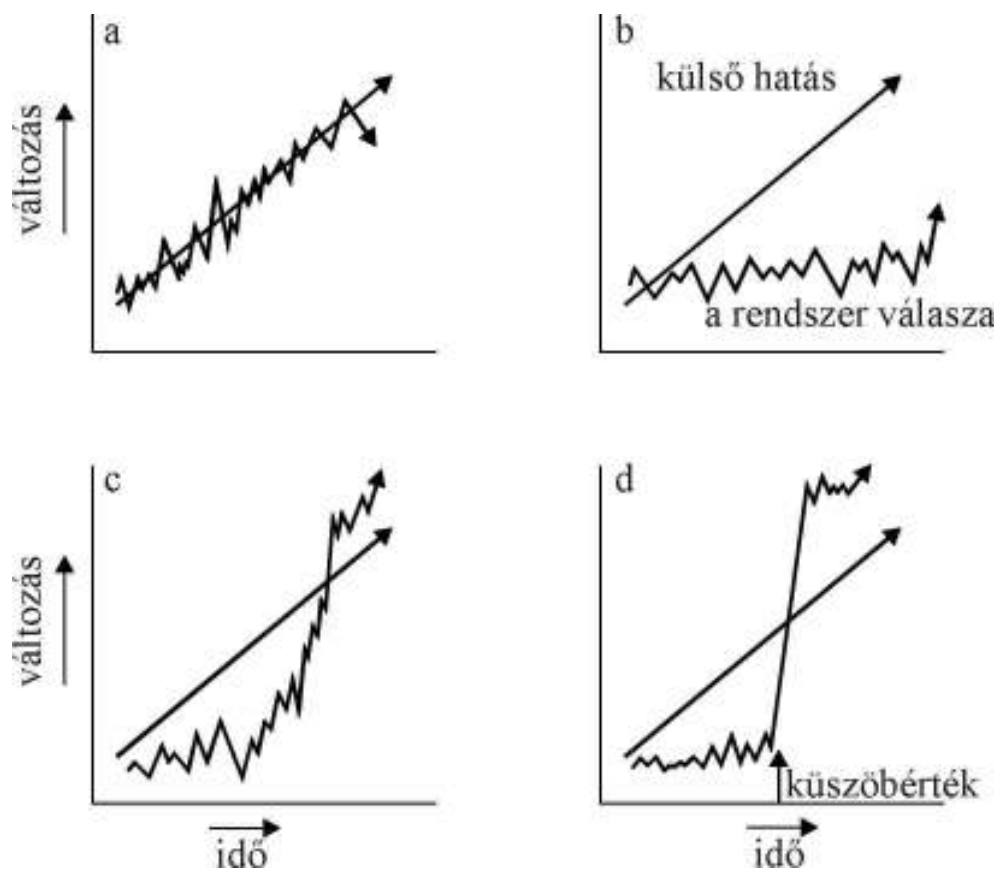
Tartós külső hatásokra a rendszerek különbözőképpen reagálhatnak. Ha a rendszerben lejátszódó változások (a rendszer "válasza") arányos a külső hatás nagyságával, akkor a rendszert lineárisnak nevezzük (**B.7a** és **b ábra**). Természetes rendszerek között ez igen ritka. A környezeti rendszereket általában a nemlinearitás jellemzi, mivel azok igen összetett rendszerek.

Már az olyan viszonylag egyszerű folyamatoknál, mint egy kiterjedt jégtakaró olvadása, jelentős nemlinearitások lépnek fel. Ha pl. $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ról indulunk, és a hőmérséklet nő, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig a jégtakaró tömege állandóan nő, az alatta lévő (a nagy nyomás miatt $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatt is keletkező) olvadék víz mennyisége nem változik jelentősen. $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ környezetében azonban a jégtakaró olvadás miatti méretcsökkenése egyre gyorsabbá válik és az olvadékvíz mennyisége rohamosan nő. A változások közelítőleg a **B.7c ábra** szerintiek.

Az ilyen jellegű változások még markánsabban jelennek meg a **B.7d ábrán**. Az ott ábrázolt folyamatban a külső hatás növekedésére egy küszöbérték eléréséig a rendszer alig észrevehetően reagál. A küszöbérték elérésekor a rendszer valamely paramétere drámai módon megváltozik és egy, az előzőtől erősen eltérő állapot következik be. Hasonló folyamat játszódik le pl. savas esők által érintett területeken. A természetes vizek és a talaj ún. pufferhatása miatt eleinte jelentős mennyiségű savas csapadék sem változtatja meg azok pH-értékét. Amikor azonban a puffer-kapacitás kimerült, a pH-érték rohamosan csökken (az ábra szerinti esetben a savasság nő), és rövidesen jelentkeznek ennek káros mellékhatásai. A környezeti rendszerek kémiai átalakulásaiban sok ilyen veszélyes, előre nem látható, hirtelen változás játszódhat le. Ezt a hatást váratlan jellege miatt gyakran kémiai pokolgép-effektusnak nevezik. Szomorú történeti példája a 7d ábrával jellemezhető környezeti katasztrófáknak az a halpusztulás, amely az USA-ban lévő Clear-tóban játszódott le 1962-ben; ez egyben a DDT által okozott környezeti károk egyik mintapéldája lett. Korábban a környező mezőgazdasági területeken nagy mennyiségű DDT-t használtak rovarirtó szerként. A vegyszer a természetes vizekkel a tóba szivárgott, majd a halak szervezetébe is bekerült (különösen gyorsan felhalmozódott a ragadozó halak testében). Kezdetben semmilyen hatás nem mutatkozott, mivel a DDT a test zsírszövetébe épül be. Később azonban - táplálékhiányos évszakok idején - a halak szervezete a zsírszöveteket kezdte felhasználni, ekkor a felhalmozódott DDT a szervezet anyagcsere-rendszerébe került és toxikus hatása következtében tömeges halpusztulás következett be.

Önszabályozó rendszerek

A természetben sokféle önszabályozó rendszer létezik. Ilyen például a homokdomb növekedése. Ha egy vízszintes felületre vékony függőleges csövön át homokot szórunk, kúp alakú homokdomb keletkezik, amely folyamatosan növekszik mindaddig, amíg a homok adagolását



B.7 ábra
Lineáris és nemlineáris rendszerek

folytatjuk. Eközben a kúp felülete kisebb-nagyobb változásokon megy keresztül, átmenetileg lavinaszerű homokfolyások alakulnak ki, amelyek vándorolnak a felület mentén. A kúp szöge azonban állandó marad, bármilyen magasra építjük is a dombot.

A földfelület különböző borítottságú (albedójú) területei a napsugárzás hatására különbözőképpen melegszenek fel. A felmelegedett felszínről induló konvektív légáramlás rendszere ilyenkor úgy alakul ki, hogy a felfelé áramlás mellett spontán módon lefelé irányuló áramlási sávok is kialakulnak és a rendszer önszabályozóvá válik. Az ily módon kialakuló cirkulációs cellákat Benard-féle celláknak nevezzük; a szélcsend és szél esetén kialakuló cellákat a **B.8 ábrán** ábrázoltuk. (Természetesen a valóságos cellák az ábrázoltnál jóval szabálytalanabbak.)

Önszabályozó rendszer az élő sejt és az élő szervezetek – gondoljunk testünk különböző szabályozó funkcióira (testhőmérséklet, vércukorszint, a gyomorsav pH-ja, stb). A Föld bioszférája is önszabályozó rendszer, amely a Nap sugárzó energiájának felhasználásával biztosítja önfenntartó funkcióinak folyamatos működését. *James Lovelock* Gaia-elmélete szerint a bioszféra és az élettelen természeti környezet együttesen alkot egy grandiózus önszabályozó rendszert. Ennek működése során az élővilág és az élettelen környezet egymásra hatása stabilizál egy sor környezeti paramétert, amelynek eredményeképp az élővilág számára kedvező létfeltételek jönnek létre. Gaia szabályozó funkciói közül itt csak kettőt említünk meg: a légkör összetételének hosszútávú stabilitását és a tengerek sótartalmának állandóságát. (A Gaia-elmélettel részletesen foglalkozunk ennek a jegyzetnek az utolsó fejezetében.)

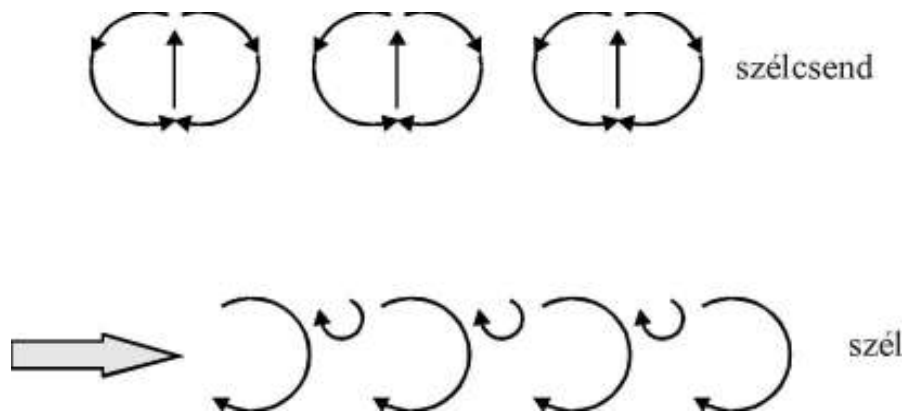
Kaotikus rendszerek

Edward Lorentz amerikai meteorológus néhány évtizede számítógépes időjárási előrejelzést készített a meglévő meteorológiai adatok alapján. Igen kismértékben megváltoztatva a bemeneti adatokat, a programot újra lefuttatta és meglepetve tapasztalta, hogy a végeredmény – a másnapra kapott előrejelzés – igen nagy eltérést mutat az előzőtől. Az olyan rendszereket, amelyek működése nagyon érzékeny a kezdeti feltételekre, kaotikus rendszereknek nevezzük. Ezek vizsgálata az utóbbi évtizedekben külön tudományággá szélesedett, egyre többet tudunk a kaotikus rendszerek tulajdonságairól. Bebizonyosodott pl. hogy egyes élő rendszerek, életközösségek is kaotikussá válhatnak, különösen hajlamosak erre a homogenizált (monokultúrák) rendszerek; a heterogén, nagy biodiverzitású rendszerek sokkal kevésbé. Az önszerveződő rendszerek a rend és a káosz határán működnek.

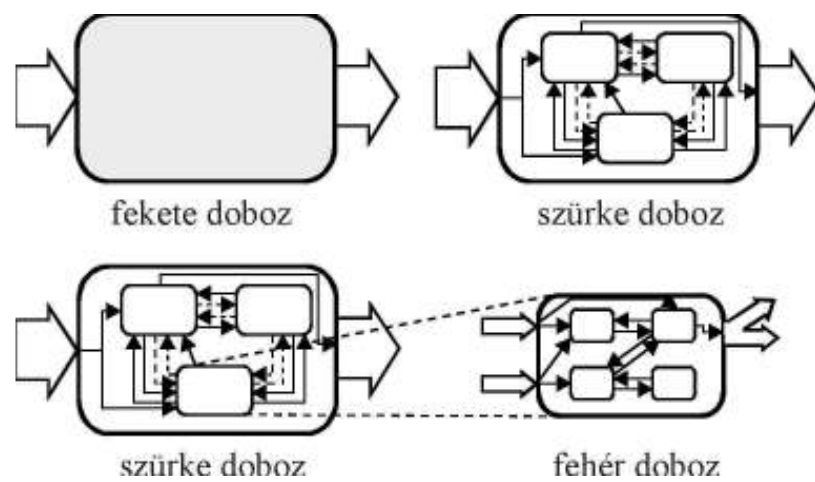
Modellek

A "modell" szó és a hozzá tartozó fogalom közismert és kiterjedten használjuk a köznapiban. Általános jelentése szerint közelítőleg a "másolat", "idealizált kép", vagy "szemléltető eszköz" fogalmak a legközelebbi megfelelői. Tudományos szempontból a modell fogalom jelentése sok tekintetben ezekhez hasonló. A modell segítségével ui. a valóságot, vagy annak egy részét mindig leegyszerűsítjük, idealizáljuk, esetleg annak szemléletes képét adjuk. Pl. képzeljük el egy épület makettjét. Ez kizárólag a külső megjelenés szemléltetésére szolgál. Arra azonban már nem alkalmas, hogy az épület lengéseit vizsgáljuk vele különböző szélsőségek esetén. Építhetünk egy olyan modellt, amely geometriailag az épület pontos kicsinyített mása, és megfelelő konstrukció esetén ez a modell már alkalmas lehet a fenti feladat megoldására is. A modell tehát több, mint az egyszerű szemléltetésre szolgáló makett. (Ugyanígy viszonylik egy match-box autómodell az autógyár szélcsatornájában vizsgált modellhez, amelyen egy új karosszéria-típus légellenállását vizsgálják.) A modelleket több szempont szerint osztályozhatjuk.

Teljesítmőképessége szerint a modell lehet: fekete doboz modell, szürke doboz modell és fehér (vagy átlátszó) doboz modell (**B.9 ábra**).



*B.8 ábra
Benard-féle cellák szélcsend és szél esetén*



*B.9 ábra
A modellek típusai*

- A **fekete doboz modell** esetén nem ismerjük a modell (ill. az általa leképezett rendszer) belső felépítését, működését, csak a bemenetet és a hozzá tartozó kimeneteket. Ebben az esetben a modell segítségével várható eseményekre csak ismert input-output empirikus kapcsolatok alapján tehetünk előrejelzéseket. (Ide sorolhatók az olyan régi időjárás-előrejelzések, mint pl. az, hogy ha az ég alja este vörös, akkor másnap szeles idő várható, vagy a periodikusan jelentkező természeti események előrejelzése, pl. egyes napfogyatkozások régebbi előrejelzése azok periodicitásának ismerete alapján.)
- A **szürke doboz modell** esetén a modell működéséről is vannak ismereteink, de azok még nem teljes körűek. Ide sorolhatók a különböző hidrológiai modellek, vagy a jelenlegi időjárás-előrejelzési modellek. A modell által kapható előrejelzések megbízhatósága elég nagy, de nem 100%.
- A **fehér (vagy átlátszó) doboz modell** a vizsgált jelenségről teljes körű ismeretet jelent, a modell által nyerhető előrejelzések megbízhatóak. Ilyen modellek általában csak technológiai berendezések esetén képzelhetők el. Itt sem 100% az előrejelzés megbízhatósága, mert nem lehet előrejelezni olyan váratlan eseményeket, mint pl. anyaghibából eredő törések, üzemzavarok stb. Egyesek szerint fehér doboz modellek csak abban az értelemben léteznek, amennyiben összetett folyamatok egyes részfolyamatairól tökéletes képünk lehet és akkor ennek a részfolyamatnak a modellje tekinthető fehér doboz modellnek, míg a folyamat egészét tekintve csak szürke doboz modelltől beszélhetünk.

Működésük szerint megkülönböztetünk fizikai modelleket, és eszmei modelleket.

- A **fizikai modellek** valamilyen anyagokból felépített, kézzel fogható eszközök, berendezések, amelyek egy rendszer bizonyos folyamatairól megfigyelés, vagy mérés útján megbízható információkat adnak. Ilyenek pl. az autógyárakban használt karosszéria-modellek, amelyeket szélcsatornában vizsgálnak, vagy ilyen egy folyószakasz kicsinyített áramlási modellje. A fizikai modellek egyik változata az ún. **analóg modellek**, amelyekben a vizsgálandó fizikai folyamatot egy másik, méréstechnikailag könnyebben kezelhető folyamattal helyettesítünk. Ilyen pl. az áramlások vizsgálatára használt elektromos analóg modell, amelyben a valóságos áramlási probléma várható paramétereit egy elektromos modellben, a jóval könnyebben mérhető elektromos paraméterek alapján határozzuk meg.
- Az **eszmei modellek** olyan modellek, amelyeknek nincs kézzel fogható fizikai megjelenése. Két kategóriát különböztetünk meg:
 - a **kvalitatív modellek** valamely természeti folyamatra vonatkozó elvi magyarázatokat, a folyamatok minőségi értelmezését tartalmazzák. Számszerű előrejelzést nem adnak, legfeljebb a várható folyamatok trendjét és a paraméterek nagyságrendjét adják meg (pl. a következő fejezetben tárgyalásra kerülő légköri modellek);
 - a **kvantitatív modellek** segítségével pontos előrejelzést adhatunk a vizsgált folyamat paramétereit illetően (pl. egy korszerű számítógépes időjárási modell előrejelzi, hogy másnapra mekkora hőmérséklet, hány mm csapadék várható).

A vizsgált folyamat időbeli lefolyásától függően beszélhetünk időtől független, vagy **stacionárius modellekről**. Ezekben olyan jelenségek vizsgálhatók, amelyek végbemenetele az idő függvényében nem változik. Az olyan modelleket, amelyek időben változó jelenségek vizsgálatára alkalmasak, **nem-stacionárius** (tranzienst) modelleknek nevezzük.

A vizsgált folyamat színterének geometriai kiterjedése szerint beszélhetünk egy-, két- és háromdimenziós modellekről.

- Ha a vizsgált jelenség csak az egyik (pl. az x) térkoordinátától függ, akkor modellünk egydimenziós, pl. abban az esetben, ha a szennyezettség alakulását egy folyó hossza mentén vizsgáljuk.
- Ha a paraméterek változását két térkoordináta (pl. x és y) függvényében vizsgáljuk, kétdimenziós modellre van szükségünk, pl. ha egy folyó szennyezettségét hossz- és keresztirányban is vizsgáljuk.
- Ha a változások mindhárom térkoordináta irányában jelentősek lehetnek, akkor vizsgálatuk háromdimenziós modellt igényel, pl. az előző eset azzal a különbséggel, hogy a szennyezés mértékét a mélység függvényében is vizsgáljuk.

1. KÖRNYEZETI RENDSZEREK

A környezeti problémák szempontjából legfontosabb (védeni kívánt) bioszféra, ill. ökoszféra az élettelen természeti környezet három nagy rendszere: az atmoszféra, a hidroszféra és a litoszféra (a földkéreg) belsejében és azok határterületein foglal helyet. Mindenekelőtt szükségesnek tartunk néhány fogalom-meghatározást. A bioszféra a Föld teljes élővilága. Az ökoszféra a teljes élővilág és az azzal kölcsönhatásban lévő élettelen környezet együttese. Ökoszisztémának nevezzük az egymással és az élettelen környezettel kölcsönhatásban lévő növények és állatok életközösségét. Ebben az értelemben beszélünk erdei-, folyami-, stb. ökoszisztémáról. Az ökológia az a tudomány, amely az élőlények egymással és élettelen környezetükkel fennálló kapcsolataival foglalkozik. Az atmoszférát, a hidroszférát, a litoszférát, valamint az öko- és a bioszférát szokás egyenként is környezeti rendszernek nevezni. Ezek között állandó anyag- és energiaáramlás van és egy nagy RENDSZER (Lovelock szóhasználatával: GAIA) alrendszerének is tekinthetők. Az atmoszféra, a hidroszféra és a bioszféra szinte kizárólagos energiaforrása a Nap sugárzó energiája. Ebben a fejezetben az atmoszféra és a hidroszféra főbb folyamataival foglalkozunk, külön figyelmet szentelve az emberi tevékenységek természetes állapotra gyakorolt hatásainak. A litoszféra folyamatait (kéregmozgások, vulkanizmus, lemeztektonika, stb.) a Környezeti geológia c. előadás keretében tárgyalják.

AZ ATMOSZFÉRA

A Föld sugárzási egyensúlya

A Föld energiakészletének túlnyomó része a Naptól származik, ehhez képest a többi energiaforrás gyakorlatilag elhanyagolható, különösen ha figyelembe vesszük, hogy a fosszilis energiahordozók is a napenergia akkumulált termékeinek tekinthetők.

A Nap felszíni hőmérséklete 5800 K és gyakorlatilag fekete testnek tekinthető, amelyre Planck sugárzási törvénye érvényes. Ennek értelmében a sugárzás intenzitása az alábbi formulával írható fel:

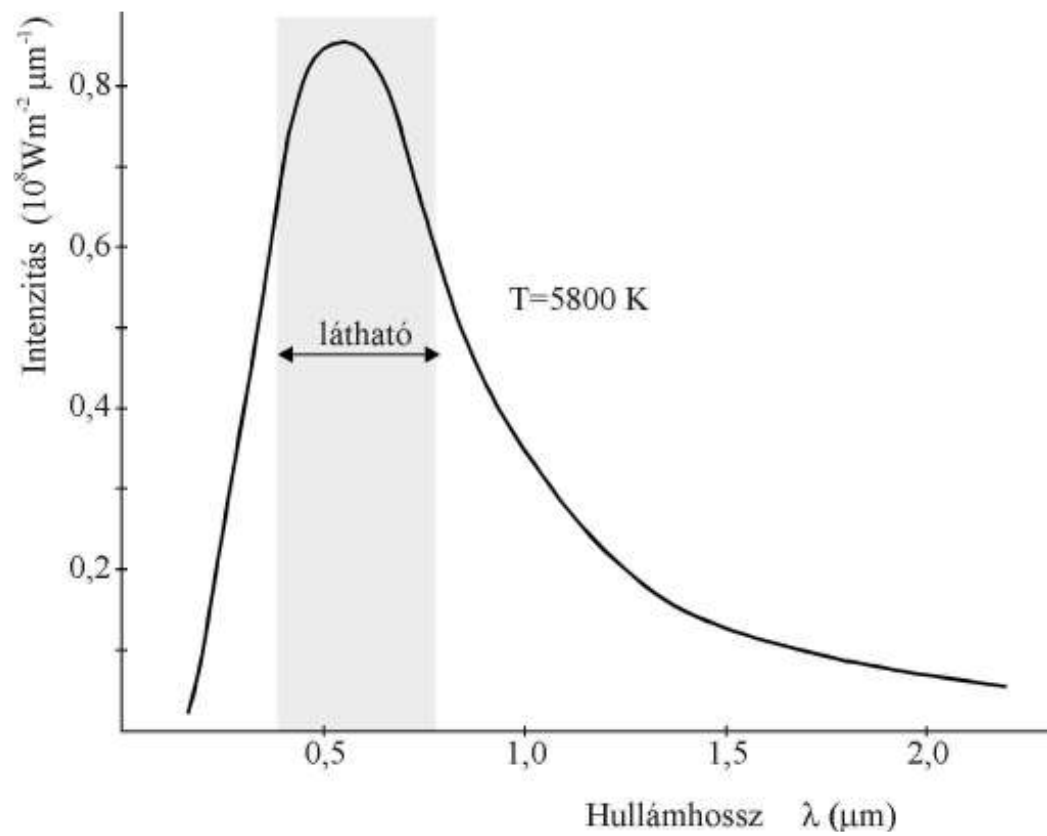
$$I_{\lambda} = \frac{2\pi c^2 h \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1} \quad (1.1)$$

ahol I_{λ} az egységnyi felületen időegység alatt kisugárzott energia, c a fény sebessége, h a Planck-állandó, λ a sugárzás hullámhossza, k a Boltzmann-állandó, T az abszolút hőmérséklet. A Nap sugárzási spektrumát az **1.1 ábra** mutatja.

Az intenzitás maximuma a látható fény tartományába esik. Az intenzitást a teljes hullámhossz-tartományra összegezve a felületegységre eső kisugárzott összteljesítményt kapjuk, amely a Stefan-Boltzmann törvény szerint:

$$P = \sigma T^4 \quad (1.2)$$

ahol $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4\text{)}$, T az abszolút hőmérséklet.



1.1 ábra
A Nap sugárzási spektruma

Az energia-maximumhoz tartozó hullámhossz és az abszolút hőmérséklet kapcsolatát a Wien-féle eltolódási törvény adja meg:

$$\lambda_{max}T = C$$

ahol C állandó, mértékegysége a hullámhossz mértékegységétől függ. A Wien-törvénynek megfelelően növekvő hőmérséklet esetén a maximumhoz tartozó hullámhossz csökken, és fordítva. A Nap teljes felületéről kisugárzott teljesítmény:

$$P_N = 4R^2\pi\sigma T_N^4 \quad (1.3)$$

ahol R a Nap sugara, T_N a Nap felszíni hőmérséklete. A Nap-Föld közepes távolságában ($d = 150 \times 10^9$ m) lévő gömb egységnyi felületére időegységenként érkező energia (az ún. szoláris állandó):

$$S = \frac{P_N}{4d^2\pi} \quad (1.4)$$

Az adatokat behelyettesítve $S = 1380 \text{ W/cm}^2$ adódik. Feltételezve, hogy a Föld felszínén stacionárius állapot alakult ki, vagyis a be- és kisugárzott energia egyenlő, az alábbi mérlegegyenlet érvényes:

$$(1-a)r^2\pi S = 4r^2\pi\sigma T_F^4$$

ahol a visszaverődési tényező (albedo) a reflektált és a beeső sugárzás intenzitásának hányadosa:

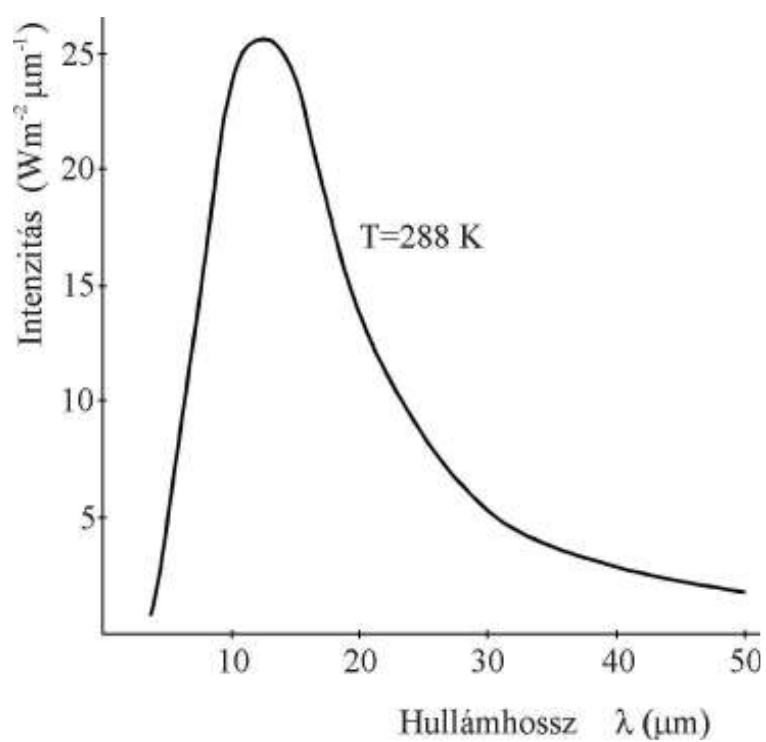
$$a = \frac{I_{refl}}{I_{be}} 100[\%] \quad (1.5)$$

r a Föld sugara T_F a Föld felszíni hőmérséklete. $a = 0,34$ planetáris albedo-értékkel számolva $T_F = 250 \text{ K}$ érték adódik, a valóságos érték $T_F = 288 \text{ K}$ (15°C). Az eltérés oka az üvegházhatás által okozott energia-visszatartás.

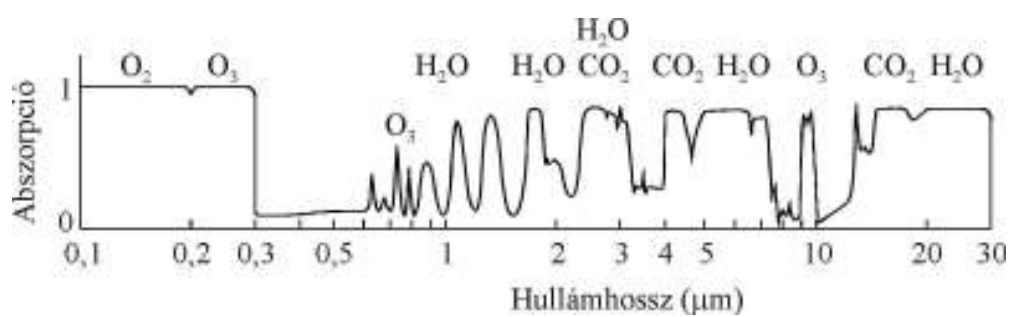
A Föld kisugárzásának energia-eloszlása az **1.2 ábrán** látható. A légkört alkotó gázok energia-elnyelése (abszorpciója) a hullámhossz függvényében változó; spektrális eloszlását az **1.3 ábrán** ábrázoltuk. A rövidhullámú tartomány abszorpciója a Napról érkező, a hosszuhullámú tartomány abszorpciója pedig a Földről kiinduló sugárzás intenzitását csökkenti. Az utóbbi hatás a légkör hosszú hullámú sugárzásra vonatkoztatott b áteresztési tényezőjével vehető figyelembe, amely a légkörből kilépő és a földfelszín által kibocsátott sugárzás intenzitásának hányadosa. Üvegházhatás nélkül $b = 1$ lenne, a valóságos érték azonban az üvegházhatás miatt közelítőleg $b = 0,6$; ezt az értéket a fenti mérlegegyenletbe írva:

$$(1-a)r^2\pi S = 4r^2\pi\sigma T_F^4 b \quad (1.6)$$

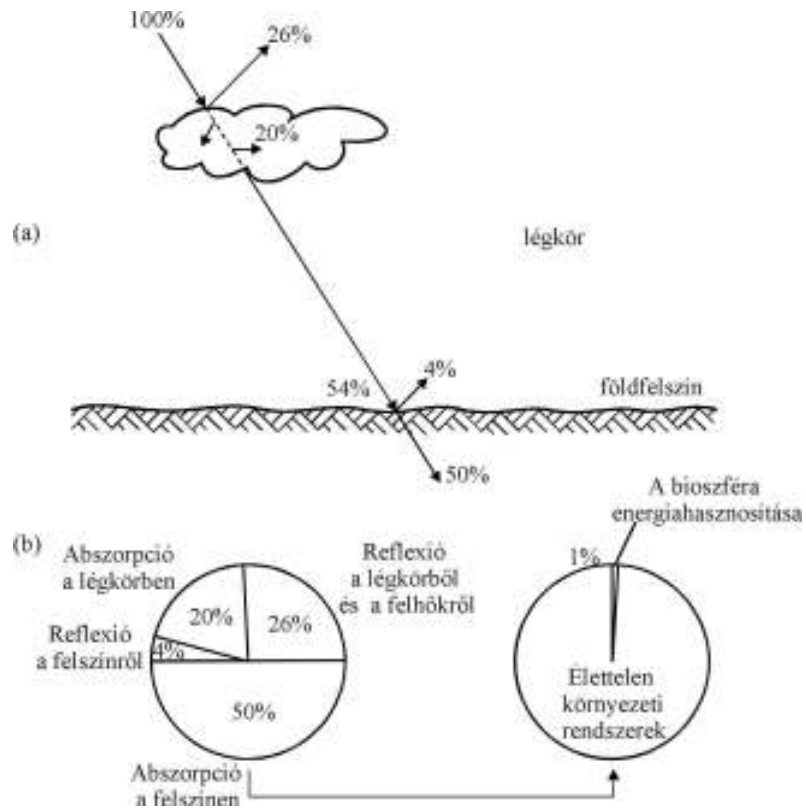
Az ily módon korrigált egyenletből már valóban kiadódik a földfelszín ($288 \text{ K} = 15^\circ\text{C}$) hőmérséklete. A Napról érkező összes energia megoszlása az **1.4a** és **b ábra** szerint alakul. Az **1.4b ábra** jobboldali része a sugárzás felszínén abszorbeált hányadának megoszlását mutatja. Látható, hogy ennek túlnyomó része (99%) az élettelen környezeti rendszerek



1.2 ábra
A Föld felületének kisugárzási spektruma

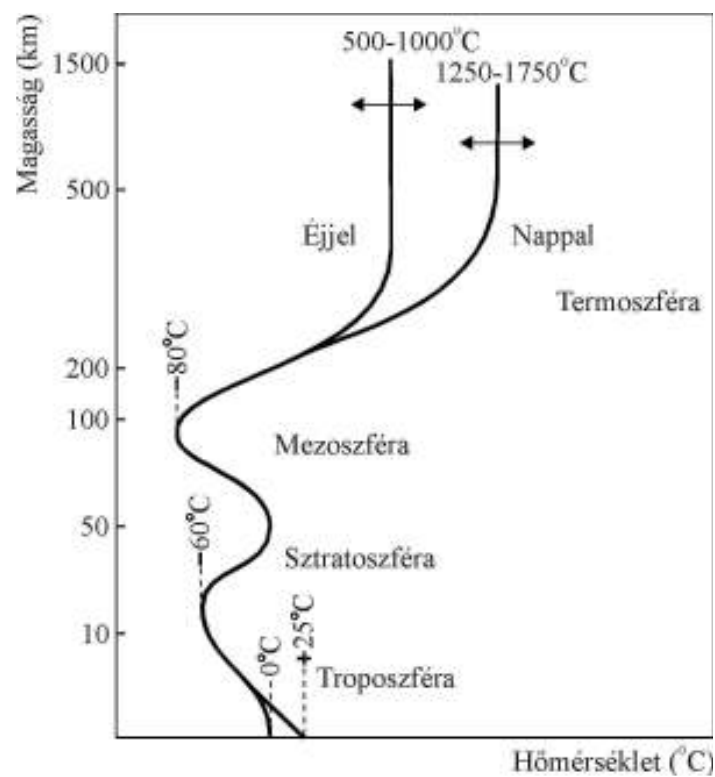


1.3 ábra
A légköri gázok abszorpciós spektruma



1.4 ábra

A beérkező napenergia százalékos megoszlása



1.5 ábra

A légkör szerkezete

(atmoszféra, hidroszféra, kémiai elemek körforgása) működtetésére fordítódik és a bioszféra mindössze 1%-át használja fel.

A légkör szerkezete

A légkör a függőleges hőmérséklet-eloszlás figyelembevételével az **1.5 ábrán** látható rétegekre tagolható:

1. *Troposzféra*: A felszínhez legközelebb eső réteg, vastagsága 15 km az Egyenlítőnél és 10 km a sarkoknál. A hőmérséklet a magassággal csökken, az átlagos hőmérsékleti gradiens $6,5\text{ }^{\circ}\text{C/km}$. A függőleges konvekció általában intenzív és a keveredés erőteljes ebben a rétegben, amely az időjárási jelenségek színtere.
2. *Sztratoszféra*: A troposzféra felső határán lévő vékony, állandó hőmérsékletű réteg (az. ún. tropopauza) felső határától 50 km magasságig terjed. A hőmérséklet a magassággal nő, első sorban az ózon rövidhullámú abszorpciója miatt. A növekvő hőmérséklet (inverzió) miatt a sztratoszférában a függőleges elkeveredés igen gyenge.
3. *Mezoszféra*: 50 és 85 km közötti magasságban helyezkedik el, a hőmérséklet a magasság növekedésével enyhén csökken, kb. $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ értékig, amely az atmoszféra leghidegebb pontja.
4. *Termoszféra*: Az atmoszféra legfelső rétege. Itt az intenzív ultraibolya sugárzás hatására disszociálnak a nitrogén és az oxigén molekulák. A hőmérséklet 1000 K fölött van.

A magasság növekedésével a légkörben rohamosan csökken a nyomás és a sűrűség. A troposzférában és a sztratoszférában található a légkör teljes gáztömegének 99%-a, az ennél magasabb rétegek tehát csak a gáztömeg 1%-át foglalják magukban. A tengerszintnek megfelelő magasságban a molekulásűrűség $2,5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$, a termoszférában már csak $10^{13}/\text{cm}^3$.

Hőmérséklet-eloszlás a troposzférában

Száraz levegő

A p nyomás változása függőleges (z) irányban az alábbi egyenlettel fejezhető ki:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \quad (1.7)$$

ahol ρ a levegő sűrűsége, g a gravitációs gyorsulás. A sűrűség nyomás- és a hőmérséklet-függése a gázok állapotegyenlete alapján:

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1.7.a)$$

ahol M a levegő molekulatömege, R a gázállandó, T az abszolút hőmérséklet. Ezt beírva az (1.7) egyenletbe:

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{pMg}{RT} \quad (1.8)$$

A légrétegek felmelegedése a következőképpen történik: a napsugárzás a felszínt felmelegíti, majd hőátadás és a kisugárzásból felvett hő révén melegszenek fel a felszín-közei légtömegek, amelyek kisebb sűrűségükönél fogva felemelkednek, és a magassággal csökkenő nyomás miatt kitágulnak.

Az emelkedő légtömegekről feltételezzük, hogy állapotváltozásuk adiabatikus, tehát köztük és környezetük között nincs hőcsere: $dQ = 0$. A termodinamika I. főtétele értelmében ekkor a teljes tágulási munkát a légtömegek belső energiája fedezi, vagyis:

$$dU = -pdV$$

ahol U a gáz belső energiája. Figyelembe véve a belső energia definícióját, a fenti egyenlet

$$mc_v dT = -pdV \quad (1.9)$$

alakban írható, ahol m az emelkedő légtömeg tömege, c_v a levegő fajhője állandó térfogaton. m tömegű, V térfogatú légtömegre a gázok állapotegyenlete a következőképpen írható fel:

$$pV = \frac{mRT}{M} \quad (1.10)$$

Az emelkedés közben végbemenő állapotváltozásokat az alábbi differenciálegyenlet írja le:

$$d(pV) = \frac{mR}{M} dT$$

mivel a nyomás és a térfogat is változik, ennek kifejtése:

$$pdV + Vdp = \frac{mR}{M} dT$$

innen pdV értékét az (1.9) egyenletbe helyettesítve:

$$mc_v dT = Vdp - \frac{mRdT}{M}$$

V értékét az (1.10) egyenletből beírva, majd az egyenletet átrendezve:

$$\frac{dT}{dp} = \frac{RT}{pM \left(c_v + \frac{R}{M} \right)}$$

amelyet az (1.8) egyenlettel összeszorozva a függőleges hőmérsékleti gradiens értékét kapjuk:

$$\frac{dT}{dz} = - \frac{g}{c_v + \frac{R}{M}}$$

mivel azonban $R/M = c_p - c_v$, ahol c_p a gáz fajhője állandó nyomáson, a fenti egyenlet végső alakja:

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_p} \quad (1.11)$$

Ez az egyenlet a száraz levegő adiabatikus hőmérsékleti gradiensét adja meg. Ezt hagyományosan Γ -val jelölik. A konkrét számértékeket behelyettesítve:

$$\Gamma = \frac{dT}{dz} = -9,76 \frac{K}{km}$$

értéket kapunk.

Nedves levegő

A nedves levegő tulajdonképpen száraz levegő és víz keveréke; fajhője állandó nyomáson az alábbiak szerint írható fel:

$$c_p' = (1 - w)c_p + wc_{pg} \quad (1.12)$$

ahol w a vízgőz sűrűsége (egységnyi tömegű levegőben lévő vízgőz tömege), c_{pg} a vízgőz fajhője állandó nyomáson.

A nedves levegő függőleges hőmérsékleti gradiensére az (1.12) összefüggés figyelembevételével az előzőhöz hasonló gondolatmenet alapján a

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_p} + \frac{L_g}{c_p} \frac{dw}{dz} \quad (1.13)$$

egyenlet vezethető le, ahol L_g a vízgőz lecsapódási hője, a dw/dz hányados pedig a páratartalom függőleges változását fejezi ki. Az (1.13) és az (1.11) egyenlet összehasonlításából látszik, hogy a nedves levegő hőmérsékleti gradiense (abszolút értékben) mindig kisebb, mint a száraz levegőé. Pl. a nedves trópusi levegőre $dT/dz \approx -3^\circ\text{C}/\text{km}$, ugyanakkor a száraz sarkvidéki levegőre: $dT/dz \approx -10^\circ\text{C}/\text{km}$, vagyis közelítőleg megegyezik a száraz levegő adiabatikus gradiens (Γ) értékével. Közepes szélességi körökön a hőmérsékleti gradiens a két szélső érték közé esik. "Standard" értéknek $dT/dz = -6.5^\circ\text{C}/\text{km}$ értékét nevezzük.

A légkör stabilitása

A dT/dz függőleges hőmérsékleti gradiens értéke kihat a légtömegek függőleges mozgására. Ha $dT/dz = \Gamma$ (adiabatikus érték), akkor a légtest egyensúlyban van környezetével, függőleges mozgását a felhajtóerő nem befolyásolja. Ez ún. "neutrális stabilitás" esete, amely egyébként a valóságban igen ritka.

Vizsgáljuk most egy V térfogatú, ρ sűrűségű, T hőmérsékletű, emelkedő légtest függőleges mozgását. Legyen a környező levegő sűrűsége ρ' , hőmérséklete T' . A légtestre ható súlyerő: ρVg , a felhajtóerő: $\rho' Vg$, ezek eredője adja a gyorsítóerőt:

$$\rho V a = (\rho' - \rho) V g \quad (1.14)$$

ahol a a légtest felfelé irányuló gyorsulása; ennek értéke:

$$a = \frac{\rho' - \rho}{\rho} g \quad (1.15)$$

Az állapotegyenlet (1.7a) alakjából következik, hogy a sűrűség a hőmérséklet reciprokéval arányos, ezt felhasználva a gyorsulás:

$$a = g \frac{T - T'}{T'} \quad (1.16)$$

vagyis a légtest felfelé gyorsul mindaddig, amíg $T > T'$.

Nyilvánvaló, hogy ha a felemelkedő légtömeg nedves, akkor a lecsapódáskor felszabaduló latens hő miatt hőmérséklete (T) kevésbé csökken, vagyis gyorsulása nagyobb, mint a száraz légtömeké. Ezt a tényt úgy fejezik ki, hogy a nedves levegő kevésbé stabil, mint a száraz.

Az **1.6 ábrán** néhány tipikus hőmérséklet-eloszlást szemléltetünk a Z magasság függvényében. Az 1. és 2. labilis, a 3. és 4. stabil, az 5. (inverzió) pedig igen stabil. Az emelkedő légtömegek mozgása attól függ, hogyan alakul lehülésük sebessége a magasság függvényében. Pl. ha a függőleges hőmérséklet-eloszlás a 2. szerinti és egy emelkedő (száraz) légtömeg lehülése az 1. szerinti, a felfelé mozgó légtömeg mindig hidegebb környezetben marad, tehát emelkedése folyamatos lesz. Ha egy nedvesebb légtömeg emelkedik, amelynek lehülése a 3. szerinti, az emelkedési sebesség még nagyobb. Ha azonban a légkörben inverzió van, vagyis a hőmérséklet-eloszlás az 5. szerinti, akkor mind a száraz, mind a nedves légtömeg stabil marad (nem emelkedik), mivel a környező levegőnél ez minden esetben hidegebb, azaz sűrűsége nagyobb. (Ennek figyelembevételével magától értetődő, hogy miért nincs függőleges légcseré és átkeveredés a sztratoszférában.)

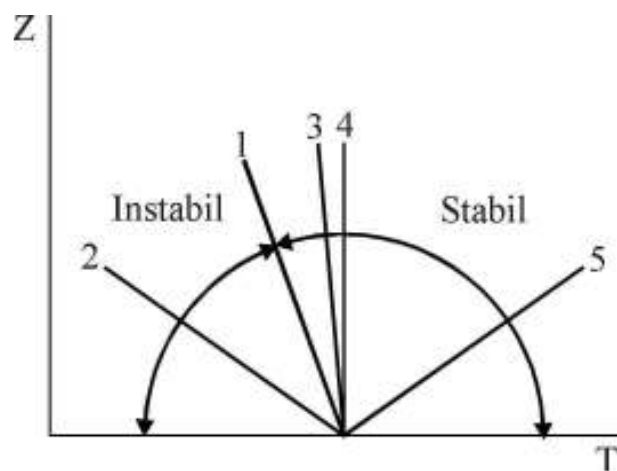
A felszín-közeli levegő hőmérséklet-eloszlása napközben is változik, ezt mutatja az **1.7 ábra**. Az egyes eloszlások magyarázata a következő: hajnali 4 órakor a felszín kisugárzása lehűti a talaj-közeli légrétegeket, emiatt inverzió alakul ki; de 9 órakor a talaj a napsugárzás miatt gyorsan felmelegszik, ekkor a hőmérséklet a magassággal már csökken, délután 2 órakor a függőleges hőmérséklet-csökkenés a felszín erős felmelegedése miatt még tovább fokozódik, 4 órakor a fokozatos lehülés miatt a helyzet közelíti a délelőtti.

A levegő hőmérséklet-különbségének hatására jönnek létre azok a konvektív áramlási cellák, amelyeket az önszabályozó rendszereknél már említettünk. Itt csak utalunk a **B.8 ábrára** (Benard cellák).

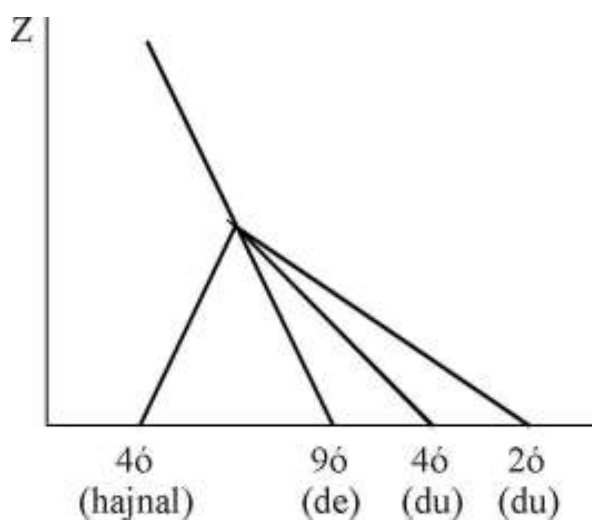
Beesési-visszaverődési viszonyok a felszínen

Korábban már szó esett arról, hogy a különböző minőségű (albedójú) területek azonos beesési viszonyok mellett is különbözőképpen melegsznek fel. Az alábbiakban a földfelszín néhány felület-típus albedóját adjuk meg:

víz	6.....80% (a beesési szögtől függően)
friss hó	75.....90%
állott hó	40.....70%
nedves, fekete talaj	5. ...15%
homoktalaj	35.....45%
gabonatóbla	15.....25%
fű	10.....20%
tundra	15.....20%
tülevelű erdő	5.....15%
lombhullató erdő	10.....20%



1.6 ábra
Függőleges hőmérséklet-eloszlások a légkör alsó részén



1.7 ábra
Napi hőmérséklet-eloszlások a felszín közelében

Ezen kívül a beérkező sugárzás a szélességi körtől függően változó szögben éri el a felszínt. Ennek megfelelően egységnyi keresztmetszetű sugárkéve által felmelegített felszín a trópusoktól a sarkok felé haladva nő, vagyis a felületegységre eső energia csökken. A beeső sugárzás intenzitásának szélességi körtől való függését a Lambert-törvény fejezi ki (**1.8 ábra**):

$$I = I_0 \cos \Phi \quad (1.17)$$

A helyzetet tovább bonyolítja az a tény, hogy a Föld tengelye az ekliptika normálisával (a Föld keringési síkjára merőleges egyenessel) 23,5°-os szöget zár be. Emiatt a felszíni energia-abszorpció jelentősen eltér a Lambert-törvény által megadott értéktől: a sarkokon átlagban magasabb, az egyenlítőnél pedig alacsonyabb. A felszín energiamérlege szempontjából viszont az abszorbeált és a kisugárzott energia különbsége mérvadó. Az ezek figyelembevételével kialakuló energiamérleget az **1.9 ábra** mutatja.

