

Klíímaváltozás múltja, jelene és jövője

Öllős Géza* – Oláh József** – Palkó György**

* - professzor emeritus, ** - Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.

1. A klímaváltozás múltja

A Föld keletkezése 4 – 4,5 milliárd évre tehető. Klímája periodikusan változott, a meleget hideg követte, majd a hideget meleg követte (*Hardy*, 2004): 20 000 évvel ez előtt Észak-Amerikát nagy kiterjedésű jégablak fedték és 8000 évvel ez előtt az Észak-Afrikai Szaharán számos mocsaras terület, tavak léteztek.

A földi klímaváltozás hat fontosabb idő periódusra osztható (*Kutzbach*, 1989):

Első periódus, egy nagyobb lehülési trend jelentkezett több mint egy milliárd évvel ez előtt a fotoszintézist végző organizmusok megjelenésekor. A fotoszintézissel a növények a CO₂ eltávolították az atmoszférából és szerves szénként tározódott. Ez a folyamat csökkentette az atmoszféra hő befogó kapacitását és így nagyobb lehülés jött létre.

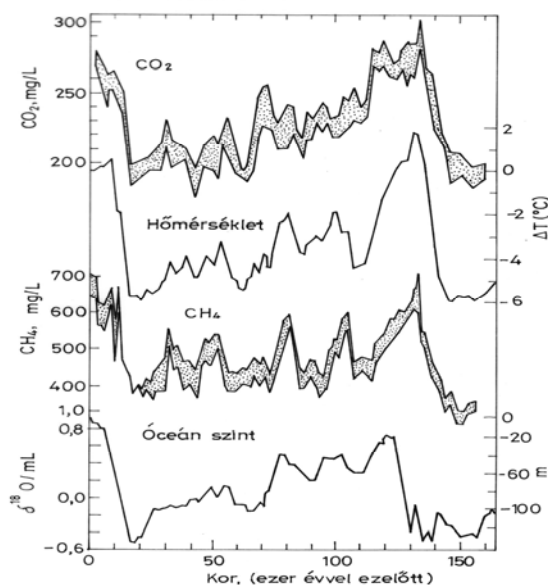
Második periódus, több százmillió évvel ez előtt a Föld intenzív tektonikai aktivitása következett be, föld-kéregbeli mozgások, kontinentális vándorlások és vulkáni kitörések jelentkeztek. Masszív CO₂ kitörések jöttek létre a Föld kéregből, így fokozott üvegházhatás jelentkezett, a mostaninál 5 °C- kal magasabb hőmérséklettel.

A harmadik periódus, kb. 100 millió évvel ez előtt a tektonikus aktivitás lecsillapodott. A CO₂ kitörések a földkéregből csökkentek, az atmoszférára ható üvegházhatás csökkent és a klíma újra lehült.

Negyedik periódus, az utóbbi évmilliók alatt változó hideg és meleg periódusok fordultak elő tízezer évenként. A Föld elliptikus pályája a Nap körül (excentrikusság) közelebb vagy távolabb viszi a Földet a Naptól 100 000 évenként.

Az ötödik periódust kisebb terjedelmű periódusok alkotják (1000 év vagy ennél is rövidebb periódusok). Például 1100 évvel ezelőtt szőlőt termeltek Dél-Angliában és a vikingek jégmentes tengeren át jutottak át Észak-Amerikába. A 200 – 600 évi periódusban a „kis jégkorszakban” gyakran zord telek uralkodtak a mérsékelt régiókban a Földön.

A sarki jégmagok betekintést nyújtottak az utóbbi 150 000 év klímájába. Az orosz kutatók 1982-ben 2083 m mélységű jégmagot emeltek ki az Antarktison. Kimutatták a CO₂ és a metán koncentrációt a levegőbuborékokban (*1. ábra*).