Látható, hogy a 40. szélességi kör és az egyenlítő között energiatöbblet, a sarkok irányában pedig energiahiány áll elő. Ennek következménye az a közismert állapot, hogy az alacsonyabb szélességi körök hőmérséklete jóval nagyobb, mint a magasabbaké. A termodinamika nulladik főtétele értelmében ilyen esetekben egy természetes fizikai rendszer mindig az egyensúly helyreállítására törekszik. Ez történik a Föld esetében is: a magasabb hőmérsékletű helyekről energia- és anyagáramlások indulnak a sarkok irányába. Ennek következtében jön létre a nagy földi légkörzés, a víz körforgása, valamint az ásványi anyagok körforgása által megvalósuló globális energia- és anyagtranszport.

A földi légkörzés modelljei

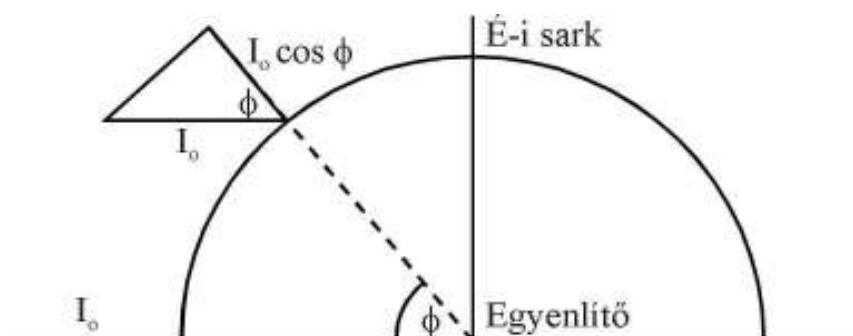
Az a tény, hogy a levegőtömegek globális méretekben áramlanak, már évszázadokkal ezelőtt ismeretes volt. A kezdetben pontatlan, durva elképzelések (modellek) finomításához, a folyamatok pontos megértéséhez azonban hosszú idő kellett. A légkörzés és a szélrendszerek történetileg fejlődő modelljeit az **1.10 ábrán** mutatjuk be.

A Hadley-féle *egycellás modell* (1735) alap gondolata az volt, hogy az Egyenlítőnél felszálló, a sarkoknál leszálló légáramlás van, a kettő között egy összefüggő áramlási kör (cella) alakul ki (ld. az ábra bal oldalát). Ennek az északi féltekén állandó északi, a déli féltekén állandó déli szelek felelnének meg. A valóságos szélrendszerek azonban ennél jóval bonyolultabbak, amint ezt már a hajózási tapasztalatok alapján régen tisztázták. Az Egyenlítő környezetében a keleti passzáti szelek, a mérsékelt égövben nyugati szélrendszer, a sarki zónákban pedig ismét keleti szélrendszer a jellemző.

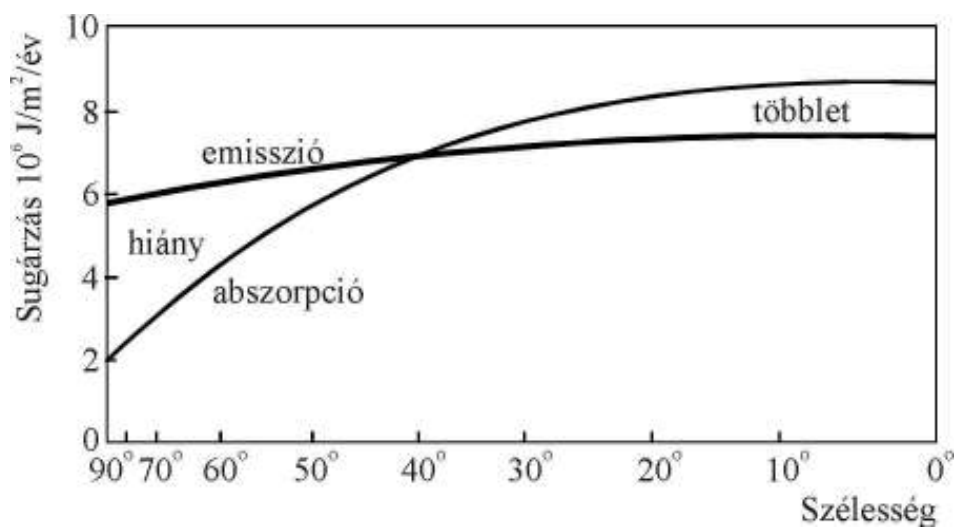
Az ismeretek fokozatos finomodása következtében már a múlt század végére kialakult a ma is érvényes *háromcellás modell* (ld. az ábra jobboldalát). A trópusokon létrejött intenzív felfelé áramlás nagy mennyiségű vízgőzt szállít, amelyek lecsapódása folytán felszabaduló latens hő a függőleges mozgás intenzitását növeli. A pára nagy része ebben az övezetben csapadékká alakul és a felszínre hullik (trópusi eső zóna).

A légtömegek a sarkok irányában mozogva fokozatosan lehűlnek, majd a 20. és 30. szélességi kör közötti zónában leszállnak (Hadley-cellák).

A sarkokon történő erőteljes lefelé áramlások esetében az előbbinek fordítottja történik, ezek a sarkköröktől délre, illetve északra felmelegedésük következtében felszállnak, így alakul ki a poláris cellák áramlása. Az említett két cella mozgása intenzív, ezek az ún. direkt áramlású cellák. A közöttük lévő területen ezekhez fogaskerékszerűen kapcsolódó, indirekt áramlású cellák alakulnak ki mindkét féltekén, ezek az ún. Ferrell-cellák.



1.8 ábra
Vázlat a Lambert-törvényhez



1.9 ábra
Energia-eloszlás a földtengely hajlásának figyelembevételével

Az így kifejlődött háromcellás (vagyis mindkét féltekét figyelembe véve hat cellás) modell szerint az egész földfelszínen északi és déli szélrendszerek alakulnának ki. A valóságos szélrendszerek már említett irányait csak a Coriolis-erő figyelembevételével lehet megérteni. A Coriolis-erő forgó rendszerekben egyenes vonalú mozgást végző testekre hat. A földfelszín felett vízszintesen áramló m tömegű és v sebességű légtestre ható Coriolis-erő nagysága:

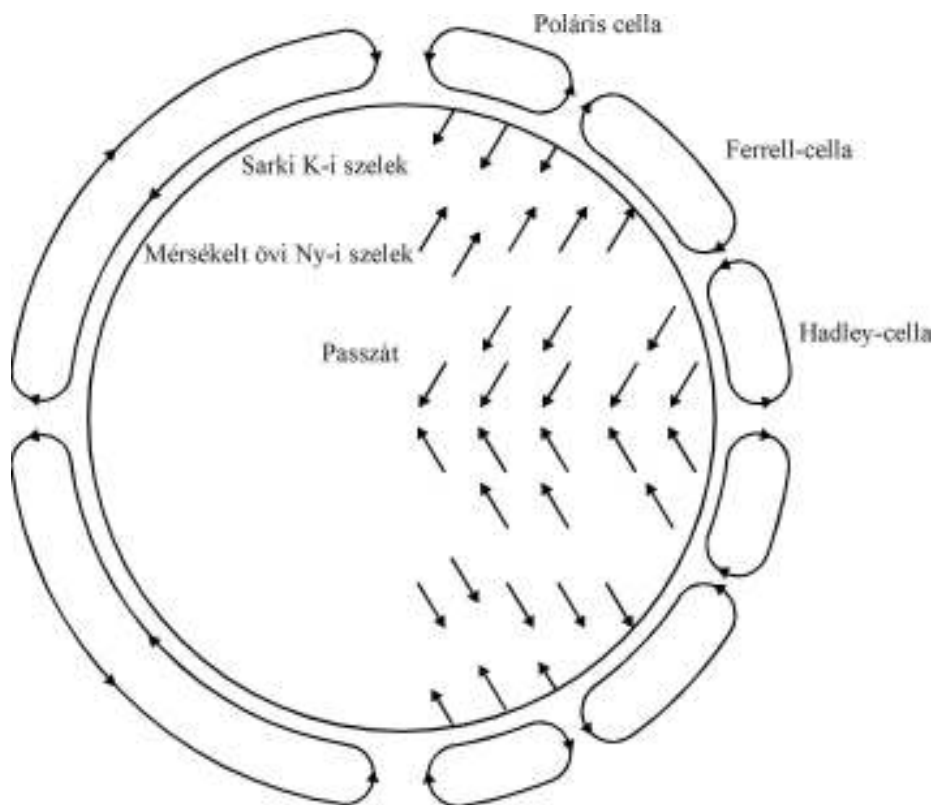
$$F_C = 2mv\omega \sin \Phi \quad (1.18)$$

ahol ω a Föld forgásának szögsebessége, Φ pedig a szélességi kör fokokban. A Föld felszínén a Coriolis-erő eltérítő hatása az északi féltekén mindig jobbra, a déli féltekén mindig balra téríti el a mozgó testeket. A végeredményben kialakuló áramlási irányok már valóban megfelelnek a tapasztalatnak, mint az **1.11 ábra** mutatja. (Az ábrán a szaggatott vonalak a háromcellás modell alapján várható, a folytonos vonalak a Coriolis-erő által eltérített szélirányokat mutatják a földfelszín közelében.)

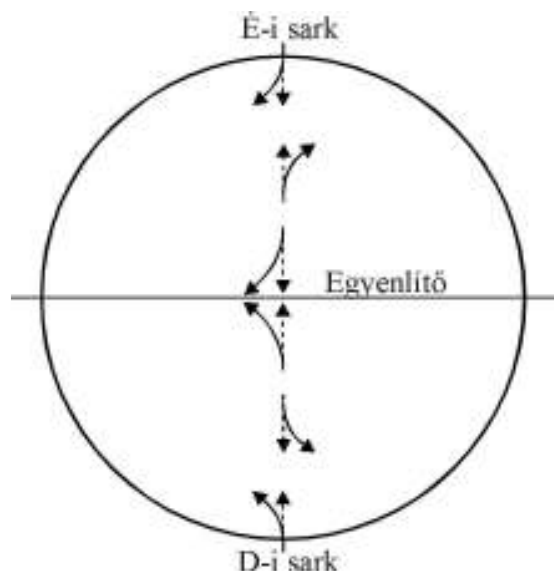
A ciklonok kialakulása

Az állandó szélrendszereken kívül ismeretes, hogy az időjárási események során - különösen a mérsékelt égövi zónában - nagy kiterjedésű, örvénylő mozgást végző légtömegek vándorolnak; ezek a ciklonok és az anticiklonok. Forgó mozgásuk közben ezek a légtömegek a mérsékeltövi uralkodó széljárásnak megfelelően nyugat-keleti irányban mozognak. A ciklonrendszerek kialakulásának tisztázása csak az utóbbi évtizedekben sikerült, és Rossby és Palmen nevéhez fűződik. Az általuk kidolgozott modell szerint a ciklonrendszerek kialakulása a sar- kok felől áramló hideg-, a trópusok felől érkező meleg levegő és a tartós nyugati légáramlások eredményeképpen az alábbi folyamat alapján megy végbe (**1.12 ábra**).

A sarki hideg és az egyenlítői meleg légtömegek áramlása a nyugat-keleti irányban mozgó légtömegek áramlásában hullámozáshoz hasonló instabilitásokat hoz létre. A hullámmozgás amplitúdója egyre nő és a hullámhegyek, ill. a hullámvölgyek által közbezárt légtömegek a levegő sűrűsödése következtében önálló forgásba jönnek. A forgási irányokat az határozza meg, hogy a légtömegek melyik irányból kapnak hosszabb "meghajtást". Így alakulnak ki végül a **1.12d ábrán** látható, fogaskerék-szerűen összekapcsolódó forgó mozgású rendszerek. A ciklonrendszeren belül az A-val jelölt helyeken alacsony, az M-mel jelölt helyeken magas légnyomás alakul ki. Emiatt a körmozgáson kívül létrejön egy másik áramlási rendszer is, amelyben a magas nyomású helyről az alacsony nyomású helyekre áramlik a levegő. Eközben az alacsony nyomású helyeken (ciklonok) felszálló légáramlás, a magas nyomású helyeken (anticiklonok) leszálló légáramlás jön létre. A felszálló légtömegek lehűlnek; ha magas a nedvességtartalmuk, annak kondenzációja következtében csapadék jöhet létre. A leszálló légtömegek esetén ez a folyamat nem mehet végbe, ezért ezek általában "jó időt" hoznak.



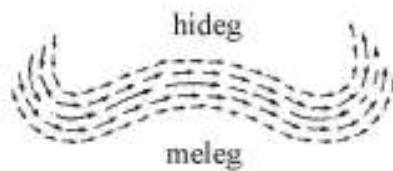
*1.10 ábra
A földi légkörzés modelljei*



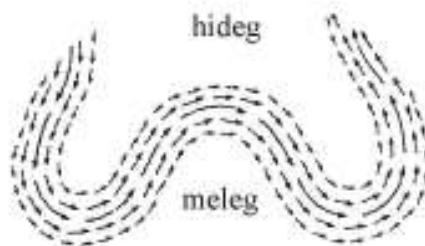
*1.11 ábra
A Coriolis-erő eltérítő hatása*



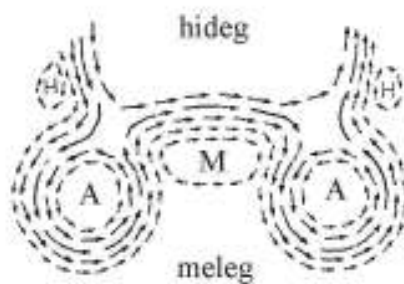
(a) A Ny-i áramlás instabillá válik



(b) A Rossby-hullámok kialakulásának kezdete



(c) A Rossby-hullámok erőteljesen kifejlődnek



M=magas nyomás
A=alacsony nyomás

(d) Hideg és meleg forgó légtetek alakulnak ki

1.12 ábra
A ciklonok kialakulásának mechanizmusa

ANTROPOGÉN HATÁSOK AZ ATMOSZFÉRÁBAN

"Ma már kétséget kizáróan állíthatjuk, hogy az emberiség képes globális klímaváltozásokat előidézni."

(Kellogg, 1978)

Az emberi populáció növekedése és a technika fejlettsége következtében megnőtt annak valószínűsége, hogy a környezeti rendszerek természetes működését befolyásolni tudjuk. Nem könnyű azonban annak felderítése, hogy a megfigyelt változások, pl. a globális hőmérséklet alakulásában, egyértelműen antropogén eredetűek-e, vagy természetes tendenciák részét képezik. Ismeretes, hogy a hőmérséklet az elmúlt földtörténeti korokban jelentős ingadozásokat mutatott, amelyek jelentős része nyilvánvalóan még az ember megjelenése előtt történt.

Az emberi tevékenység éghajlatra gyakorolt hatása kétféleképpen érvényesül :

- a bejövő és a kimenő sugárzás légkörön való áthaladásának befolyásolása, vagyis az atmoszféra abszorpciós tulajdonságainak módosítása (ez tulajdonképpen az 1.6 egyenlet b paraméterének megváltoztatását jelenti);
- a sugárzás felszíni abszorpciójának és emissziójának módosítása (vagyis az *albedo* – az 1.6 egyenlet a paraméterének változása).

A Föld energiamérlegének valamilyen hatás folytán történő megbontását az ún. éghajlati kényszer fogalmával jellemzik. Ezt általában W/m^2 -ben fejezik ki, és az adott hatásra bekövetkezett energiatöbbletet (pozitív kényszer), vagy energiacsökkenést (negatív kényszer) jelenti. Néhány példa a természetes és antropogén kényszerekre:

- vulkánkitörések alkalmával nagy mennyiségű aeroszol kerül a légkörbe, ezek visszaverik a beeső sugárzás egy részét, kevesebb energia éri el a felszínt, ezért ez negatív kényszer;
- a Nap felületi fényessége (luminozitása) – a csillagfejlődés törvényeinek megfelelően – egyre nő, ennek folytán a felszínre egyre több energia érkezik, ez tehát pozitív kényszer (a rövid távú hatás jelentéktelen, de a Naprendszer létrejötté óta összesen 30%-ot nöött a besugárzás);
- a fosszilis tüzelőanyagok elégetése során szén-dioxid, más tevékenységek folytán egyéb üvegházgázok kerülnek a légkörbe, ezek visszatartják a hosszúhullámú kisugárzás egy részét, nő a felszín hőmérséklete, ez pozitív kényszer;
- az erdők irtása és a túllegeltetéssel járó elsivatagosodás növeli a felszín albedóját, kevesebb lesz a felszín által abszorbeált energia, csökken a hőmérséklet, ez negatív kényszer.

Az alábbi táblázatban az üvegházgázok, aeroszolok, és egyéb tényezők által okozott éghajlati kényszer nagyságát adjuk meg W/m^2 -ben; az adatok az 1750 és 2000 közötti 250 éves időszakra vonatkoznak.

Ható tényező	Éghajlati kényszer	
szén-dioxid	1,3....1,5	(1)
metán	0,5....0,7	(1)
troposzféra ózon	0,25...0,75	(1)
dinitrogén-oxid	0,1....0,2	(1)
szulfátok	- 0,3 - 1,0	(2)
aeroszolok közvetett hatása	0.0. - 1,5	(3)
felszíni albedo változása	0,0...- 0,5	(3)
Nap fényességváltozása	0,0....0,6	(3)

(Az (1) jelű adatok megbízhatósága jó, a (2) jelűeké közepes, a (3) jelűeké igen alacsony, az adott tényezőkkel kapcsolatos ismereteink szintjének megfelelően.)

A fenti közvetlen hatások mellett jelentős visszacsatolások is közrejátszanak a klímaváltozás alakulásában (itt csak utalunk a Bevezetésben a rendszerek szabályozásával kapcsolatban leírtakra). Az irodalomban az alábbi visszacsatolásokat tartják a klímaváltozás szempontjából számottevőnek:

- a hőmérséklet növekedésével nő a légkör páratartalma és mivel a vízgőz is üvegházgáz, nő a kisugárzott energia légköri abszorpciója;
- a párolgás növekedésével nő a felhőzet nagysága, ami ugyan csökkenti a belépő napsugárzást, de a felhőzet ugyanakkor reflektálja a felszín infravörös sugárzásának egy részét és valószínűsíthető, hogy ez az utóbbi hatás dominál;
- a jég- és hótakaró olvadása csökkenti a felszín albedóját, ezáltal nő a felszín energia-abszorpciója (ld. **B.4 ábra**);
- magasabb hőmérsékleten a növényzet gyorsabban pusztul, a bomlástermékek növelik a szén-dioxid és a metán koncentrációját;
- az óceánok hőmérsékletének növekedése csökkenti szén-dioxid felvételüket (a gázok vízoldhatósága a hőmérséklettel fordítva arányos), ennek következtében nő a légkör szén-dioxid tartalma;
- a tundra jellegű területek talajpórusok közé fagyott jéggrétege a melegedéstől felolvad, a kiszivárgó és a felszínen lefolyó víz erodálja a talajt, a növényzet pusztulása szén-dioxid emisszióval jár; a jég olvadásakor a régebben befagyott szén-dioxid és metán szabaddá válik, mindezek a folyamatok az üvegházhatást erősítik.

A felsorolt folyamatok mind pozitív visszacsatolások, vagyis a globális hőmérséklet további növekedését segítik elő, közülük némelyik egyre erősödő mértékben. Ennek megfelelően sok szakértő egy "önmagát erősítő", "egyre gyorsuló" üvegházhatás lehetőségére figyelmeztet. Vannak azonban olyan visszacsatolások is, amelyek hatása az előzővel ellentétes, mint például az, hogy a fokozott párolgás hűti az óceánok vizét, de melegíti a légkör felső rétegeit, ahol a kondenzáció történik; az eredmény: az alsó légrétegek hőmérséklete csökken.

Üvegházgázok a légkörben

A légkörben természetes állapotban is jelenlévő szén-dioxid más gázokkal együtt a földfelszínről kiinduló hosszúhullámú (infravörös) sugárzás egy részét abszorbeálja, ezáltal lassítja a felszín és a légrétegek lehűlését. A jelenség - az üvegházhatás - régóta ismert és alapvető feltétele az élővilág létének. Az ipari forradalom kezdete óta azonban a fosszilis tüzelőanyagok elégetésének üteme egyenletesen nőtt, amely többlet CO₂ légkörbe juttatását eredményezte. Ez a többlet a hősugárzás elnyelése révén hosszú távon a hőmérsékleti egyensúly kialakulását csak egy magasabb hőmérsékleten teszi lehetővé (lásd az 1.6 egyenlet utáni magyarázatot!).

A szén-dioxidon kívül számos egyéb üvegházgáz is van a légkörben, az összhatás szempontjától azonban a szén-dioxid a legjelentősebb. Az egyes üvegház-gázok részaránya a sugárzás abszorpciójában a következő:

szén-dioxid	49%
metán	18%
freonok	14%
nitrogén-oxidok	6%
egyéb	13%

Az üvegház-gázok ún. relatív hatékonysága az egy molekula által elnyelt sugárzási energia mennyiségével kapcsolatos; az egyes üvegház-gázok relatív hatékonysága a következő:

szén-dioxid	1
metán	30
freonok	4000...9000
ózon	2000
nitrogén-oxidok	280

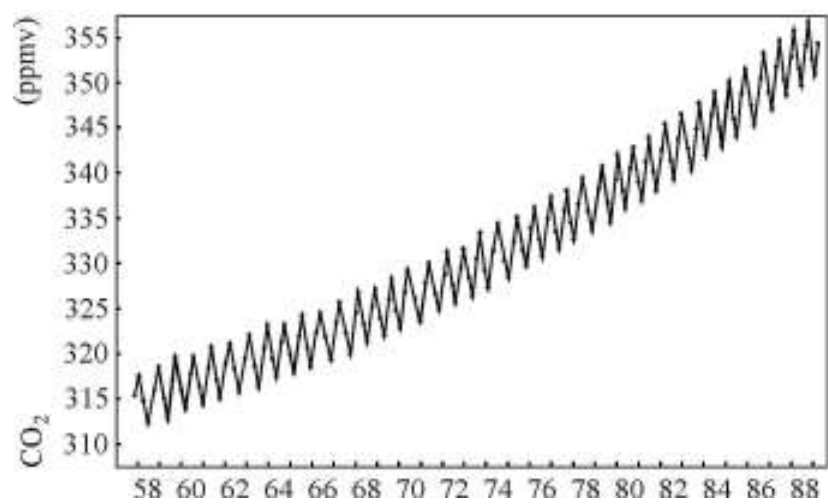
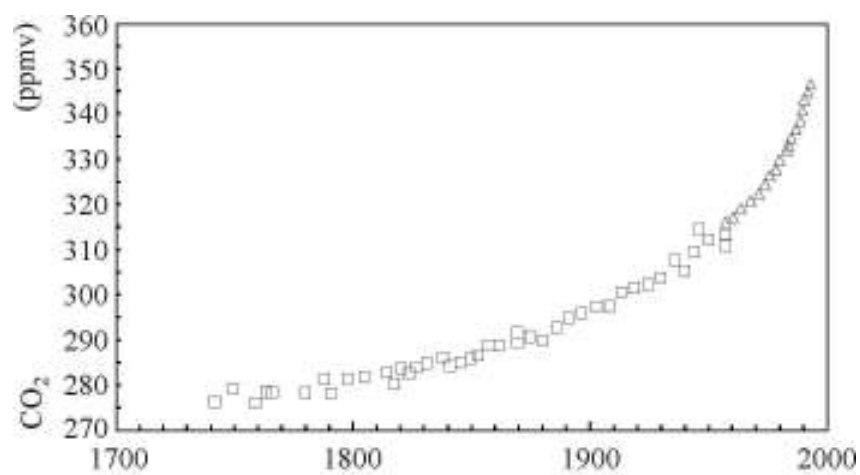
A légköri szén-dioxid tartalom folyamatos növekedése az 1700-as évek közepétől napjainkig kétségtelen (**1.13 ábra**); a korábbi időszakokra a jégtakaró fúrási magmintái alapján végeztek becsléseket (részletesen ld. később), az utóbbi évtizedekre pedig közvetlen mérési adatok állnak rendelkezésre. (A felső grafikon a hosszú távú becsült értékeket, az alsó a Hawaii-ban mért értékeket mutatja 1958 és 1988 között; ppmv = milliommód térfogatrésnyi.)

A szén-dioxid sugárzás-abszorpciója a többatomos molekulák abszorpciós spektrumának elemzése alapján érthető meg. Ezek a molekulák forgás (rotáció) és rezgés (vibráció) révén képesek energiát felvenni a környezetükből. Mind a rotáció, mind a vibráció csak meghatározott energiaszinteken jöhet létre, vagyis ezeknek a mozgásformáknak az energia-felvétele kvantumos, hasonlóan az atomok elektronpályái közötti ugrásokkal. Pontosan meghatározott energiaértékek képesek pl. egy CO₂ molekula különböző forgási állapotait előidézni, és ugyanez érvényes a rezgési állapotokra is. Az infravörös sugárzás kisebb energiájú fotonjai elnyelődésük közben forgásra gerjesztik a CO₂ molekulákat, míg a nagyobb energiájú fotonok abszorpciója különböző típusú vibrációkat gerjeszt. Az **1.14 ábrán** középen a szén- két oldalon az oxigén-atomok; balra az ábra síkjára merőleges rezgések, jobbra az atomtávolságok periodikus változásainak megfelelő rezgések láthatók. Az ábra alsó részén a szén-dioxid rezgési-rotációs spektrumát adjuk meg. (A közölt szám adatok mértékegysége az ún. hullámszám, amely az 1 cm-re eső hullámok számát adja meg.)

Az üvegház-gázok energia-abszorpciója kétségtelenül bizonyított és régóta ismert tény. Hőmérséklet-növelő hatásuk azonban sokáig vitatott volt. Léteznek ugyanis a felmelegedés ellen ható tendenciák is, pl. a tengervíz CO₂-elnyelése. Ha növekszik a légkör CO₂ tartalma, nő a tengervízben oldott CO₂-tartalom is. Ez esetleg ellene hat a CO₂-tartalom növekedésének és a hőmérséklet emelkedésének. A közelmúltban azonban kétséget kizáró bizonyítékokat találtak a légkör CO₂-tartalma és a hőmérséklet közötti szoros korrelációról.

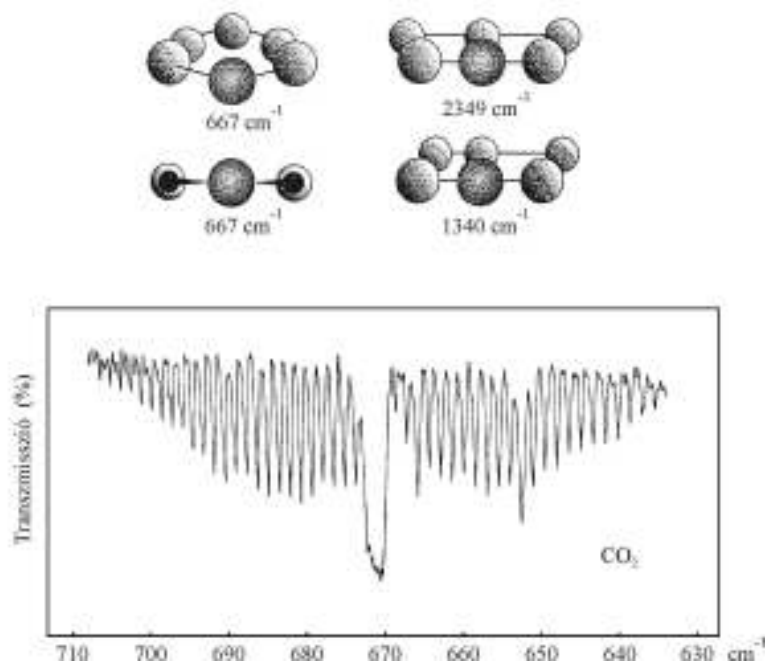
A déli sarki jégtakaró fúrásából kapott jégminták gáz-zárványait elemezték az elmúlt 160 ezer évre. A jégben talált levegő-zárványok a mindenkori légkör összetételét jellemzik, innen pontos mikroanalitikai módszerekkel meghatározható a CO₂ mennyisége a korábbi időszakokra. A jégminta víztartalmának elemzéséből viszont a hőmérsékletet lehet nagy pontossággal becsülni. A jégben lévő víz ugyanis ¹⁸O és ¹⁶O izotópot tartalmaz. A könnyebb izotópot tartalmazó víz valamivel alacsonyabb hőmérsékleten kondenzál, így a két izotóp arányából nagy pontossággal következtetni lehet az adott időszakban uralkodó felszín-közel hőmérsékletre (az utóbbi vizsgálatok laboratóriumban is elvégezhetők). Az **1.15 ábrán** a CO₂-tartalom és a hőmérséklet idősorát mutatjuk be a jégminták elemzése alapján. Látható, hogy a közöttük lévő korreláció igen szoros. (A vízszintes tengely az időt ábrázolja a jelentől 160 ezer évre visszamenőleg.)

A jégfúrások és az utóbbi időszak mérései alapján a légköri szén-dioxid hosszú távú változása a következőképpen alakult: a legutóbbi jégkorszakra jellemző 190 ppmv érték az interglaciális folyamán az ipari forradalomig 280 ppmv-re nőtt, 1958-ig a koncentráció elérte a 315 ppmv értéket, a 2001. évi adat 370 ppmv. A jelenlegi növekedés üteme: 1,5 ppmv/év. A növekedés okának ma már kétséget kizáróan az emberi tevékenységet (a fosszilis tüzelőanyagok elégetését) tartják. A CO₂-kibocsátásban – természetesen – igen nagy területi egyenlőtlenségek vannak. A legnagyobb kibocsátó az USA, az éves mennyiség 24%-át

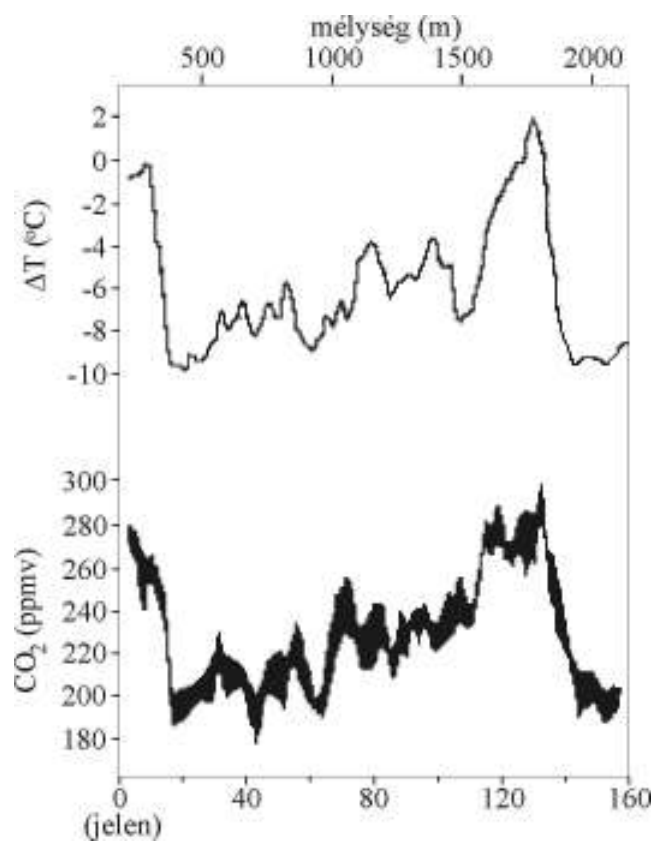


1.13 ábra

A szén-dioxid koncentrációjának változása a légkörben



*1.14 ábra
A szén-dioxid molekula különböző rezgési formái*



*1.15 ábra
A szén-dioxid koncentráció és a felszíni hőmérséklet kapcsolata*

produkálja, bár lakossága a világ össznépességének kevesebb, mint 5%-a. Az iparosodott országok lakossága a Föld népességének 14%-a, kibocsátásuk a teljes értéknek közel fele. Ugyanakkor feltételezhető, hogy a fejlődő országok szén-dioxid kibocsátása – technológiai fejlődésük következtében – a 21. században ugrásszerűen megnő, ami tovább rontja a globális helyzetet.

Az utóbbi 150 év globális hőmérséklet-emelkedését az **1.16 ábrán** mutatjuk be. A bizonytalanságokat és a szórást figyelembe véve megállapítható, hogy a 20. század folyamán az átlagos felületi léghőmérséklet 0,4-0,8 °C értékkel nőtt. A földfelszín legnagyobb hőtárolójának, az óceánok vizének hőmérséklete 1950-től 2000-ig 0,05 °C-kal nőtt.

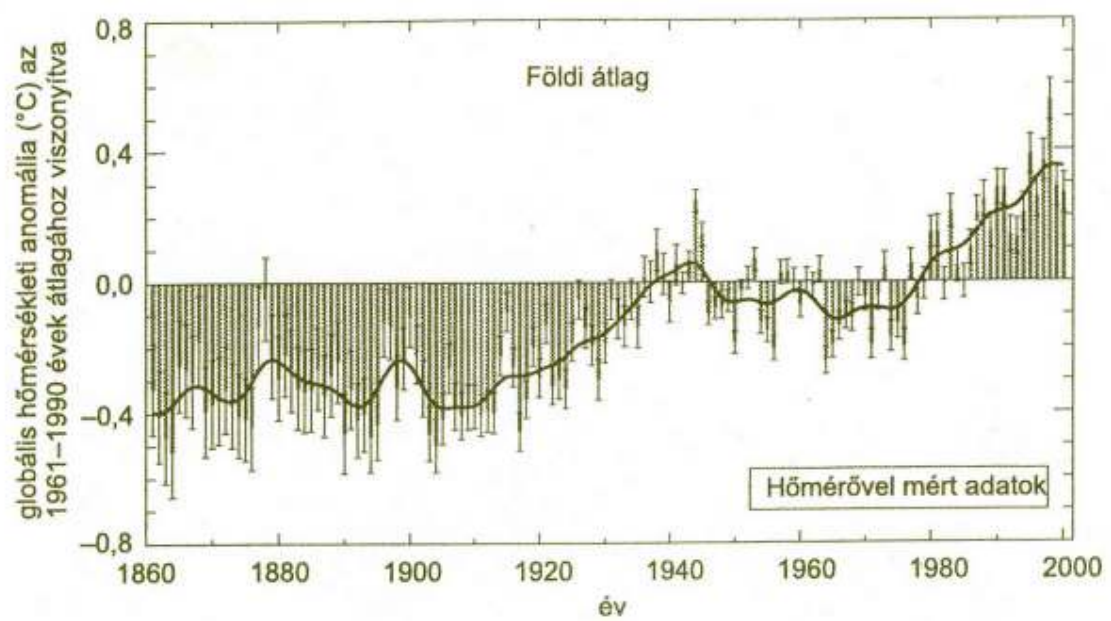
Egyes kutatók szerint a felmelegedés következtében nő a szélsőséges időjárási események gyakorisága. Ennek jeleit is megfigyelhettük az elmúlt néhány évtizedben.

A *hurrikánok* a ciklonokhoz hasonló légköri képződmények (trópusi ciklonoknak is nevezik őket), de azoknál kisebb kiterjedésűek és hevesebb lefolyásúak. Többnyire az óceánok nyugati medencéjében keletkeznek és létrejöttek feltétele az, hogy a víz hőmérséklete meghaladja a 26-27 °C-ot. Mivel ez a globális felmelegedés folytán egyre gyakrabban bekövetkezik, a hurrikánok gyakorisága is nő. A hurrikán belsejében intenzív felfelé áramlás van, miközben a benne foglalt légtömeg igen gyorsan forog. Mivel a tengerből nagy mennyiségű vízgőz utánpótlást kap, nagy a nedvességtartalma. Ez a magasabb légrétegekben kondenzálódik, az így felszabaduló látens hő újra felmelegíti a már lehűlt levegőtömeget, ami ismét megnöveli az emelkedés sebességét. A jelenség hasonló ahhoz, amikor beindítják egy rakéta második fokozatát. A hurrikán gyorsan forgó léghengere a szárazföldre érkezve elveszíti nedves levegő utánpótlását. Még így is nagy távolságot képes azonban megtenni, hiszen hatalmas impulzus- és impulzusmomentum-tartalékai vannak. Orkánszerű szélvihar és felhőszakadás halad a nyomában, amely a természeti környezetben és az emberi településekben óriási károkat okozhat.

A klímaváltozás másik figyelmeztető jele az ún. *El-Niño* tevékenység fokozódása a Csendes-óceán medencéjében. Normális esetben a keleti passzát szelekkel azonos irányban halad egy óceáni áramlás Peru felől Indonézia irányába. Ennek hatására a napsugarak által felmelegített felszíni víz nyugat felé áramlik (**1.17 ábra**), Ausztrália és Indonézia környezetében felhalmozódik. Műholdas megfigyelések szerint a medence két széle között fél méternél is magasabb szintkülönbség alakulhat ki. A nyugaton felhalmozódott meleg víztömeg erősen párolog, ennek eredményeképp alakul ki a nyári monszún-esők övezete Indonéziában. Ugyanakkor Peru nyugati partvidékére a délről érkező hideg Humboldt-áramlás oxigéndús, tápanyagban gazdag vizet szállít, amely a halászoknak gazdag fogást eredményez.

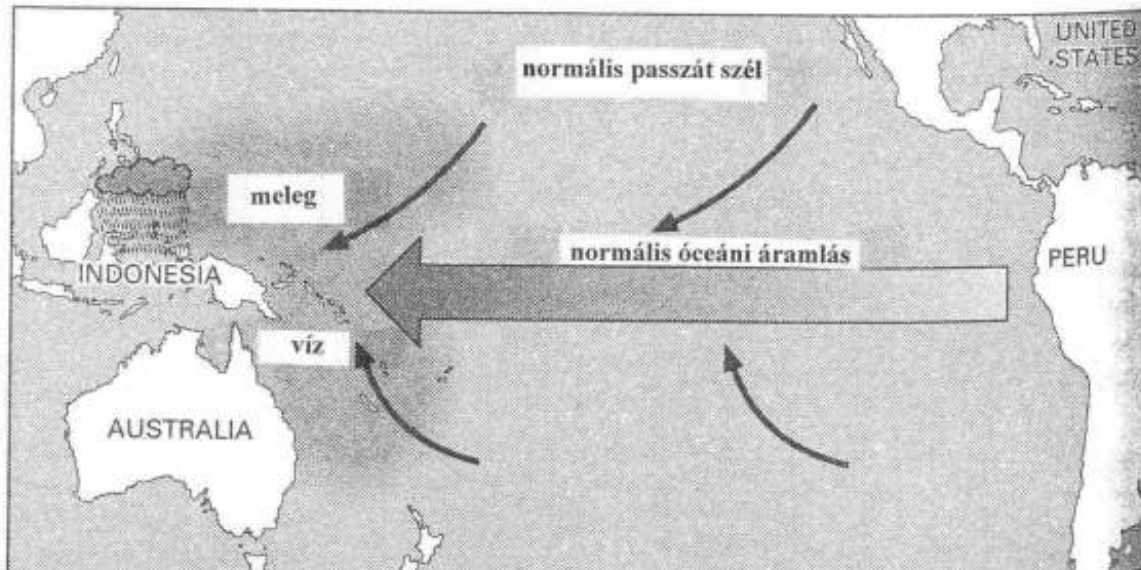
Az ún. *El-Niño* években a passzát szelek legyengülnek és a keleti áramlás ellenkező irányba fordul. A meleg víztömeg most Dél-Amerika keleti partjainál halmozódik fel, itt okoz nagy esőzéseket, miközben Indonéziában aszályos időszak következik be (**1.18 ábra**). A feltorlódott melegvíz meggátolja, hogy a Humboldt-áramlás elérje a perui partokat, így a tápanyagban gazdag víz áramlása elmarad, a halászati hozamok katasztrofális mértékben lecsökkennek. Mivel ez az esemény karácsony táján szokott bekövetkezni, a halászok adták neki az *El-Niño* (kisded) nevet, utalásképpen a gyermek Jézusra.

A jelenség oka hosszú ideig tisztázatlan volt, csak a legújabb kutatások tárták fel a folyamat részleteit. A globális felmelegedés miatt az óceán vizének hőmérséklete – a korábbi időszakhoz képest – emelkedett; a megnövekedett párologás kis méretű trópusi ciklonok kifejlődéséhez vezet. Ezek – a Coriolis-erő hatására – az egyenlítőtől északra az óramutató járásával ellentétes, az egyenlítőtől délre pedig azzal megegyező forgásirányúak (az **1.18 ábrán** szaggatott vonallal jelölve). Midkét forgás a normális passzát szél és tengeri áramlat ellen hat, így alakul ki az *El-Niño* áramlás. A globális felmelegedés miatt a tengervíz hőmérséklete egyre magasabb, ezért egyre gyakrabban alakulhatnak ki azok a trópusi ciklonok, amelyek a

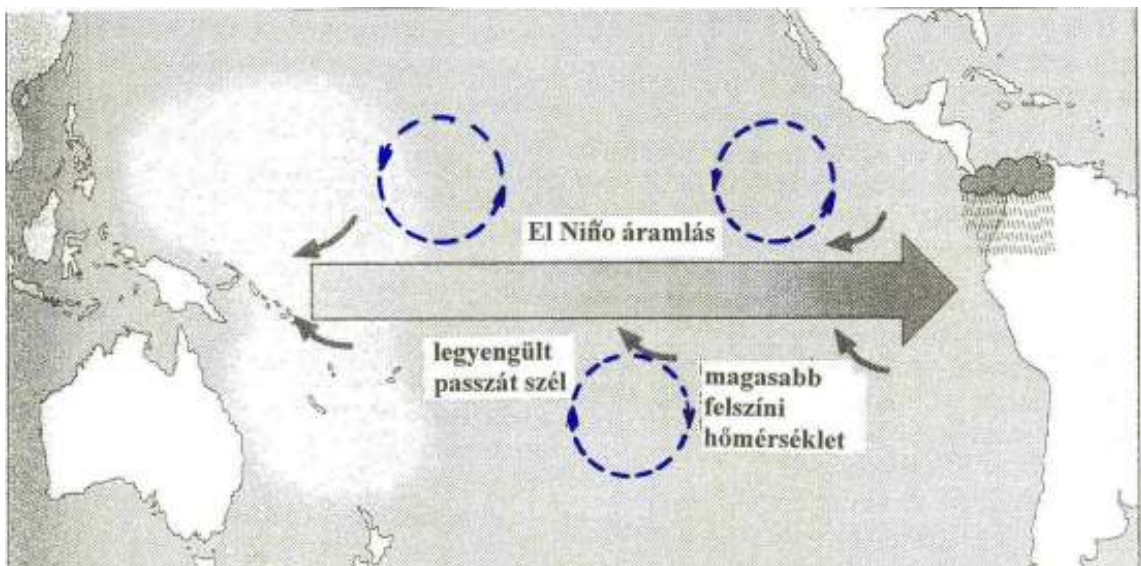


1.16 ábra

A globális átlaghőmérséklet emelkedése az utóbbi 140 évben



1.17 ábra
Normális óceáni áramlás a Csendes-óceán medencéjében



1.18 ábra
El-Niño áramlás

tengeráramlást megfordítják. Az utóbbi évtizedekben a megfigyelések szerint megnőtt az El-Niño évek gyakorisága és ennek, mint láttuk, igen nagy régióra kiterjedő káros hatása van. A fenti folyamattal összhangban van az a tény, hogy az El-Niño években az átlagosnál jóval kisebb a pusztító erejű hurrikánok gyakorisága – ezek energiáját valószínűleg az említett kisebb kiterjedésű trópusi ciklonok emésztik fel.

A globális felmelegedés egy további eredménye a jégtakaró egyre gyorsuló ütemben történő csökkenése. Zsugorodnak a gleccserek a magas hegységekben és fogyatkozik az Északi Jeges-tenger, valamint az Antarktisz jégborítása. A jégtakaró fogyatkozása pozitív visszacsatolós folyamat, amelyet korábban már elemeztünk (ld a visszacsatolásokra vonatkozó szakaszt ennek a fejezetnek az elején, és a **B.4 ábrát**). A klimatológusok szerint 1°C globális hőmérséklet-emelkedés esetén a sarkok hőmérséklete 3°C-kal nő. Az ennek köszönhető drámai változások legjobban az Északi Jeges-tengeren figyelhetők meg, ahol 20 év alatt 15%-kal csökkent a jégfelület nagysága. A jég átlagos vastagsága 40 év alatt 300 cm-ről 180 cm-re csökkent.

Az eredmény: veszélybe került az egész Jeges-tengeri ökoszisztéma. Az ottani táplálkozási lánc legalsó szintjén azok az algák vannak, amelyek a jégtáblák alján hatalmas, fűrtös telepeket képeznek; ezek képezik a halak és kagylók táplálékát, amelyekkel a fókák táplálkoznak és a piramis csúcsán a főleg fókákkal táplálkozó jegesmedve áll. A jégtakaró zsugorodásával azonban az egész ökoszisztéma veszélybe került. Egyes vélemények szerint a jegesmedve már most kihalásra van ítélve.

A sarki jégtakaró rohamos fogyása egy további fenyegetést is magában hordoz, amely olyan, mint egy időzített bomba. A legutóbbi években fedezték fel, hogy a korábban is ismert tengeráramlatok egyetlen nagy szállítószalagot képeznek (**1.19 ábra**), amelynek a közismert Golf-áramlat csak egy rövid szakasza. Ez az Északi Jeges-tengerben alábukik és a mélyben hideg áramlatként (Labrador-áramlat) folytatja útját dél felé, csaknem az egész Földet megkerüli, közben két helyen – az Indiai-óceán és a Csendes-óceán közepe táján – felbukkan a felszínre és meleg, felszíni áramlatként halad tovább. Ez az egybefüggő, grandiózus szállítószalag – a légkörzéshez hasonlóan – nagy mennyiségű energiát szállít a trópusoktól a sarkok irányába. Működése azonban sokak szerint veszélyben van: a Jeges-tenger elolvadt jegétől a sós víz egyre könnyebbé válik, hamarosan bekövetkezhet az az állapot, hogy már nem képes alábukni, akkor pedig az egész szállítószalag leáll. (Egyes megfigyelések szerint a Golf-áramlat sebessége már most jelentősen lecsökkent.)

Az antarktisi jégtakaró-fúrások (**1.15 ábra**) és a többi hasonló, Grönlandon és Alaszkában végzett vizsgálat egybehangzó eredményei szerint az utolsó 10 ezer évben a korábbi időszakhoz képest igen nagy volt a hőmérsékleti stabilitás; valószínűleg ez is hozzájárult az emberi civilizáció gyors fejlődéséhez. Egyes kutatók szerint ez a nagyfokú állandóság a nagy szállítószalag egyenletes, megbízható működésének köszönhető.

Lehet, hogy az üvegházhatás növelésével az emberiség végleg elrontja ezt a nagyszerű, természetes stabilizáló rendszert? A kérdésre még nincs megbízható válasz. A növekvő instabilitás jelei azonban már érzékelhetők: az árvizek, a hurrikánok és az El-Niño tevékenység egyre gyakoribbá válása erről tanúskodik.

Globális klíma-modellek

Az 1980-as évektől több olyan számítógépes modellezést végeztek, amelyek célja az volt, hogy a szén-dioxid tartalom növekedésének a Föld hőmérséklet növekedésére gyakorolt hatását hosszabb-rövidebb távra előre jelezzék. Ezek a modellek általában úgy működnek, hogy egy fizikai paramétereken alapuló klíma-moddellel első lépésben megkísérlik a már ismert időszakok (pl. a 19. sz. közepétől napjainkig) globális hőmérséklet-idősorát rekonstruálni. Ha ezek az adatok kielégítően egyeznek a valóságos adatokkal, akkor

különböző események feltételezése (forgatókönyvek) figyelembevételével becsléseket végeznek a várható jövőbeli állapotokra. Az alábbiakban az egyik ilyen, széles körben elfogadott globális klíma-modell eredményeit ismertetjük (**1.20 ábra**). A modellt egy nemzetközi kutatócsoport, az IPCC (Intergovernmental Panel on Climatic Change) dolgozta ki a 90-es évek elején, majd a modellen több javítást, pontosítást végeztek. A 2100-ig terjedő időszak eseményeit 4 különböző forgatókönyv (scenárió) szerint képzeltek el:

A-forgatókönyv (a jelenlegi trendek folytatódnak)

Az energia-felhasználásban a szén a jelenlegihez hasonló arányban szerepel, a CO₂-emisszió szabályozása jelentéktelen, az erdőirtások folytatódnak, a trópusi esőerdők nagy részét teljesen kiirtják, a metán és a nitrogén-oxidok kibocsátása korlátlan, a freonok gyártása a jelenlegi ütemben folytatódik.

B-forgatókönyv

Az energiaellátás az alacsonyabb széntartalmú tüzelőanyagok (pl. földgáz) irányában tolódik el, a felhasználás hatékonysága nő, a szén-dioxid emissziót szigorú szabályozások korlátozzák, az erdők irtását leállítják, a freonok gyártása korlátozott.

C-forgatókönyv

Az energia-termelés nagymértékben eltolódik a megújuló energiaforrások és a nukleáris energia irányában. A freonok gyártását beszüntetik és korlátozzák a mezőgazdasági metán-kibocsátást.

D-forgatókönyv

Az energiaipart elsősorban a megújuló energiaforrásokra és az atomerőművekre alapozzák, a CO₂-kibocsátás igen szigorú korlátozás és szabályozások alá esik.

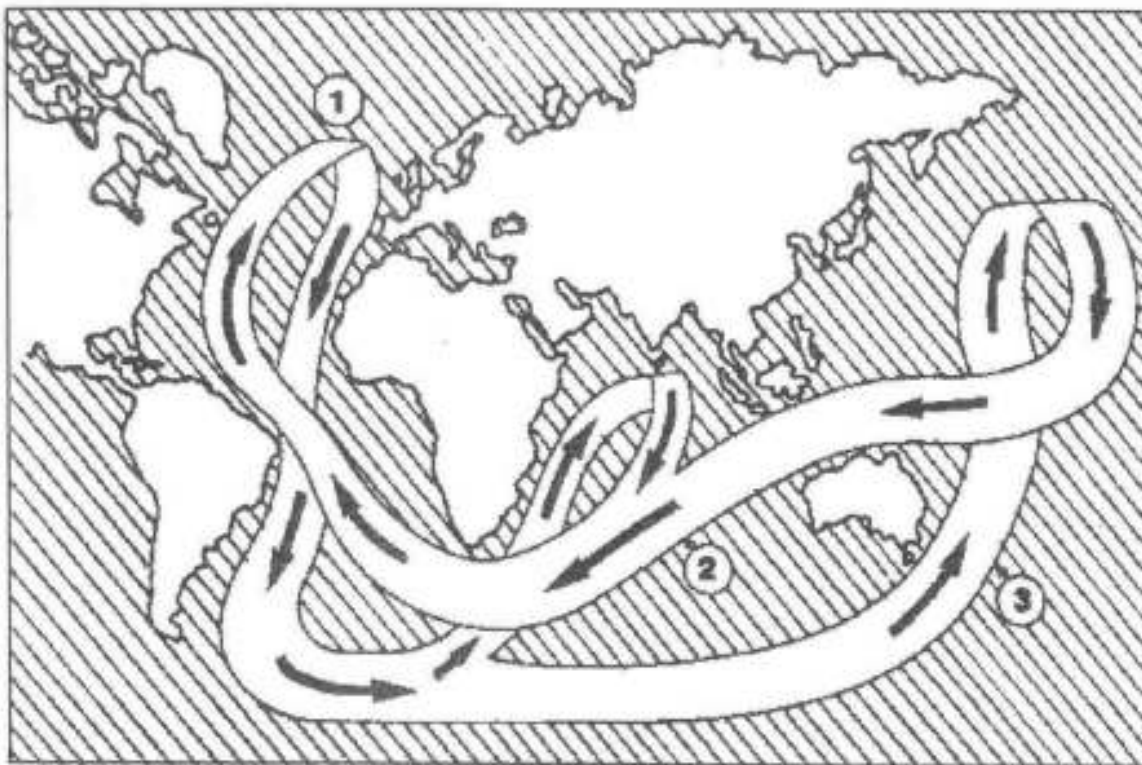
Az **1.20 ábrán** látható, hogy az A-forgatókönyv szerinti változat állandóan emelkedő hőmérsékletet eredményez, míg a többi eset a hőmérséklet állandósulása irányába halad. Az IPCC-modell alapfeltevése szerint a felmelegedés 40%-a származik az üvegházgázoktól, 60%-a a visszacsatolási jelenségektől; elsősorban a vízgőz mennyiség-növekedéséből és a jégtakaró csökkenéséből eredő visszacsatolásból. Megjegyezzük, hogy a szakirodalomból ismert néhány hasonló klíma-modell eredményei az ismertetett modellétől csak kismértékben térnek el.

A várható globális hőmérséklet-emelkedések következményei tekintetében a vélemények már sokkal inkább eltérőek. Van azonban néhány alapvető jelenség, amely szinte valamennyi kutatócsoport szerint várható. Ezek a következők:

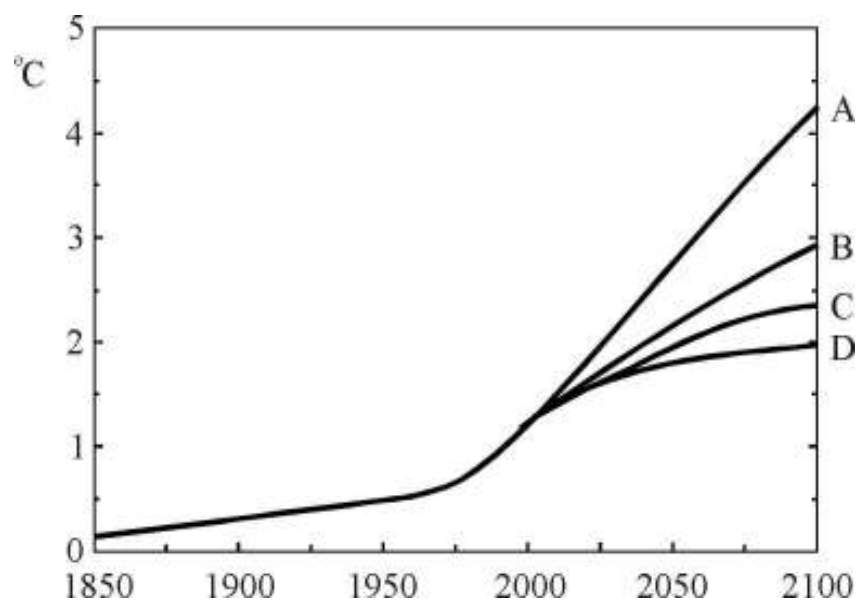
- az óceánok, tengerek szintjének jelentős megemelkedése;
- mélyreható ökológiai változások (növényzeti zónák eltolódása, állatfajok életövezetének megváltozása, egyes fajok fokozott veszélyeztetettsége, ill. kihalása, stb.);
- a mezőgazdasági területek termékenységének csökkenése;
- jelentős területek elsivatagosodása.

A jégtakaró olvadása és részben az óceánok vizének hőtágulása következtében várható tengerszint emelkedésre a modellek alapján az alábbi előrejelzéseket kapták (az emelkedések az 1980. évi szintekhez viszonyítva értendők):

Év	A legvalószínűbb érték	Max.
2030	15 cm	30 cm
2100	50 cm	120 cm
2200	104 cm	360 cm



*1.19 ábra
Az óceáni áramlások összefüggő szállítószalagja*



*1.20 ábra
Az IPCC-modell alapján 2100-ig becsült globális hőmérsékletemelkedések*

További vita tárgya, milyen eszközökkel lehet a CO₂-koncentráció növekedését és az ezzel együtt járó következmények csökkenését elérni. Ezek az intézkedések az alábbiak szerint összegezhetők:

1. Nagyobb hatékonyságú energiagazdálkodás bevezetése, alacsonyabb fosszilis energiafogyasztással.
2. A fosszilis tüzelőanyagokat jobb hatásfokkal, energiatakarékosabb módszerekkel kell elégetni.
3. A szén helyett a földgázt kell az energiatermelés domináns tényezőjévé tenni.
4. Az energiaiparból fokozatosan ki kell küszöbölni a fosszilis tüzelőanyagokat, helyettük a napenergiát, a szélenergiát és az atomenergiát kell általánossá tenni. (Ez utóbbival kapcsolatban a társadalmi megítélés köztudottan igen szélsőséges, erről bővebben a 2. fejezetben szólnunk majd.)
5. A CO₂ abszorpciójának fokozása az erdőirtások leállítással és kiterjedt erdőtelepítésekkel.

Az üvegházgázok kibocsátásának csökkentése érdekében 1997-ben a fejlett ipari országok és egy sor további résztvevő (köztük hazánk) együttműködésével aláírták a *Kyotói Egyezményt*. Az aláíró felek kötelezettséget vállaltak arra, hogy összes üvegházgáz kibocsátásukat 2012-ig átlagosan 5,2%-kal az 1990. évi érték alá csökkentik. A százalék-érték országonként változik, pl. az Európai Unió országai 8%-os, az USA 7%-os, Japán és Kanada 6%-os csökkentést vállaltak. Az egyezmény – a probléma nagyságához mérten – igen kicsiny kezdeti lépésként minősíthető és hatékonyságát erősen lerontja az alábbi két tényező:

- ◆ A fejlődő országokra nézve az egyezmény nem tartalmaz előírásokat; ez annak hallgatólagos tudomásulvételét jelenti, hogy nekik is joguk van kiépíteni korszerű technológiájukat.
- ◆ Az Egyesült Államok – a legnagyobb üvegház-gáz kibocsátó – a közelmúltban felmondta az egyezményt.

Aeroszolkok

Aeroszolkoknak nevezzük a levegőben lebegő kisméretű szilárd, vagy folyékony halmazállapotú részecskéket. A légnemű szennyezéseken kívül az emberi tevékenységek nagymennyiségű aeroszolt juttatnak a levegőbe. Az alábbi táblázatban megadjuk a természetes és mesterséges, szilárd és folyékony aeroszolkok mennyiségét a Föld egészére (a becslések a 90-es évek elejére vonatkoznak, millió tonna/év mértékegységben).

Tengeri só		1000
Szélfújta por		500
Szulfátok		640
Szénhidrogének		90
Nitrátok		115
Vulkánkitörések	min.	25
Erdőtüzek		35
Meteor-törmelékek		10

Az antropogén eredetű szennyezések több, mint 50%-kal megnövelik a légkör aeroszol koncentrációját. Jelenlétük módosítja a légkör sugárzásra vonatkoztatott áteresztőképességét. A várható hatást tekintve különböző vélemények vannak. Az egyik álláspont szerint a megnövekedett planetáris albedo csökkenti az atmoszféra fölmelegedését, ezáltal lehűléshez vezet. A másik vélemény szerint viszont a részecskék energiát abszorbeálnak, amely később kisugárzódik a környezetbe, ezáltal felmelegedést eredményeznek.

Az aeroszokok egy másik lehetséges hatása az, hogy a magas légkörben történő hőenergia-abszorpciójuk miatt inverziót hoznak létre, ezáltal csökkentik a felszín-közelbeli rétegek függőleges légcseréjét. A történelmi vulkánkitörések klimatikus utóhatásainak elemzése arra utal, hogy azok általában hosszú ideig (sokszor évekig) tartó jelentős lehűléseket eredményeztek.

A kiülepedett aeroszokok olyan területeken, ahol eredetileg hó-, vagy jégtakaró volt, csökkenthetik a felszín albedóját és ezáltal melegedést okozhatnak. Az aeroszokok hatása tehát azok minőségétől, elhelyezkedésük magasságától és a terület jellegétől függően különböző lehet. Az utóbbi időben a szakmai közvélemény mégis azt az álláspontot alakította ki, hogy az aeroszokok – összességükben – hőmérsékletcsökkentő hatást eredményeznek (ld. a hőmérsékleti kényszerek táblázatát a fejezet elején).

Az utóbbi évtizedekben sok országban szigorú intézkedéseket hoztak a levegő minőségének javítására. Ezek – főleg a városi területeken – az aeroszokok mennyiségének jelentős csökkenését eredményezték, így a várható hatások is kisebbek. Jelentős lehet azonban továbbra is éghajlat-módosító hatásuk a nagyobb ipari területeken és a nagyvárosokban.

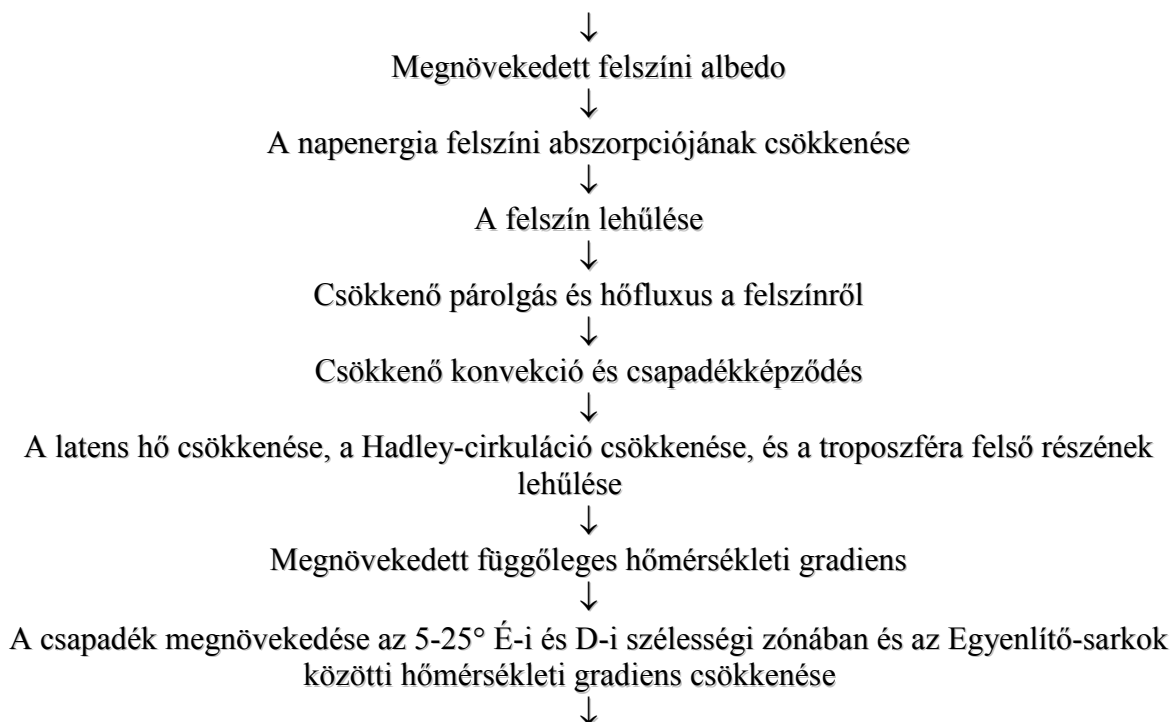
A területhasználat megváltozása

Az emberi tevékenységek területmódosító hatása elsősorban az alábbi vonatkozásokban érvényesül:

- a természetes erdőtakaró (főleg a trópusi esőerdők) csökkentése,
- az öntözés és a túllegeltetés miatti elsivatagosodás,
- az urbanizáció.

A trópusi esőerdők irtása a közvetlen környezetben - hosszabb távon - a legelővé átalakított területek talajának gyors tönkremenetelét eredményezi, a jelenlegi nagyléptékű erdőirtásnak azonban globális klíma-módosító hatása is lehet. Ez az éghajlati folyamatok (visszacsatolások) alábbi sorozatán keresztül érvényesül:

Erdőirtás



A hosszúsági körök mentén csökkenő hő-transzport és az egyenlítői zóna nedvességtartalmának csökkenése



Globális lehűlés és a csapadék csökkenése a 45-85° É-i és a 40-60° D-i szélességi övezetben

A fenti folyamat elsődleges oka az, hogy a felszín albedója az esőerdő-savanna területmódosítás következtében 0,07-ről 0,16-ra nő. Ezen kívül az esőerdők irtása jelentősen növelheti a légkör CO₂-tartalmát is, mivel a növénytakaró CO₂ felhasználása ekkor elmarad.

A túlzott mértékű legelőhasználat szintén jelentős mértékű albedo-változást eredményez. Pl. az afrikai füves szavannák albedója 0,16, a túllegeltetés miatt létrejött, elsivatagosodott területek albedója 0,35. A megváltozott albedo megnövekedett felszíni reflexiót okoz, ez növeli a légkör stabilitását, ezáltal csökken a konvekció és a csapadék mennyisége. A folyamat pozitív visszacsatolás jelleggel működik és az elsivatagosodás folyamatát erősíti. Egyesek szerint ezek a folyamatok a felelősek a Száhel-övezet fokozott mértékű expanziójáért.

Az urbanizáció, mint területhasználat-módosítás az albedo megváltoztatásán kívül még számos más természetes paramétert is megváltoztat. Ezek a változások különböző irányokban hatnak, amelyek részletezésével itt nem foglalkozunk. Az alábbiakban viszont megadjuk azokat a főbb éghajlati tényezőket, amelyeket az urbanizáció módosít. (A + előjel növekedést, a - jel csökkenést jelent a 'természetes' állapotú területekhez viszonyítva.)

Sugárzás (vízszintes felületekről, átlag)	-15%
(az UV-sávban)	-20%
Hőmérséklet éves átlag	+0,7C°
téli maximum	+1,5C°
fagymentes időszak	+2, +3 hét
Szélesebesség éves átlag	-20, -30%
erős szellőkések	-10, -20%
szélcsendes időszakok gyakorisága	+5, +20%
Felhőzet felhő gyakorisága	+5, +10%
köd	+100% (tél)
Csapadék	-30% (nyár)
összeg	+5, +10%
havas napok száma	-14%

A fenti adatokat sok város adatainak átlagolása útján határozták meg. A hatások nyilvánvalóan nagyobbak a nagyvárosokban és időről-időre változhatnak is. Pl. a széntüzelésről az olaj-, majd a gáztüzelésre való áttérés gyakorlatilag teljesen megszüntette a legendás londoni ködöt, és más kisebb klímaváltozási eredményekkel is járt.

A magas légkör ózontartalmának csökkenése

Az ózon (O₃) mérgező hatású, szúrós szagú gáz. A felszín közelében a belsőégésű motorok működésének melléktermékeként keletkezik, főleg nagyvárosi környezetben, ahol a légszennyezés egyik igen radikális komponense. A sztratoszférában (20 és 30 km közötti magasságban) elhelyezkedő ózonréteg viszont hatékony védőpajzs a Napról érkező ultraibolya-sugárzás ellen. Az öslégkörrel kapcsolatos jelenleg elfogadott elméletek szerint a szárazföldi élet csak

akkor vált lehetővé, amikor az ózonréteg már kellő védelmet nyújtott a romboló UV-sugárzás ellen. (Az ózon elnyelési spektruma az **1.3 ábrán** látható, a jelenlegi elemzés az UV-sávban található abszorpcióra vonatkozik.) Az ózonréteg vastagsága a sztratoszférában csak bizonytalanul határozható meg, mivel koncentrációja igen kicsi. Szemléletesen úgy jellemezhető, hogy ha a felszín közelében helyezkedne el (1 bar nyomáson), akkor vastagsága maximálisan 3-4 mm lenne. Az ózonkoncentráció jellemzésére ennek nyomán gyakran használják az un. Dobson-egységet (1 Dobson-egység, 1DE = 0,01 mm vastag ózonréteg 1 bar nyomáson).

Az ózon keletkezése a sztratoszférában az alábbi mechanizmus szerint megy végbe:



Az atomos oxigén egy része (mivel kémiaiailag igen aktív) a jelen lévő oxigén-molekulákkal ózont képez:

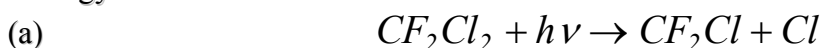


Ez a tulajdonképpeni védőréteg, amely az UV-sugárzás jelentős részét elnyeli: az UV-fotonok hatására a (b) folyamat fordítottja történik.

Természetes körülmények között - hosszabb időtávon - a keletkezés sebessége valamivel nagyobb volt mint az elbomlása, így dinamikus egyensúlyi állapotban egy tartós ózonréteg alakult ki.

A freonok az ipari technológiákban az 1930-as évek óta kiterjedten használt semleges gázok. Kémiai besorolásuk szerint klórozott-fluorozott metán-származékok; több változatuk van, a leggyakrabban használt változat a CF_2Cl_2 , az un. CFC-12. Semleges kémhatásuk, nagy stabilitásuk, könnyű, veszélytelen kezelhetőségük és a szobahőmérséklet közelében történő kondenzációjuk miatt igen alkalmasak hűtőszekrények hűtőközegének, vagy szóró palackok hajtógázának.

1974-ben Sherwood Rowland légkörkémikus a Kaliforniai Egyetemen a freonok és a légköri ózon egymásra hatásával kapcsolatban az alábbi folyamatot ismerte fel. A freonok molekulái igen stabilak, ezért a felszínről bomlás nélkül, diffúzió révén felemelkedhetnek a sztratoszféráig. Ott az intenzív UV-sugárzás hatására felbomlanak a következő reakcióegyenlet szerint:



A leszakadt klór-atom egy ózonmolekulával az alábbi reakcióba lép:



A keletkezett klór-monoxid a sztratoszférában mindig jelenlévő atomos oxigénnel (lásd előbb) tovább reagál:



Az így létrejött klór-atom a (b) reakció szerint újabb ózonmolekulát bonthat le. (Ily módon - a részletes elemzések szerint - egyetlen klóratom 10^5 ózonmolekulát is elbonthat.) A fenti reakciók a későbbi magas légköri vizsgálatok tapasztalatai szerint valóban végbemennek.

A baljóslatú észlelések eredményeképp az 1970-es évek közepétől műholdak segítségével rendszeresen mérik a magas légköri ózontartalom alakulását. A mérések első riasztó eredménye a Déli-sark fölötti ózonréteg nagymértékű fogyása volt. (A műholdas mérések szerint a réteg vastagsága a kritikus tavaszi időszakban az 1960-1990 közötti évtizedekben 320 DE-ről 180 DE-re csökkent.)

Az ózonréteg fokozatos fogyását figyelték meg Ausztrália, Új-Zéland, majd később Dél-Amerika déli részén, sőt az Egyesült Államok fölött is. A fogyás azonban a Déli-sark fölött a legnagyobb mértékű. Ennek oka az, hogy ott a magasabb légrétegekben nagy mennyiségű jégkristály képződik, ezek nagy felületükkel katalizálják a fenti folyamatot.

Az ózonréteg fogyásának várható hatásaira becsléseket végeztek az USA-ban. Az ózon mennyiségének 1%-os csökkenése a bőrrákos megbetegedések kb. 2-5%-os növekedését eredményezi. Emiatt a következő 50 évben a jelenlegi átlagos érték fölött 12 millió USA-állampolgár bőrrákos megbetegedése várható, közülük több, mint 210 ezer halálos kimenetelű. A helyzet várhatóan még kedvezőtlenebb a Déli-sark közelében lévő területeken, így pl. Ausztráliában, Új-Zélandon és Dél-Amerika déli területein (Chilében). A fokozott UV-sugárzás azonban nemcsak az emberiséget károsítja, hanem a szárazföldi bioszférát, sőt a sekély vizek élővilágát is. Óceánokban végzett vizsgálatokban kimutatták pl., hogy az algák szaporulata egyes helyeken a megnőtt UV-szint miatt 20-30%-kal is csökkent.

Az ultraibolya sugárzás különböző hullámhosszúságú tartományait sajátos néven szokás említeni. A szokásos szóhasználat szerint az elnevezések a következők: UV-A (320-400nm), UV-B (290-320nm), UV-C (230-290nm).

Az UV-A az emberi szervezetre ártalmatlan, sőt hasznos; ez segíti elő a természetes úton történő D-vitamin képződést.

Az UV-B napozáskor bőrleégést és hólyagosodást okozhat, ez hozza létre a bőrfelületen a pigment képződést (barnulást).

Az UV-C különösen veszélyes komponens, ez okozza a bőrrákos megbetegedések különböző fajtáit.

A magas légköri ózon a 290nm-nél (0,29 μ m-nél) rövidebb hullámhosszú sugárzást nyeli el (ld. **1.3 ábra**), az ózonréteg sérülése esetén azonban a rövidebb hullámú sugárzás is áthatol az atmoszférán.

Az ózonréteg további károsodásának megállítása érdekében kötötték 1987-ben a *Montreali Egyezményt*, amelyhez sok ország, köztük Magyarország is csatlakozott. Az egyezmény aláírói vállalták, hogy rövid idő alatt leállítják a freonok gyártását; a fejlődő országok 2000-ig halasztást kaptak. A jelek szerint az egyezményt az aláírók valóban betartották, ennek köszönhetően a freonok gyártása 2000-re az 1985. évi érték 1/6-ára csökkent. Ennek eredményeképp a felszín közeli koncentráció növekedésből csökkenésbe fordult és a magas légköri ózonpajzs elvékonyodása az ezredfordulóra megállt. Ez volt eddig az egyetlen sikeres nemzetközi egyezmény a légkör megóvására.

A HIDROSZFÉRA

A víz természetes körforgását az **1.21 ábrán** vázoltuk. Ennek során a tengerekből, óceánokból és a szárazföldekről elpárolgott vízgőz csapadék formájában visszahull a tengerekbe és a szárazföldre; a szárazföldekre hulló csapadék egy része a felszínen lefolyik, másik hányada beszivárog a felszín alá, ahol jóval lassabban, de szintén lefolyik. Globális méretekben a következő mérlegegyenlet érvényes:

$$CS = L + P \quad (1.19)$$

ahol CS a csapadék, L a lefolyás, P a párolgás. Kisebb területekre és rövidebb időszakokra a vízmérlegnek tartalmaznia kell a felhasználást és az esetleges tározásokat is. Ekkor a mérlegegyenlet:

$$CS = L + P + F - T \quad (1.20)$$

ahol F a felhasználás (természetes, vagy antropogén), T a tározás, amely lehet természetes (növényekben, talajrétegekben tárolt víz), vagy mesterséges (folyami tározókban, vagy ipari-, lakossági tárolókban tárolt víz).

A mérlegegyenlet baloldalán álló csapadék mennyisége általában nem, vagy csak kis mértékben befolyásolható. A lefolyás és a párolgás szintén csak kismértékben és indirekt módon befolyásolható. Ezért - a mérlegegyenletből következően - adott területi egységen (pl. egy vízgyűjtő területen) a felhasználást hosszú távon mindenképpen korlátozza a lehullott csapadék mennyisége. (A tározással csak a fogyasztás időbeli ütemezését tudjuk módosítani.)

A csapadék és a párolgás egymáshoz viszonyított mennyiségétől függően az egyes területeket a következőképpen osztályozzuk:

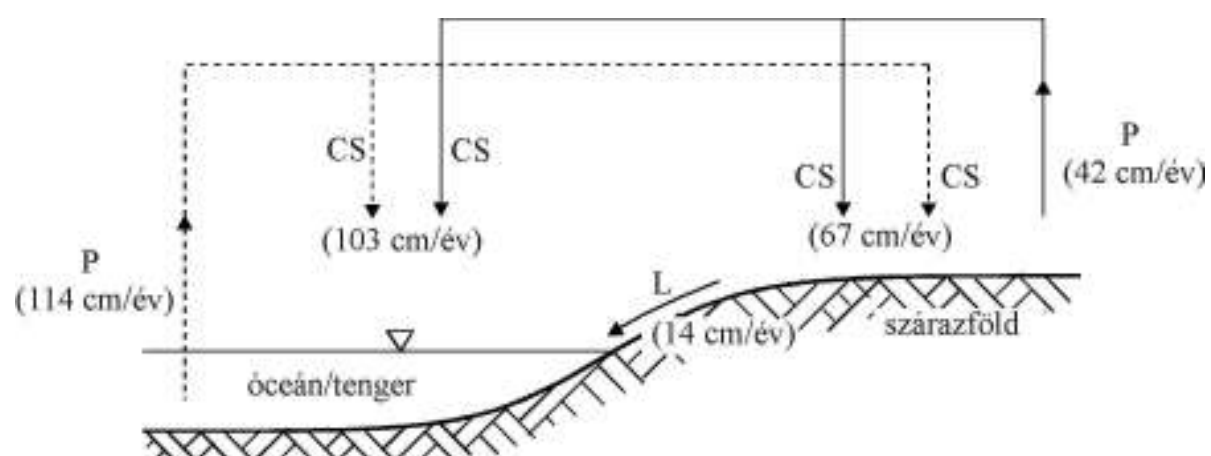
- nedves (humid) területek: $CS > P$
- száraz (arid) területek: $CS < P$
- átmeneti területek: $CS \approx P$

Finomabb osztályozást tesz lehetővé az ún. ariditási index (Ar) bevezetése; ennek definíciója:

$$Ar = \frac{ET}{CS}$$

ahol ET az ún. evapotranspiráció, amely magában foglalja a vízfelületek párolgását (evaporáció) és a növények párologtatását (transpiráció). Az ariditási index alapján a következő területtípusokat definiálták:

- sarkvidéki terület: $Ar < \frac{1}{3}$
- tundra: $\frac{1}{3} < Ar < 1$
- meleg-, mérsékeltövi erdők: $Ar \approx 1$
- füves puszták (szavannák): $Ar = 2 \dots 3$
- félsivatagok: $Ar \approx 5$
- sivatagok: $Ar > 10$



1.21 ábra
A víz természetes körforgása

Megjegyezzük, hogy Magyarország az első osztályozás szerint az átmeneti területekhez, a második szerint a mérsékeltövi erdők zónájába sorolható, a korábbi hosszú távú adatok alapján.

A Föld teljes vízkészletének 97,2%-a tengervíz, és csak 2,8%-a édesvíz. Az édesvíz-készletek 77%-a jég formájában a sarki jégsapkákban és a gleccserekben foglal helyet. A folyékony formában található édesvíz a teljes készlet 22,4%-a, az atmoszférában lévő vízgőz pedig az édesvíz-készlet 0,6%-át teszi ki.

A víztömegek mozgási folyamatainak megértése szempontjából fontos adat az un. tartózkodási idő (T). Ennek definíciója a következő:

$$T = \frac{V}{\Delta v} \quad (1.21)$$

ahol Δv az egy év alatt az adott tartózkodási helyen történő vízcsere, pl. $\text{m}^3/\text{év}$ -ben, V az adott tartózkodási helyen lévő összes vízmennyiség. A két paraméter hányadosa idő-dimenziójú mennyiséget eredményez, mértékegysége: év. Az ennek megfelelő tartózkodási idők a következők:

- világóceánok, tengerek:	2500 év
- talajvíz:	1400 év
- talajnedvesség:	1 év
- légköri nedvesség:	0,022 év (8 nap)
- tavak:	17 év
- sarki gleccserek:	9700 év

A csapadék

A csapadék képződésének három alapvető módját különböztetjük meg. (1) A domborzat hatása (*orografikus hatás*): a magas hegységek szél felőli oldalán a lejtő terelő hatására a levegő felfelé áramlik és lehül, páratartalma lecsapódik. A hegység széllel ellentétes oldalán emiatt gyakran jelentős csapadékhiány lép fel. (2) A függőleges felfelé áramlások pl. a monszun esők övezetében, vagy a trópusokon szintén jelentős csapadékképző hatást eredményeznek (*konvekciós hatás*). Ugyanilyen csapadékképző folyamatokat indíthat - bár kisebb mértékben - egy városi környezet, egy nagy hő-kibocsátású ipartelep, vagy erőmű. (3) Végül az időjárási frontok határfelületén, a különböző hőmérsékletű légtömegek keveredése folytán jöhet létre jelentős csapadék, különösen a hideg frontok érkezésekor (*ciklon-, vagy fronthatás*).

A lefolyás

A lefolyás (L) összetevőit az **1.22a ábrán** ábrázoltuk. A főbb összetevők a következők:

- a mederbe hulló csapadék,
- felszíni lefolyás (L_f),
- a telítetlen talajzónában történő lefolyás (L_{t1}),
- talajvízáramlás (L_{t2}).

A mederbe hulló csapadék a vízgyűjtők többségénél elhanyagolható a többi komponenshez képest. Felszíni lefolyásnak azt a lefolyás-hányadot nevezzük, amely nem szivárog be a talajba, hanem a felszínen lepelszerű vízmozgással, vagy kisméretű, ideiglenes csatornák mentén áramlik. A felső talajzóna lefolyása a beszivárgásból származó víz egy részét jelenti, amely a tereppel párhuzamosan a közeli medrekbe áramlik. A talajvízáramlás a telített zónában törté-

nő áramlás. Részben a terület közvetlen beszivárgásából származik, részben távoli utánpótlódási területekről áramlik. Az esetek többségében lassú, lamináris áramlás, ez a mederlefolyás legfontosabb komponense hosszú, száraz időszakokban. A mederlefolyásnak ezt a részét felszínalatti hozzáfolyásnak nevezik.

A lefolyásra ható tényezők

Ezeket két csoportba szokás sorolni:

- a teljes lefolyásmennyiséget szabályozó tényezők (klímaviszonyok, és a vízgyűjtőterület nagysága, földrajzi helyzete),
- azok a tényezők, amelyek a lefolyás rövid távú változásaira hatnak (meteorológiai tényezők, a vízgyűjtőterület adottságai, és a medermorfológia hatása).

Klímaviszonyok

Hosszú távon a lefolyás mennyisége az (1.20) mérlegegyenlet szerint alakul. Ettől rövid távon lehetnek eltérések, pl. a csapadék mennyiségének ingadozásai, vagy a vegetáció változásai következtében.

A vízgyűjtő terület nagysága

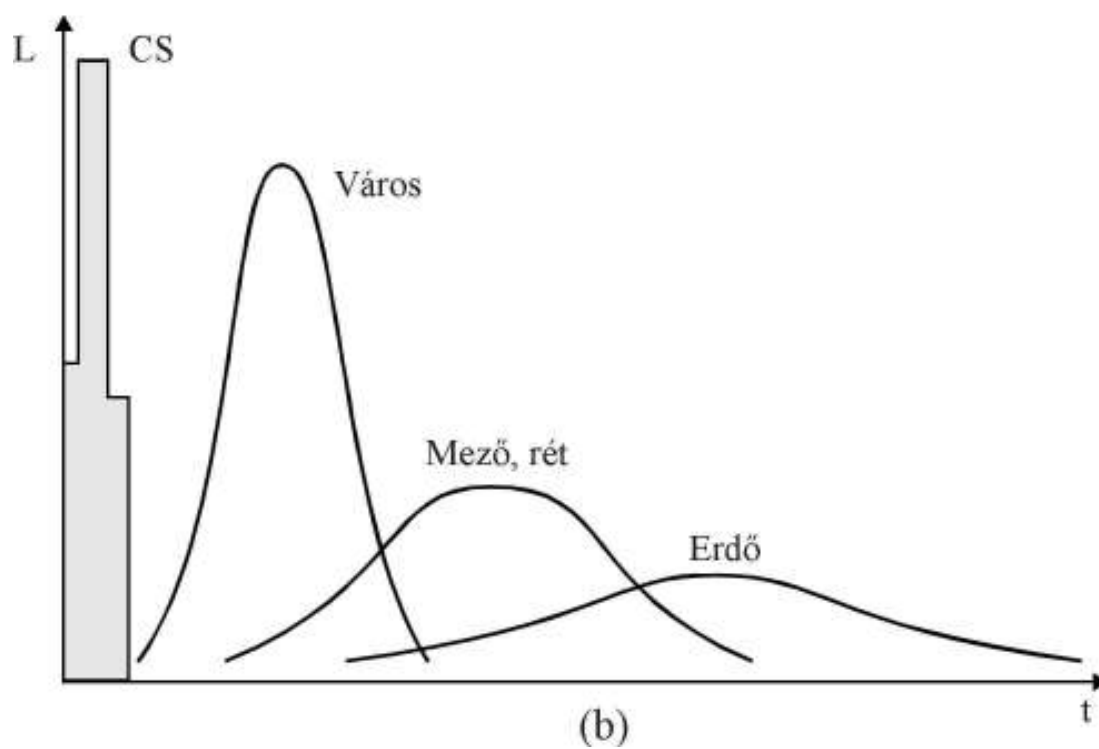
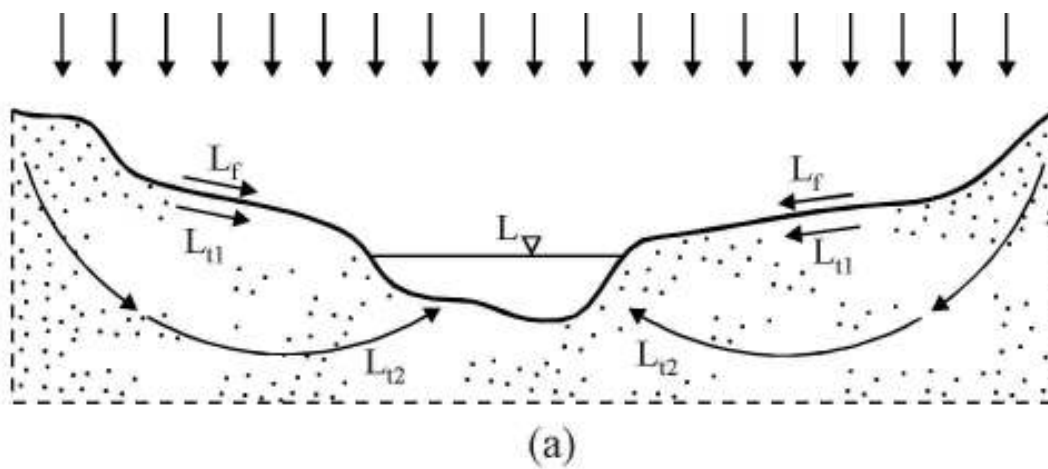
A vízgyűjtő terület nagysága az összes főbb paraméter szempontjából fontos, kihat a csapadék, a párolgás és a lehetséges lefolyás mennyiségére is. További fontos paraméterek: a terület lejtése, a talaj- és közettípusok. Végül a vízgyűjtő terület geodéziai magassága és domborzata jelentős hatást gyakorolhat a csapadék mennyiségére és így a lefolyásra is.

Meteorológiai tényezők

- A csapadék jellege szerint lehet eső, vagy hó; hó esetén a lefolyás erősen késleltetett lehet.
- A csapadék intenzitása és időtartama: nyilvánvaló, hogy ugyanaz a csapadékmennyiség zápor formájában gyors felszíni lefolyást és meredek árhullámot eredményez, míg lassú esőzések idején a beszivárgási hányad megnövekedése miatt a lefolyás késleltetett.
- A csapadék területi eloszlása a vízgyűjtőn szintén kihat a lefolyás időbeli eloszlására; ez nagy vízgyűjtő terület esetén igen változatos hatást eredményezhet.

A vízgyűjtő terület adottságai

- A vízgyűjtő felszíni talaja és a felszín alatti kőzetek minősége további befolyásoló tényezők; nyilvánvaló, hogy erősen áteresztő talaj és repedezett alapkőzet esetén a lefolyási görbe időben nyújtottabb lesz, mint pl. vízzáró felszín és tömör alapkőzet esetén. Ugyanígy a nagy kiterjedésű burkolt felületek (pl. városi környezet) gyorsabb és meredekebb lefolyást eredményez.
- A növényzet vízvizsdatartó hatása a lefolyás időbeli késleltetését szintén jelentősen módosíthatja, mégpedig - egyébként azonos körülmények között - a növényborítás mértékével arányosan. (Az utóbbi két hatást az **1.22b ábra** szemlélteti.)
- A vízgyűjtő alakja számottevően módosíthatja a lefolyási görbe időbeli alakulását. Erre mutatunk néhány példát az **1.23 ábrán**. Ugyancsak fontos tényező a vízgyűjtőterület átlagos lejtése.



1.22 ábra
A lefolyás összetevői és néhány lefolyástípus

A medermorfológia hatása

- Erősen kanyargó folyómeder esetén az abban történő lefolyás jóval lassúbb, mintha ugyanazon a szakaszon kevésbé kanyargó, vagy egyenes folyószakasz haladna (**1.24 ábra, 1 és 2**).
- A mederszelvény növényvel való borítottsága a lefolyást nyilvánvalóan lassítja, ugyanabban a szelvényben növényzet nélkül az áramlási ellenállás jóval kisebb és így a lefolyás jóval gyorsabb (**1.24 ábra 3 és 4**).

Az **1.25 ábrán** egy természetes lefolyási rendszer folyamatábráját adjuk meg; az itt megadott diagram folyami vízgyűjtő esetére érvényes. (Az ábrán szereplő elnevezések közismertek, talán egy kivétellel: *intercepció*s *tározás* alatt a növényzet levelei, ágai, általában a talaj fölötti részei által visszatartott vízmennyiséget értjük.)

ANTROPOGÉN HATÁSOK A HIDROLÓGIAI CIKLUSBAN

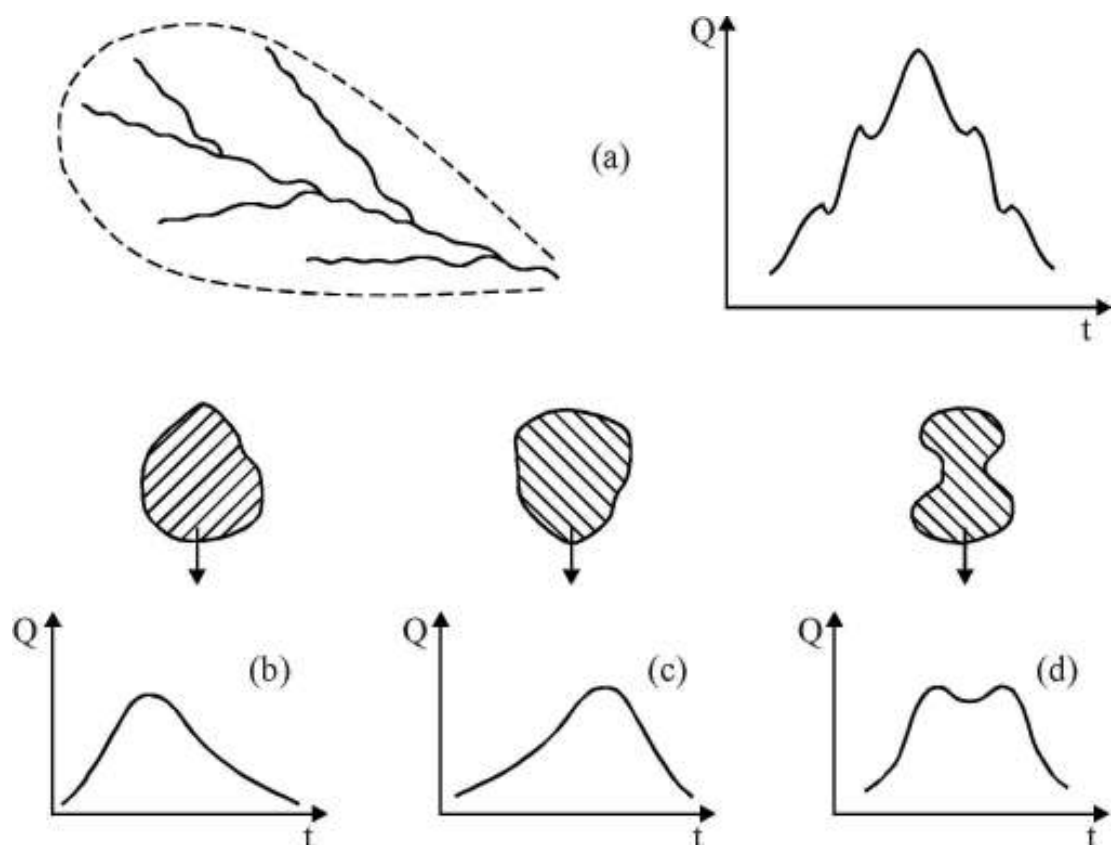
Az emberi tevékenységek hatása a víz természetes körforgására már évezredekkel ezelőtt nyilvánvalóan, látható formában megjelent. Elég, ha az ókori gátépítésekre és öntözőrendszerekre utalunk. Az utóbbi évszázadokban ez a hatás egyre erősödött. Valamennyi antropogén hatás felsorolása és elemzése szinte lehetetlen, ezért itt csak a legfontosabbakat ismertetjük röviden, nagyjából az **1.25 ábra** sorrendjének megfelelően.

A **csapadék** közvetett módon, emberi létesítmények másodlagos hatására is megváltozhat (ld. a Területhasználat megváltozása és a Csapadék c. szakaszt).

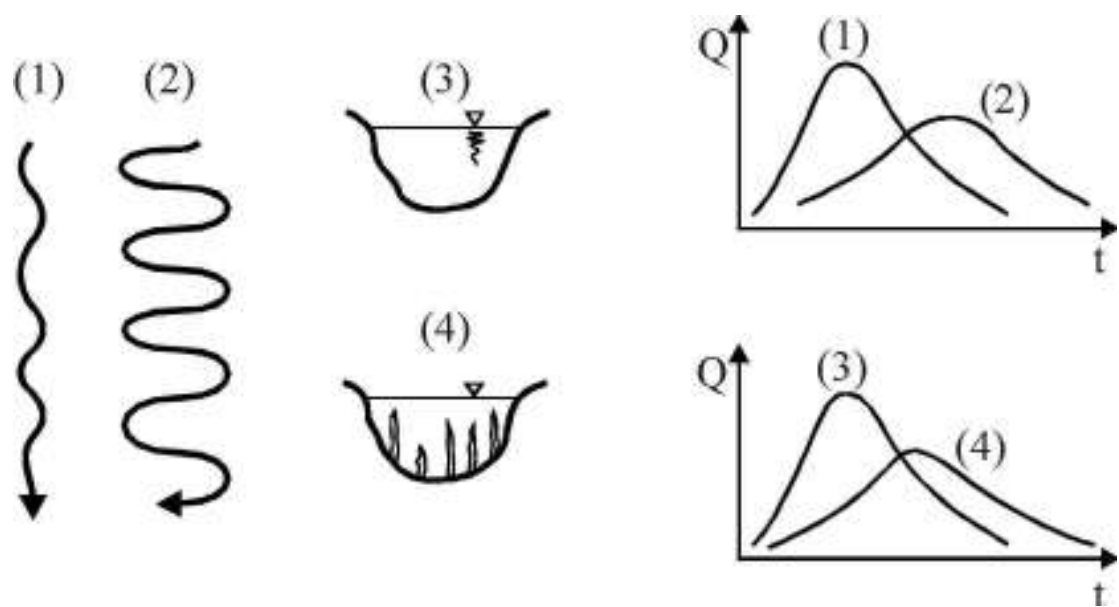
A csapadék közvetlen eszközökkel történő módosítására csak az utóbbi időben nyílt lehetőség. Néhány évtizede alkalmazott eljárás a "felhők beoltása". Sok esetben a meglévő felhőzetből azért nem hullik csapadék, mert az esőcseppek túl kicsik. A felhőkben kondenzált vízcseppek átlagos mérete 0,01mm, a csapadékképződés viszont csak akkor indul meg, ha az esőcseppek átmérője eléri a 0.2 mm-t. Ha mesterséges kondenzációs magokat viszünk be a felhőbe, az apró esőcseppek nagyobb méretűekké állnak össze, a csapadékképződés beindulhat. Mesterséges kondenzációs magokat képez pl. a kálium-jodid (KI), vagy az ezüst-jodid (AgI) amelyeket felülről lehet a felhőkbe permetezni repülőgépről. Ugyanezzel a módszerrel sokszor sikeresen megelőzték jégeső képződését.

Egyes sivatagos területeken újabban kifejlesztett módszer a felhők "megcsapolása". Az eljárás egy régi megfigyelésen alapszik. Olyan területeken, ahol a sivatagot a tengertől alacsony hegyek választják el, és a szél a tenger felől fúj, gyakori a köd- és felhőképződés, mégsem képződik csapadék. Itt ugyanis a hegyek alacsonysága miatt az orografikus csapadékképződés (ld. a Csapadék c. fejezetet) feltételei csak részben teljesülnek. Ilyen pl. az Andok előhegye, az El Tofo lábánál lévő félsivatagos terület, ahol sok kis település korábban súlyos vízhiánnyal küzdött. A levegő magas páratartalmának megcsapolására az ötletet az adta, hogy az ilyen területeken a pókhálókról és egyes növényekről gyakran csöpög a víz, tehát a szálas-rostos szerkezetű anyagok kondenzációs centrumokat képeznek. A nemzetközi támogatással létesített El Tofo projekt során több száz nagyméretű (4m x 12m) polipropilén hálót feszítettek ki, ezekkel naponta több száz köbméter vizet csapolnak a felhőkből. Az összegyűjtött vizet tárolókba, majd onnan vízvezeték a környező kis településekre vezetik. A lakosság életét alapvetően megváltoztatta a víz: a sivatag helyén virágoskertek nyílnak és a házakban fürdőszobákat szereltek fel.

Az El Tofo projekt sikere újabb fejlesztéseket ösztönzött. Nemzetközi kutatási programban tisztázták a felhőcsapolás feltételeit. Az erre alkalmas területek általában a tengerpart 25 km-es sávjában helyezkednek el és a tengertől 500-1000m magas hegyek választják el őket.

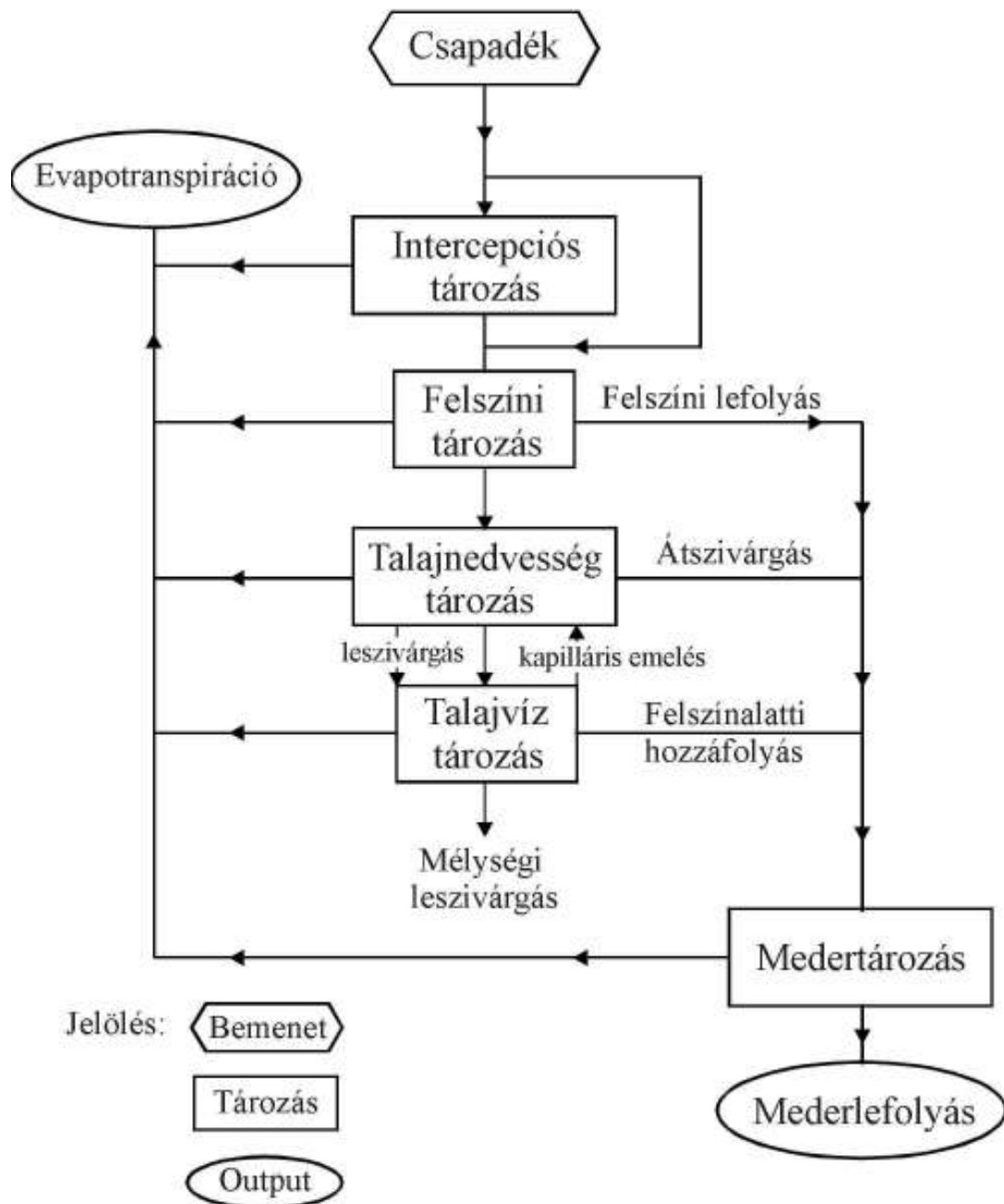


1.23 ábra
A lefolyás függése a vízgyűjtő tulajdonságaitól



1.24 ábra
A medermorfológia és a mederállapot hatása a lefolyásra

Természetes lefolyási rendszer blokkdiagramja
(folyó vízgyűjtőterület)



1.25 ábra
A hidrológiai ciklus folyamatábrája egy folyami vízgyűjtőre

A szél a tenger felől fúj és (a felszíni topográfia hatására) gyakori a felhő- és ködképződés. A felmérések szerint Latin-Amerika, Afrika és a Közel-Kelet 22 országában vannak olyan vízhiányos területek, ahol a fenti feltételek teljesülnek. A polipropilén-hálós felhőcsapolás a jövőben ott is a vízhiány jelentős enyhülését eredményezheti.

A **párolgás** a felszín mesterséges átalakítása nyomán jelentősen megváltozhat. Az antropogén változások egyik nyilvánvaló példája az, amikor pl. egy természetes erdőterületen várost építenek; ekkor a párolgás az eredeti értéknek akár egytizedére is lecsökkenhet.

A **beszivárgás** szintén jelentősen módosulhat, pl. az említett urbanizációs hatások következtében. Ugyanígy ebben a tekintetben is jelentős változást hozhat az erdőirtás, vagy a túllegeltetés. Kisebb mértékű változásokat okozhat a növénytakaró megváltoztatása, ill. maga a mezőgazdasági művelés, pl. a szántás, vagy a járművek által okozott talaj-tömörítés.

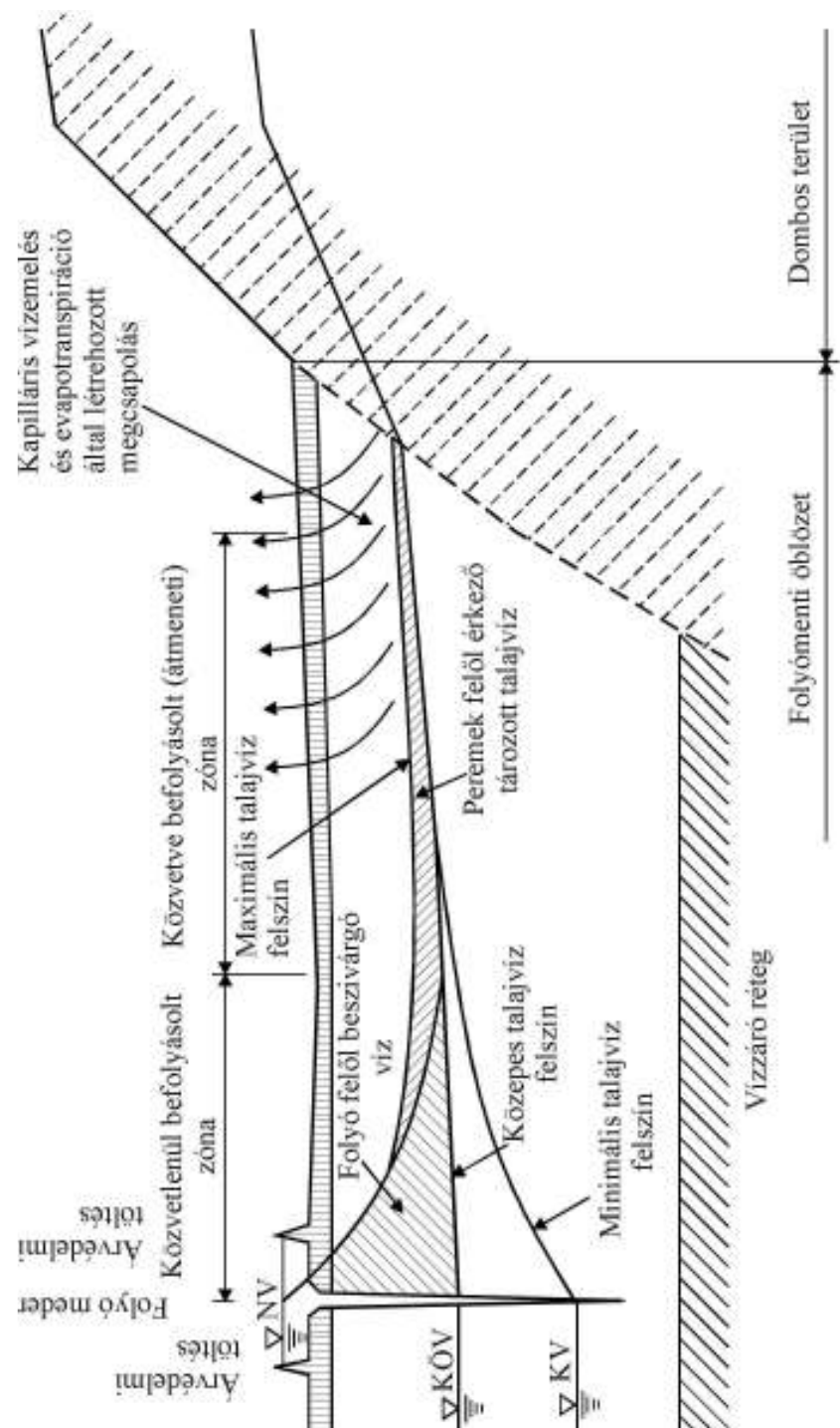
A **felszíni lefolyás** szoros korrelációban van a növénytakaró minőségével. Gyér növényzet esetén a felszíni lefolyás igen gyors, gazdag növénytakaró esetén a növényzet késlelteti a felszíni lefolyást. A két eset között egyébként ugyanolyan talajminőség esetén akár egy nagyságrend különbség is lehet. Egy erdőterület falusi, majd városi környezetté történő átalakulásakor a lefolyás jellege az **1.22b ábrának** megfelelő változásokon mehet keresztül.

A **talaj nedvességtartalma és a talajvízszint** érzékenyen függ a növényzettől. A növénytakaró módosítása, vagy megszüntetése (pl. erdőirtás) alapvetően megváltoztathatja a talajnedvességi zóna víztartalmát és lesüllyesztheti, ill. megemelheti a talajvíztükör szintjét.

A további hatások megértése céljából érdemes röviden áttekinteni a felszíni és a felszínalatti vizek egymásra hatását. Az **1.26 ábra** egy vízfolyás árterét és az alatta lévő felszínalatti víztartót mutatja be (az ábrán a függőleges lépték erősen torzított). Közepes vízállásoknál (KÖV) a talajvíz kis eséssel, kis vízállások (KV) esetén nagy eséssel áramlik a mederbe, utóbbi esetben (pl. hosszú, csapadékmentes időszakokban) gyakran a talajvíz a vízfolyás egyedüli táplálója. Magas vízállások (nagy víz = NV), kiváltképp árvizek időszakában viszont a felszíni víz táplálja a talajvizet. Az ábra alapján érthető, hogy a kölcsönhatás mértéke csökken a folyótól mért távolság növekedésével.

A víz körforgására gyakorolt emberi hatások közül a legjelentősebbek az **öntözés-lecsapolás**, a **vízhasználat**, a **folyószabályozás** és a **tározás**. Az alábbiakban ezeket részletesebben elemezzük.

Öntözés-lecsapolás: mindkét tevékenység évezredek óta közzismert és igen kiterjedt. Lényeges hatásuk a talaj nedvességtartalmának, ill. a talajvíztükör szintjének módosítása (**1.27 ábra**); mindkét vázlaton a szaggatott vonal az eredeti, a folytonos vonal a megváltozott talajvízszintet jelöli. Az öntözés (felső ábra) nyilvánvaló célja a művelt rétegek víztartalmának növelése, ill. a talajvízszint emelése. Mindkét hatás a párolgás intenzitásának növekedését eredményezi. A fokozott párolgás következtében viszont megnövekedhet a felszín-közeli rétegek sóartalma. Ha a talajvíz sok nátrium-, vagy kálium-sót tartalmaz, akkor (mivel ezek jól oldódó sók) az ozmózisnyomás jelentősen megnövekszik. Ez hosszabb távon a növénytakaró gyérüléséhez, majd pusztulásához vezethet. A növénytakaró eltűnése után a talaj szervesanyag-tartalma és így kötöttsége is rohamosan csökken, ennek következtében a talaj a felszínről a szél vagy a víz eróziós munkája révén lepusztulhat. Ezt a folyamatot nevezik másodlagos szikesedésnek, ill. elsivatagosodásnak. Kiterjedt példáit az ókori Mezopotámia területén és az Aral-tó környezetében találhatjuk meg. A lecsapolásnak (alsó ábra) szintén lehetnek káros következményei. Az elsődleges cél itt legtöbb esetben új mezőgazdasági területek nyerése. Ez azonban nem mindig bizonyul sikeresnek, így történt pl. a Kis-Balaton esetében is. A múlt század végén történt lecsapolás eredményeképp nyert mezőgazdasági terület



1.26 ábra

A felszíni víz és a talajvíz egymásra hatása egy vízfolyás mentén

igen rossz minőségű, gyakorlatilag használhatatlan volt. Ugyanakkor a Balaton természetes előszűrőjének felszámolása az újabb időkben - közismerten - súlyos vízminőségi problémákat okozott a tóban.

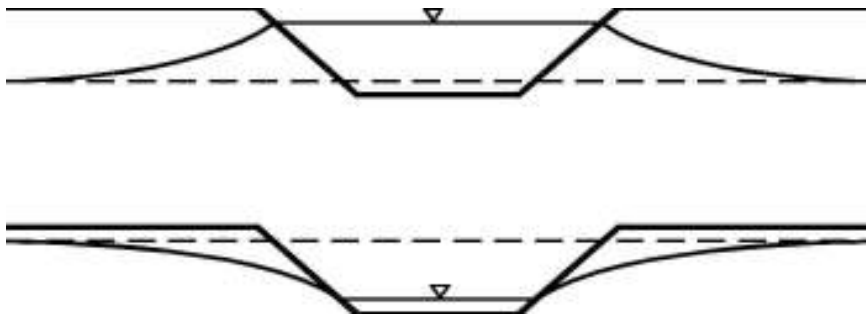
Az öntöző- és lecsapoló csatornák talajvízszint-módosító hatása (mint az ábra is érzékelteti), a csatorna korlátozott környezetében érvényesül, a befolyásolt zóna szélessége függ az altalaj anyagától, rétegzettségétől és más paraméterektől.

A vízigények növekedése a népesség növekedésének természetes következménye. A megnövekedett igények kielégítésére részben a felszíni vízfolyások vizét, részben - és egyre növekvő mértékben - a felszínalatti vízkészleteket használják fel. A folyók vizének ipari, mezőgazdasági, lakossági, stb. célokra történő felhasználása egyes folyók vízjárását alapvetően megváltoztatta. (A hidrológiai helyzet változását közelítőleg úgy képzelhetjük el, hogy az **1.26 ábra** természetes vízszint-ingadozásai helyett ekkor az alacsony vízállásoknak (KV) megfelelő állapot állandósul.) Ilyen következményekkel járt pl. az Egyesült Államok D-Ny-i területeinek vízellátása, amelyet lényegében a Colorado-folyó vízhasználatával oldottak meg. A növekvő vízkivétel miatt a folyó alsó szakaszán egyre nagyobb vízhiánnyal kell számolni, és az egykori torkolat (a Mexikói-öbölnél) medre ma már teljesen száraz, a folyó nem éri el az óceánt, hanem "megszűnik" a mexikói sivatagban.

A felszínalatti vízkészletek növekvő kitermelése helyenként a talajvízszintek rohamos csökkenéséhez vezetett. Szélsőséges esetben ez a felszínalatti víztartók teljes kiürülését is eredményezheti (vízbányászat), helyes talajvíz-gazdálkodás esetén azonban ez az állapot nem következhet be. Hosszú távon ui. a kiszivattyúzott víz mennyisége nem lehet nagyobb, mint a felszíni és felszínalatti utánpótlódás összege.

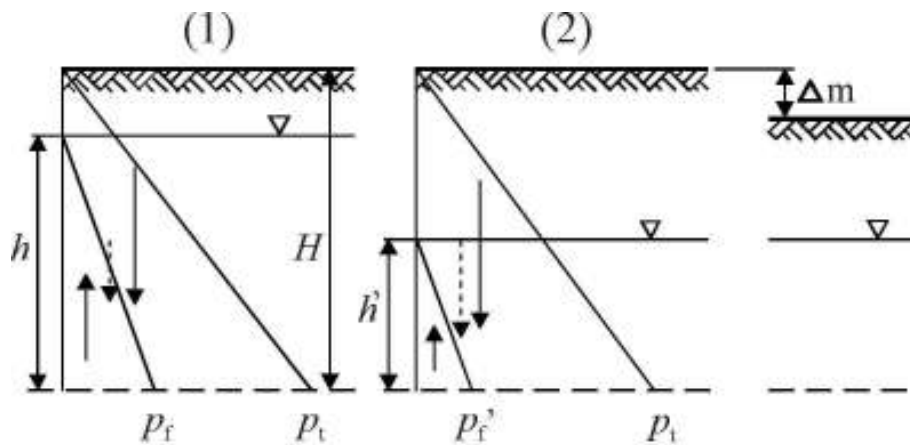
Sok esetben fellép a talajvíz-kitermelésnek egy további mellékhatása, az un. térszín-süllyedés. A jelenséget az **1.28 ábrán** szemléltetjük, ugyanott a jelenség pontos fizikai leírását is megadjuk. (Az 1. és 2. eset a szivattyúzás előtti és utáni helyzetnek felel meg; mindkét esetben megadjuk a lefelé irányuló effektív nyomás értékét, amely a talajnyomás és a felhajtóerő különbségeként számítható. Könnyen belátható, hogy a 2. esetben az effektív nyomás nagyobb.) A jelenség közelítő, elemi magyarázata a következő: A víztartó réteg szemcséire, ha azok a vízszint alatt vannak, a gravitációs erőn kívül a felhajtóerő is hat, ami csökkenti a réteg önsúlyát. Ha a vízszint csökken, a réteg szárazra került szemcséire csak a gravitációs erő hat, tehát megnő a réteg önsúlya, ill. az ebből eredő, lefelé ható nyomás. Ha a víztartó rétegek anyaga zsugorodásra hajlamos komponenseket (pl. iszap-, vagy agyagzárványokat, lencsákat) tartalmaz, a megnövekedett nyomás hatására a réteg megsüllyed, ennek következtében a felszín is lesüllyedhet. Jelentős talajsüllyedéseket (10-15 m) tapasztaltak Japán egyes területein, Milánó környékén (4-5m), de Magyarországon is előfordult hasonló jelenség, pl. Putnok környékén, ami a bányászati vízszint-süllyesztés eredményeképpen állt elő.

A folyószabályozások lényegesen módosíthatják a mederlefolyás jellegét. A szabályozás egyik alapvető művelete, hogy a kanyarulatokat átvágják, ill. csökkentik azok számát. Ehhez hasonló munkálatokat végeztek sok európai és észak-amerikai folyón, pl. a Rajnán, a Rhone-on, a Tiszán, a Dunán, a Mississippin stb. Hatására a meder lefolyási görbéje lényegében az **1.24 ábra** szerinti változáson ment keresztül (a 2. állapot az eredeti, az 1. a szabályozott állapotnak felel meg). Ennek eredményeképp, mint az ábrából következik, az árvízi csúcshozam emelésének hatására az árvízi szintek is megemelkedtek, a területek védelme érdekében ezért emelni kellett a védőgátak magasságát. További hatás a vízsebességek jelentős növekedése, ami fokozott meder-erózióval járt együtt; a folyómedrek a szabályozott szakaszokon jelentősen kimélyültek.



1.27 ábra

Az öntözés és a lecsapolás hatása a talajvízszintek alakulására



$$p_f = h \rho_f g \quad p_t = H \rho_t g$$

$$p_{\text{eff}}^{(1)} = H \rho_t g - h \rho_f g$$

$$p_f = h' \rho_f g \quad p_t = H \rho_t g$$

$$p_{\text{eff}}^{(2)} = H \rho_t g - h' \rho_f g$$

$$p_{\text{eff}}^{(1)} < p_{\text{eff}}^{(2)}$$

1.28 ábra

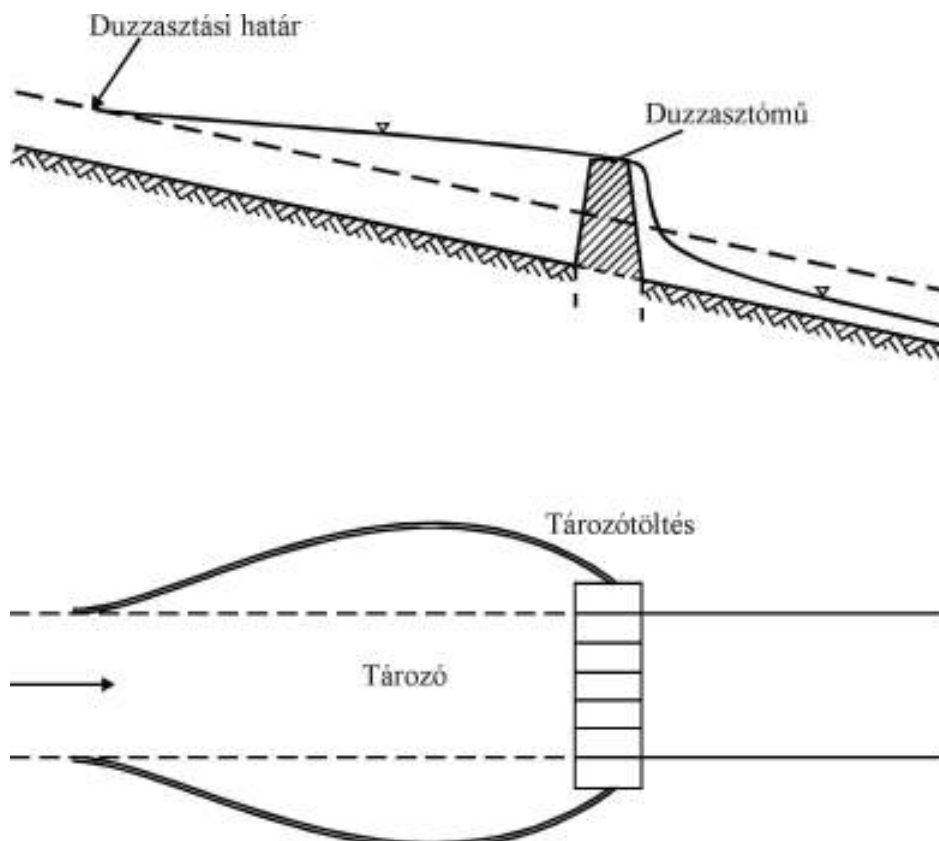
Térszínsüllyedés a talajvíz-kitermelés hatására

A mederlefolyást módosító emberi tevékenységek közül talán a legradikálisabb, és éppen ezért a legtöbbet vitatott beavatkozás a **duzzasztóművek és tározók létesítése**. Az **1.29 ábrán** egy duzzasztómű és a fölötte létrejött tározó és környezetének egyszerűsített vázlatát ábrázoltuk hosszszelvényben és felülnézetben.

A duzzasztómű általában a mederben keresztirányban épített magas, vízzáró fal. Hatására a vízszint a mederben megnő egészen a felső, ún. koronaszintig, közben a megemelkedett vízszint miatt a víz a felső szakaszon lévő területet elárasztja. Az elárasztott terület mesterséges töltéssel határolják, az így nyert terület a tározó, az általa befogadott víztérfogat akár több százmillió m³ is lehet. A tározott víz lehetővé teszi, hogy jelentős létesítmények, pl. ipartelek, városok, öntözőrendszerek vízellátása hosszú időn keresztül egyenletesen biztosítható legyen és nagymértékben függetlenné váljon a folyó természetes vízjárásától. Vannak azonban olyan további hatások, amelyek fizikai, kémiai és ökológiai szempontból hátrányosak lehetnek. Ezeknek a folyamatoknak a megértéséhez először át kell tekintenünk egyes fizikai, kémiai és ökológiai paraméterek változását egy természetes vízfolyás mentén (**1.30 ábra**, O`Riordan, 1995. nyomán).

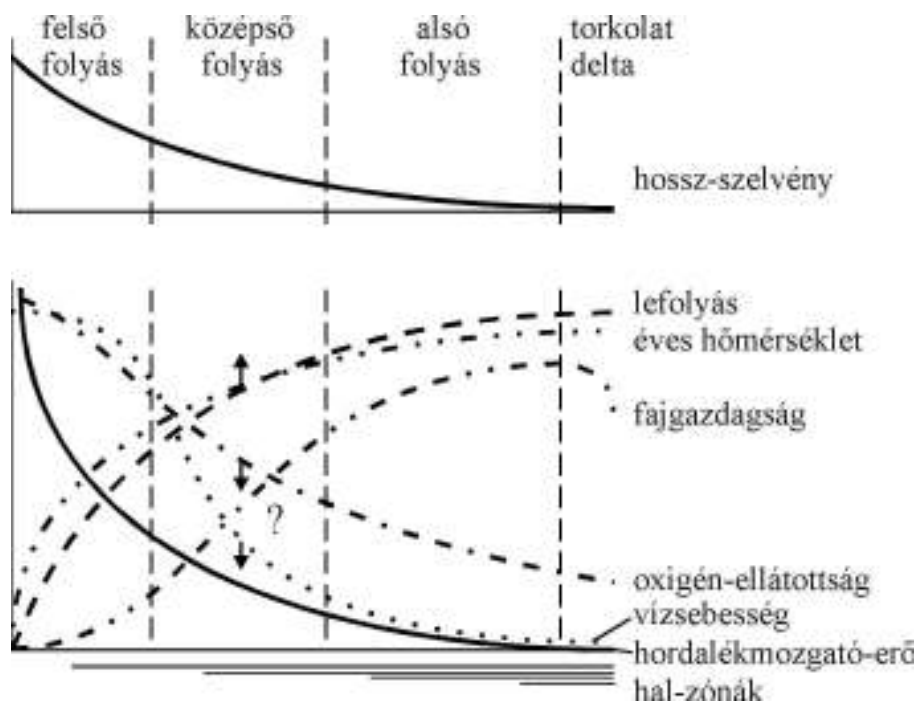
Szembevetendő, hogy a folyó egyes szakaszai (felső-, középső-, alsó- és torkolati/delta szakasz) mentén az átlagos vízszintesítés (az egységnyi hosszra eső szintkülönbség) egyre csökken. Ennek következtében a vízsebesség is egyre csökken, annak ellenére, hogy a folyó vízbősége (a mederlefolyás) egyre nő. Az éves átlaghőmérséklet a hossz mentén egyenletesen nő. Ez részben a földrajzi környezet változásának (hegységből a síkságba való átmenet), részben a vízsebesség csökkenésének következménye, lassúbb folyás esetén ugyanis a környezetből történő hőfelvétel intenzívebb. A sebességgel és a hőmérséklettel szoros kapcsolatban áll az oxigéntartalom, amely a folyó hossza mentén csökken. A felső szakaszok magasabb oxigéntartalma részben az alacsonyabb hőmérséklet következménye (a gázok vízben való oldhatósága csökken a hőmérséklet növekedésével), részben annak köszönhető, hogy nagyobb vízsebességeknél a légkörből történő gázfelvétel intenzívebb. A sebesség csökkenésével együtt csökken a víz hordalékszállító képessége. A fenti fizikai-kémiai paraméterek változásával szoros kapcsolatban áll az élővilág fajgazdagsága. A felső szakaszon a biodiverzitás kicsi, az ott uralkodó speciális feltételek, valamint az élőhelyek térbeli korlátozottsága miatt. A középső- és az alsó szakaszon a biodiverzitás nő, majd a torkolati szakaszon ismét csökken. Emellett az egyes szakaszokon általában jellegzetes, csak arra a szakaszra jellemző növény-, és állatfajok élnek.

Duzzasztómű, ill. tározó létesítésekor a vízfolyás fizikai paramétereit jelentősen megváltoztatjuk. A felszíni- és a talajvizek vonatkozásában a változások az **1.26 ábra** alapján - közelítőleg - úgy jellemezhetők, hogy a duzzasztott szakaszon az NV-nek, a duzzasztó alatti szakaszon pedig a KV-nek (esetleg egy, a KV és a KÖV közötti alacsony vízállásnak) megfelelő állapot állandósul. Az egyéb változások tekintetében vegyük figyelembe a következőket. Ha pl. a középső szakaszon tározót építünk (ld. nyílak az **1.30 ábrán**, a nyílak iránya az adott paraméter változásának irányát mutatja), akkor a vízsebesség ott lényegesen csökken, mivel a mederlefolyás ezúttal az eredetnél jóval nagyobb keresztmetszeten áramlik át. Ennek egyik következménye az, hogy lecsökken a hordalékmozgató erő. A tározók többségében ezért iszaplerakódások jönnek létre. Ha ez jelentős mértékű, akkor hosszú távon a tározó működését is zavarhatja. (Ilyen problémák merültek fel pl. az Asszuáni gát építésekor a Níluson, vagy a Sárga-folyó tározóiban.) A csökkent vízsebesség másik következménye a hőmérséklet növekedése és az oxigéntartalom csökkenése. Ha az ábra nyilainak hosszával jelzett változásokat vízszintesen kivetítjük, akkor szemléletesen is érzékelhetjük, hogy a duzzasztómű építése lényegében a folyó szakasz-jellegét változtatja meg. A fizikai környezet megváltozása az egész ökoszisztéma kisebb-nagyobb mértékű változását idézheti elő. Ennek nagyon különböző következményei lehetnek: egyes növény- és állatfajok eltűnhetnek, mások megjelenhetnek az adott szakaszon, kialakulhat az állóvizekre sokszor jellemző eutrofizáció, általános vízminőségromlás stb.



1.29 ábra

Folyami duzzasztómű és tározó hosszszellete és helyszínrajza



1.30 ábra

Folyószakaszok ökológiai paraméterei

A tározókat természetesen sehol sem azért építik, hogy a természetben káros és helyrehozhatatlan folyamatokat idézzenek elő. Az építőket általában valós igények és pozitív szándékok vezérlik, a negatív hatások nem szándékosak és a legtöbb esetben váratlanok és nehezen előrejelezhetők. Az alábbiakban rövid áttekintést adunk a tározók létesítésének pozitív és negatív hatásairól.

Pozitív hatások:

- víztározás, vízellátási problémák megoldása;
- öntözőrendszerek vízellátása;
- az árvédelmi biztonság fokozása (a tározók ui. nagy vízmennyiségük révén csillapító hatást gyakorolnak az árhullámokra)
- elektromos energia termelése;
- hajózási út biztosítása (a tározóban megemelt vízszint az eredetileg sekély folyószakaszokon is biztosíthatja a folyamatos hajózást).

Negatív hatások:

- iszap felhalmozódása a tározó területén (ez esetleg kotrással eltávolítható, de mindenképpen növeli a létesítmény költségeit);
- a talajvízszint a tározó környezetében megváltozik: a tározó fölötti szakaszon általában megemelkedik, az alsó szakaszon lesüllyed. Az emelkedést ellensúlyozni lehet pl. egy mesterséges lecsapoló-rendszer kiépítésével, a csökkenést ugyancsak mesterséges vízpótló rendszerrel lehet helyrehozni; mindkettő a létesítmény költségeinek növekedését eredményezi.
- kisebb-nagyobb mértékben felléphetnek a már említett ökológiai problémák, ezen kívül eutrofizáció ronthatja a vízminőséget, különösen abban az esetben, ha a tározóba tisztítatlan szennyvizet vezetnek be.

Nyilvánvaló ezek után, hogy egy tározó létesítése kérdésében a döntéshozatal nem könnyű feladat. Éppen ezért minden ilyen létesítmény építését hosszas előmunkálatok előzik meg. Céljuk az, hogy a lehető legpontosabb előrejelzést adják a várható előnyöket és a negatív következményeket illetően. Ezeket az előmunkálatokat, amelyeket ma már a legtöbb fejlett országban, így hazánkban is törvények szabályoznak, **környezeti hatásvizsgálatnak** nevezzük. A hatásvizsgálat során mérlegelni kell az előnyöket és hátrányokat, de az ökológiai-környezeti szempontnak mindenképpen prioritást kell adni. Ugyancsak figyelembe kell venni az érintett lakosság véleményét is, ezért ma már a legtöbb ilyen létesítmény építését társadalmi vita előzi meg.

A vizek természetes és mesterséges szennyező forrásai

Felszíni vizek

Természetes szennyező források a kőzetmállások termékei, a vulkáni hamu és por, valamint a vulkáni tevékenység folytán a levegőbe kerülő kén-dioxid. Ugyancsak ide sorolható a villámcsapások idején keletkező többféle nitrogén-oxid. Jelentős a tengervízből kikristályosodott és a szelek által nagy távolságokra szállított só mennyisége is.

A mesterséges (emberi eredetű) szennyező források közül legfontosabbak az ipari, kommunális és mezőgazdasági eredetű szennyvizek. Ezek nagy hányadát a világ minden részén tisztítatlan állapotba vezetik be a természetes vizekbe. Az ipari eredetű szennyvizek összetétele igen változatos, nagy mennyiségű nehézfémeket, toxikus anyagot stb. tartalmaznak, ezért esetenként igen nagy veszélyt jelentenek a vízi élőlényekre, sőt a környező települések lakóira is.

A kommunális szennyvizek általában kevésbé veszélyesek, jellemző rájuk a magas szerves anyag- és tápanyagtartalom. Mindkettő lebontásához nagy mennyiségű oxigén szükséges, így ez a folyamat rendkívül gyorsan fogyasztja a természetes vízfolyások oxigéntartalmát, ezáltal jelent veszélyt a vízi élővilágra. A szerves- anyag lebontásával egyidejűleg a kommunális vizek baktérium tartalma is csökken, ezt a bonyolult kémiai-biológiai folyamatot nevezik a vizek természetes öntisztulásának. Az öntisztulás igen hatékony módja a vízminőség természetes úton történő javulásának. Sűrűn lakott területeken (pl. Európa nagyobbik felén) azonban a vízfolyásokba bocsátott szennyvizek mennyisége olyan nagy, a bebocsátások közötti távolság pedig olyan kicsiny, hogy az öntisztulási folyamat nem tud kielégítően végbemenni. A problémát az **1.31 ábrán** vázoltuk, ahol a szerves anyag lebontásával szorosan összefüggő ún. biológiai oxigén-igény (BOI) változását ábrázoltuk egy fiktív folyószakasz mentén. A vázolt esetben (és ez érvényes Európa valamennyi kisebb-nagyobb folyójára) az öntisztulás nem tud kellőképpen kifejlődni, mert röviddel az egyik szennyező forrás után már következik a másik. Mezőgazdasági szennyezésekre a probléma hasonló, bár ott rendszerint inkább azok magas tápanyagtartalma jelent problémát; ez az algák és vízinövények produkciójának káros mértékű megnövekedéséhez vezethet. Ez különösen veszélyes lehet állóvizekben.

Gyakori és súlyos probléma az utóbbi évtizedekben a folyóvizek olajszennyezése. Az olaj kisebb sűrűsége miatt a víz tetején úszik, vékony rétegben. Jelenléte akadályozza a légkörből történő oxigénbevitelt és ez végül oxigénhiányhoz vezet, ami gyakran okoz halpusztulásokat. Az olaj vízben oldódó komponensei (pl. a fenolok) toxikus hatásuknál fogva jelentenek veszélyt az élővilágra. A tapasztalatok szerint 1 liter olaj 1 millió liter (1000 m^3) vizet tehet ivásra alkalmatlanná.

Talajvizek

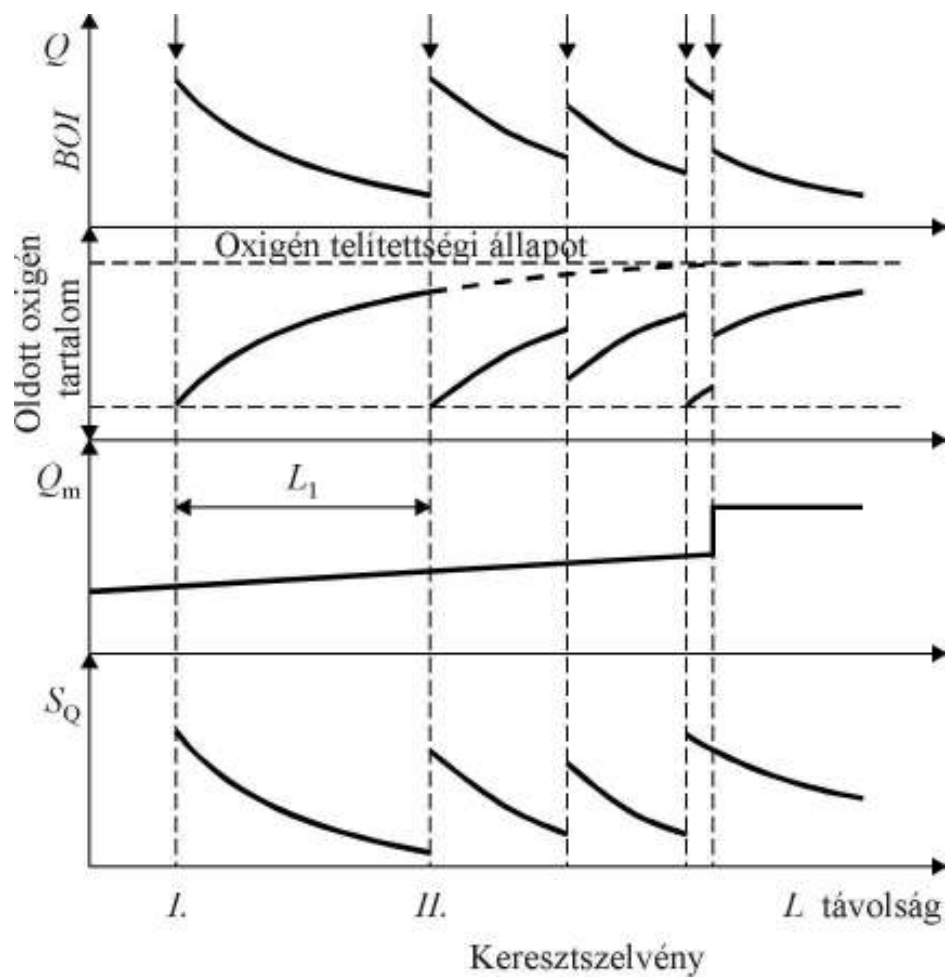
A felszín alatti vizek természetes szennyezői a kőzetekben oldott ásványi sók és tengerparti édesvíztartókban a sós víz behatolása.

Mesterséges szennyező források a szemét- és hulladék lerakóhelyek, szennyvíz-bebocsátások, a legálisan, vagy illegálisan eltemetett veszélyes hulladékok, mezőgazdasági és bányászati eredetű szennyezések, olajszivárgások.

A mezőgazdasági és bányászati eredetű szennyezések keletkezését és terjedését az **1.32 ábrán** szemléltetjük. A műtrágyák és növényvédő szerek a csapadékvízzel szivárognak le az alsó rétegekbe és ott az ivóvízkészleteket szennyezik. Ugyanez mondható el az állattartó telepek szennyvíz bevezetéseire is. A külszíni bányaművelés során eltávolítják a legfelső védő talajréteget, ezáltal a talaj érzékenyebb lesz a behatoló szennyezésekre, emellett a bányaművelés során is bekerülhetnek szennyező anyagok. Az aknamélyítéssel bányászat során a járatok víztelenítése céljából nagy mennyiségű vizet szivattyúznak a felszínre. Ezek általában a mélyebb rétegek nagy sótartalmú vizei; felszíni elhelyezésük után beszivárognak a felsőbb rétegek talajvizét szennyezik. Hasonló jelenség játszódik le a bányameddőknél nagy víztartalma folytán leszivárgó vizekkel, amelyek természetes úton, vagy a technológia folytán különböző vegyi anyagokat tartalmazhatnak.

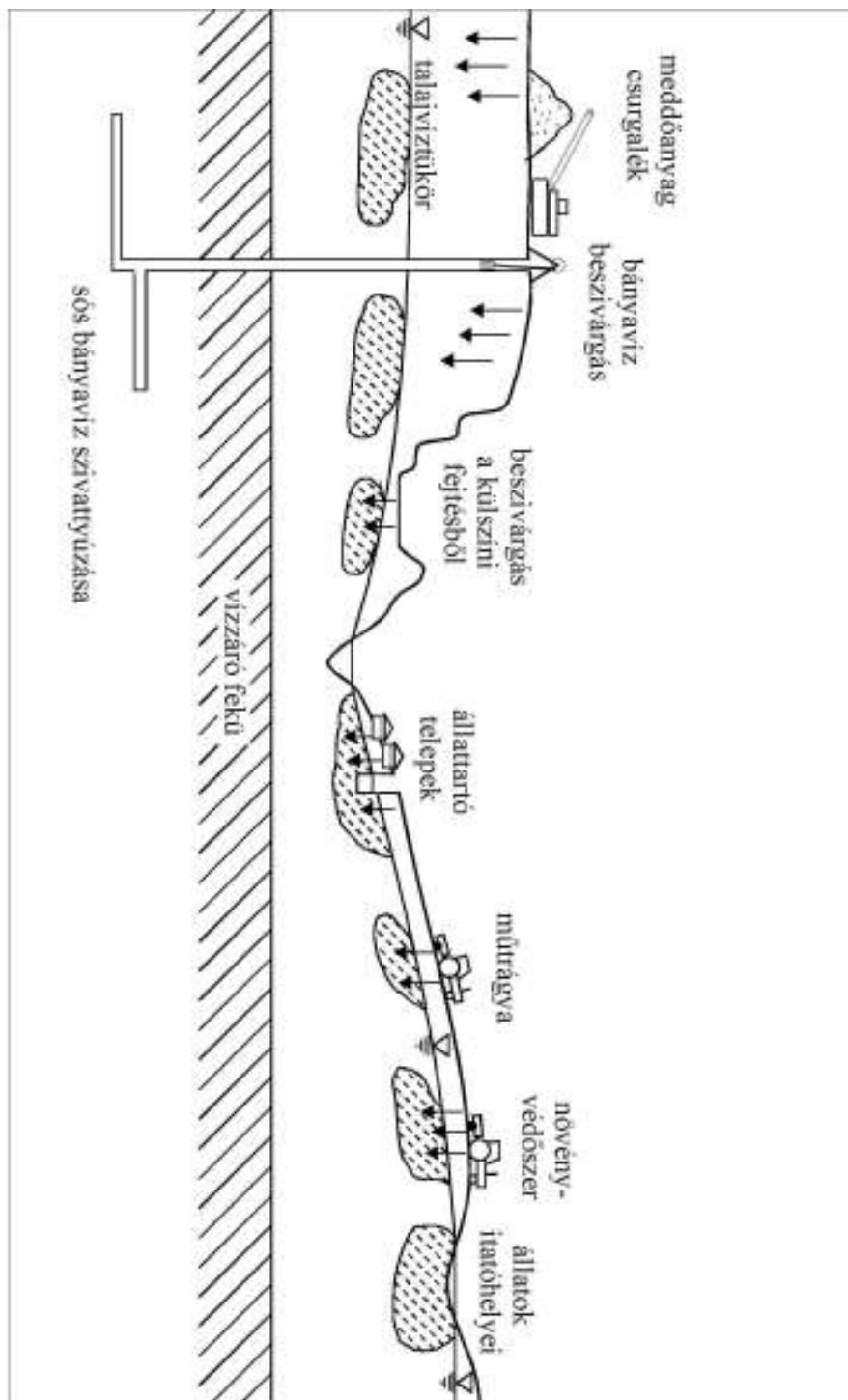
A vízkitermeléssel járó talajvízszennyezésekre az **1.33 ábra** mutat néhány példát. Az ipartelepek vízellátása céljából kiszivattyúzott vizeket legtöbb esetben az üzem közelében lévő vízfolyásba bocsátják, sokszor tisztítás nélkül. Ezek a szivattyúzás miatti nyomáscsökkenés következtében gyorsan leszivárognak, szennyezik az alsóbb rétegeket, esetleg az üzem vízellátására újból kiszivattyúzott vizet is, ezáltal egyre szennyezettebb víz kerül a körforgásba.

A mélyebb rétegekből történő vízkitermelés során különböző ásványi eredetű sók kerülhetnek a kitermelt vízbe. Tengerparti víztartókból végzett intenzív vízkitermelés esetén a sós víz-édesvíz határfelület eredeti helyzetéhez képest benyomulhat az édesvíztartóba. Ha a sós víz



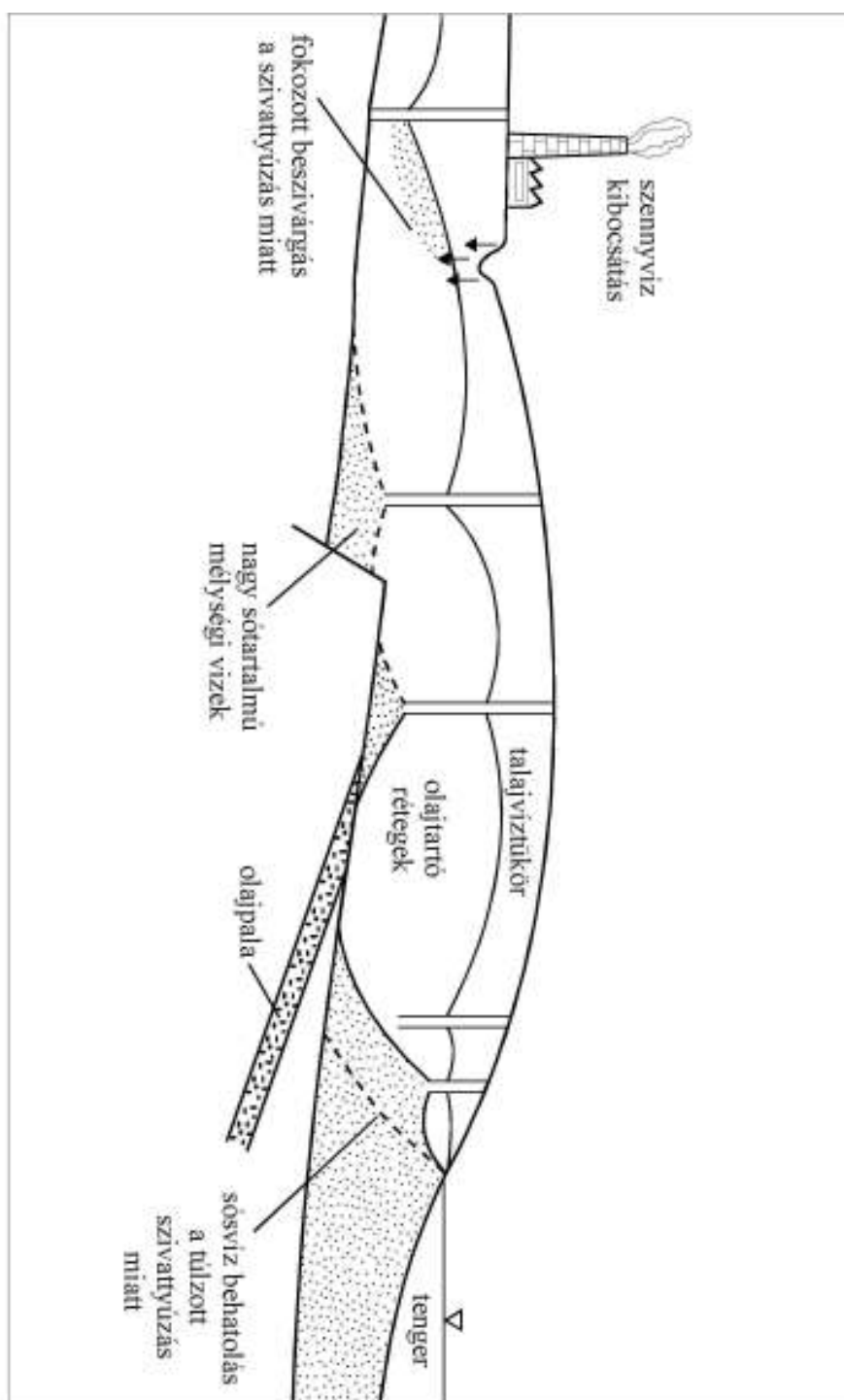
BOI = biokémiai oxigénigény
 Q_m = a folyószakasz vízhozama
 S_Q = a szennyezőanyag mennyisége
 $\downarrow$ = szennyvíz-bebocsátások

1.31 ábra
 A biológiai oxigénigény (BOI) alakulása sorozatos szennyezéskor



1.32 ábra

Bányászati és mezőgazdasági eredetű szennyezések a talajvízben



1.33 ábra

Talajvíz kitermelés által keltett szennyezések talajvíztartó rétegekben

eléri a kutakat, a szivattyúzást le kell állítani, mert a nagy sótartalmú víz már nem alkalmas vízellátási célokra.

Ilyenkor gyakran kiépítenek egy második kútsort a szárazföld belseje felé. Egyes esetekben a sósvíz behatolás ezt a második kútsort is tönkretelheti, ilyenkor további kútsorokat kell kiépíteni.

Speciális problémát jelentenek azok a szennyezések, amelyek nem, vagy csak korlátozott mértékben oldódnak vízben. Azok a szennyezők, amelyeknek sűrűsége nagyobb a vízénél (ilyenek a klórtartalmú szerves oldószerek, pl. a triklór-etilén), a víztartók aljára szivárognak és ott a nyomás-, ill. a lejtési viszonyoktól függő irányban haladnak tovább (**1.34a ábra**). A víznél könnyebb szénhidrogének ezzel ellentétben a talajvíz áramlási zóna felső sávjában áramlanak. Ezeknek tipikus esete az olajszennyezés, amely földalatti tartályok szivárgása, távvezetékek törése és felszíni kiömlésekből történő beszivárgás révén szennyezheti a talajvizet. Ezt szemlélteti az **1.34b ábra**, amelyen egy felszíni olajkiömlés beszivárgás utáni útja látható. Az olaj egy része hosszú ideig megreked a beszivárgási zónában, másik része leszivárog a talajvíz szintjéig. Ott kisebb sűrűsége folytán a talajvíztér felső részén marad, és kis mértékben tovább áramlik a talajvízáramlás irányában. Mindkét típusú anyagnak vannak vízben oldható komponensei (az ábrán árnyékolt sávok), ezek a talajvízáramlással igen nagy távolságra eljuthatnak.

Az éghajlatváltozás hatása a hidrológiai ciklusra

Az IPCC-modell éghajlati előrejelzéseit a 2030. évig elvégezték néhány régióra is. (Megjegyezzük, hogy a korábban részletezett A-forгатókönyvre 2030-ig kb. 2°C globális átlaghőmérséklet adódik 1750-re vonatkoztatva.) A részletesen vizsgált régiók:

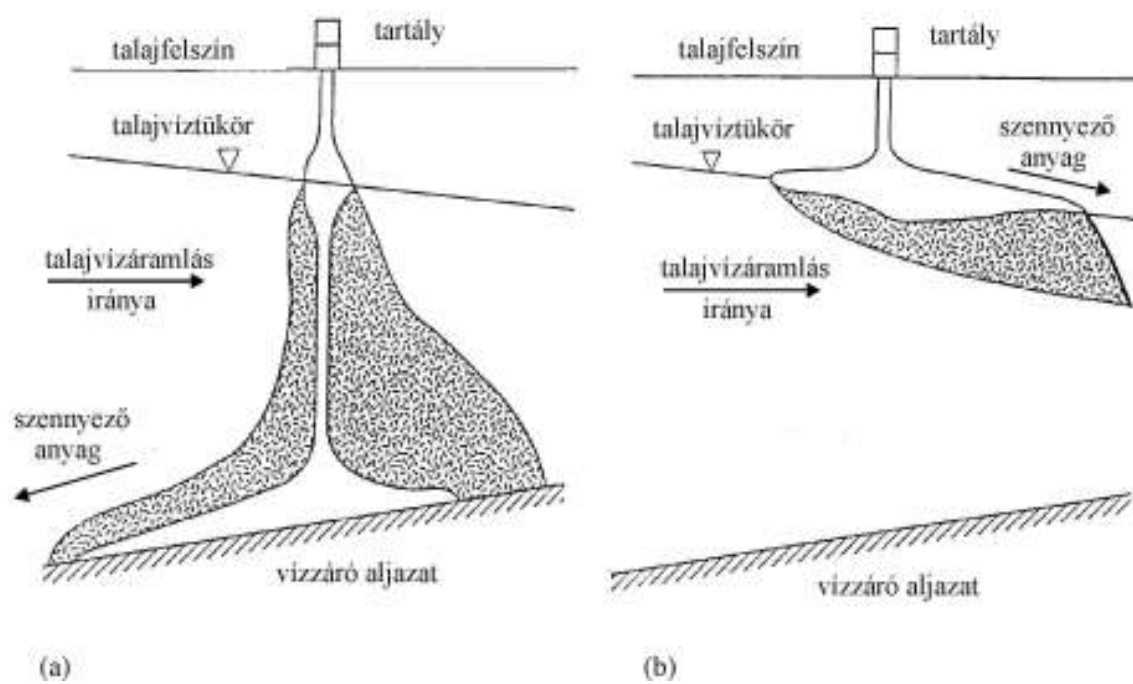
Észak-Amerika középső része,
Dél-Ázsia (Indiát is beleértve),
A Száhel-övezet,
Ausztrália,
Európa középső és déli része (a Kárpát-medencét is beleértve).

Az egyes régiók hőmérséklet emelkedése általában 1...3 °C, ill. 2...4 °C, a téli és a nyári hőmérséklet változás nem tér el jelentősen. A csapadék és a talajnedvesség értékének változása már nem ilyen egyöntetű, egyes területeken nőnek másutt csökkennek ezek az értékek.

Az európai régióban a felmelegedés várható értéke télen 2° C, nyáron 2...3° C. A téli csapadék kismértékű növekedése várható, a nyári csapadék viszont 5...15%-kal csökken, a talajnedvesség csökkenése a nyári időszakban ennél is jelentősebb: 15...25%.

Magyarország területére a régió előrejelzése alapján levont következtetéseket az alábbiakban lehet összefoglalni:

1. Hazánk éghajlatában megjelenik és erősödik a mediterrán jelleg: a nyár melegebb és szárazabb, a tél enyhébb és csapadékosabb lesz. Nő az ariditás, következésképp nő az aszályra való hajlam, különösen az Alföld területén.
2. A lefolyás időbeli átrendeződése várható valamennyi vízfolyásunkon: a nyári lefolyás mennyisége csökken a téli pedig nő. Az első hó-olvadásból eredő árhullámok az eddiginél korábban jelentkeznek és tetőző vízhozamuk növekedhet. (Ez máris bekövetkezni látszott a korábbi évek tél-végi tiszai árhullámai alkalmával.)



1.34 ábra
Felszínről beszivárgó, vízben nem oldódó szennyezések transzportja

3. A párolgás növekedése és a lefolyás megváltozása következtében módosulhat tavaink vízháztartása. Számos jelenleg is kis méretű tavunk felülete erősen csökken, közülük több ki is száradhat. Három legnagyobb tavunk: a Balaton, a Fertő-tó és a Velencei-tó vízforgalma lelassul, ennek következtében nő átlagos sótartalmuk, nő az eutrofizációra való hajlamuk és az ezzel járó oxigénhiány.
4. Az éghajlat melegedése növeli egyes vízfogyasztók (fajlagos) vízigényét. Ennek megfelelően a vizsgált időszak végéig az öntözővíz igény a 2000. évi értéknek akár kétszeresére is nőhet és az öntözés igényének határa térben is kitolódhat. Ugyanakkor a nyári lefolyás csökkenésének következtében a rendelkezésre álló öntözővíz-készlet jelentősen lecsökkenhet – éppen a tenyészidőszakban. Ezért hosszabb távon a jelenleginél jóval víztakarékosabb öntözési módok, pl. a felsivatagos területeken elterjedt csepegtető öntözés bevezetését is elő kell irányozni.
5. A szennyvíztisztítás stratégiájának kialakításánál figyelembe kell venni, hogy a tisztított szennyvizet befogadó vízfolyások vízhozama és ennek folytán természetes öntisztuló képessége csökken.
6. Az ariditás növekedése kedvezőtlenül hat a természetvédelmi célú vízgazdálkodásra is. A vizes élőhelyek egy része kiszáradhat, a már meglévő száraz időszakok gyakorisága és időtartama megnövekszik. A vízfolyások nyári vízhozamainak csökkenése, a vízhőmérséklet növekedése, az állóvizek sótartalmának növekedése mind olyan változás, amely hatással lehet az élővilágra.
7. A vízellátási problémák (lakossági, mezőgazdasági, ipari) súlyosbodása, valamint a talajvízszintek várható csökkenése távlatilag tározók építését teheti szükségessé; ezeknek ugyanakkor jelentős szerepe lehet a már említett télvégi árhullámok csillapításában is.

2. ENERGIA ÉS KÖRNYEZET

"Bár a filozófusok ezzel nem értenének egyet, le kell szögeznünk, hogy a *homo sapiens* egy dologban nem különbözik az állatfajoktól: ugyanúgy ki van téve a természet törvényeinek, mint azok. Vannak szükségleteink, amelyeket környezetünkől elégítünk ki, ugyanakkor befolyásoljuk is környezetünket. Ugyanúgy, mint a többi állatfajoknak, a mi legalapvetőbb igényünk is az energia és az ásványi anyagok. Az ember igényei azonban jóval nagyobbak a közvetlen testi szükségletek igényénél. Óriási mennyiségű energiát használunk fel elektromosság, hő, stb. formájában a civilizációs tevékenységek fenntartására. Az emberi populáció egyre növekvő igényeinek kielégítése közben környezetünkre egyre nagyobb befolyást gyakorlunk. Sokan aggódnak, hogy ez veszélyeztet más fajokat, mások - talán az önzőbbek - azért aggódnak, hogy környezetrontásunk végeredményben az emberi faj létét veszélyezteti."

(Kupchella-Hyland, 1989)

Bevezetés

Az energiafelhasználás történeti fejlődése során az ember először saját testi erejét, majd a háziasított állatok erejét használta fel és csak néhány ezer évvel ezelőtt valósult meg más, "külső" erőforrások munkába fogása. Ezek közül a víz és a szél energiáját már a legősibb kultúrák is felhasználták, és alkalmazásuk átível a civilizáció történetén, egészen napjainkig. Az energiaigény gyors növekedésével azonban egyre inkább előtérbe kerültek ezeknek az energiaforrásoknak az alkalmazási korlátjai is: a telepítés helyhez kötöttsége, függés a vízjárástól, illetve a széljárástól és a viszonylag kis teljesítmény. A növekvő energiaigény ezután gyökeresen új utakat keresett, amiket a gőzgép, majd a belsőégésű motorok révén meg is talált. A 20. század elejétől rohamosan felfejlődött a földkéregből vett (fosszilis) energiahordozók: a szén, az olaj, a földgáz, majd a század közepétől a nukleáris energia használata.

A fosszilis energiaforrások végeessége először az 1970-es évek olajválsága idején kapott reális hangsúlyt; ugyanekkor fogalmazódtak meg először az energiával való takarékoság szükségességének elvei: ettől kezdve beszélünk energiatakarékos technológiáról, üzemanyag-takarékos autóról stb. Egyáltalán, az energia ára (egyre növekvő ára) ettől kezdve vált mindennapjaink problémájává. A jelenlegi helyzet a következőképpen jellemezhető:

1. Történetileg igen rövid idő (kevesebb, mint 500 év alatt) felhasználjuk azokat az olaj- és földgáz-készleteket, amelyek létrejöttéhez 500 millió év kellett.
2. A közeljövőben éppen azok az energiaforrások apadnak el, amelyektől jelenleg a legnagyobb függőségben vagyunk és nincs biztosíték arra, hogy zökkenőmentes lesz az átmenet az új energiaforrásokra. Nagy a bizonytalanság az átmenettel kapcsolatos társadalmi, gazdasági és politikai problémák várható nagyságrendjét illetően is.
3. Csaknem valamennyi környezeti probléma közvetlen kapcsolatban van az energia előállításával és felhasználásával.

A **2.1 ábrán** az egy főre eső energiafogyasztás alakulását ábrázoltuk 1800-tól 2000-ig, az ábrán a népesség növekedését is feltüntettük, ennek 2000 utáni értékei becslések (az USA grafikonjának értékei 10-zel szorzandók).

Az egyes régiók között jelentős különbségek vannak az egy főre eső energiafogyasztásban, ezt mutatja a következő táblázat (világátlag = 1):

USA	4,1
Európai Unió	2,2
Magyarország	1,5
Világátlag	1,0
Latin-Amerika	0,45
Kína	0,33
Dél-Ázsia	0,21
India	0,11
Fekete Afrika	0,01

A régiók fejlettségében mutatkozó különbségek táptalaját adják korunk válságainak: a terrorizmusnak, a vallási fundamentalizmusnak, a megélhetési migrációnak és az etnikai gyűlölködésnek. Az egyenlőtlenségek további mutatói:

- ♦ A fejlett ipari országok lakossága a Föld népességének 20%-át teszi ki, de az anyagi javak 83%-át ők tartják ellenőrzésük alatt; nagyjából ugyanez érvényes az energiafogyasztási arányokra is.
- ♦ A legalacsonyabb életszínvonalon élő 1 milliárd ember részesedése az anyagi javakból: 1%.

Az egyes energiaforrások részaránya a jelenlegi energiatermelésben olyan adat, amelynek igen nagy a bizonytalansága; az egyes adatforrások jelentős különbségeket mutatnak. Nagy számú adathalmaz összehasonlítása alapján a következő – valószínűsíthető – adatsort állítottuk össze (az adatok a 2000. évre vonatkoznak):

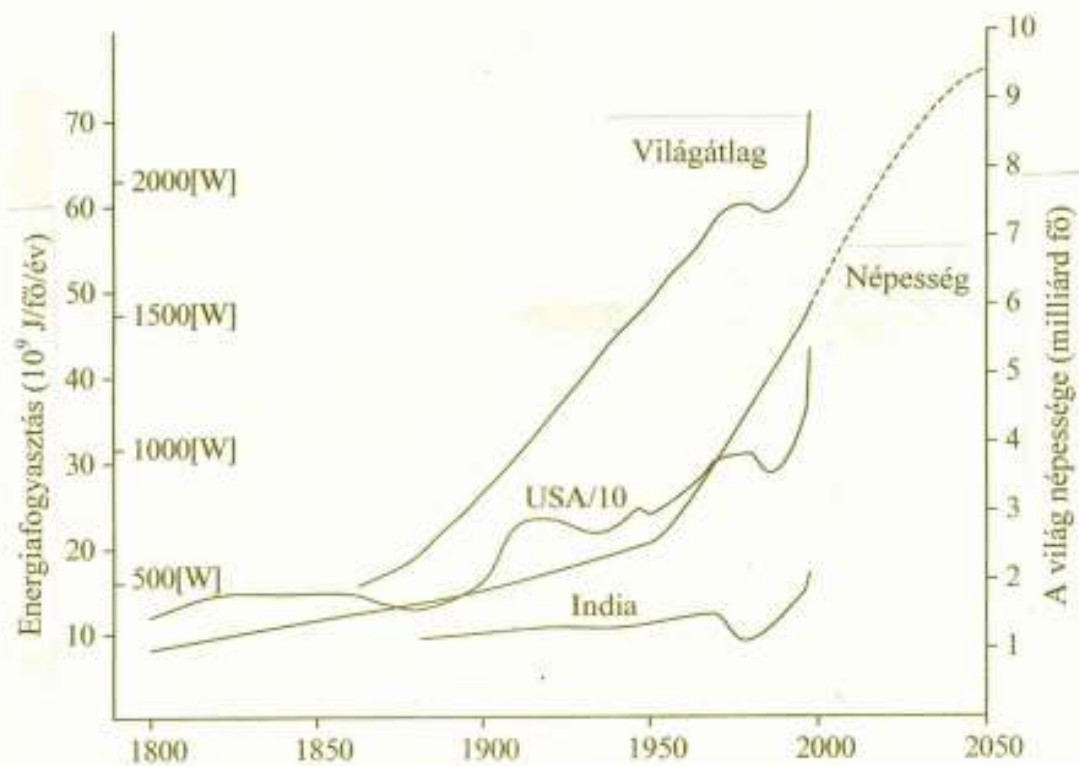
Fosszilis energiahordozók	80 %
Atomenergia	6 %
Megújuló energiaforrások	14 %

A megújuló energiaforrásokon belül a részarányok (a teljes 100%-ra vonatkoztatva) a következők: biomassa 7%, vízenergia 5%, szélenergia 1%, nap-hő 0,8%, nap-fotovillamos 0,2%.

A fosszilis energiahordozók készletei és környezeti problémái

A szén, az olaj és a földgáz készletei végesek, a legtöbb régióra viszonylag pontos becslések vannak a még kitermelhető mennyiségekről, tehát a fogyasztás ütemétől függően becsülhető a készletek várható élettartama. Felhasználásuk jövőbeli perspektíváit (a becsült készletek várható élettartamát) és a velük kapcsolatos környezeti problémákat (amelyek egy részével már foglalkoztunk az 1. fejezetben), az alábbiakban foglaljuk össze.

A várható élettartam a becsült készletek és az éves fogyasztás hányadosa. Az áttekintett szakirodalom adatai mindkettőnél jelentős szórásokat mutatnak. Az éves fogyasztás figyelembevételénél a bázisév kiválasztásában és a növekedés tervezett ütemében vannak jelentős eltérések. A készletek becslésekor egyes szerzők csak a szigorúan bizonyított (művealó), mások a becsült, de még bizonytalan nagyságrendű (feltételezett) készleteket is figyelembe vették.



*2.1 ábra
Az egy főre eső energiafogyasztás 1800-tól 2000-ig*

Szén

A rendelkezésre álló becsült készletek országok, illetve régiók szerinti százalékos megoszlását az alábbi táblázat mutatja:

Egyesült Államok	29
Volt Szovjetunió	26
Kína	11
Nyugat-Európa	10
Kelet-Európa	8
Ausztrália	7
Többi ország összesen	9

A készletek becsült élettartama 200-250 év. A környezeti hatások jelentősek. Ezek közül a legfontosabbak:

- a külszíni fejtés, dacára az utóbbi évtizedek technikai fejlődésének, még ma is jelentős környezetrombolásnak számít, különösen tájképi szempontból;
- a kiszivattyúzott bányavíz sokszor kémiaiilag aktív (esetenként savas), elhelyezése talaj- és talajvízszennyezéssel jár; ugyanez mondható el a szén tisztítására felhasznált vizekről is;
- a víztelenítés intenzív talajvíz-szivattyúzással jár, ez gyakorta okoz a környező régióban talajvízszint-süllyedést, helyenként pedig térszínsüllyedést;
- a kén tartalomból származó kén-dioxid a savas esők egyik fő alkotó eleme, másrészt aeroszolok formájában a légszennyezés része;
- az elégetéskor keletkező szén-dioxid az üvegházhatás legfontosabb komponense, a globális felmelegedés legfőbb okozója;
- az elégetéskor létrejövő nitrogén-oxidok a savas eső komponensei, a keletkezett szénhidrogének egy része pedig rákkeltő;
- a bányászat mindmáig az egyik legkockázatosabb emberi tevékenység (beomlások, sűjtőlégrobbanások stb.);
- a kibányászott szén - természetes urántartalma következtében - jelentős radioaktivitást mutathat; az aktivitás egy része az elégetéskor az atmoszférába, másik része a salakba, ill. a salakpernyébe kerül. Szakirodalmi adatok szerint egy tipikus széntüzelésű erőmű pernyéjében 3650 Bq/kg aktivitás lehet. Ebből következik, hogy (egységnyi teljesítményre vonatkoztatva) a szén erőművek radioaktív szennyezése nagyságrendekkel nagyobb lehet egy atomerőmű radioaktív szennyezésénél.

A szén közvetlen eltüzelésével járó környezeti problémák kiküszöbölése céljából az utóbbi években néhány lehetséges környezetbarát technológiával kezdtek foglalkozni az energiaipar kutatóhelyein. Ezek közül ismertetünk néhányat, röviden.

A fluidizációs tüzelés során a porrá őrölt szenet mészkefével keverve égetik el. Magas hőmérsékleten égetett mész keletkezik, amely a szén oxidált kén tartalmával gipszet képez; így módon a kén nagy része szilárd fázisba kerül. A módszer hátránya, hogy gondoskodni kell a keletkezett szilárd hulladék elhelyezéséről.

A szén gázosítása úgy történik, hogy a szénport oxigén és vízgőz befűvás közben égetik el. A vízgőz magas hőmérsékleten oxigénre és hidrogénre bomlik, majd a hidrogén a szénnel metánt képez; a metán már környezetbarát tüzelőanyag.

A szén "cseppfolyósítása" bonyolult, sok lépéses eljárás, ennek során petróleum-szerű folyékony tüzelőanyag keletkezik. Hátránya, hogy az eljárás közben rákkeltő melléktermékek keletkeznek.

A fentiekén kívül még más eljárásokkal is kísérleteznek; pl. eredményes kísérleteket folytattak az Egyesült Államokban az ún. *in situ* (helyszíni) gázosítási technológiákkal is. A technológiák egyrészt ma még igen költségesek, másrészt környezeti hatásaik nem teljesen tisztázottak.

Olaj

A készletek jóval kisebbek, mint szénből. A becsült összes olajkészlet területi megoszlását az alábbi táblázat mutatja %-ban:

Közel-Kelet	57
Észak-Amerika	12
Volt Szovjetunió	9
Afrika	8
Közép-és Dél-Amerika	5
Távol-Kelet és Óceánia	5
Nyugat-Európa	4

A készletek becsült élettartama az adatforrástól függően 35-50 év. A potenciális hasznosítás szempontjából lényeges szempont az is, hogy a könnyen kitermelhető készlet kimerülése után a homokkőben és az olajpalában rejlő készletek már csak igen költségesen hasznosíthatók, így esetleg már nem lesznek versenyképesek más, alternatív energiaforrásokkal.

Az olaj elégetéséből származó környezeti hatások részben megegyeznek a szénnél leírtakkal. Itt a kéntartalom és annak következményei nem jellemzők, viszont nagy mennyiségű rákkeltő anyag keletkezik. A belső égésű motorokban nitrogén-dioxid keletkezik, amely a nagy városokban gyakori fotokémiai füstköd alapvető komponense.

Állandó környezeti problémát jelentenek az olaj szállításából származó szennyezések. A tankhajók balesetei az óceánokban ökológiai katasztrófák okozói, az olajvezetékek meghibásodása pedig sokszor helyrehozhatatlan talaj- és talajvízszennyezést okoz. Ugyanez mondható el az olajfinomítók üzemével kapcsolatban is.

Földgáz

A teljes készlet területi megoszlását a következő táblázat mutatja. A készletek becsült élettartama 60-90 év.

Volt SZU és Kelet-Európa	43
Közel-Kelet	26
Észak-Amerika	10
Nyugat-Európa	6
Távol-Kelet és Óceánia	6
Afrika	6
Közép- és Dél-Amerika	3

Környezeti szempontból a fosszilis energiaforrások közül a földgáz a legtisztább. Mivel az ún. "gázvezeték minőségű" gáz túlnyomórészt metánból áll, elégetésekor csupán szén-dioxid és víz keletkezik.

Energia-átalakítások termodinamikája

A termodinamika a fizikának az az ága, amely az energia átalakításának legáltalánosabb törvényeit kutatja. Alapköve az energia megmaradás törvénye, amely szerint "energiát nem lehet előállítani, vagy megsemmisíteni, csupán át lehet alakítani egyik formájából a másikba." (Ennek megfelelően az "energiaipar", "energiatermelés" fogalmak tulajdonképp értelmetlenek, de mivel a köznap, sőt a szaknyelvi használatban is ezek terjedtek el, mi is ezeket használjuk.)

A termodinamika I. főtétele az energiamegmaradás különböző vonatkozásaival foglalkozik. Egyik megfogalmazása a fenti megmaradási tétel. Egy másik megfogalmazás ennek

következménye: “elsőfajú perpetuum mobile nem készíthető” (perpetuum mobile = örökmozgó), vagyis nem tudunk olyan gépet szerkeszteni, amely energia befektetés nélkül munkát végez. Egy további megfogalmazás már energiamérlegekről szól: “zárt rendszer összenergiája állandó” és “nyílt rendszer energiájának változása egyenlő a felvett és a leadott energia különbségével”.

Ha egy fizikai rendszerrel hőt közlünk, az részben a rendszer belső energiáját növeli, részben munkavégzésre fordítódik. A folyamat legegyszerűbb modellje egy hengerben lévő gáz, amelyet könnyen mozgó dugattyú zár le. Ha a hengert kívülről (vagy akár belülről) melegítjük, a gázmolekulák mozgási energiája (első közelítésben: belső energia) nő és a dugattyút a felületére ütköző molekulák kifelé mozdítják (munkavégzés). A folyamat mérlegegyenlete egy végtelenül kicsiny folyamat-szakaszra:

$$dQ = dU + dW \quad (2.1)$$

ahol dQ a bevitt hő, dU a belső energia változása, dW az eközben történt munkavégzés. Az előbbi konkrét esetben a munkavégzés térfogat növekedéssel jár, ekkor:

$$dQ = dU - pdV \quad (2.2)$$

ahol p a pillanatnyi nyomás, dV a térfogátváltozás. Ha a dugattyú mozgásának egy hosszabb szakaszára (mondjuk 1. és 2. állapot között) írjuk fel az egyenletet, akkor már véges mennyiségekkel kell számolnunk:

$$Q = U_2 - U_1 + \int_1^2 pdV \quad (2.3)$$

Az előbbi modell-példa tulajdonképpen egy hőerőgép végtelenségig leegyszerűsített modellje: az ilyen berendezés hőt mechanikai munkává alakít át.

A termodinamika II. főtétele a folyamatok lehetséges irányát szabja meg. Az I. főtétele ugyanis erre nem ad útmutatást: az energia megmaradás törvénye megengedi bármely irányú folyamat lejátszódását. Eszerint az előbbi rendszerben spontán módon lejátszódhatna pl. a következő folyamat: a henger hőt vesz fel a környezetből, ez a hő felmelegíti a benne lévő gázt, amely a dugattyún munkát végez és eközben a környezet lehül. Az energia megmaradása csak azt követeli meg, hogy a henger által felvett hő ne legyen több, mint a környezet által leadott hő. A II. főtétele éppen az ilyen folyamatok létezését zárja ki: “nem lehet olyan gépet szerkeszteni, amely környezetéből elvont hő felhasználásával végez munkát” (ez lenne az ún. másodfajú perpetuum mobile). Egy ezzel ekvivalens megfogalmazás: “hő spontán módon nem mehet át hidegebb testről melegebb testre”.

Ezt a megfogalmazást persze nehéz lenne kvantitatív formában - egyenlettel felírni. Nem is lehet. Ezért Clausius a múlt században egy új fogalmat vezetett be, amelyet az ő nyomán entrópiának nevezünk. Jele: S . Definálni csak a változását tudjuk, így:

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

ahol dQ a rendszer által felvett (végtelenül kicsiny) hőmennyiség, T a rendszer abszolút hőmérséklete. A II. főtétele előbbi megfogalmazásai az entrópiával szólva így hangzanak: “zárt rendszerben lejátszódó irreverzibilis folyamatokban az entrópia mindig nő” (reverzibilis folyamatokban állandó), vagyis:

$$dS \geq \frac{dQ}{T} \quad (2.4)$$

(ez az ún. Clausius-féle egyenlőtlenség); itt tehát a $>$ jel irreverzibilis, az $=$ jel reverzibilis folyamatokra vonatkozik. (A reverzibilis folyamatokra nyugodtan mondhatjuk, hogy azok fikciók, a valóságos folyamatok mind irreverzibilisek.) A fentieket egy modell-példán keresztül próbáljuk érthetőbbé tenni.

Képzeljünk el egy magas hőmérsékletű hőszigetelt tartályt (**2.2a ábra**). Ez önmagában nem képes munkavégzésre. Ha azonban hozzá kapcsolunk egy alacsonyabb hőmérsékletű tartályt úgy, hogy az elválasztó falon két nyílás legyen, a hőmérsékletkülönbség hatására a nyílásokon át hőáramlás indul (**2.2b ábra**) és az ott elhelyezett ventillátorok forgásba jönnek, vagyis munkavégzés történik. Rövid idő alatt dQ hőmennyiség áramlik át a bal térfélből a jobb térfélbe. A két térfél entrópia változására igaz, hogy:

$$\frac{dQ}{T_1} < \frac{dQ}{T_2}$$

mivel $T_1 > T_2$. A rendszer teljes entrópia változása:

$$dS = \frac{dQ}{T_2} - \frac{dQ}{T_1} > 0$$

vagyis a rendszer teljes entrópiája nő. A hőcsere eredményeképp a két térfél hőmérséklete végül kiegyenlítődik és beáll egy T közös hőmérséklet: a rendszer egyensúlyba kerül. Ekkor a nyílásokon át megszűnik az áramlás, leállnak a ventillátorok (**2.2c ábra**). Az entrópia változás ekkor:

$$dS = \frac{dQ}{T} - \frac{dQ}{T} = 0$$

Ha az entrópia megváltozása nulla, akkor ez azt jelenti, hogy az entrópia állandóvá vált: $S = \text{állandó}$. Ez az (állandó) érték az előzőeknél nyilvánvalóan nagyobb, hiszen a folyamat közben az entrópia mindig nőtt. Modellkísérletünk tanulságai (amelyek általános érvényűek) tehát a következők:

- munkavégzés csak akkor történhet, amikor a rendszerben hőmérsékletkülönbség van, ha ez kiegyenlítődik és a rendszer egyensúlyba kerül, munkavégző képessége megszűnik;
- a (zárt) rendszer entrópiája a munkavégzés közben egyre nő;
- egyensúlyi állapotban a rendszer entrópiája maximumot vesz fel és ott állandósul.

A *hőerőgépek* legáltalánosabb működési elvét a **2.3a ábrán** vázoltuk. Ezeknél a rendszer egy T_M hőmérsékletű meleg hőtartályból Q hőmennyiséget vesz fel, ennek árán W munkát végez, majd a $Q - W$ hőmennyiség "lecsurog" a T_H hőmérsékletű hideg hőtartályba.

A rendszer teljes entrópia változása (2.4) alapján:

$$\frac{Q - W}{T_H} - \frac{Q}{T_M} \geq 0 \quad (2.5)$$

innen következik, hogy a hasznosítható munka:

$$W \leq Q \left(1 - \frac{T_H}{T_M} \right) \quad (2.6)$$

Az elvileg elképzelhető legkedvezőbb eset az egyenlőség jel, vagyis a maximálisan kinyerhető munka:

$$W_{\max} = Q \left(1 - \frac{T_H}{T_M} \right) \quad (2.7)$$

A termikus hatásfok definíció szerint a hasznos munkavégzés és a befektetett energia (esetünkben a Q hőmennyiség) hányadosa. A hőgépek maximális hatásfoka tehát:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_H}{T_M} \quad (2.8)$$

Jó közelítéssel a fenti alapösszefüggésekkel jellemezhető a dugattyús gőzgép és a gőzturbina működése. Ezeknél a meleg hőtartály a kazán, a hideg hőtartály a hűtőrendszer (kondenzátor), amely végül a külső környezethez csatlakozik. Nyilvánvaló, hogy minél magasabb a meleg- és minél alacsonyabb a hideg hőtartály (abszolút) hőmérséklete, annál nagyobb a hatásfok. Éppen ezért ma már kizárólag a gőzturbinákat használják a hőerőművekben: ezek ui. 400-500 °C -os túlhevített gőzzel üzemeltethetők. (További előnyük a dugattyús gépekkel szemben, hogy nincsenek alternáló mozgást végző alkatrészek.)

A *hűtőgépek* működési elve a **2.3b ábrán** látható. Itt a hőelvonás a hideg hőtartályból történik külső munka befektetése árán, és a hő a meleg hőtartályba (a környezetbe) távozik. Az energiamérleg:

$$Q_M = Q_H + W \quad (2.9)$$

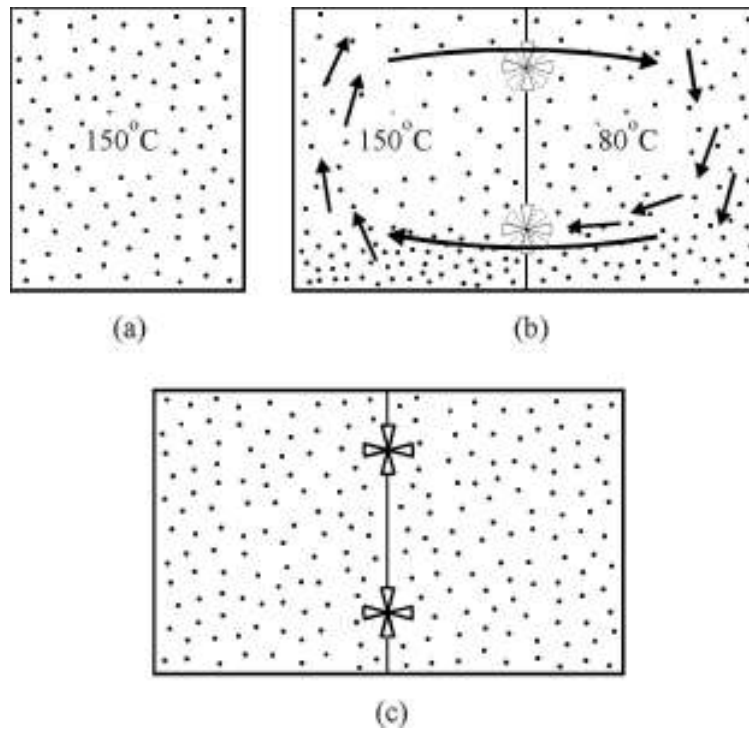
az entrópia változás a folyamat során:

$$\frac{Q_H + W}{T_M} - \frac{Q_H}{T_H} \geq 0 \quad (2.10)$$

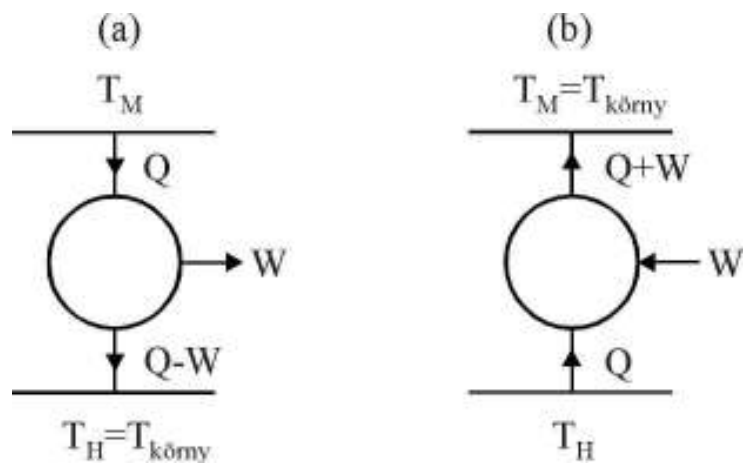
innen a befektetendő munkára nézve az alábbi egyenlőtlenség következik:

$$W \geq Q_H \left(\frac{T_M}{T_H} - 1 \right) \quad (2.11)$$

A *hőszivattyúk* a hűtőgépekkel azonos elv alapján működnek, de gyakorlati elrendezésük különböző, lényegében fordított hűtőgépek. A hőszivattyúk lakások, családi házak fűtésére alkalmas berendezések. A hideg hőtartály itt a külső, hideg légtér, vagy még gyakrabban a ház alatti talaj/talajvíztér. Az utóbbi esetben több méter mélyen a ház alatt csőhálózatot fektetnek le, a mely a ház belsejében lévő csőhálózattal zárt cirkulációs rendszert alkot. A rendszerben keringő munkaközeget (gázt) egy kompresszor összenyomja, amitől a gáz felmelegszik, ez működteti – hőcserélő közbeiktatásával – a ház fűtőberendezését. A gáz tovább haladva egy expanziós szelepen áramlik át, hirtelen kitágul és lehül, majd a föld alatti csőhálózatba áramlik, ahol a geotermikus hő hatására jelentősen felmelegszik. Ez a hőnyereség a gazdaságos üzemelés alapja. A 2.11 egyenletből látható, hogy ha növeljük a hideg hőtartály T_H hőmérsékletét, csökken a befektetendő W munka nagysága. A legkorszerűbb hőszivattyúkkal elérhető, hogy a fűtéshez szükséges energiának mindössze 1/3-át kell az elektromos hálózathoz pótolni, 2/3-át a geotermikus hő szolgáltatja. Az ilyen berendezések azonban egyelőre még nagyon drágák.



2.2 ábra
Vázlat az entrópia növekedésének szemléltetésére



2.3 ábra
A hőgépek működésének elve

A *belső égésű motorok*nál nincs felső hőtartály. A munkavégzéshez szükséges hő a henger belsejében, az üzemanyag robbanása révén keletkezik. Egy Otto-motor munkadiagramját a **2.4 ábrán** mutatjuk be. A munkafázisok (a szívás és a kipufogás elhagyásával) a következőképpen jellemezhetők.

Az 1-2 ütem adiabatikus kompresszió; ideális gázt feltételezve a jól ismert összefüggés érvényes:

$$T_1 V_1^{k-1} = T_2 V_2^{k-1} \quad (2.12)$$

A 2-3 ütem a robbanás, ekkor Q_M hő keletkezik, miközben a térfogat: V =állandó. Egységnyi tömegű gázt feltételezve:

$$Q_M = c_v (T_3 - T_2) \quad (2.13)$$

A 3-4 ütem adiabatikus expanzió, a 2.12 egyenlethez hasonlóan:

$$T_3 V_3^{k-1} = T_4 V_4^{k-1}$$

de mivel $V_1 = V_4$, a fenti egyenlet így írható:

$$T_3 V_3^{k-1} = T_4 V_1^{k-1} \quad (2.14)$$

A 4-1 ütem (kipufogó szelep nyitás) alatt Q_H hőmennyiség távozik a hengerből, ennek nagysága:

$$Q_H = c_v (T_4 - T_1) \quad (2.15)$$

A termikus hatásfok:

$$\eta = \frac{W}{Q_M} = \frac{Q_M - Q_H}{Q_M} = 1 - \frac{Q_H}{Q_M} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad (2.16)$$

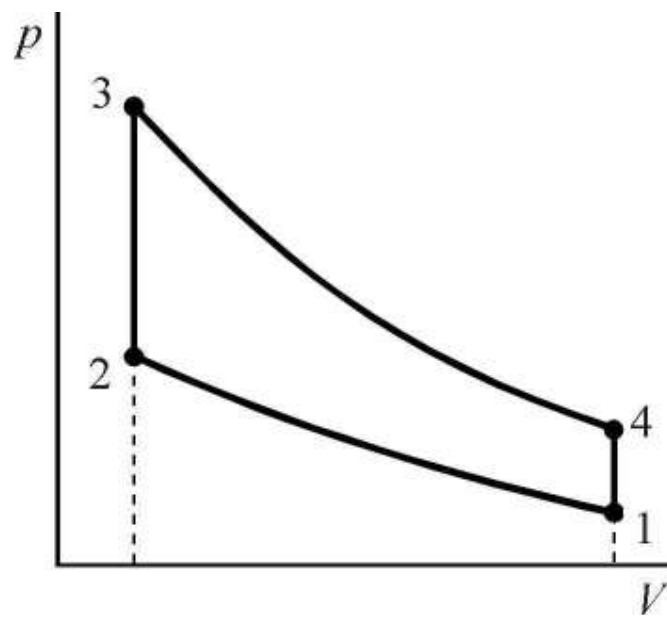
Figyelembe véve a 2.12 és a 2.14 egyenletet és azt, hogy $V_3 = V_2$, a jobb-oldal második tagja:

$$\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = \frac{1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}} \quad (2.17)$$

a jobboldal nevezőjében lévő hányados az r kompresszió-arány, ezzel a hatásfok kifejezése:

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \quad (2.18)$$

Az egyenletből következik, hogy a hatásfok nő, ha a kompresszió-arányt növeljük. Ennek határt szab a levegő-benzin keverék öngyulladás: a túl korán felrobbant üzemanyag visszaüti a dugattyút (innen származik a motorok "kopogása") és ez az alkatrészek gyors



2.4 ábra
Az Otto-motor munkadiagramja

tönkremenetelét okozhatja. Kiküszöbölésére ólomtartalmú vegyületeket adagolnak az üzemanyaghoz, amely - közismerten - súlyos ólomszennyezést okozott a városok levegőjében - és sok helyen még ma is okoz. (Itt ismét azzal a tipikus jelenséggel találkozunk, mint oly sok más esetben, hogy egy műszaki probléma megoldása előre nem látott súlyos környezeti problémát idéz elő.)

Az energia szállítása és tárolása

Az egyes országok, régiók, sőt a kisebb egységek energiaigénye is, térben és időben igen tág határok között változik. Az energiahordozók és az energiatermelő objektumok (erőművek) helyhez kötöttek. Köztük és felhasználók között az energia (vagy energiahordozók) szállító hálózatára van szükség. A termelés és a felhasználás időbeli változékonysága viszont az energia tárolását teszi szükségessé.

Az energia szállítása

Az elektromos hálózatok az energiaközvetítő- és elosztó hálózatok között kiemelt helyet foglalnak el. Általuk lehetővé válik, hogy több területileg elkülönült és időszakosan használt berendezés energiaigényét egyetlen, központilag táplált és irányított energiahálózat elégítse ki. Ezáltal az energia megtermelésének és felhasználásának kedvezőbb feltételei és gazdaságosabb megoldásai jöhetnek létre.

Az elektromos energiaigény időbeli eloszlása egyenetlen: napszakonként és évszakonként változik. (Pl. a legtöbb európai országban nyáron 8 és 16 óra között, télen 6 és 22 óra között vannak a fogyasztás csúcsidőszakai és a téli fogyasztás szignifikánsan nagyobb, mint a nyári.) Mindehhez járulnak még a pillanatnyi időjárási helyzet függvényében előálló kisebb-nagyobb "csipkézetek". Ezt az állandó fluktuációt az elektromos energiaellátó rendszernek követnie kell. Az erőművek üzemelésében a lehető legnagyobb rugalmasságot igyekeznek megvalósítani: a teljes kapacitás kisebb, egymástól függetlenül indítható és leállítható egységekből áll, az üzemrendet az irányító központban az igényeknek megfelelően végzik.

Az elektromos energia szállítása nagyfeszültségű vezetékeken történik. A veszteséget főleg a vezeték ohmikus ellenállása okozza, de jelentős lehet a nedvességtartalom miatt vezetővé vált levegő okozta veszteség is.

Ha a vezeték ellenállása az erőmű és a fogyasztó között R , akkor I átfolyó áramerősség mellett a veszteség I -ra vonatkoztatva:

$$P_V = I^2 R \quad (2.19)$$

az összteljesítmény (ha a feszültség és áram azonos fázisban van):

$$P_t = IV \quad (2.20)$$

A két teljesítmény hányadosa azonos átalakításokkal a következő alakra hozható:

$$\frac{P_V}{P_t} = P_t \frac{R}{V^2} \quad (2.21)$$

Ezt az arányt kell a lehető legkisebbre leszorítani. A két alternatív lehetőség: (1) R csökkentése, (2) V növelése.

Az (1) lehetőséget szupravezetéből készült távvezetékkel lehetne megvalósítani. Ez azonban - még az újabban felfedezett magas hőmérsékletű szupravezetőkkel is - igen költséges lenne.

A (2) alternatíva a transzformátorral valósul meg, amely három magyar mérnök: Déry Miksa, Bláthy Ottó és Zipernovský Károly találmánya. Jelentősége óriási: nélküle nem valósulhatnak meg a korszerű energiaellátó rendszerek. Az erőműveknél az előállított feszültséget transzformátorokkal több száz kV-ra feltranszformálják, ez kerül a távvezetékre, ahol viszonylag kis veszteséggel továbbítható. A fogyasztó közelében újra le kell transzformálni a feszültséget és a közvetlen felhasználás 120 vagy 220 V-os hálózatról történik.

Előnyei mellett a váltóáramú távvezetékes rendszernek hátrányai is vannak, ezek közül a két leggyakrabban említett probléma: a távvezeték koronakisülései zavarják a rádió-TV rendszereket és a keltett elektromágneses tér káros élettani hatása (ez utóbbi mechanizmusa és veszélyessége még nem teljesen tisztázott). Újabban nagyfeszültségű egyenáramú rendszereket is kifejlesztettek. Ilyen épült Franciaország és Anglia között nemrég; a francia atomerőművekben termelt többlet-energiát ezen keresztül exportálják.

Az olajvezeték az energiahordozók szállításának leggazdaságosabb módja. Környezeti hatás az olajszivárgások és az estenkénti törések alkalmával jelentkezik. Az ilyen módon létrejött talajszennyezés elhárítása az egyik legnehezebb környezet-technológiai feladat. További probléma, hogy hideg égővi lelőhelyeken a csővezetékbe történő bebocsátás előtt az olajat fel kell melegíteni (pl. az alaszakai olajvezetékbe 60 °C-ra melegített olajat szivattyúznak). Alacsony hőmérsékleten ui. az olaj nagy viszkozitása miatt szállításuk lehetetlenné válna. A melegítés többlet-költségei természetesen az olaj árába épülnek be.

Az energia tárolása

Az energiaipar mindmáig legnagyobb problémája az energia tárolása. A változó energiaigények kielégítése állandó kihívás, amelynek a hagyományos erőművekre alapozott energia ellátás csak ügyel-bajjal tud eleget tenni. Fokozott problémát jelent az energia tárolása megújuló energiaforrások (nap-, szél-energia stb) esetén, azok szakaszos működése és az intenzitás változó jellege miatt.

Szivattyús energiatároló (SZET)

A gravitációs energia tárolását valósítja meg. Két különböző magasságban fekvő víztározó között hozható létre úgy, hogy pl. az éjszakai órákban vizet szivattyúznak az alsó tározóból a felsőbe. Nappal, az energiaigény csúcsidőszakában a felső tározóból a vizet turbinákon átvezetik az alsó tározóba, ezúton energiát termelnek. A veszteségek miatt természetesen a visszanyerhető energia kevesebb, mint a befektetett. Hogyan lehet ez mégis gazdaságos? Úgy, hogy csúcsidőben termelt energia fogyasztói ára jóval magasabb, mint az éjszakai.

A föld alatti gáztárolók

Kimerült gáztelepek, tároló rétegük lyukacsos, szivacsos szerkezetű, régi geológiai korszakokban keletkezett formáció. A földgáz készletek felhasználását ugyanis nehezíti, hogy a lelőhelyek és a felhasználás általában távol esik egymástól. Másrészt a készletek kitermelése viszonylag állandó ütemben történik, míg a felhasználás alapvetően a földrajzi helyzetre jellemző hőmérsékleti viszonyoktól függ. Ezért a földalatti gáztárolók jelentős szerepet töltenek be a gázellátás rendszerében.

A szerkezet zártságának és egyéb tárolási tulajdonságainak ellenőrzése után kezdődik a tároló réteg feltöltése a távvezetékéről, ez a művelet nálunk áprilistól októberig tart. A betárolt gáz kitermelése a fűtési időszakban: októbertől áprilisig tart. Magyarországon négy nagyobb gáztároló üzemel (a legnagyobb Hajdúszoboszló közelében), összesen 45 millió m³/nap kapacitással.

Akkumulátoros energiatárolás

Az elektromos energia elektrokémiai úton történő tárolására szolgálnak a különböző típusú akkumulátorok. A fontosabb akkumulátor típusokat az alábbiakban ismertetjük.

Savas ólom akkumulátor

A legkiterjedtebben alkalmazott akkumulátor típus, töltését jól tartja és viszonylag olcsó. Hátránya, hogy alacsony töltőárama miatt csak lassan tölthető és teljes lemerülés esetén tönkre mehet. Élettartama végén nagy mennyiségű veszélyes hulladékot képez.

Nikkel-kadmium akkumulátor

Élettartama igen hosszú, töltőárama nagy, ezért igen rövid idő alatt feltölthető. Hatásfoka viszont kisebb, mint az ólom akkumulátoré és könnyebben lemerül (rosszabb a töltéstartó képessége).

Az utóbbi években fejlesztettek ki néhány különleges akkumulátor-típust, elsősorban járművekben történő használatra. Ezek üzemi jellemzői sokkal jobbak, mint a hagyományos akkumulátorokéi.

A lítium-polimer akkumulátor képviseli a jelenlegi csúcstechnikát. Fajlagos energiatároló képessége 150 Wh/kg (ez például az ólom akkumulátor esetén 35 Wh/kg). Egy elektromos autó ezzel az akkumulátorral 450 km-t képes megtenni, ugyanilyen súlyú ólom akkumulátorral ez a távolság mindössze 130 km.

Hidrogén technológia

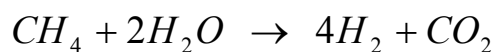
A hidrogén a legtisztább tüzelőanyag, égéshője 242 kJ/mól, elégetésekor vízgőz keletkezik. Acél vagy alumínium tartályban nagy nyomáson, gáz alakban tárolható és szállítható. Erősen lehűtve, 18 K hőmérsékleten cseppfolyósodik, a folyékony hidrogén szintén tartályban tárolható és szállítható. A tárolás egy további módját jelentik a fém-hidridek; ezek nagy nyomáson hidrogént abszorbeálnak, amely hőközléssel felszabadítható. A hidrogén előállításnak több különböző módja ismeretes.

Szolár-villamos hidrogén előállítás

A napsugárzás energiáját fotovillamos (PV) cella alakítja át villamos energiává. Az így előállított egyenárammal elektrolizáló berendezést működtetnek.

Biomassza elgázosítása

A biomassza szénhidrogén kötése magas hőmérsékleten meg bomlanak, hő hatására a szerves anyagból oxigénszegény környezetben hidrogén, szén-monoxid és metán keletkezik. A metánt vízgőzzel érintkeztetve hidrogén és szén-dioxid képződik az alábbi reakcióegyenlet szerint:



A hidrogén és a szén-dioxid nagy sűrűség különbségük folytán könnyen elválasztható.

Fermentáció

Gázosítás és pirolízis útján cukor-, keményítő- és olajtartalmú biomassza-alapanyagokból etanol és metanol állítható elő. Ezek szintén felhasználhatók hidrogén termelésre. Jelenleg a legolcsóbb a biomasszából történő előállítás.

A hidrogén felhasználási módjai

Hőtermelés.

A tiszta hidrogén levegőben elégethető és hőtermelésre felhasználható. Levegőben elégetve NO_x is keletkezik, de ún. katalitikus égést biztosítva a keletkezett NO_x mennyisége elhanyagolható.

Robbanómotorok üzemanyaga

A belső égésű motorok – kisebb módosítások elvégzése után – hidrogénnel is üzemeltethetők. Elsőként a BMW-gyár fejlesztette ki a hidrogén-motoros gépkocsiját. A motor kipufogó csövén víz és kis mennyiségű nitrogén-oxid távozik; hatásfoka jóval nagyobb, mint benzinüzem esetén.

Az üzemanyag lehet folyékony hidrogén, ekkor azonban költséges hőszigetelést kell alkalmazni, ezért inkább nagy nyomású tartályban tárolják.

Izlandon hosszú távú közlekedés-fejlesztési programot indítottak hidrogén-üzemanyagra alapozva. A hidrogént a vízerőművekben igen olcsón előállított elektromos energiával fejlesztik, majd az így nyert üzemanyagot fokozatosan növekvő mértékben kívánják hasznosítani: 1. városi autóbuszok üzemeltetésére, 2. a halászhajó flotta hajóinak üzemeltetésére, 3. az összes autó és teherautó hajtására. Problémát jelentenek a még magas költségek, a folyékony hidrogén biztonságos tárolása és a megfelelő mennyiség biztonságos elraktározása hosszú utakra (pl.: halászhajóknál).

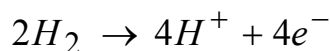
Tüzelőanyag-cellák

A tüzelőanyag-cellákban (fuel cell) hidrogént oxidálnak katalitikus úton elektrokémiai folyamat során, más szóval a kémiai energiát elektromos energiává alakítják át. Különböző típusai vannak, pl.:

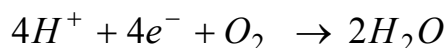
- lúgos cellák
- savas cellák
- olvadó karbonátos cellák
- szilárd oxid cellák
- szilárd polimer cellák
- mikroorganikus (biokémiai) cellák

Példaképpen a savas cella működését mutatjuk be, amelynek szerkezeti vázlata a **2.5 ábrán** látható.

A porózus szerkezetű platina elektródák kénsav oldatba merülnek. Az anódot H_2 -, a katódot O_2 - áramban tartják. A katalizátor hatására az anódon a hidrogén disszociál és a következő reakció játszódik le:



A protonok a katódra áramlanak, ahol:



a nettó reakció: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

A víz képződési hője (entalpiája) 286 kJ/mol (emlékeztetünk arra, hogy az égéshő ennél kisebb, 242 kJ/mol). A képződési entalpia elektromos energia formájában jelenik meg az elektródok között, amely a fogyasztón realizálódik. A cellában tehát a kémiai energia közvetlenül elektromos energiává alakul; emiatt a folyamatot gyakran “hideg égésnek” nevezik

Az energia átalakulás hatásfoka 60 % körüli, ami jóval nagyobb, mint az égetési folyamatok hatásfoka (ott ugyanis a hatásfok felső határa a Carnot-körfolyamat hatásfoka). Egy cellával 1,23 V feszültség érhető el.

A tüzelőanyag cellák üzemeltetésénél számos technikai problémát kell megoldani; ilyenek, pl.: a gázok bevezetésénél a megfelelő túlnyomás és a folyadékkal való egyensúly biztosítása, a keletkezett víz miatt a savas elektrolit egyre hígul, ezért a víztöbblet eltávolításáról gondoskodni kell, stb. Ezek miatt a tüzelőanyag cellák technikailag bonyolult, költséges berendezések. Előnyük a folytonos üzem, és a minimális környezetszennyezés.

Járművekben történő alkalmazás esetén a tüzelőanyag cellák egyenáramú motorokat hajtanak meg, emiatt sebességváltó nem szükséges az erőátvitelhez. Nagyobb léptékű fejlesztési programok az 1990-es években indultak a vezető autógyárakban (Daimler-Benz, Chrysler, Ford). A Daimler-Benz 1997-ben üzembe helyezte az első tüzelőanyag cellás autóbuszokat Stuttgart városi közlekedésében.

Biztonsági kérdések

A hidrogén alkalmazásakor gyakran emlegetett probléma a biztonság. Megfelelő intézkedésekkel a tűz- és robbanásveszély minimálisra csökkenthető. A hidrogén igen széles koncentráció tartományban elégethető levegőben (4-75 térfogatszázalék), ez a tartomány jóval szélesebb, mint földgáz esetén. A robbanóképes keverék határkoncentrációja (18 %) magasabb, mint a metáné (10 %). A hidrogén igen könnyű, a levegőbe jutva felszáll és könnyen eloszlik – zárt terekben viszont állandó szellőztetés szükséges pl. ventilátorral. Égéskor a láng színtelen, ezért észrevételéhez színező gázt kell hozzá adagolni. A tapasztalatok azt mutatják, hogy mindhárom említett tárolási mód (nagy nyomáson, palackban; folyékony állapotban; fém hidrideken) teljesen biztonságos.

Hőszennyezés

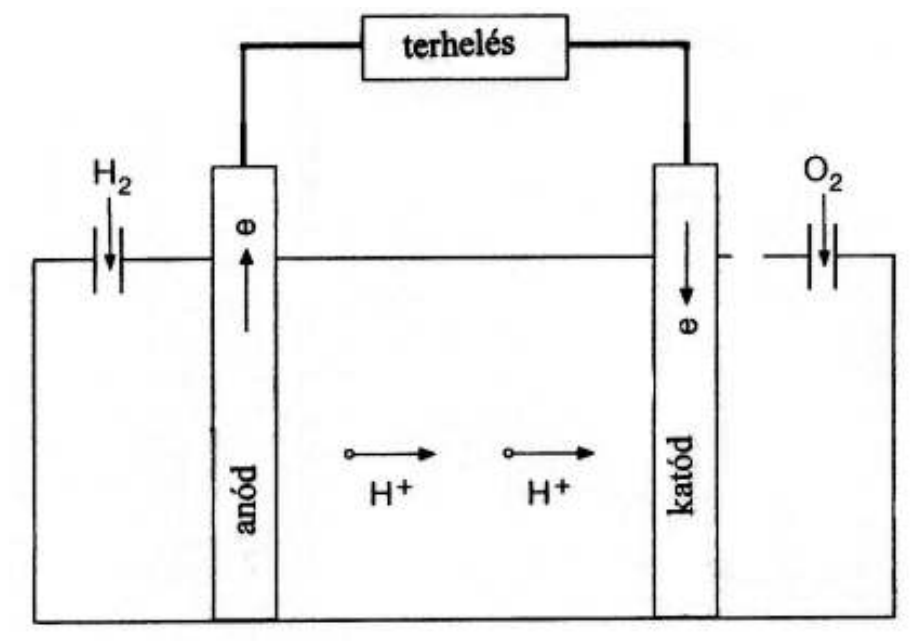
A 2.8 egyenletből következik, hogy a hőerőgépek hatásfok-növelésének egyik módja az alsó hőtartály T_H hőmérsékletének csökkentése. Ezt pl. gőzturbinánál úgy valósítják meg, hogy a gőzt több lapátkeréken vezetik át, ezeken áthaladva hőmérséklete egyre csökken. A kimeneti oldalon még így is forró a gőz, ezért egy csőrendszerbe vezetik, ahol tovább hűl, majd kondenzálódik. Az így keletkezett víz még mindig túlságosan meleg, nem lehet élő vizekbe vezetni. A hőmérséklet emelkedésével ui. csökken a víz oldott oxigéntartalma, ami az ökológiai egyensúly megbomlását okozhatja (bővebben ld. az 1.2 fejezetet). Ennek megelőzésére a kondenzált vizet hűtőtornyokba vezetik. A jelenleg használatos hűtőtornyok két fő típusát a **2.6 ábrán** vázoltuk. (Megemlítjük, hogy a jóval gazdaságosabb száraz hűtőtoronynak az egész világon elterjedt típusa, a Heller-Forgó féle hűtőtorony két magyar mérnök találmánya.)

A hűtőtornyok és más hőcserélő berendezések révén az eltávozó hő egy része hasznosítható. A hasznosítás módjai:

- a kazánba bemenő víz, vagy az égésterbe bevezetett levegő előmelegítése;
- épületek fűtése;
- kertészeti melegházak fűtése, stb.

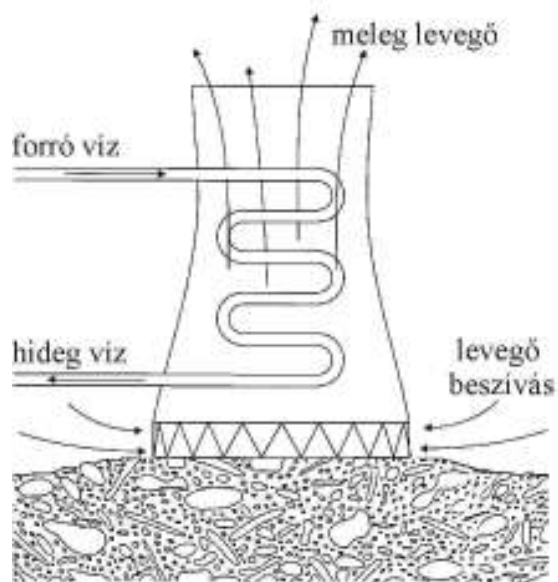
Energiafelhasználás gazdasági áganként

Az ipar, a mezőgazdaság, a kereskedelem, a szolgáltatások és a lakosság energiafelhasználása nehezen osztható fel élesen elkülönült kategóriákra. (Gondoljunk pl. a mezőgazdaságban felhasznált vegyszerekre: előállításuk ipari üzemekben történik, szállításuk a szolgáltató, felhasználásuk a mezőgazdaság energiaszámláját terheli.) A statisztikai értékelésekben mégis gyakran megkísérlik, hogy az egyes országok, vagy régiók energiafogyasztására ágazatonként

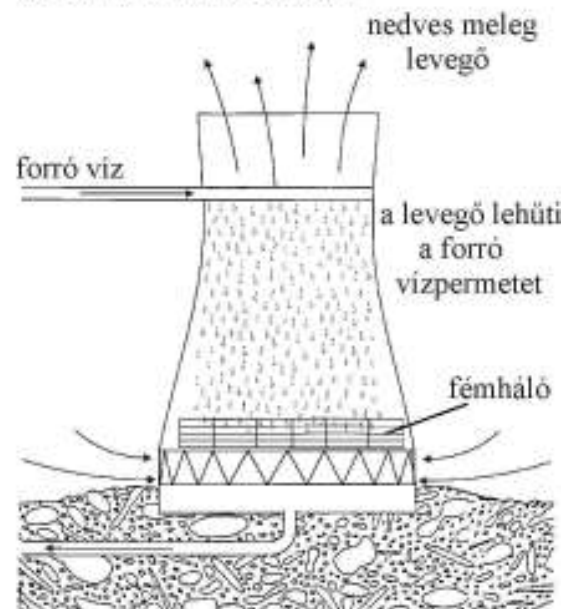


2.5 ábra
Savas tüzelőanyag cella működési vázlata

SZÁRAZ HŰTŐTORONY



NEDVES HŰTŐTORONY



2.6 ábra
Nedves és száraz hűtőtorony vázlata

ti becsléseket adjanak. Ez a mi Közép-Európai régiókban az utóbbi időben nagy nehézségekbe ütközik. A gazdasági szerkezet átalakulása állandóan változó feltételeket és - többek között - állandóan változó energiafogyasztási arányokat jelent. Konszolidáltabb gazdasági körülmények között azonban a változások kevésbé rapszodikusak és így viszonylag megbízható adatok állnak rendelkezésre. A legnagyobb energiafogyasztó, az Egyesült Államok energiafelhasználása ágazatonként a következő: ipar 37%, szállítás 25%, kereskedelem 16%, lakosság 22%. Itt a mezőgazdaság hiányzik, nyilván a többi ágazatban szerepel, elrejtve. Egy más szempontok szerint összeállított adatsorban viszont a mezőgazdaság 17%-os értékkel szerepel.

Nézzük tehát az egyes ágazatok sajátosságait - elsősorban a fejlett országok vonatkozásában.

Ipar

A fejlett országokban az ipar energiafogyasztásának 45%-át gőz előállítására, 25%-át motorok üzemeltetésére, épületek világítására, és kémiai folyamatok fenntartására használják fel. A maradék 30%-ot épületek és technológiai berendezések fűtésére fordítják. Az ipari folyamatok energia-hatékonysági mutatói az utóbbi időben rohamosan javultak; ez a tendencia az olajválság időszakában kezdődött és azóta folyamatosan tart. A közép-európai régióban a rendszerváltás előtt nagyszámú "energiafaló" üzem, sőt ágazat létezett, ezek részben megszűntek, részben korszerűsítés alatt állnak. A konszolidált piacgazdasági körülményektől - és az annak megfelelő energia-mutatóktól - még távol vagyunk.

Mezőgazdaság

Néhány ökológiai szempont

A mezőgazdasági tevékenység során az ember természetes (vagy mesterségesen létrehozott) ökoszisztémák produktivitását hasznosítja saját igényeinek kielégítése céljából. Az ökoszisztémák fontos sajátossága az anyag- és energiaáramlás az egyes táplálkozási (trofikus) szintek között. Az energiaáramlást egy természetes ökoszisztéma (mérsékeltövi erdő) példáján mutatjuk be. A fő energiaforrás a Nap sugárzó energiája; az egyes energia értékeket 1m^3 biomassa napi energia felvételére vonatkoztatva adjuk meg, a mértékegység: $\text{kJ}/(\text{m}^3\text{nap})$.

<u>Energiahasznosítás szintje</u>	<u>Energia $\text{kJ}/(\text{m}^3\text{nap})$</u>
Beérkező napenergia (ebből reflektálódik kb. 50%)	3000
↓	
Növények energiafelvétele	1500
↓	
Növényi biomassa (fotoszintézissel) (Producensek energiahasznosítása)	15
↓	
Növényevő állatok energiahasznosítása (Primer konzumensek)	1,5
↓	
Húsevő állatok energiahasznosítása (Szekunder konzumensek)	0,15

A fenti energiaáram-diagram adataihoz az alábbi megjegyzéseket fűzzük.

A számértékeket fordítva (alulról felfelé) ábrázolva kapjuk az ún. energiapiramist, ennek analógiájára az ökológiában használják a biomassza-piramist, egyedszám-piramist, stb., ezek az ún. Elton-piramisok.

A fotoszintézis során szervetlen anyagból szerves anyag jön létre. A folyamat a glükóz példáján – egyszerűsítve – a következő reakcióegyenlettel írható le:



a folyamat hatásfoka a diagram alapján (1500 egységből lesz 15 egység) 1% körül van. Ez látszólag rossz hatásfok. Ha azonban ugyanezt a folyamatot szintetikus úton valósítjuk meg, a hatásfok még ennél is 100-szor kisebb. A fotoszintézis tehát a napenergia szerves anyaggá történő átalakításának legkedvezőbb lehetősége.

Az energiaáram-adatokból az is látható, hogy a növényi biomassza további útja során minden táplálkozási szinten kb. 1/10-ére csökken az energia. Ez más szóval azt jelenti, hogy a növényevők energiahasznosítása 10-szer kedvezőbb, mint a húsevőké. Nagyjából hasonló nagyságrendi különbségek érvényesek a vegetáriánusok és a húsevők energiahasznosítása során is, ha a számértékek a fentiektől különböznek is. A húsevők táplálékának megtermeléséhez jóval nagyobb terület szükséges, mint a vegetáriánusokéhoz.

Az ember mezőgazdasági tevékenysége

A mezőgazdaság energetikájának mérlegelése során a napenergia meglétét adottnak tekintik, (ez “ingyen van”), az energiamérlegnél nem veszik számításba. A ténylegesen figyelembe vett energiafelhasználást (energiaigényt) az alkalmazott berendezések, gépek, anyagok előállításának energiaigénye és a művelési/termelési technológia energiaigénye határozza meg. Az alábbi táblázat ebben a vonatkozásban adja meg az egységnyi élelmiszer-energia előállításához befektetendő energia-szükségletet (a táblázatban E_b a befektetett energia, E_t a termény energiája). Látható, hogy az ún. intenzív technológiák rendkívül energiaigényesek.

<u>Tevékenység</u>	<u>E_b/E_t</u>
ültetvényes növénytermesztés	0,02.....0,05
Távol-Keleti rizskultúrák	0,02.....0,1
hagyományos burgonyatermelés	0,05.....0,1
vadászat-gyűjtögetés	0,1.....0,2
intenzív rizstermelés	0,2
hagyományos kukoricatermelés	0,2
intenzív burgonyatermelés	0,2.....0,5
intenzív kukorica, szója	0,3.....0,8
rideg szarvasmarhatartás	0,5.....1
hagyományos tojástermelés	0,5.....1
vízparti halászat	1.....2
legeltetési szarvasmarha-tenyésztés	2.....5
intenzív tojástermelés	2.....5
halastavi haltenyésztés	5.....10
intenzív szarvasmarha-tenyésztés	8.....16
tengeri halászat	10.....20

A történeti trendek érzékeltetésére az alábbiakban bemutatunk egy adatsort a kukorica-termelés energiaigényének változására az USA-ban 1700 és 1983 között. (Az adatok 1 ha. kukoricára vonatkoznak, az energia egysége 10^5 kJ/ha.) Látható, hogy az energia befektetés sokkal nagyobb ütemben nőtt, mint a termés hozam, ill. annak energia egyenértéke.

Év	1700	1920	1945	1983
$E_{\text{termény}}$	301	301	341	1040
$E_{\text{befektetett}}$	29	52	100	441
E_t/E_b	10,5	5,8	3,4	2,4

Nyilvánvaló, hogy az 1700-as évekre az emberi munka, az 1900-as évek elején az állati munka, mára pedig a gépi munka jellemző. Ez utóbbi pedig nagy mennyiségű fosszilis tüzelőanyag felhasználását jelenti. A kukorica terméshozama a közölt adatok szerint pl. 1945 és 1983 között több, mint háromszorosára nőtt; a növekedés 30%-a új fajták kifejlesztésének, 70%-a a fosszilis energiahordozók fokozott használatának eredménye.

A másik véglet: Kínában még ma is az emberi munka dominál, bár az utóbbi 30 évben ott is erősen megnőtt (mintegy 100-szorosára!) a fosszilis energiahordozók részaránya.

A fosszilis energiahordozók fokozott használata köztudottan alapvető szerepet játszott a modern társadalmak életmód-váltásában. A falusi lakosság rohamos csökkenése, az urbanizáció csak ezen az áron volt elképzelhető. (A mezőgazdasági lakosság az USA-ban a népesség 2,5%-át teszi ki, nálunk ez az arány 4% körül van.) Az Egyesült Államok jelenleg a világ legnagyobb élelmiszer-exportőre; mindezt azon az áron érte el, hogy nagymennyiségű olajat importált.

Ennek a gyakorlatnak a hosszú távú fenntarthatatlanságát Észak-Korea esete példázza. Az ország korábbi – nagyüzemi alapon megszervezett – mezőgazdaságát a Szovjetuniótól kapott olaj és a kínai energia- és műtrágya import tartotta fenn (politikai okokból mindkettőt úgyszólván ingyen juttatták az országnak). A kommunista blokk összeomlása után mindkét kedvezmény megszűnt, aminek következtében a koreai mezőgazdaság energiafálgépezete működésképtelenné vált. A termésátlagok a korábbiak 40%-ára estek vissza, emberek százai haltak éhen, vagy váltak alultáplálttá. Az éhínség – várhatóan – addig tart majd, amíg a népesség le nem csökken a hagyományos mezőgazdaságnak megfelelő eltartó képesség határértékére. Tovább rontja a helyzetet Észak-Korea nemrég nyilvánosságra került nukleáris fegyverkezési programja, ami egyrészt gazdasági visszahúzó erő, másrészt rontja az ország nemzetközi megítélését és a segélyprogramok nyújtásának esélyeit.

A fosszilis energiaforrások kimerülése a mezőgazdaságnak is felveti a kérdést: mi lehet a jövő útja? Talán az Amish farmerek (USA, Pennsylvania állam) anakronisztikusan környezetbarát gazdálkodása, akik puritán hagyományaikat megtartva, ma is csak igavonó állatokat használnak és kerülnek a vegyszerek használatát? Nem valószínű, hogy ez a csoda megtörténik a 21. században. Az azonban bizonyosnak látszik, hogy a jelenlegi és az ősi technológia között valahol a középúton lesz kénytelen haladni a jövő mezőgazdasága. Ennek szükségességét jelzik elnitrátosodott vizeink és az állandó vegyszerhasználatból elmérgeződött termőföldjeink is.

Szállítás

A világ energiafelhasználásának 25%-át az áru- és személyszállítás teszi ki. A fajlagos energiaigényt az alábbi táblázat mutatja. Látható, hogy mindkét esetben a vasút a leggazdaságosabb (ha a személyszállításhoz a lassúságánál fogva alkalmatlan uszálytól eltekintünk). Ennek ellenére a fejlett országokban, sőt a közép-európai régióban is az országúti szállítás terjedt el. Előnyei nyilvánvalóak: gyorsaság, rugalmasság és – főleg a személyszállítás esetén – a jóval nagyobb szabadság.

<u>Áruszállítás (kJ/t/km)</u>		<u>Személyszállítás (kJ/fő/km)</u>	
Repülőgép	17 880	Repülőgép	3 580
Téherautó	2 140	Személyautó	2 190
Vasút	1 075	Motorkerékpár	3 600
Uszály	620	Vasút	360
		Távolsági busz	675

A személyautó használata az Egyesült Államokban az életforma szerves része; családonként 2-3, sőt több autót is üzemeltetnek. A szövetségi kormány minden lehetséges eszközzel ösztönzi a tömegközlekedés fejlesztését, vagy legalább a személyautók jobb kihasználását - kevés sikerrel. Az okok között a benzin rendkívül alacsony ára is szerepet játszik. Európában, és főleg a mi régióinkban magasabb üzemanyagárak fékezik az ilyen irányú "fejlődést".

Az olajkészletek kimerülése a közlekedés-szállítás területén várhatóan drámai változásokat okoz majd a következő évtizedekben. A jövő lehetséges alternatívái közül néhány:

- metanollal üzemelő gépjárművek: ez egyes dél-amerikai országokban már létező realitás (bővebben a Bioenergia c. fejezetben foglalkozunk a témával);
- megújuló energiaforrások térhódítása a közlekedésben;
- más, jelenleg még ismeretlen fejlődési irányok.

Lakossági energiafelhasználás

A motorizáció, a légkondicionálás elterjedése a fejlett országokban, a háztartások gépesítése az utóbbi évtizedekben ugrásszerűen megnövelte a családi energiafelhasználást. Az alábbi táblázat egy átlagos amerikai család energia-fogyasztásának megoszlását mutatja MJ/év egységekben:

Autó	900 000
Fűtés	180 000
Légkondicionálás	40 000
Sütés-főzés	9 000
TV-rádió	11 000
Mosogatógép	4 000
Hajszárító	150

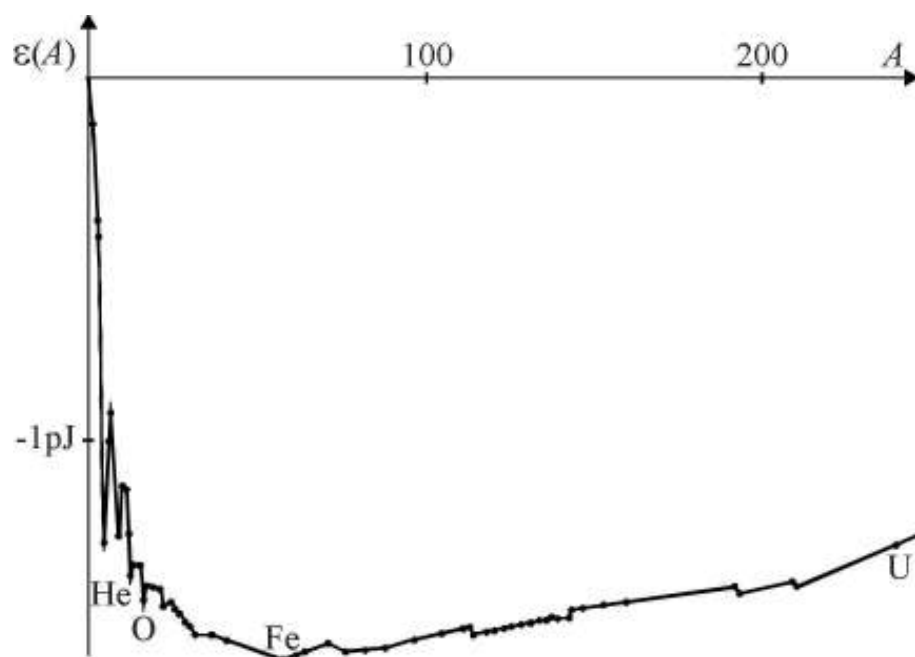
Szembevetendő az autók kiugróan magas részesedése: a teljes fogyasztás 3/4-e. Ez az adat jól illusztrálja a közlekedésről fent elmondottakat, egyúttal azt is jelzi, hol lehetne a leghatékonyabban takarékoskodni.

Egy alternatív energiaforrás: a maghasadás

Az atommagban a nukleonokat (protonokat és neutronokat) rövid hatótávolságú magerők kötik egymáshoz. A magerők az azonos töltésű protonok közötti Coulomb-taszítás ellenére stabilan összetartják az atommagokat, azok felbontásához igen nagy energia szükséges. Azt az energiát, amely egy atommag nukleonjaira való felbontásához szükséges, a mag kötési energiájának nevezzük. Az egy nukleonra vonatkoztatott kötési energia a tömegszám függvényében a **2.7 ábrán** látható.

A függvény alakjából következik, hogy a legstabilabbak a közepes atommagok - itt van a "kötési energiavölgy". A kis- és nagy tömegű magok viszonylag kis stabilitást mutatnak, vagyis viszonylag könnyen "legördülnek" a lejtőn a középen lévő 'vastócsa' irányába. A kis- és nagytömegű magok instabilitása - erősen leegyszerűsítve - a következőképpen magyarázható: a kistömegű magokban kevés a nukleon, ezek majdnem mind a felületen helyezkednek el, vagyis kevés környező nukleon vonzereje köti őket, ezek stabilabbá válnak, ha nagyobb magokká egyesülnek. A nagytömegű magokban viszont sok a proton, amelyek azonos töltésük miatt nagy taszítóerőt fejtenek ki a magerők vonzása ellenében; ezek akkor válhatnak stabilabbá, ha kisebb magokká alakulnak át. A kötési energiavölgy alapján az is nyilvánvaló, hogy kétféleképpen nyerhetünk nukleáris energiát:

- (1) kis tömegszámú elemek egyesítése (fúziója), vagy
- (2) nagy tömegszámú elemek atommagjainak szétbontása hasadás (fisszió) révén.



2.7 ábra

Az egy nukleonra eső kötési energia az atomtömeg függvényében

Mindkét esetben nagyobb energiájú atommagokat kisebb, tehát olyan magokká alakítjuk át, amelyekben a nukleonok erősebben kötöttek. Az átalakulás során felszabaduló többletenergiát hasznosítjuk.

Természetesen egyik átalakulás sem megy végbe spontán módon. A könnyű atommagok fúziójához le kell győzni az azonos töltések közötti taszítóerőt. Az ehhez szükséges energiát (az ún. aktivációs energiát) az anyag magas hőmérsékletre hevítésével, termikus aktiválással állíthatjuk elő. Az E_a aktiválási energia és a közeg T abszolút hőmérséklete közötti kapcsolat:

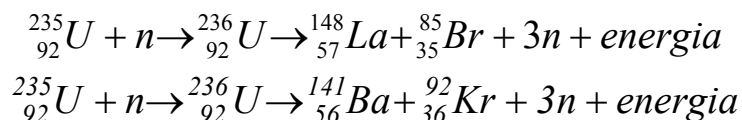
$$\frac{3}{2}kT = E_a$$

ahol k a Boltzmann-állandó. Könnyű atommagok fúziójakor az aktiválási energia 10^{-13} J nagyságrendű, ennek a fenti egyenlet alapján közelítőleg 10 millió fokos hőmérséklet felel meg. (Az atommaghasadás aktiválási energiájának - ugyanilyen alapon - több százmillió fokos hőmérséklet felelne meg.)

A kutatások jelenlegi állása alapján úgy látszik, hogy az atomenergia fúziós úton való felszabadítása kizárólag termikus aktiválással lehetséges. Ehhez azonban - éppen a rendkívül magas hőmérséklet miatt - rengeteg technikai feladatot kell még megoldani.

A maghasadás létrehozásához, amint ez már a 40-es években tisztázódott, van egy másik, alternatív lehetőség. A nagy tömegszámú, nehéz atommagokban a neutronok számaránya nagyobb, mint a közepesekben. Ezért, ha egy ilyen nehéz mag két részre hasad, neutronok maradnak főlöslegben a stabil állapothoz képest. Ráadásul vannak olyan nehéz atommagok (pl. ^{235}U , ^{239}Pu stb.), amelyek neutronok befogásakor spontán módon is elhasadnak. Ilyenkor a befogott neutron felszabaduló kötési energiája fedeazheti a maghasadás aktiválási energiáját. Ezekre az anyagokra tehát fennáll a pozitív visszacsatolás feltétele: a hasadás olyan termékekre vezet (neutron), amely elősegíti újabb maghasadások létrejöttét. Mivel az aktiválási energiát most nem a hőmozgás, hanem a neutronok kötési energiája fedezi, a neutronos láncreakció alacsony hőmérsékleten is működhet.

Mielőtt a láncreakció néhány további részletére kitérnénk, lássunk néhány lehetséges hasadási folyamatot, végtermékeikkel együtt. Az alábbi két reakció tipikusnak mondható:



További lehetőségek a hasadványokra (a jobb oldal közepes atommagjaira): Rb+La; Sr+Ce; Yt+Pr; Zr+Nd stb.

A folyamat minden esetben úgy megy végbe, hogy az ^{235}U mag neutron befogásával ^{236}U közbenső maggá alakul át, amely igen rövid idő alatt (a sejtosztódáshoz hasonlóan) kettéhasad közepes atommagokra és főlös neutronok szabadulnak ki, mivel a közepes magokban a neutronok száma kisebb, mint a nehéz magokban. A végtermékek tömege valamivel kisebb, mint a kiinduló nehéz atommagoké. Ez a tömeghiány (tömegdefektus) alakul át energiává; Δm tömeghiány esetén a felszabaduló energia Einstein egyenlete alapján:

$$E = \Delta mc^2$$

ahol c a fény sebessége (299 792 458 m/s). Ez az energia a hasadványok és a keletkező neutronok hőmozgásának energiáját növeli, ami az egész anyagmennyiség felmelegedéséhez vezet; a továbbiakban ezt a hőt hasznosítjuk.

A láncreakció szabályozása

Ahhoz, hogy a láncreakció meghatározott keretek között maradjon, vagyis nehogy “megszaladjon”, a neutronok számát valamilyen módon szabályoznunk kell. Vannak olyan anyagok, amelyeknek nagy a neutron-elnyelő képességük; ilyen pl. a kadmium, vagy a bór. Ezekkel szabályozhatjuk a meglévő és hasadást előidéző neutronok számát. Ha sok neutront vonunk el, a láncreakció leáll, ha keveset, újra indul. A jelenlegi, maghasadáson alapuló atomerőművekben neutronelnyelő anyagokból készült rudak ki- és betolásával szabályozzák a teljesítményt.

Az önfenntartó láncreakció feltétele az, hogy minden hasadási neutron legalább egy újabb maghasadást hozzon létre. Ennek pontosabb kvantitatív jellemzésére vezették be az *effektív sokszorozási tényezőt* (k_{eff}), amely a hasadás során keletkezett és az eredetileg meglévő neutronok számának hányadosa.

Ha $k_{\text{eff}} < 1$ (szubkritikus rendszer), akkor a láncreakció csökken, majd leáll; ha $k_{\text{eff}} > 1$ (szuperkritikus rendszer), akkor a láncreakció nő, ez veszélyes lehet, végül $k_{\text{eff}} = 1$ (kritikus rendszer) estén a láncreakció éppen önfenntartó. Atomreaktorokban a szabályozó rendszerek segítségével az utóbbi állapotot igyekezünk megvalósítani.

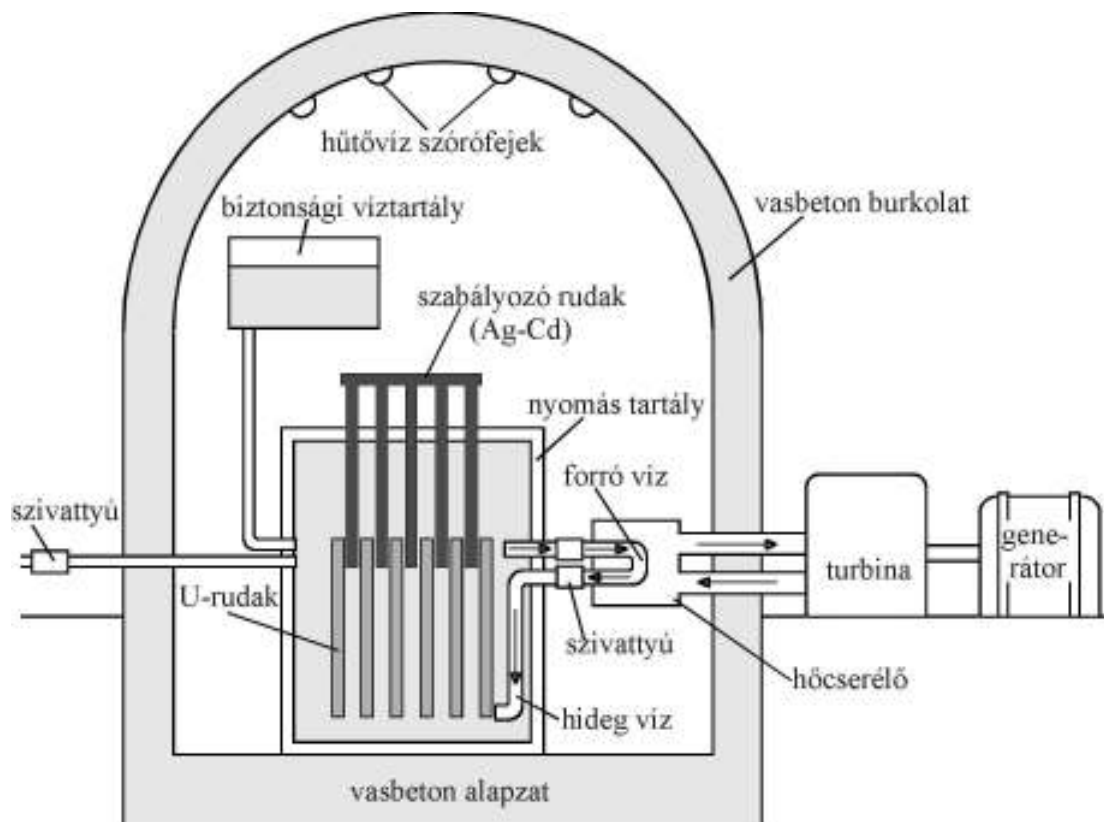
A nagyenergiájú, gyors neutronok rövid ideig tartózkodnak az atommagok közelében, ezért csak kis valószínűséggel lépnek velük kölcsönhatásba, végül könnyen kiszöknek a reaktorokból. A neutronok lassításával ez a helyzet javítható; a lassítás másik előnye, hogy a lassú neutronok a hasadóképes magokba sokkal könnyebben fogódnak be és hoznak létre maghasadást. Legjobb neutronlassító anyag a hidrogén, mivel annak atommagja (a proton) neutronnal ütközve annak csaknem teljes mozgási energiáját átveszi (hasonlóan, mint a biliárdgolyók ütközésekor történik). A legolcsóbb hidrogén tartalmú anyag a víz, ezért a leggyakrabban ezt alkalmazzák lassító (moderátor) közegként.

A láncreakció szempontjából csak az ^{235}U atommagok jöhetnek szóba. A természetes uránércnek ezek csak 0,7%-át teszik ki, a nagyobbik hányad az ^{238}U tulajdonképpen meddő anyag, amely azonban elnyeli a neutronokat. Ezért egy természetes uránból álló tömbben nem indulhat meg a láncreakció. Az ^{238}U káros hatását úgy lehet csökkenteni, hogy a fűtőelemek anyagában növelik az ^{235}U -nek a másik izotóphoz viszonyított arányát. Ezt a műveletet dúsításnak nevezzük. A két izotóp kémiai azonos, ezért kémiai módszerekkel nem választhatók szét. A fizikai módszerek a két izotóp tömegének különbségét használják ki. Ez a tömegkülönbség azonban igen kicsi, így ezek a módszerek csak lassan, többszöri ismétlés után vezetnek számottevő eredményre. A fizikai dúsítási módszerek közül az ultracentrifugálást és a gázdifúziós (termo-difúziós) módszert említjük, további részletezés nélkül, mindkettő rendkívül drága, anyag- és energiaigényes művelet. Ezért dúsító művek építése csak egy bizonyos kapacitás fölött térül meg. A gazdasági okok mellett szigorú nemzetközi egyezmények és előírások is korlátozzák a dúsító művek létrehozását. Ezekben ui. olyan összetételű nukleáris fűtőanyagot is elő lehet állítani, amely atomfegyverek készítésére alkalmas.

Az atomreaktor felépítése és üzemelése

Miután tisztáztuk az atomreaktorban lejátszódó egyes folyamatokat és elemeztük a legfőbb problémákat, ideje, hogy megismerjük a reaktorok működését. Egy *nagynyomású, vízhűtésű heterogén reaktor* vázlatos felépítése a **2.8 ábrán** látható.

A reaktornak az a tartománya, ahol az energiatermelő magreakciók lejátszódnak, az aktív zóna. Itt helyezkednek el a fűtőelem-kötegek, amelyek a hasadóanyagot tartalmazzák. A fűtőelemekből kilépő gyors hasadási neutronokat a legtöbb típusnál az elemek között lévő közeg lassítja. Ezt a lassító közeget nevezzük moderátornak. (A bemutatott típus azért heterogén, mert benne a fűtőközeg és a moderátor zonális eloszlásban foglal helyet.) Miután a maghasadások energiája megnöveli a hasadványok mozgási energiáját, ezek lefékeződnek, energia leadásuk a fűtőelemeket felmelegíti. A hűtőközeg (ábránkon víz) a keletkezett hőt



2.8 ábra
Nyomott vizes reaktor működési vázlat

elszállítja. A vízzel működő reaktorokban tehát a moderátor egyúttal a hűtőközeg szerepét is betölti. Vannak olyan konstrukciós megoldások is, ahol a két feladatot különböző közegek látják el. (Vannak pl. grafit-moderátoros reaktorok, amilyen a csernobili reaktor volt; az ezzel kapcsolatos problémákra még visszatérünk.)

Az aktív zónában lévő víz hőmérséklete több száz $^{\circ}\text{C}$, nyomása néhány száz bar. Ezt az ún. primer körben cirkuláltatják; hőmennyiségét egy hőcserélőben adja át a munkafolyamatot végző szekunder körben áramló víznek; itt a nyomás jóval kisebb és a víz gőzzé alakul, amely gőzturbinát hajt meg. A vele egy tengelyre kapcsolt generátor elektromos áramot termel. (A szekunder körtől kezdve tehát az atomerőmű működése pontosan megegyezik a hagyományos erőművékével.)

A primer és a szekunder kör egymástól anyagátadás szempontjából teljesen el van szigetelve. Erre azért van szükség, hogy a primer körben lévő víz esetleges radioaktív szennyezése esetén a szennyezések semmiképpen ne juthassanak át a szekunder körbe. Ilyen módon tehát a reaktorban fejlődő hő tisztán, kísérő radioaktív-, vagy egyéb szennyezések nélkül vonható ki.

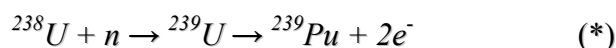
Visszatérve az aktív zónára: abban az üzemelés közben alapvető változások zajlanak le. A főbb folyamatok a következők

- a hasadó anyag (^{235}U) mennyisége egyre fogy;
- a hasadás végtermékeinek (a hasadványoknak) a mennyisége nő;
- a nagy neutron-fluxus az atommagok egy részét új radioaktív izotópokká alakítja át.

Ezek a változások visszahatnak a reaktor működésére, ezért az üzemi paramétereket folyamatosan módosítani kell. Egy idő után azonban ez sem segít, az üzemanyag kiég, a kiégett fűtőelemeket pedig újakra kell kicserélni.

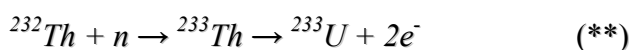
Az üzem közben bekövetkezett változások nagyságát és minőségét 1000 kg 3,3%-ban dúsított urán példáján keresztül szemléltetjük. A dúsításnak megfelelően az 1000 kg üzemanyag kezdetben 967 kg ^{238}U és 33 kg ^{235}U izotópból áll.

Három év múlva már csak 8 kg ^{235}U és 943 kg ^{238}U marad. Ezenkívül 35 kg erősen radioaktív közepes tömegű atommag - hasadási termék - keletkezik. A maradék nagy tömegszámú elemekből áll, amelyek a kiinduló izotópokból neutronbefogásokkal jönnek létre. Ezek közül a legnagyobb figyelmet az a 9 kg plutónium (^{239}Pu) érdemli, amely atombomba gyártására is alkalmas. Ez az ^{238}U -ból jön létre neutronbefogással a következő reakciók szerint:



Az 1000 kg kiinduló tömegből 3 év után hiányzik 36 g; ez a tömegdefektus, amely a már idézett Einstein-egyenlet alapján 860 millió kWh ($3,1 \times 10^{15}\text{J}$) energiának felel meg. Ekkora energiát 102 000 t jó minőségű feketeszén elégetésével lehet nyerni. Vagyis az 1 t kiinduló üzemanyagot figyelembe véve ez azt jelenti, hogy az urán fajlagos energiatartalma több, mint százezerszerese a szénnek.

Az előbbieken ismertetett, dúsított urán üzemanyaggal működő, nyomott-vizes reaktorokon kívül egészen más típusú reaktorokat is kifejlesztettek. Az ún. *gyors tenyésztő reaktorok* jelentik talán a jövőre nézve legígéretesebb perspektívát. Ezeknek két alternatív változatuk létezik: az egyik a (*) egyenlet szerint működik, a másik alapanyaga a tórium és belsejében az alábbi magreakciók játszódnak le:



Mind a ^{239}Pu , mind az ^{233}U hasadó anyag, de a természetben egyik sem fordul elő. A (*) és a (**) egyenletnek megfelelően mindkét esetben több hasadó anyag keletkezik, mint a kiinduló anyagmennyiség. A magreakcióhoz gyors neutronok szükségesek; e két utóbbi tulajdonság miatt nevezik ezt a reaktortípust *gyors tenyésztő reaktornak*. A kétszereződési idő

(amely alatt a hasadó anyag mennyisége megkétszereződik) kb. 20 év. Mivel működéséhez nem kell neutronlassító (moderátor), az ilyen reaktorok hűtőközege nem lehet víz, erre a célra általában folyékony nátriumot használnak. Ez hőcserélő közbeiktatásával adja át hőjét a szekunder körben keringő víznek – innen a berendezés felépítése és működése már megegyezik a nyomott vizes reaktorokéval.

Mivel a tórium az urániumnál jóval gyakoribb elem, a jövő energiaellátása szempontjából a (**) reakció ígéretesebbnek látszik.

Végül ejtsünk néhány szót a reaktorok biztonságáról; nem a bonyolult és többszörösen biztosított, számítógép-vezérlésű rendszerekről, hanem a fizikai törvények által ‘szavatolt’ biztonságról. Korábban definiáltuk az effektív sokszorozási tényezőt. Ha $k_{eff} > 1$, akkor a láncreakció nő. De vajon válhat-e egy atomerőmű atombombává? A válasz: nem! Ha ugyanis valamilyen okból az aktív zónában a láncreakció ‘megszalad’, a hőmérséklet egyre emelkedik. A víz (a túlnyomás ellenére) végül felforr és a biztonsági szelepeken keresztül gőz formájában távozik (esetleg leszakítja a reaktor-tartály fedelét). A víz távozásával viszont megszűnik a neutronok lassítása, ez lecsökkenti a maghasadások számát, végül a láncreakció leáll. Robbanás tehát nem következhet be (vízzel moderált reaktoroknál). Az atombombaszerű robbanás elleni biztonságot tehát a ‘soha meg nem hibásodó’ természeti törvények szavatolják. Az egyedüli veszélyforrás a nagy aktivitású radioaktív elemek környezetbe jutása, aminek - a szennyezés mértékétől függően - lehet katasztrofális következménye is.

Az ilyen katasztrófák lehetőségét az USA-ban korábban - a harrisburgi (Three Mile Island, Pennsylvania) reaktorbalesetet követően - egy forgatókönyvben leírták és az elképzelt eseménysorozatnak a **Kína-szindróma** nevet adták (a forgatókönyv vízzel moderált reaktorokra vonatkozik.) Ennek során a víz eltávozása után a reaktor-töltet megolvad, megolvasztja az aktív zóna alsó, vastag beton védőrétegét (**2.8 ábra**) és a töltet beáramlik az altalajba; az olvadék iránya (az USA területén elképzelt balesetnél) Kína felé mutat - innen az elnevezés. A forgatókönyvben feltételezték, hogy a környezetbe kijutó vízgőz radioaktív gázokat és megolvadt aktív anyagot is magával ragadhat. Az intenzív sugárzás és a magas hőmérséklet hatására a vízmolekulák hidrogénre és oxigénre hasadnak, ez durranógáz fejlődéséhez vezethet, amelynek robbanása szintén nagy mennyiségű sugárzó anyagot juttathat a környezetbe.

Problémák az atomenergia felhasználásával kapcsolatban

Az atomenergiával kapcsolatos problémákat öt csoportba sorolják:

- a környezetbe kerülő radioaktív szennyezés;
- a radioaktív hulladékok elhelyezésének problémája;
- a reaktorbalesetek kockázata;
- az illegális hasadóanyag-kereskedelem veszélyei;
- az atomerőművek magas beruházási költségei.

Az atomerőművek *környezeti sugárszennyezése* a statisztikai adatok alapján *gyakorlatilag elhanyagolható* (természetesen “normális” üzemelést figyelembe véve). Az Egyesült Államok hivatalos adatai szerint az atomerőművekből eredő háttérsugárzás 0,00003 mSv/ fő/év (míg az orvosi diagnosztika 0,72 mSv/fő/év terhelést okoz!). Ez rendkívül kis kockázatot jelent, ekvivalens pl. azzal a kockázattal, amit egyetlen cigaretta elszívása okoz egy egész élet során, vagy amit három évente eggyel több átkelés okoz az úttesten.

Sokkal nagyobb gondot okoz *a reaktorhulladék elhelyezése*. Ez igen sok, különböző felezési idejű izotópot tartalmaz; vannak közöttük rövid felezési idejű izotópok, pl. a ^{131}I (T=8 nap), közepes felezési idejű a ^{137}Cs és a ^{90}Sr (T=30 illetve 28 év), a ^{239}Pu felezési ideje pedig 24.000 év (bár az utóbbit általában kivonják a hulladékból), kedvezőtlen esetben tehát akár 100 000 évig is gondoskodni kellene a biztonságos tárolásról. Nem véletlen, hogy egyes országok (régión, települések) óvakodnak attól, hogy területükön radioaktív hulladékot helyezzenek el.

A hulladék biztonságos elhelyezésének néhány lehetősége:

- sóbányák elhagyott tárnáiban, ezekben talajvíz általában nincs és geológiaiilag is biztonságos területek;
- üvegbe öntve (a korrózió elleni védelem céljából), néhány ezer méter mély mesterséges aknában elhelyezve;
- a legveszélyesebb, leghosszabb felezési idejű komponenseket kémiai úton kivonják és csak ezeket kell hosszú távra, biztonságosan elhelyezni; így az eredeti hulladék mennyisége 1/100-1/1000 részére csökkenthető;
- egy újabb (kísérleti stádiumban lévő) technológia szerint a kiégett fűtőelemeket nagyenergiájú gyorsítók ionnyalábjával bombázzák. Ez nagy neutron-fluxust gerjeszt az anyagban, amely az atommagokat nagy aktivitású, gyors lebomlású magokká alakítja át (transzmutáció). Ráadásul a folyamat többlet energiát termel, ezért energia-sokszorozásnak is nevezik.

A *reaktorbalesetekről* korábban már említést tettünk. Eddig összesen 30-40 kritikus esetről számoltak be, ezek nagyságrendje a kisebb üzemzavaroktól a katasztrofális csernobili balesetig terjed. Vízrel moderált reaktorok esetén - mint már említettük - a hasadó anyag túlhevülése a moderátor (víz) távozása miatt gyakorlatilag lehetetlen. A súlyos csernobili baleset oka az emberi mulasztások sorozatán kívül az elavult konstrukció volt. Egyes régebbi reaktorokban (így a katasztrófát okozó csernobili reaktorban is) a víz mellett grafit-moderátort is alkalmaztak (túlmoderált reaktorok). Ezekben a reaktor-töltet túlhevülése esetén a víz eltávozik ugyan, de a grafit továbbra is lassítja a neutronokat, ezért a láncreakció nem áll le. Az ilyen típusú reaktorok veszélyeire Teller Ede már az 1950-es években felhívta a konstruktőrök figyelmét; az Egyesült Államokban és Nyugat Európában már régen beszüntették ezek gyártását.

Az *illegális hasadóanyag-kereskedelem* veszélye az utóbbi években egyre inkább fenyegető tényezővé válik. Az ezzel kapcsolatos követelményeket, feltételeket a legjobban a Nobel-díjas svéd fizikus Hannes Alfvén sorai fejezik ki:

“A hasadó energia csak akkor biztonságos, ha. (a reaktorok biztonsági feltételeinek betartása mellett) nem történik szabotázs, vagy a szállítmányok eltérítése, ha a hasadóanyag feldolgozó üzemek sehol a világon nincsenek kitéve lázadásoknak, gerilla-akcióknak, ha nincs az érintett területen forradalom, vagy háború (még hagyományos sem), a különösen veszélyes anyagok nem kerülhetnek tájékozatlan emberek, vagy banditák kezére. Nem bízhatunk a gondviselésben!”

Megújuló energiaforrások

Ide sorolhatók azok az energiaforrások, amelyek korlátlan mennyiségben állnak rendelkezésünkre, pontosabban addig, ameddig a Nap változatlan energiával sugároz. Legtöbbjük a napsugárzás közvetlen következménye. Az alábbi táblázatban a napenergia és a többi energiaforrás összehasonlítása látható, ugyanitt megadtunk néhány más, érdekesebb energiaértéket 10^{20} J egységekben (megjegyezzük, hogy a táblázat első és két utolsó adatának kivételével a többi adat állandóan változik).

A földfelszínre érkező napenergia (24 h)	154		
A szénkészletekben tárolt energia	1950		
Az olajkészletekben tárolt energia		180	
A földgázkészletekben tárolt energia	135		
A becsült északi-tengeri olajkészletek		3	
Az USA évi energiafogyasztása			0,75
Nagy-Britannia évi energiafogyasztása	0,09		
A Föld belsejéből származó hő-fluxus (24 h)	0,027		
A csillagokról érkező összes sugárzás (24h)	6×10^{-6}		

Figyelemre méltó tény, hogy a Napról közelítőleg 15 nap alatt annyi energia érkezik, mint a fosszilis energiahordozók összes becsült készletének energiaértéke. Az energiaforrások közül az egyetlen, amely nem a Nap működésének köszönhető: a geotermikus energia, amely a föld belső magjában levő radioaktív anyag (elsősorban uránium) bomlásából keletkezett hőenergia. Mivel a bomlások felezési ideje milliárd év nagyságrendű, emberi léptékkal mérve a geotermikus energia is megújuló energiaforrásnak tekinthető.

A napenergia

A napenergia hasznosításának sok évszázados története során az alábbi műszaki megoldások alakultak ki:

- 1) szoláris építészet – a napenergia közvetlen hasznosítása;
- 2) szoláris épületgépészet – különböző típusú és munkaközegű napkollektorok alkalmazása;
- 3) Fotovillamos (PV) energia átalakítók – napelemek, napelem-rendszerek;
- 4) teljes körű energiaellátást megvalósító, komplex rendszerek;
- 5) nap-hőerőművek – ipari léptékű energiaellátó rendszerek.

Az épületekben alkalmazott szoláris rendszerekben a napenergia hasznosítása három részfeladatot foglal magában:

- a napenergia hatékony begyűjtése,
- az energia szükséges mértékű tárolása,
- az energia megadott ütemezés szerinti leadása.

A szoláris épülettervezés során a fenti három funkciót az épület szerkezeti elemei látják el, az ilyen rendszereket passzív rendszereknek nevezzük. Az aktív rendszerekben ezzel szemben a három funkciót megfelelően kialakított épületgépészeti berendezésekkel: napkollektorokkal, fotovillamos rendszerekkel és az azokhoz kapcsolódó kiegészítő elemekkel biztosítják.

1. Szoláris építészet

A napenergia-hasznosítás legrégebb és máig leggyakrabban alkalmazott módja a direkt és a szórt sugárzás közvetlen felhasználása fény, hő, vagy mindkettő formájában. A klasszikus görög épületekben, de a jóval későbbi falusi, népi építészetben (tornácos házak) már megtalálható a modern energiatudatos építészet minden fontosabb eleme. Ezeket az elemeket tudatosan és tervszerűen alkalmazza a modern építészet, felhasználva a korszerű technika és anyagtudomány eredményeit.

Az épület helyes tájolásával növelhető a direkt és a szórt sugárzásból hasznosítható energia mennyiség és csökkenthető a hőveszteség. Az épület elhelyezésekor figyelembe kell venni a terepviszonyok, esetleges közeli épületek és növények adta árnyékhatásokat. A klasszikus szabály szerint a hőhasznosítás a benapozott felületek déli tájolása esetén a legnagyobb; ezt más szempontok módosíthatják, de mégis általános irányelv, hogy a nappali tartózkodásra szolgáló helyiségeket a déli oldalra célszerű helyezni.

A szoláris építészetben alkalmazott passzív energiahasznosító rendszerekben – mint már említettük – a napenergia hasznosítás három fő funkcióját (az energia begyűjtését, tárolását és leadását) az épület szerkezeti elemei látják el. Attól függően, hogy az alapelemek milyen kombinációban jelennek meg az épületben, megkülönböztetünk direkt és indirekt rendszereket.

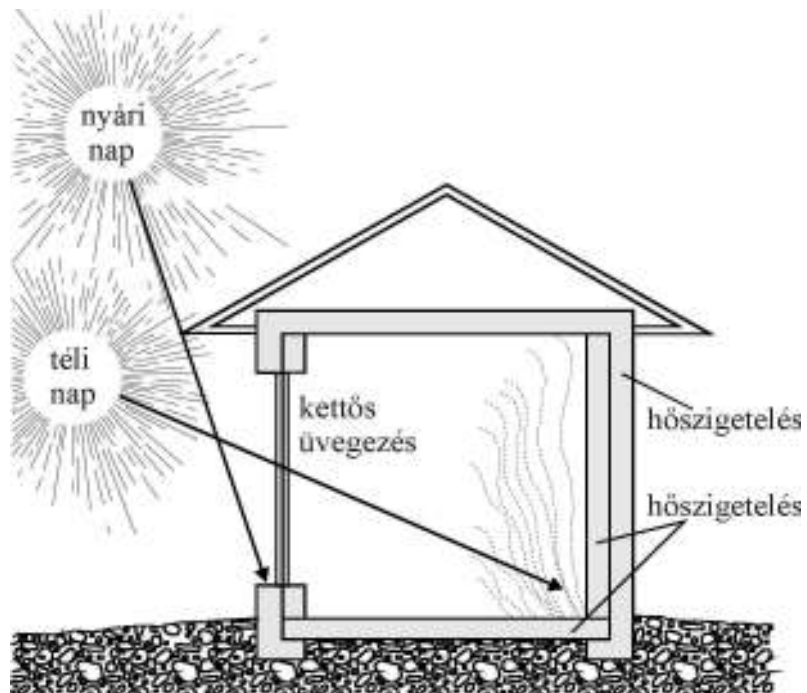
A *direkt rendszerek* az ablakfelületeken át a helyiségbe érkező napsugárzást közvetlenül hasznosítják (**2.9 ábra**). A besugárzott belső felületek (falak, födégek, berendezési tárgyak) felmelegszenek, a hő egy részét saját tömegükben tárolják, más részét átadják a levegőnek. A helyiségből a hőleadást a korábban részletezett üvegházhatás mechanizmusa akadályozza meg.

A hő bevezetése és tárolása az *indirekt rendszerekben* egymástól térben elkülönül. Ez úgy valósul meg, hogy a helyiséget határoló üvegfelület belső oldalán vastag, hőszigetelő fal helyezkedik el, amely nagy hőtárolóképessége folytán hosszú időre elraktározza az üvegházhatás révén csapdába esett hőt.

A *naptér* (**2.10 ábra**) az épület fűtött helyiségeihez csatlakozó, a külső környezettől üvegfelületekkel elválasztott direkt besugárzású tér, amelynek általában nincs hagyományos fűtőberendezése. (A régebbi üveges verandák, vagy csatlakozó üvegházak hasonló funkciót töltöttek be.) A napenergiát az alsó födém és az épület felőli fal tárolja. Az időjárástól függően a naptér a tárolt hő felhasználásával, konvektív és vezetékes hőáramokkal fűti az épületet, hidegben pedig csökkenti a hőveszteséget. Nyáron a túlmelegedés az üvegfelületek megfelelő árnyékolásával mérsékelhető. Naptér alkalmazásával az éves fűtési energia megtakarítás jelentős, a mi éghajlati körülményeink között maximálisan 30% lehet. Mind a direkt, mind az indirekt rendszereknél fontos a határoló falak és az üvegfelületek jó hőszigetelő képessége.

2. Szoláris épületgépészet

A napenergia hasznosítására szolgáló épületgépészeti berendezéseket aktív rendszereknek nevezzük. Alkalmazásuk elsődleges célja a hagyományos energiahordozók felhasználásának csökkentése. A modern épületgépészeti és szabályozástechnikai eszközök alkalmazásával ma már az épületek teljes energiaellátása is megoldható. A szoláris épületgépészeti rendszerek felhasználhatók vízmelegítésre, fűtésre és hűtésre. Magyarországon a legfontosabb felhasználási cél a vízmelegítés, ezért a továbbiakban csak az erre szolgáló berendezésekkel foglalkozunk.



2.9 ábra
Direkt napenergia hasznosítás előtető alkalmazásával



2.10 ábra
Ház oldalához csatlakoztatott naptér

A sík kollektor olyan eszköz, amely a nap által sugárzott energiát elnyeli és átalakítja olyan (hő)energiává, amely épületgépészeti eszközökkel jól kezelhető.

A hagyományos sík kollektor keresztmetszetét a **2.11 ábrán** mutatjuk be. A besugárzás az üveg lefedésen keresztül a fekete, matt felületű abszorberre (elnyelő felületre) érkezik, amelyhez hegesztéssel, jól vezető módon rögzítik a folyadékot szállító csőhálózatot. Az üveg lefedés funkciója kettős: egyrészt csökkenti a konvektív áramlás általi energiaveszteséget, másrészt az üvegházhatás folytán hozzájárul az abszorber hőmérsékletének növeléséhez. Az abszorber jó energiaelnyelő tulajdonságainál fogva magas hőmérsékletre melegszik fel és hőjét átadja a hozzá rögzített csőhálózatnak. Az alsó hőszigetelő réteg a vezetés általi hőveszteségek csökkentését szolgálja.

A hasznosított sugárzási energia a kollektor felületével arányos. A besugárzott energiából a kollektor annál többet hasznosít, minél kisebbek a saját veszteségei. Ezért fontos a veszteségek részletes áttekintése. Az egyes veszteségeket a **2.11 ábra** keresztmetszeti vázlata alapján tárgyaljuk.

A veszteség 3 fő komponense a hővezetési, a sugárzási és a konvekciós veszteség; a teljes veszteség ezek összege:

$$q_{\text{ö}} = q_v + q_s + q_k \quad (2.22)$$

ahol $q(W/m^2)$ az egyes veszteségi tagokat jelenti, az indexek kezdő betűk szerinti jelölésével.

A hővezetés vesztesége Fourier I. törvénye alapján:

$$q_v = \lambda \frac{T_a - T_t}{d} \quad (2.23)$$

ahol T_a az abszorber, T_t a támasztó felület hőmérséklete, λ és d a szigetelő réteg hővezetési tényezője, ill. vastagsága.

A sugárzási veszteség a Stefan-Boltzmann törvény szerint:

$$q_s = \varepsilon_{\ell} \sigma (T_{\ell}^4 - T_0^4) \quad (2.24)$$

ahol a ε_{ℓ} az üveg lefedés anyagának hőemissziós tényezője, T_{ℓ} a lefedés, T_0 a környezet hőmérséklete. A konvektív veszteség:

$$q_k = k(T_{\ell} - T_0) \quad (2.25)$$

ahol k a konvekciós tényező; értéke szélcsend (szabad konvekció) esetén $2 \dots 10 W/(m^2 K)$, szél (kényszerített konvekció) esetén több száz, sőt több ezer $W/(m^2 K)$ is lehet. Az egyes veszteségi tényezők meghatározása összetett technikai feladat.

Az üveg lefedés anyaga a jó minőségű kollektoroknál edzett, biztonsági üveg. Léteznek többrétegű hőszigetelt üveg lefedések is. A 2.24 egyenletből látható, hogy a sugárzási veszteség az üveg lefedés hőemissziós tényezőjének alacsony értéke esetén kedvező. Ezért az utóbbi időben speciális, alacsony hőemissziójú üvegeket is forgalomba hoznak erre a célra. Szintén fontos, hogy az üveglefedés külső oldalának reflexió-képessége kicsi legyen, ezt valósítják meg az ún. antireflexiós szolárüveggel, amelynek külső felülete raszteres, ezáltal kisebb a visszaverő képessége. Ennek kedvező hatása főleg a reggeli és a késő délutáni, ferdén érkező napsugárzás esetén érvényesül.

A hővezetés általi veszteségeket (2.23 egyenlet) kis hővezető képességű szálak szerkezetű ásvány-, vagy üveggyapot lemezekkel biztosítják, a szigetelés teljes vastagsága 4-8 cm.

A kollektor hatásfokát az üzemelési adatok alapján a következőképpen számíthatjuk:

$$\eta = \frac{\frac{\Delta m}{\Delta t} c (T_{ki} - T_{be})}{A_k I_k} \quad (2.26)$$

ahol c az üzemi folyadék fajhője, $\Delta m/\Delta t$ a kollektoron időegység alatt áthaladó folyadéktömeg (folyadékhozam), T_{ki} és T_{be} a kimenő és a bemenő folyadék hőmérséklete, A_k a kollektor felülete, I_k a besugárzás intenzitása a kollektor síkjában.

A tapasztalat azt mutatja, hogy a kollektorok hatásfoka elsősorban a napsugárzás erősségétől függ, a külső hőmérséklet hatása másodlagos. (Pl.: egy derült téli napon, amikor a levegő hőmérséklete -10°C , a hatásfok sokkal nagyobb, mint egy borús őszi napon, amikor a külső hőmérséklet $+10^\circ\text{C}$.)

Az éghajlattól, és a felhasználás követelményeitől függően a sík kollektorokat egykörös, vagy kétkörös rendszerben használják. Az egykörös rendszerben a meleg vizet közvetlenül a kollektorról nyerik, gyakran egy nagyobb méretű tároló tartály is járul a rendszerhez. Ilyen kollektorokat használnak a melegebb éghajlatú országokban, pl. Izraelben, ahol a hőmérséklet nem csökken fagypont alá, így nem fenyeget a csövek szétfagyásának veszélye. A kétkörös rendszert (2.12 ábra) olyan helyeken használják, ahol télen gyakori a fagy (pl. Magyarországon). Ezenél a primer körben fagyálló folyadék kering, amely egy hőcserélőn keresztül adja át hőjét a szekunder körben áramló, közvetlen felhasználásra kerülő víznek. Mindkét rendszer működtethető ún. termoszfionos keringetéssel, amikor a spontán módon kialakuló konvektív áramlás cirkuláltatja a folyadékot, újabban azonban csaknem minden esetben keringető szivattyúkat alkalmaznak.

A sík kollektorok azon kívül, hogy jelentősen hozzájárulhatnak a kisebb mértékű energiaigények fedezéséhez, jelentős környezetvédelmi funkciót is ellátnak. Egy négyzetméter kollektor felület környezeti hatásai (egy évre vonatkoztatva) hozzávetőlegesen a következők:

- Megtakaríthatunk általa 75 liter tüzelőolajat.
- Elkerülhetjük 200 kg szén-dioxid kibocsátását.
- Elkerülhetjük 2,5 kg kén-dioxid kibocsátását.

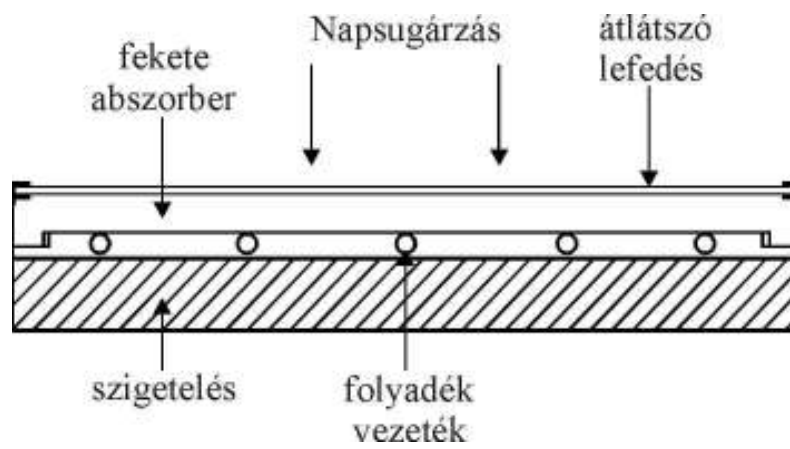
3. Fotovillamos (PV) energia-átalakítók

A napelemek (PV diódák) a napsugárzás fotonjainak energiáját közvetlenül elektromos energiává alakítják át. A fotonok energiája rezgési frekvenciájuktól függ az alábbi, Planck-féle összefüggés szerint:

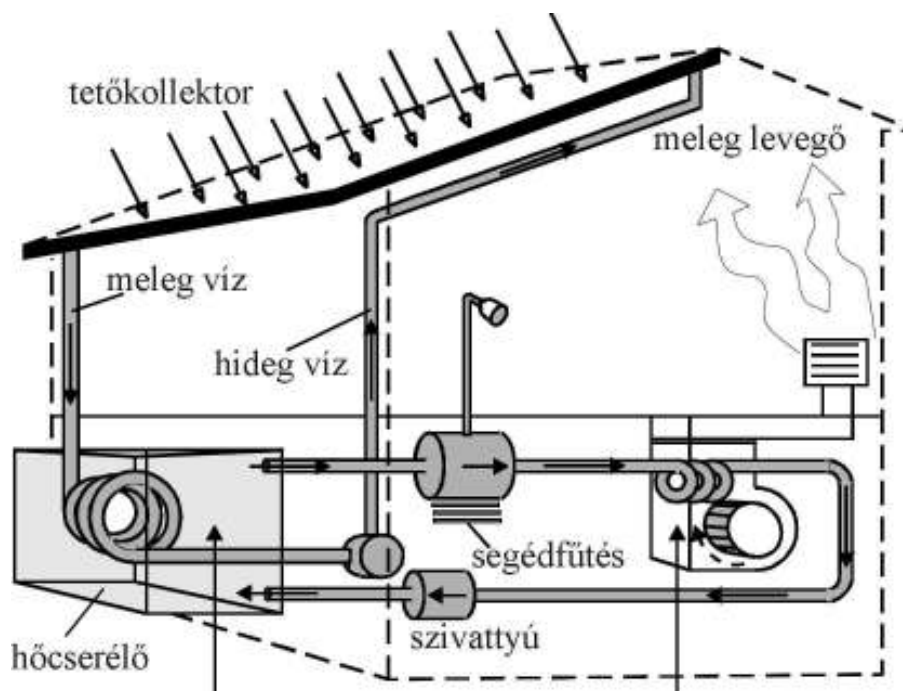
$$E_f = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{Joule})$$

ahol h a Planck-féle állandó, ν a foton rezgési frekvenciája, c a fénysebesség, λ a foton hullámhossza. Félvezető problémáknál az energiát gyakran eV (elektronvolt) egységekben fejezik ki:

$$E_f = \frac{hc}{\lambda e} = 1,242 \frac{1}{\lambda_{\mu m}} (eV) \quad (2.27)$$



2.11 ábra
Sík napkollektor keresztmetszete



2.12 ábra
Lakóház melegvízellátása kétkörös kollektor-rendszerrel

ahol e az elektron töltése: $1,6 \times 10^{-19}$ C; a hullámhossz az utóbbi kifejezésben μm -ben értendő.

A napelemek alapanyaga a leggyakrabban szilícium félvezető kristály. A tiszta szilícium külső elektronhéján négy elektron helyezkedik el. Egy elektronnak a vegyértéksávból a vezetési sávba történő emeléséhez $1,12$ eV energia szükséges. Ekkor az elektron helyén a kristályrácsban az elektronhiány folytán egy pozitív töltés (lyuk) marad vissza. Megfelelő megvilágítás esetén az elektron-lyuk párok folyamatosan keletkeznek, majd az elektronok lyukakkal re-kombinálódnak. Az elektron-lyuk párok keletkezése a vezetőképesség megnövekedéséhez vezet; a jelenséget a szilárdtest fizikában fotokonduktivitásnak nevezik. Ezen az elven működik a fényelem, amely sok fényérzékelő berendezés (pl. a fotocella) működésének alapja. Az ily módon működő félvezetőket "intrinsic" félvezetőknek nevezzük.

Számottevő elektromos energia nyeréséhez szennyezett (extrinsic) félvezetők szükségesek. A szilícium kristályt kétféleképpen szennyezik.

Az ún. donor-szennyezéskor kis mennyiségben olyan elemet adagolnak a szilíciumhoz, amelynek külső elektronhéján öt elektron van; ilyen pl. az antimon, az arzén és a foszfor. Ilyenkor a negatív töltésű elektronok vannak fölöslegben, ezért az ilyen félvezetőt n-típusú félvezetőnek nevezzük.

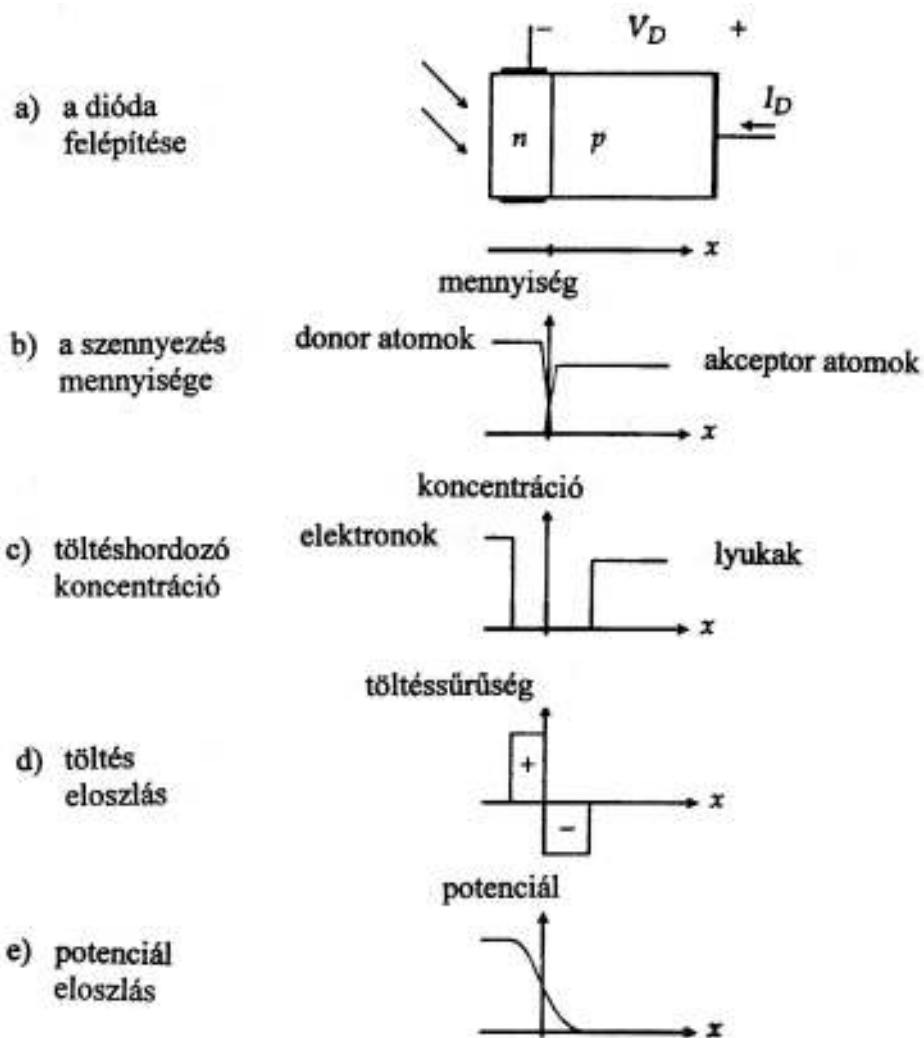
Az akceptor szennyezéskor a szilíciumot olyan elemmel szennyezik, amelynek külső elektronhéján három elektron van; ilyen pl. a bór, az alumínium és az indium. Ilyenkor pozitív töltésű lyukak keletkeznek fölöslegben, ezért az ilyen típusú félvezetőt p-típusú félvezetőnek nevezzük.

A napelem egy n- és egy p-típusú réteg összekapcsolásából létrehozott félvezető dióda, amelynek egyszerűsített vázlata a **2.13a ábrán** látható. A szabad elektronok és a lyukak átdiffundálnak a határrétegen és rekombinálódnak, ezért töltéseloszlásuk a (b) ábra szerint alakul. Az ellentétes töltések hatására a határréteg közelében az n-rétegben lyukak, a p-rétegben elektronok halmozódnak fel, ezek koncentrációját a (c) ábra, a határréteg-közeli töltéseloszlást a (d) ábra mutatja. A fenti töltéseloszlás hatására létrejött egyensúlyi elektromos mező potenciál eloszlását a (d) ábra mutatja. Nyilvánvaló, hogy az n-rétegben az elektronok vannak többségben, ezért ott azokat elsődleges, vagy többségi töltéshordozóknak nevezzük, ugyanítt a lyukak másodlagos, vagy kisebbségi töltéshordozók. A p-rétegben viszont a lyukak a többségi (elsődleges), az elektronok a kisebbségi (másodlagos) töltéshordozók. Ha nincs külső energiaforrás (megvilágítás) akkor a diódában a fenti módon kialakult potenciál különbség nem alkalmas áramforrásként történő alkalmazásra. A létrejött elektromos mezőt ugyanis teljes mértékben kioltja a két anyag közötti kontaktpotenciál különbsége.

Ha azonban a diódát az n-réteg felől megvilágítás éri (és a réteg elég vékony és átlátszó) akkor a fotonok áthatolnak a p-rétegig és ott energiájuknak megfelelő számú elektron-lyukpárt hoznak létre. Az így keletkezett lyukak (többségi töltéshordozók), mivel belőlük ott már egyébként is sok van, alig keltenek áramot, viszont az elektronok (itt kisebbségi töltéshordozók) az elektromos mező hatására átmennek a határrétegen. Így keletkezik az az elektronáram, amely már energiaforrásként működik mindaddig, amíg a megvilágítás tart. A napelemek – a napkollektoroktól eltérő módon – szórt fény esetén is számottevő energia-átalakításra képesek.

A napelem idealizált áramköri modelljét és feszültség-áram karakterisztikáját a **2.14 ábrán** mutatjuk be. A terhelésen átmenő áramra a csomóponti törvény alapján felírható:

$$I_L = I_p - I_D \quad (2.28)$$



2.13 ábra

Napelem vázlata és eloszlás-diagramjai (magyarázat a szövegben)

Továbbá érvényesek a következő egyenletek az áramerősségre és a kimeneti teljesítményre:

$$I_L = \frac{V_D}{R_L} \quad (2.29)$$

$$P = I_L V_D \quad (2.30)$$

A maximálisan kinyerhető teljesítmény a **2.14 ábra** karakterisztikájából láthatóan:

$$P_{\max} = I_{mp} V_{mp} \quad (2.31)$$

ahol I_{mp} és V_{mp} a maximális teljesítményhez tartozó áramerősség és feszültség. A napelemek a Nap sugárzási spektrumának csak egy részét képesek hasznosítani (**2.15 ábra**). Egy elektron-lyuk pár keltéséhez 1,12 eV foton-energia szükséges. Azok a fotonok, amelyeknek energiája kisebb ennél, nem képesek a párkeltésre. A teljes besugárzási energiának így 23 %-a elvész. A túlságosan nagy energiájú fotonok energiájának egy része is kárba vész; a fölös energia hő formájában jelenik meg és melegíti a félvezető eszközt. Ezt a hatást is figyelembe véve a beeső napenergiának már csak 44%-a hasznosulna. További veszteségek miatt azonban (elméletileg bizonyítható), hogy a maximális elérhető hatásfok mindössze 22 % (szilícium félvezető napelemre 19,2 %) a kereskedelmi forgalomban hozzáférhető napelemek esetén azonban a hatásfok csak 12-16 %. A napelem hatásfokát tetszőleges terhelő ellenállás esetén az alábbi összefüggés alapján számíthatjuk:

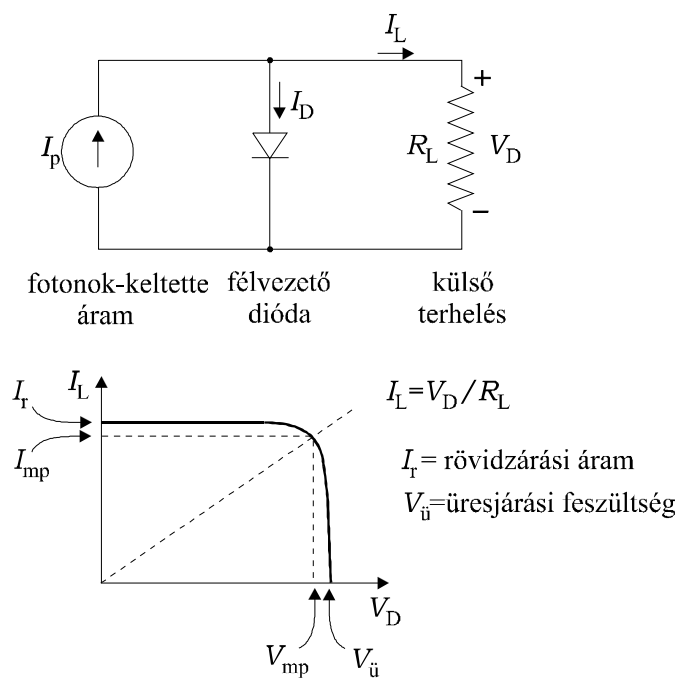
$$\eta = \frac{I_L V_D}{P_{be}} \quad (2.32)$$

ahol a P_{be} a besugárzás teljesítménye a napelem felületére vonatkoztatva.

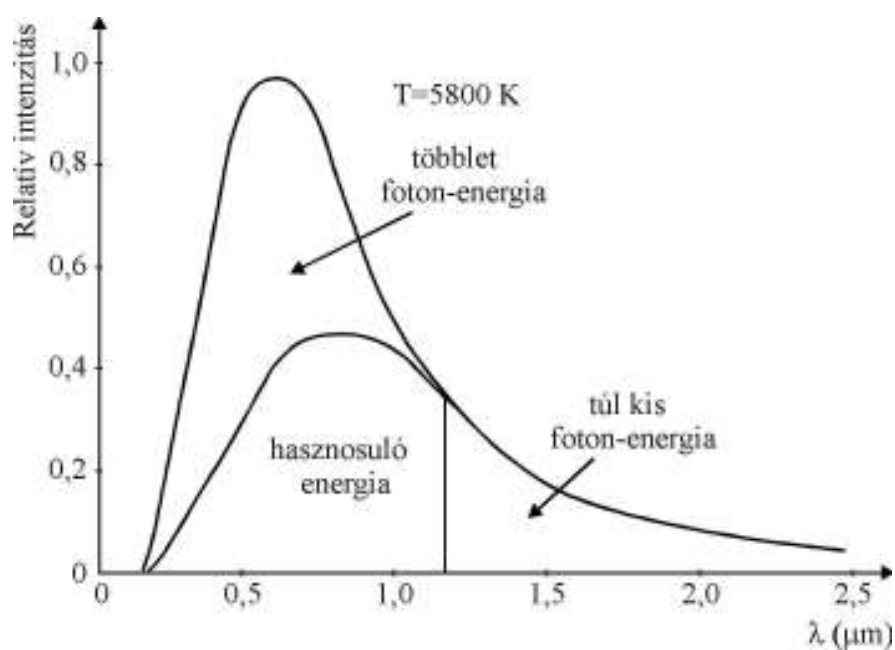
Egyetlen szilícium napelem cella feszültsége maximálisan 1,1-1,2 V és általában 0,1 A árammal terhelhető. A kívánt teljesítmény elérése céljából megfelelő számú napelemet párhuzamosan ill. sorosan kapcsolnak. Soros kapcsolásnál a cellák feszültsége, párhuzamos kapcsolásnál a cellák árama adódik össze.

A napelemek alkalmazása igen széles körű. Nagy mennyiségben alkalmazzák a kisebb napelemes áramköröket mikroelektronikai eszközökben: órákban, kalkulátorokban, kisebb világítási egységekben stb. Alkalmazásuk létfontosságú az űreszközök működtetésében, ahol semmilyen más energiaforrás nem jöhet szóba. Ugyanígy távoli, nehezen megközelíthető területek kutatóállomásai, megfigyelő pontjai stb. energiaellátására is kiterjedten használják a napelemeket. Nagyobb léptékű (erőművi) energia ellátásra nagy költségigénye és viszonylag rossz hatásfoka miatt egyelőre még csak kísérleti jelleggel alkalmazzák. Az alábbiakban közölt adatsor összehasonlítást ad az 1000 MW teljesítmény előállításához szükséges terület nagyságáról hagyományos és alternatív energiaforrások esetén.

A nagyobb egységekbe kapcsolt napelemeknél a maximális teljesítmény kinyerése érdekében minden cellának az optimális munkaponton kell lennie. Ez azt jelenti, hogy a terhelő ellenállás értékének a körülményektől (besugárzás intenzitásától, és a külső hőmérséklettől) függően változnia kell. Ezt nagyobb egységeknél elektronikus szabályozó rendszerrel valósítják meg. Ugyancsak nagyobb, ezért költségesebb rendszereknél automatikus napkövető mechanizmust is alkalmaznak, amely a napelem-egységeket mindig a napsugarakra merőlegesen állítja be.



2.14 ábra
Napelem áramköri modellje és feszültség-áram karakterisztikája



2.15 ábra
Napelem sugárzó energia hasznosítása

A szokásos elektromos energiatermelő egységben a napelem-modul által termelt egyenáramot váltóárammá kell átalakítani, melynek frekvenciája és feszültsége a hálózati áraménak felel meg, mivel általában az összes eszköz ezzel működtethető.

Speciális alkalmazásoknál, ahol hálózati áramellátás nincs, a napenergia áramlásának szakaszos jellege miatt energiatárolásról is gondoskodni kell. A legtöbb ilyen rendszernél akkumulátorokkal oldják meg az energiatárolást. (Egyes esetekben ezt még egy motoros áramfejlesztő egység is kiegészítheti.)

Az 1980-as évek elejétől különböző országokban nagy méretű, kísérleti energiaellátó rendszereket építettek. Ezek közül az egyik legnagyobb a Carissa Plains-ben (USA) 1984-85-ben létesült 5,2 MW teljesítményű napelem-erőmű, amely szilícium egykristály-cellákból épült fel. Ez kéttengelyes napkövető-keretre szerelt egységekből áll. A teljesítmény 1990-ig 3 MW-ra csökkent, amelynek oka valószínűleg a magas üzemi hőmérsékleten fellépő oxidáció volt. 1990-ben a berendezést szétszerelték és elemeit kisebb energiaellátó rendszerekben hasznosították. Számos kisebb teljesítményű napelemes rendszer épült ezen kívül az USA-ban, Németországban, Svájcban, Hollandiában stb. Érdekes kísérleti erőmű épült Floridában 1988-ban 15 kW teljesítménnyel. A fix állású modulokat amorf szilícium-diódás egységekből építették fel. Ezek jóval olcsóbbak a hagyományos kristályos szilícium napelemeknél, de hatásfokuk is jóval kisebb. A rendszer hatásfoka három év alatt 25 %-kal csökkent, így 1991-ben a hatásfok már csak 4 % volt.

A napelemes elektromos energiatermelés egyelőre még jóval drágább, mint a hagyományos. Egy amerikai gazdasági elemzés szerint (1995-ben) a napelemekkel előállított áram ára kilowattóránként 20 c, míg a hőerőművek esetében az egységár 3-4 c/kWh.

A napelemek környezeti hatásaival kapcsolatban megállapítható, hogy azok működésük közben semmilyen szennyező anyagot nem bocsátanak ki. Gyártásuk során keletkeznek ugyan káros anyagok, ezek azonban még nagy léptékű alkalmazás esetén is jóval kisebbek, mint akár a fosszilis tüzelőanyaggal, akár az atomerőművekben történő energiaátalakításkor.

4. Komplex rendszerek

A szoláris építészetben egyre inkább tért hódít az integrált szemlélet, az ún. "teljes épület" megközelítés. Ez azt jelenti, hogy a passzív építészeti elemek mellett aktív épületgépészeti eszközöket is alkalmaznak a napenergia nagyobb mértékű hasznosítására annak érdekében, hogy a hagyományos energiaellátás igényét minimálisra, vagy éppen nullára csökkentsék.

Az ilyen épületekre jellemző az egyes elemek, berendezések többfunkciós használata. Pl.: A sík kollektorok hőnyereségét nemcsak használati melegvíz előállítására, hanem alacsony hőmérsékletű központi fűtéses rendszerben fűtés-rásegítés céljára is hasznosítják; a napkollektorok ugyanakkor az előtető, a tetőfedés és az árnyékoló szerkezet funkcióját is elláthatják.

A következő rövid ismertetésben a komplex napházak három példáját mutatjuk be. Magyarországon Bucsa községben (Karcag közelében) épült az első bioszolár napház, amelynek passzív eleme az épülettömbbe déli oldalról integrált naptér. Az ennek padlószerkezetén abszorbeált napsugárzás részben a padlóburkolatot, részben az alatta lévő üregekben lévő levegőt melegíti fel. A belső helyiségek a naptérhez üvegezett falakkal csatlakoznak. Így alacsony téli napállásnál a napsugárzás közvetlenül az épület magjába jut, ahol a nagy tömegű kémény kedvező hőtárolást biztosít. A kiegészítő fűtés: jól szabályozható, gáztüzelésű légfűtés. Az alkalmazott passzív eszközökkel a hagyományos fűtési költségek 40-60%-a megtakarítható.

A közelmúltban Berlinben épült egy nulla fűtési energiaigényű családi ház. A hőveszteséget a falak és a födémek rendkívül jó hőszigetelő anyagból történt kiképzésével

minimálisra szorították le. A napenergia hasznosítás passzív eszközei: a nagyméretű, délre tájolt üvegezés, az északi homlokzat kis felülete és kis üvegezési hányada, valamint a központi hőtároló tömeg beépítése a lépcsőház terében. Aktív elemek: 52 m² napkollektor felület a déli tetősíkba integrálva, a melegvíz ellátás és az alacsony hőmérsékletű fűtés céljára, a rövid idejű használati melegvíz ellátás céljára egy 350 l-es, a szezonális hőtárolás céljára egy 20m³-es hőszigetelt, forró vizes hőtároló, 30 cm vastag hőszigeteléssel, valamint a friss levegő téli előmelegítése a távozó levegővel, hőcserélőn keresztül. Nyáron a kollektor a szomszédos két lakóépület használati melegvíz igényét is fedezi.

Végül a jelenlegi csúcsteljesítmények közé sorolható a freiburgi autonóm (energia-önellátó) ház. Az alkalmazott passzív elemek: a déli homlokzat transzparens hőszigetelése, gáztöltésű ablakok kis hőemissziós tényezőjű bevonattal, az északi homlokzat és az alapozás különleges hőszigetelése. Aktív elemek: 14m² transzparens hőszigetelésű kollektor, 30 m² felületű PV-mező, amely vízbontó berendezést is működtet. Az elektromos energia egy részét 48 db akkumulátorban tárolják, másik részét vízbontásra használják. Az így nyert hidrogént a háztartásban főzési-sütési célra használják fel.

5. Nap-hőerőművek

Az óceánok vízfelülete úgy is felfogható, mint egy hatalmas napkollektor: a naponta általa adszorbeált napenergia 250 milliárd hordó olajjal egyenértékű. Az *óceáni hőerőművek* működése azon alapszik, hogy az elnyelt hő hatására a víz felső rétegei felmelegszenek, hőmérsékletük 20-25 °C-kal is lehet melegebb az alsó rétegeknél. Az energetikai alkalmazásoknál ezt a hőmérséklet különbséget hasznosítják. A berendezés vázlatát a **2.16 ábra** mutatja. A felső melegebb zónában az alacsony forráspontú üzemi folyadék felforr, gőze meghajtja a turbinát, majd kondenzálódik és lecsurog az alsó folyadéktartályba (Rankine-ciklus).

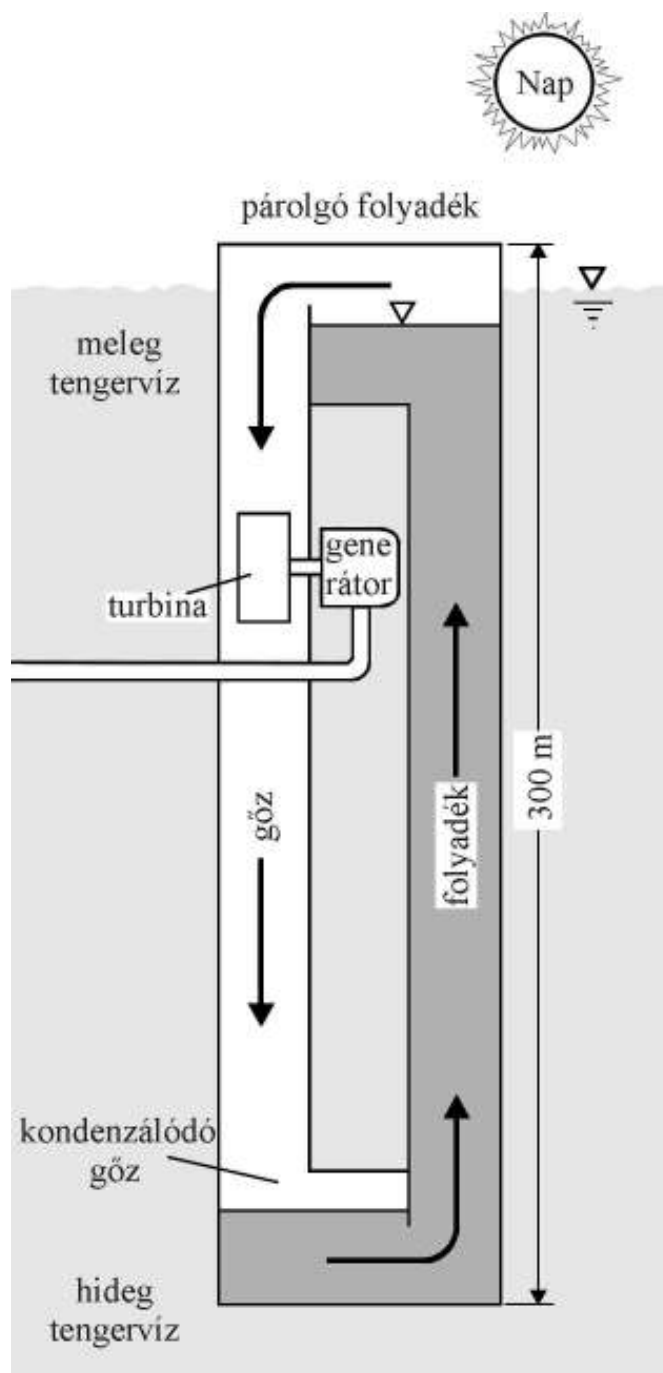
A napenergia koncentrációján alapuló (koncentrátoros) erőművek jellemzője, hogy a sugárzás felfogására és összegyűjtésére optikai szerkezetet: lencsét, vagy tükröt alkalmaznak. Az ilyen kollektorok általában magasabb (több száz, vagy több ezer fok) hőmérséklet elérésére képesek, ezért ipari (erőművi) léptékű energia szolgáltatásra is alkalmasak. Az elérhető maximális hőmérséklet megvalósítása érdekében kompromisszumot kell találni az optikai és termodinamikai szempontok között. Az abszorbert a lehetőség szerinti legkisebb méretűre kell választani, hogy csökkenjen a hőveszteség. Ugyanakkor az abszorbernek elég nagyra kell lennie ahhoz, hogy befogadjon minden, vagy majdnem minden beeső sugárzást.

A koncentráló kollektorok fontos jellemzője az ún. koncentráció-fok. Ezt a következőképpen definiálják:

$$C = \frac{A}{A_a} \quad (2.33)$$

ahol A = a fogadó felület nagysága, A_a = az abszorber felület nagysága.

A napkövetővel ellátott koncentráló kollektoroknál igen jelentős koncentráció-fokot lehet elérni, pl. fókuszpontos rendszereknél C = 40 000, fókuszvonalas rendszereknél C = 200 értékeket. A gyakorlatban megvalósított rendszereknél a koncentráció fokát jó néhány körülmény csökkentheti, ilyenek pl. a tükrök és a lencsék optikai hibái, követési hibák, a fényvisszaverő anyag minőségromlása, a tükrökre, lencsére érkező por és más szennyezések. Az alacsony koncentrációjú kollektoroknak előnyös tulajdonsága, hogy a diffúz sugárzás jelentős részét is hasznosítják.



2.16 ábra
Óceáni nap-hőerőmű működési vázlata

Az energia koncentráló hőerőműveknek három típusa alakult ki, ezek működését elsősorban az Egyesült Államokban 1972-ben indult nagyszabású fejlesztési program során vizsgálták. A három alaptípus a következő:

- parabolatányéros naperőművek,
- vonalfókuszos (Luz-rendszerű) naperőművek,
- toronykazános (heliosztátos) naperőművek.

Az alábbiakban ezeket az alaptípusokat röviden ismertetjük a **2.17 ábra** működési vázlatai alapján.

A parabolatányéros naperőművek (**2.17a ábra**) egyetlen nagy forgási paraboloid alakú reflektorból és annak fókuszába rögzített abszorber-elemből állnak. Az abszorber összegyűjtött hőjét egy Stirling-motor alakítja át mechanikai energiává, majd egy generátor elektromos energiává. (A Stirling-motor tulajdonképpen egy dugattyús gázmotor, amelyben a hőközlés és a hőelvonás a hengerekhez csatlakozó hőcserélőkben történik.)

Jellemző adatok: tükröfelület 50-100 m², az abszorber üzemi hőmérséklete 700-1000 °C, a hatásfok 30% körüli, egy egység teljesítménye: 5-25 kW. A parabolatányéros egységek egymástól függetlenül, de együttműködve is üzemelhetnek, pl. országos hálózatba történő tápláláskor.

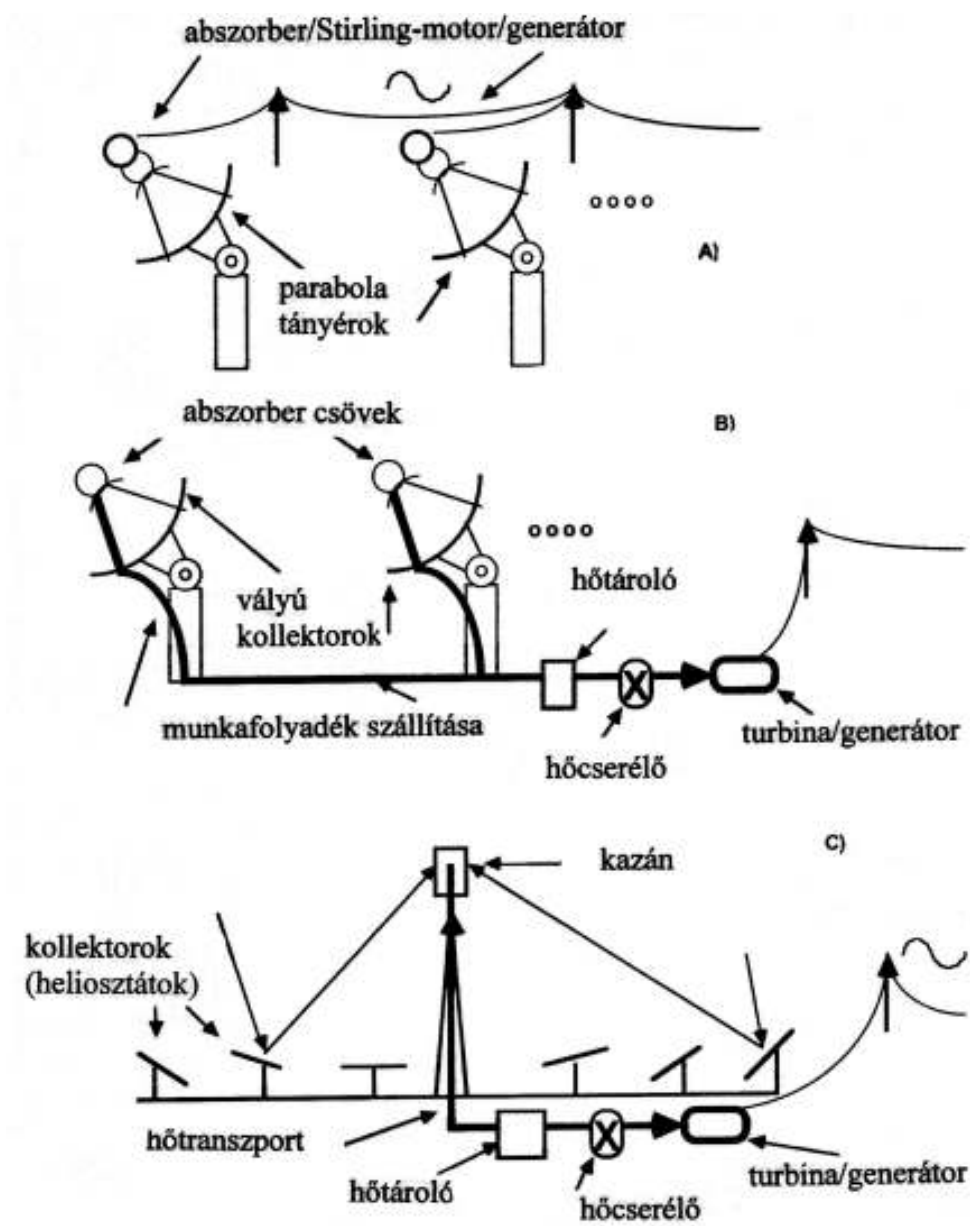
Az energiakonzentráció másik lehetséges módja: hosszú, parabola keresztmetszetű, itatóvályúra emlékeztető koncentráló tükröket alakítanak ki, a munkafolyadékot a fókuszvonalban elhelyezett kollektor-csőben áramoltatják. Ezen alapszik a vonalfókuszos naperőművek működése (**2.17b ábra**). A Luz International (nemzetközi energiaipari társulás) 1984 és 1990 között 8 elektromos energia- szolgáltató erőművet épített Kaliforniában a fenti elv alapján, ezek összteljesítménye 355 MW. A vonalfókuszos rendszernek számos előnye van a másik két rendszerrel szemben:

- a parabola keresztmetszetű vályúkat csak egyetlen (vízszintes) tengely körül kell forgatni,
- alkalmazási köre igen széles: háztartási melegvíz, fűtővíz, meleg levegő előállítás (pl. szárító-, aszaló berendezésekhez), túlhevített gőz előállításával pedig elektromos energia átalakító erőművi berendezések üzemeltetése, szerkezetéből adódóan kiválóan alkalmas moduláris megosztásra azaz független, kisebb egységek létesítésére.

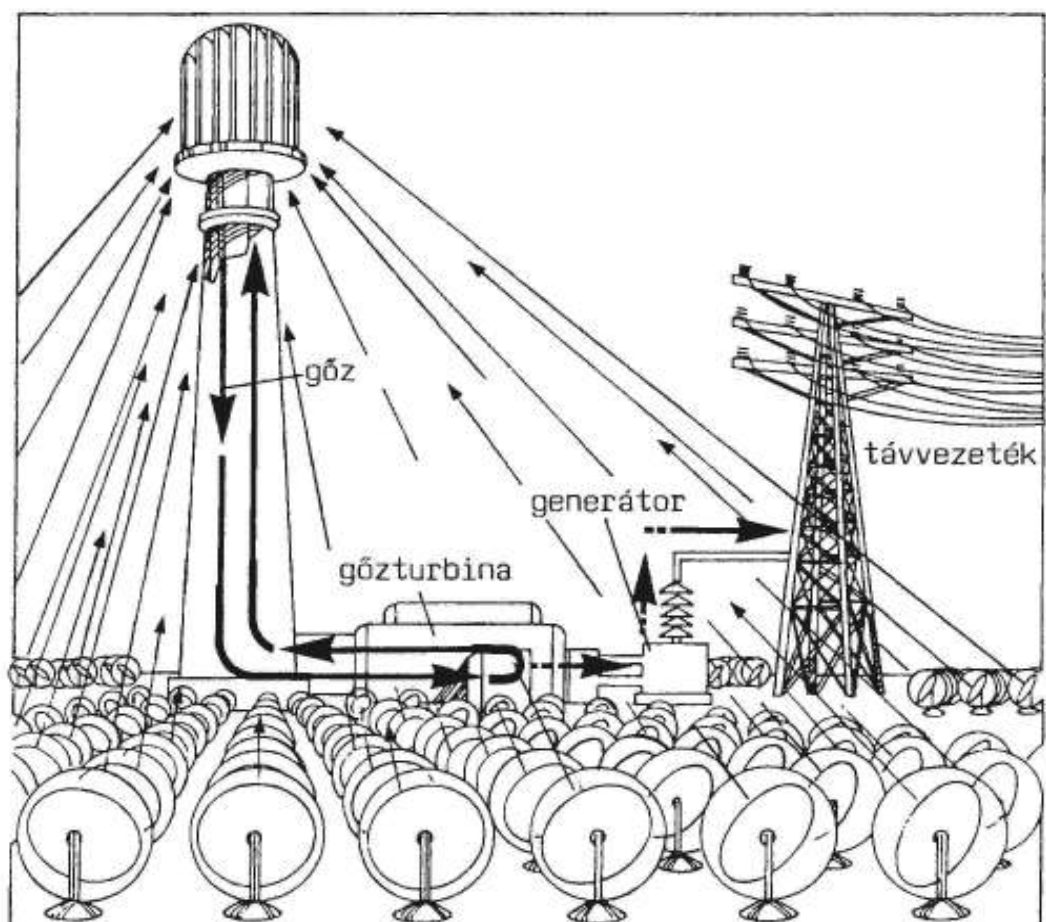
A vályúkat É-D-i vagy K-Ny-i irányba lehet tájolni. Az É-D-i tájolás valamivel nagyobb energia-kihozattal eredményez, de a K-Ny-i tájolással jóval kisebb évszakos ingadozás érhető el. A kollektor-csövet galvanizált króm-, vagy nikkellal bevonattal látják el. Ezt koncentrikus üvegcső veszi körül a sugárzási és a konvekciós veszteség csökkentése céljából (üvegházhatás). A munkaközeg sokféle lehet: erőművi üzemelés esetén szintetikus termolajat, vagy olvasztott sókat használnak.

A toronykazános (heliosztátos) naperőművek (**2.17c ábra**) üzemi területén nagy számú, egyedileg működtetett parabolatükröt (heliosztátot) helyeznek el. Ezek a beérkező párhuzamos napsugarakat egy magas torony tetején álló kazánra fókuszálják (**2.18 ábra**). A toronykazános erőművek első, sikeresen működő prototípusa a Solar One, amely Kaliforniában készült. A kazán egy 76 m magas torony tetején áll, erre fókuszálja a napsugarakat 1818 külön mozgatható, egyenként 40 m²-es tükrök (heliosztát). A tükröket egy automatikus vezérlő rendszer mindig a nap irányába állítja.

Az erőmű elektromos teljesítménye 10MW (termikus teljesítménye 35MW). Munkaközége 510 °C-os túlhevített vízgőz, amelyet egy több fokozatú gőzturbinába vezetnek. A folyamatos üzemelés biztosítására a rendszerhez egy olajos-kőolajvezeték hőtároló is csatlakozik. A sikeres üzemelés nyomán jóval nagyobb teljesítményű (~100MW) hasonló típusú erőművek építését határozták el.



2.17 ábra
A naperőművek alaptípusainak vázlata



2.18 ábra
Toronykazános (heliosztatós) naperőmű rajza

A szélenergia

A legősibb természeti erőforrás, a szélenergia az utóbbi évtizedekben reneszánszát éli. A múlt század második felében a gőzmalmok szorították ki a nálunk is kiterjedten használt szélmalomokat. Nyugat-Európában is ugyanez történt, ahol pedig a szélmalomok - különösen a tengerparti területeken - igen jó hatásfokkal működtek. (Hollandiában főleg a belvizek szivattyúzására használták őket, már a középkorban.)

Jelenleg a szélenergiát elsősorban elektromos áram előállítására használják. A korszerű, háromlapátos szélgenerátorok korábbi változatai csak nagy szélességeknél voltak hatékonyak, hatásfokuk maximuma 5 és 12 m/s között volt, ennél kisebb és nagyobb sebességeknél rohamosan csökkent. Újabban kisebb szélességekkel is hatékonyan üzemelő modelleket fejlesztettek ki.

A korszerű szélturbinák teljesítménye ma már igen tekintélyes, teljesítményük a 10kW...3MW tartományba esik.

Az időegység alatt A felületű légcsavarra érkező levegő térfogata:

$$\frac{V}{t} = Av \quad (2.34)$$

ahol v a szélesség. A lapátnak átadott kinetikus energia:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Vv^2$$

ahol ρ a levegő sűrűsége; a teljesítmény a 2.22 egyenlet felhasználásával:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2.35)$$

A hatásfok lehetséges maximuma: $\eta_{\max} = 59\%$, általában 30%-os hatásfokkal számolnak. (Itt ismét érvényesek a napelem hatásfokával kapcsolatban elmondottak; az energia itt is 'ingyen' van. A szélérőművek versenyképessége viszont a magas beruházási költségek miatt egyelőre kérdéses.)

A szélenergia hasznosításában a legjobb eredményeket Németország és Dánia érte el. Németországban 2000-ben több, mint 8000 szélgenerátor üzemelt.

Magyarországon a szélességek átlagértéke 3 m/s körül van, a sebesség ingadozása nagy, sok a szélcsendes időszak. A szélenergiát korábban csak kisebb szélkerekekkel hasznosították, főleg olyan helyeken, ahol nem szükséges a folyamatos üzemelés, pl. kisebb öntözőberendezések, szennyvíztisztítók, itató berendezések üzemeltetése.

Az utóbbi időben hazánkban két szélérőmű épült, az egyik Inotán (250kW), a másik Kulcs községben, Dunaújváros közelében (600kW). A nálunk felépített erőműtípusok rotorja 2,5-3 m/s szélességnél automatikusan indul és 25 m/s-nál leáll. A berendezés automatikusan követi a szélirányt és a lapátok szöge is állítható. A működés teljes egészében automatizált, nem igényel közvetlen felügyeletet

A vízenergia

A vízerőművek a folyók esésének energiáját (gravitációs energia) alakítják át elektromos energiává. m tömegű víz h magasságból történő leesésekor a hasznosítható potenciális energia:

$$E = mgh = V\rho gh \quad (2.36)$$

ahol ρ a víz tömegsűrűsége. A turbinában ez a potenciális energia alakul át forgási energiává, majd a generátorokon elektromos energiává. A teljesítmény:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{V}{t} \rho gh = Q\rho gh \quad (2.37)$$

ahol a $Q = V/t$ mennyiséget a vízfolyás vízhozamának nevezik, mértékegysége m^3/s . Értéke természetes vízfolyásoknál erősen ingadozik, éppen az ingadozások csillapítása céljából építenek nagy befogadóképességű tározókat.

Jelenleg a világ hasznosítható vízenergia készletének kb. 20%-át már kihasználják. Az USA-ban a potenciális készlet 40%-án már kiépültek az erőművek; ezek összteljesítménye a teljes energiaigény alig 6%-át elégíti ki.

A vízerőművek elvileg "tisztá" energiaforrások, közvetlen környezeti szennyezésük nincs. A tározók építésével azonban jelentős környezeti-ökológiai problémák merülhetnek fel. (Ezekkel részletesebben az 1 fejezetben foglalkoztunk.)

Példa: Egy lakóház energiaellátása megújuló energiaforrásokból

Lakóházak energiaellátására elsősorban a szél- és a napenergia jöhet szóba. Tételezzük fel, hogy lakóházunk teljesen elektromos energiára lett tervezve és a folyamatosan szükséges teljesítmény $P=2$ kW. Tekintettel a természetes energia-források működésének egyenlőtlenségére, tervezzünk energiaellátó rendszerünkbe egy öt napos energiatárolást; a tárolandó energia:

$$E_t = P \cdot t$$

behelyettesítve a $P = 2 \times 10^3$ W és $t = 5 \times 24 \times 3600$ s értéket:

$$E_t = 8,64 \cdot 10^8 \text{ J}$$

Jelenleg energiatárolásra ilyen kis léptékben egyedül a savas ólomakkumulátorok jöhetnek szóba. Egy akkumulátor által tárolt energia:

$$E_t^I = UI t$$

$U = 12$ V feszültségű és $It = 100$ Ah kapacitású akkumulátorokat feltételezve a szükséges darabszám:

$$N = \frac{E_t}{E_t^I} = 200$$

Szélenergia alkalmazása esetén a szélkerék által szolgáltatott elektromos energia a 2.35 egyenlet alapján, a hatásfok figyelembevételével:

$$P = \frac{\eta}{2} \rho A v^3$$

30%-os hatásfokkal, $v = 8 \text{ m/s}$ szélsősebességgel számolunk; figyelembe véve, hogy a szél a teljes idő 1/3-ában fúj, $P = 6 \text{ kW}$ teljesítményt kell megkívánnunk; végül $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$ levegőssűrűséggel számolva, a fenti egyenletből az egyetlen ismeretlen az A szárnyfelület, amelyre:

$$A = 6 \text{ m}^2$$

érték adódik. Ekkora szélérőmű igen drága, költségei valószínűleg a ház árának nagyságrendjébe esnek.

A másik alternatíva: napelemek használata. A napsugárzás fajlagos értékének, a napállandónak kb. 50%-a érkezik a földfelszínre (ld. 1. fejezet), vagyis kb. $0,7 \text{ kW/m}^2$ a napsugarakra merőleges felületre. Figyelembe véve a reggeli és az esti órákat a felhős időszakokat és az éjszakákat, ennek az értéknek a 20%-ával számolhatunk. 12%-os hatásfokkal számolva, a szükséges 2 kW teljesítmény az alábbi egyenletnek megfelelően áll elő:

$$2 \text{ kW} = 0,2 \cdot 0,12 \cdot 0,7 \text{ kW} / \text{m}^2 \cdot A$$

ahonnan a szükséges felület: $A = 119 \text{ m}^2$.

Ez igen nagy felület; fényelemekkel beborítva a jelenlegi áron szintén a ház építési költségének nagyságrendjébe esik.

Végeredményben tehát bármelyik energiaforrás - kiegészítve az energiatároló akkumulátorokkal - akkora költségtöbbletet jelent, amely a teljes beruházáshoz viszonyítva elviselhetetlenül magas. Vagyis az alternatív energia - a mai körülményeket tekintve - nem versenyképes a hagyományos, hálózati energiaellátással. Ráadásul ez a megoldás magában foglal - távlatilag - egy jókora mennyiségű veszélyes hulladékot: a 200 db akkumulátort. Ezek néhány évenkénti cseréje - a tetemes költség mellett - megújuló környezeti problémát jelent.

Geotermikus energia

A földmag radioaktív hőtermelése a földköpenyben konvektív áramlásokat létesít, ezek révén a termelt hő feláramlik a földkéregbe. A földkéreg alja ezért forró, míg a külső oldala hideg. Az egységnyi ΔM földkéregvastagságra eső hőmérséklet-növekedés az ún. geotermikus gradiens; vagyis:

$$G = \frac{\Delta T}{\Delta M}$$

G értékének világátlagos 30°C/km , de vannak helyek, ahol ez az érték jóval nagyobb; ezek az ún. geotermikus anomáliák helyei. Ezek között is különleges helyet foglalnak el az ún. forró pontok (*hot spots*), ahol a hő közvetlenül megjelenik pl. gejzírek, vagy forró gőz formájában. Ezeken a pontokon - a látványosság turisztikai kihasználása mellett - hőerőművek létesíthetők, ilyenek vannak pl. Új-Zélandon és Izlandon. Az ilyen lehetőségek azonban ritkaságszámba mennek.

Jóval általánosabb a mélyebben fekvő rétegek hőenergiájának hasznosítása. Erre több lehetőség kínálkozik:

- (1) Mélységi víztartó rétegek sokszor nagy termálvízkészleteket tárolnak, ezekből fúrásokon keresztül kiszivattyúzható a meleg víz, amelynek hőenergiája (és gyógyhatása) a felszínen hasznosítható. Fontos szempont, hogy a kitermelés sebessége legfeljebb akkora lehet, mint az utánpótlódásé. Ha ez nem teljesül, gondoskodni kell a megfelelő mennyiségű nyersvíznek a termelés alatt álló rétegbe történő visszatáplálásáról.
- (2) Ha a mélyebb, magas hőmérsékletű zónában tömör alapkőzet van (pl. gránit), akkor gyakran alkalmazzák az ún. *hidraulikai repesztés* módszerét (**2.19 ábra**). Egy függőleges furaton nagy nyomással hideg vizet sajtolnak a forró kőzetbe. Ennek hatására a tömör kőzetben repedések jönnek létre, amelyekben nagy mennyiségű víz tárolódhat. A repedésekben felforrósodott vizet egy másik furaton át a felszínre hozzák. A módszer a tapasztalat szerint 8000 m mélységig gazdaságos lehet.

Magyarország bővelkedik geotermikus energiában; ez a Kárpát-medence geológiai sajátosságainak köszönhető: a földkéreg vastagsága itt jóval kisebb az átlagosnál. Ennek következtében G értéke itt 40-60 °C/km, vagyis csaknem kétszerese a világtátlagnak. Mivel a kérget nagyobb mélységig szemcsés-, ill. repedezett kőzetek alkotják, a mélységi víztartókban nagymennyiségű termálvíz raktározódik (becslések szerint kb. 2500 km³). A hévizek hőmérséklete 30...100 °C. A környezetvédelmi szempontokat figyelembe véve évente 50PJ (1PJ = 10¹⁵J) energia lenne felhasználható, a tényleges felhasználás csak 3,6 PJ. Ennek jelenleg kétféle hasznosítása történik:

- termálfürdők, gyógyászati intézmények;
- mezőgazdasági épületek, melegházak fűtése.

A legnagyobb probléma az, hogy jelenleg a kitermelt forró víz felszíni utánpótlásáról nem gondoskodnak, vagyis helyenként vízbányászat (nyersebben kifejezve: rablógazdálkodás) folyik. (A termálvíz-készlet felelőtlen kezelésére nézve itt csak utalunk a Hévízi-tóval kapcsolatos korábbi gondokra.) A hasznosítások másik problémája: a termálvizek magas hőmérsékletük és oldott sótartalmuk következtében kémiaiag agresszívek, ami a csővezetékek és a csatlakozó egyéb berendezések gyors korróziójához vezet.

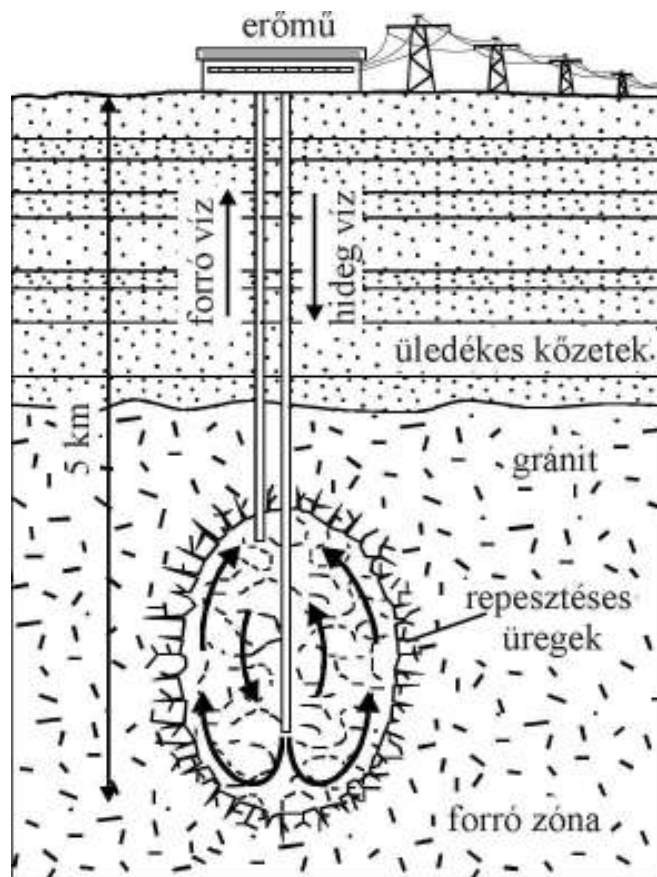
Ésszerű gazdálkodással (amelyben a készletek utánpótlása is szerepet kap) a jelenlegi hasznosítás mellett energiatermelésre is használhatnánk felszín alatti hőkészleteinket.

Bioenergia

Ebbe a kategóriába tartozik sokféle, biológiai folyamatok révén nyert energiahordozó elégetésével nyert energia. Ide sorolhatjuk a legősibb tűzrakások és a fatüzelés útján nyert energiát (sőt tulajdonképpen a fosszilis energia is ide tartozna, de azt - konvencionális okokból - külön csoportba sorolják). A mai értelmezés szerint a bioenergia főbb formáinak az alábbiakat tekintik:

- a cukor, ill. gyümölcsök erjesztésével előállított alkoholokat, elsősorban a metanolt és az etanolt, ezeket Otto-motorok üzemanyagaként hasznosítják);
- a dízelmotorok hajtására alkalmas növényi olajokat (biodízel);
- a faipari hulladék anyagokat (faapríték);
- gyorsan növekvő növényi biomassza éghető anyagát;
- a szeméttelpeken, hulladék-depóniákban keletkezett biogázt.

A metanol és az etanol, mint éghető anyag elsősorban járművek üzemanyagaként jöhet szóba. Egyes dél-amerikai országokban - főleg Braziliában - széles körben elterjedt gépkocsi



2.19 ábra
Geotermikus energia hasznosítása hidraulikus repesztés módszerével

üzemanyag, ott cukornádból állítják elő. Kifejlesztettek vegyes (alkohol- benzin-) üzemű gépjárműveket is.

A *növényi olajok* (napraforgó- és repceolaj) üzemanyagként használhatók a dízelmotorok kisebb átalakítása után.

Az alkohollal és növényi olajjal üzemeltetett autó sokkal inkább környezetbarát, mint a hagyományos. Elterjedését főleg az akadályozza, hogy az alkohol és a növényi olaj a legtöbb országban - egyelőre - drágább, mint a benzin. Másik probléma a termőterület használata. Egy jármű üzemeltetéséhez szükséges üzemanyag megtermeléséhez akkora terület szükséges, amekkorán 10-15 ember éves élelmiszer szükséglete megtermelhető.

A *növényi biomassza* nád, vagy valamilyen gyorsan növő fafajta, pl. fűz. Az utóbbi esetben az erre a célra telepített erdő (az ún. "energiaerdő") 3 évenként kitermelhető, majd újratelephető. A kivágott faanyagot összeaprítják, szárítják, majd kazánokban eltüzelik. Égetésekor bázikus kémhatású anyagok szabadulnak fel, vagyis a savas csapadékhoz nem járul hozzá, sőt azzal ellentétes hatású.

A *biogáz* a szemét-depóniák belsejében végbemenő anaerob rothadás eredményeképp keletkezik. Általában a főleg metánt tartalmazó biogáz hasznosítás nélkül elillan (hozzájárulva az üvegházhatáshoz). Felhasználás céljából porózus falú, függőleges csöveken át gyűjtik össze a biogázt, amelyet többnyire a helyszínen elégetnek. Sok szeméttelep saját energiaellátását fedezi az így nyert energiából. Nagyobb üzemek, ill. régiók energiaellátása szempontjából azonban az így nyerhető energia jelentéktelen.

A megújuló energia Magyarországon

Az Európai Unió (EU) előirányzata szerint a tagországokban a megújuló energiaforrásból nyert villamos energiának 2010-re el kell érnie a 12%-ot. Ez az arány jelenleg 6%, tehát ennek megduplázása a cél.

Magyarország energiafelhasználása 2000-ben 1041PJ volt, ebből 37PJ (3,55%) a megújuló energia. Ennek megoszlása a következő volt:

Tűzifa	71,9%
Növényi és egyéb szilárd hulladék	11,3%
Geotermikus energia	10,8%
Vízenergia	3,0%
Szeméttégetés és biogáz	2,8%
Napenergia	0,2%

(Az adatsor még nem tartalmazza a nemrég üzembe helyezett szél erőműveket.)

Újabb fejlemény, hogy néhány hőerőműben a széntüzelésről átállnak faapríték tüzelésre, valamint az, hogy a közelmúltban (2002-ben) felépült az olajos magvak feldolgozására két biodízel üzem.

A jövő lehetőségeit tekintve a helyzet a következő. A napenergia hasznosítás lehetőségei nálunk igen jók. Az évi besugárzás átlagosan 1265 kWh/m². Egy jól megtervezett napkollektor-rendszerrel szakértők szerint az évi használati melegvíz-igény 60%-a kielégíthető lenne. A valóság képe azonban lehangelő: nálunk jelenleg kb. 45000 m² kollektor felület van, míg a nálunk rosszabb helyzetben lévő Ausztriában 2,4 millió m². A korábban említett két szélgenerátor összes energiaszolgáltatása: 1,5 millió kWh/év.

Az EU elvárása Magyarországra nézve az, hogy 2010-re az évi teljes villamos energia mennyiség 11,5%-át megújuló forrásokból kellene előállítani. Szakértők szerint azonban lemaradásunk olyan nagy, hogy a reálisan megvalósítható érték csak 3-5%.

Jövőképek az energiagazdálkodásról

Egyes vélemények szerint a következő néhány évtizedben, sőt az egész 21. században az emberiség meghatározó energiaforrását a fosszilis tüzelőanyagok jelentik majd. Mások igen nagy szerepet szánnak az atomenergiának a jövő energiagazdálkodásában. Megint mások merész víziójában a napenergia ragyogja be az emberiség közeli és távoli jövőjét. Kendall és Nadis nagy visszhangot kiváltott könyvében ("Energy Strategies: Toward a Solar Future." 1980) egy 100%-ban megújuló energia felhasználásán alapuló társadalom jövőképét rajzolja meg. Elképzelésük szerint az összes ipari folyamatok és lakossági igények kielégíthetők aktív napenergia-hasznosítással (egyes ipari üzemekben biomassa elégetéssel). A közlekedés-szállítás jövőjét ők elsősorban a vasúti és a tömegközlekedésben látják: a vasút aktív napenergia-hasznosítás útján termelt árammal, az országúti közlekedés pedig részben napelemes, részben alkohollal üzemelő járművekkel történne.

A higgadtabb mérlegelés, a tények és a trendek objektív számításba vétele olyan jövőképet sugall, amelyben az emberiség energetikai jövője összetett, nehezen áttekinthető folyamat, komplexitásánál fogva sok bizonytalanságot hordoz, miközben vannak olyan kényszerfeltételek, amelyek a lehetőségek számát erősen leszűkítik.

Nemzetközi szakértői testületek becslése szerint az energiaigény várható növekedése a következő 100 év folyamán 1,7...2,8%/év közé esik majd. Ez más szóval azt jelenti, hogy 2100-ig az energiaigény a 2000. évinek 5...15-szöröse lesz. (Az emelkedés legvalószínűbb értéke 10-szeres.) Felmerül a kérdés: vajon kielégíthető-e majd ez az energia-igény? Fosszilis tüzelőanyagokkal biztosan nem!

A fosszilis tüzelőanyag készleteknek jelenleg 3 kategóriáját különböztetik meg:

- ismert (műrevaló) készletek – ezek a 21. sz. szükségleteinek mintegy 25%-át fedeznék;
- feltételezett készletek – az ismert készleteknek kb. 3-szorosa;
- nem konvencionális készletek – az ismert készletek 2-szerese (ilyen pl. az olajpala, a nehezen hozzáférhető szénkészletek, stb.).

Az ismert készletek tehát a várható igényeknek csak töredékét lennének képesek kielégíteni. A feltételezett készletek megléte, kitermelhetősége bizonytalan. A nem konvencionális készletek kitermelésére pedig valószínűleg nem kerül sor, mivel azok csak igen gazdaságtalanul hasznosíthatók. A velük kapcsolatos problémát jól megvilágítja a jelenlegi olajforrások kitermelési költségeinek aránya.

<u>Olajforrás</u>	<u>Relatív önköltség</u>
Perzsa-öböl	1
Nigéria	3
Venezuela	6
USA	9
Alaszka, Északi-tenger	12
Olajpala	24

A készletek elégtelen voltának nyilvánvaló ténye mellett emlékeztetnünk kell az üvegházhatással kapcsolatban korábban elmondottakra, valamint a globális klíma-modellekre; az összes fosszilis tüzelőanyag elégetése elviselhetetlen mértékben felerősítheti az üvegházhatást és a globális felmelegedést!

A megújuló energiaforrások teljesítménysűrűsége (az egységnyi területen hasznosítható energia) kicsi. Emiatt az energiát nagy méretű, anyagigényes berendezésekkel kell összegyűjteni, ráadásul ezek előállítása – mivel csak hagyományos technológiával lehetséges – jelentős környezetszennyezéssel jár. A legtöbb jelenlegi hasznosítási mód hatásfoka – mint láttuk – igen alacsony. Ráadásul az időszakos működés miatt energiátárolókról, vagy jelentős

háttér-kapacitásról kell gondoskodni. (Itt utalunk a lakóház energiaellátásával kapcsolatban korábban tárgyalt példára!) Igaz, a megújuló energiaforrások versenyképessége várhatóan javul majd a műszaki fejlesztés és a fosszilis tüzelőanyagok drágulása következtében.

Mértékadó szakértői körök véleménye szerint az energiaforrásokban mutatkozó hiány pótlására hosszú távon – jelenlegi ismereteink szerint – csak az **atomenergia** jöhet számításba. Az előzetes számítások szerint a fosszilis-, a megújuló- és az atomenergia a 21. sz. energiaigényéhez viszonyítva az alábbi készleteket biztosítja:

Energiaigény:	1
Fosszilis tüzelőanyagok	1,5
Megújulók	0,7
Atomenergia	22

A fosszilis energiahordozókhoz beszámították a feltételezett készleteket és a nem konvencionális készlet egy részét is. Az atomenergiánál a 235-ös uránizotóp kis koncentrációja miatt a jelenlegi technika nem jelent perspektivikus megoldást; a rendelkezésre álló uránérc-készlet energiaértéke alig éri el a kőolajé 1/3-át. A kiutat a már ismertetett tenyésztő (gyors) reaktorok jelentik, amelyek óriási energiatartalékot rejtjenek. (A fenti becslésnél csak a hasadó energiát vették figyelembe, a fúzió egyelőre nagyon távolinak tűnő lehetőségét nem.)

Az atomenergia jövőbeli felfutásának azonban jelenleg technikai és társadalmi korlátjai vannak; ezekről már szó volt az atomenergiával kapcsolatos fejezetben. Az utóbbi évek fejleményei alapján az elemzők az atomenergia széleskörű alkalmazását két fontos feltétel teljesülésétől teszik függővé:

- a gazdasági versenyképesség;
- a társadalmi elfogadtatás.

Jelenleg az atomerőművekben és más típusú erőművekben termelt villamos energia átlagos önköltsége között nincs alapvető különbség. Lényeges különbség van azonban a fajlagos beruházási költségekben, amelyet a szén-erőműre vonatkoztatva az alábbi adatsor szemléltet:

<u>Erőműtípus</u>	<u>Fajlagos beruházás</u>
Szén-erőmű	1
Gázturbinás erőmű	0,6
Atomerőmű	1,5

A létesítési költségek csökkentésére az alábbi lehetőségeket tartják megvalósíthatónak:

- tipizálás (szabványosítás);
- az építéstechnika korszerűsítése;
- a számítógépes vezérléstechnika kiterjesztése;
- élettartam-növelés felújítással (ez történik jelenleg Pakson).

A társadalmi elfogadtatás az előzőnél nehezebb, összetett probléma. Az atomenergia-ellenesség legfőképp a korábban már említett csernobili reaktor-balesetre vezethető vissza. Az ottani baleset a tudatlanság által kikényszerített hibás intézkedések (a biztonsági rendszerek szándékos kikapcsolása, felsőbb utasításra) következménye volt. Ez racionális üzemeltetés mellett gyakorlatilag kizárható. A világon jelenleg működő 430 atomerőművi blokk esetén a személyzet és a környék lakosságának egészségi kockázata a legkritikább természeti katasztrófák kockázatával mérhető össze. Ennek ellenére az atomerőmű építő cégek

napirendre tűzték az ún. *inherens* (a konstrukció jellegéből adódó) *biztonságú erőművek* tervezését. Erre több alternatív megoldás létezik, pl az erőmű nukleáris részének föld alá építése, a reaktor neutron-fluxusának külső vezérlése részecskegyorsítóval, stb. Dél-Afrikában jelenleg építenek egy ilyen erőművet.

Az aggodalom másik forrása a radioaktív hulladék elhelyezésével kapcsolatos kockázat. A kis- és közepes aktivitású (30 évnél rövidebb felezési idejű) hulladék elhelyezése szakmailag megoldottnak tekinthető világszerte. A nagy aktivitású hulladék elhelyezésére a korábban már ismertetett módszereket (stabil geológiai formációkban történő elhelyezés) tartják megfelelőnek. Az ilyen formációk biztonságát maga a természet is igazolta, mivel néhány helyen (pl. a közép-afrikai Gabonban) egymilliárd évvel ezelőtt lezajlott spontán maghasadásos láncreakció termékeit a transzportfolyamatok nem hordták szét. Politikai okokból ilyen tárolók még sehol sem épültek, ehelyett a fűtőelemeket 50-100 éves időszakra ún. ideiglenes tárolókba helyezik. Egy másik, ígéretes alternatíva a korábban már ismertetett transzmutáció.

Az atomfegyverek elterjedésének kockázata az aggodalom harmadik forrása. A hasadási erőművekben keletkezett plutónium közvetlenül alkalmas fegyvergyártásra, kinyeréséhez azonban bonyolult, veszélyes és költséges technológiákra van szükség. Jelenleg (2003-ban) ennél sokkal egyszerűbben lehet más (illegális) utakon hasadó anyaghoz jutni. A megoldás a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) egyik jelentésében olvasható, amely szerint: "...Az atomfegyverek elterjedését nem az erőművek betiltásával, hanem politikai megállapodásokkal és azok betartásának érdemi ellenőrzésével lehet megakadályozni."

A fenti elemzésből nyilvánvaló, hogy az atomenergia alkalmazásával kapcsolatban mind a biztonság, mind a gazdaságosság tekintetében bőven van még tennivaló. A fentebbi táblázat alapján azonban úgy tűnik, hogy a 21. sz. növekvő igényeit egyedül az atomenergia lenne képes kielégíteni. A problémát kissé sarkítva, de találóan jellemzi P. Hodgson (Fizikai Szemle 1999/6):

"...Ahhoz, hogy 2040-ig stabilizáljuk a szén-dioxid kibocsátást, 2000 fosszilis tüzelőanyaggal működő erőművet kellene kiváltani 40 év alatt. Ez annyit jelent, hogy hetente kellene egy új erőművet építeni. A kérdés ez: találhatunk-e minden héten 500 km² területet, hogy oda 4000 szélgenerátort telepítsünk, vagy befedhetünk-e 10 km²-nyi sivatagot napelemekkel, amelyeket azután állandóan tisztán kell tartanunk? Ugyanez a kérdés feltehető az atomerőművekkel kapcsolatban is. A válasz: az 1980-as években az építési arány 23 erőmű/év volt, de volt olyan év (1983), amikor 43 atomreaktort építettek...Ez egy jól bevált és megbízható energiaforrás, míg a többi alternatíva nagyrészt csak vágyálom."

A jövőt nem ismerhetjük. Az azonban bizonyosnak látszik, hogy a globális környezeti problémákat és a rohamosan növekvő energiaigényeket figyelembe véve az emberiségnek a 21. században új energiaforrásokra kell áttérni. Az áttérés várható gondjait illetően idézzük az USA Tudományos Akadémiájának beszámolóját:

"Fontos annak hangsúlyozása, hogy az energiaprobléma nem az energiaforrások fizikai értelemben vett hiányából adódik. Az új energiaforrások alkalmazásának több reális alternatívája létezik, ezek – potenciálisan – hozzáférhetők a világ valamennyi országa számára. A probléma sokkal inkább az, hogy biztosítani tudjuk-e a társadalmilag elviselhető, zökkenőmentes átmenetet a fokozatosan kimerülő olaj- és gázkészletek felől az új technológiák irányába, amelyek lehetőségeit, gazdasági vonatkozásait ma még becsülni sem tudjuk. Az átmenet időtartama - a tervezés és a fejlesztés időszaka - legalább fél évszázadra becsülhető. Alapvető kérdés: vajon lesz-e elég kitartásunk, bölcsességünk és szerencsénk ahhoz, hogy ez az elkerülhetetlen átmenet rendben, zökkenőmentesen megtörténjen."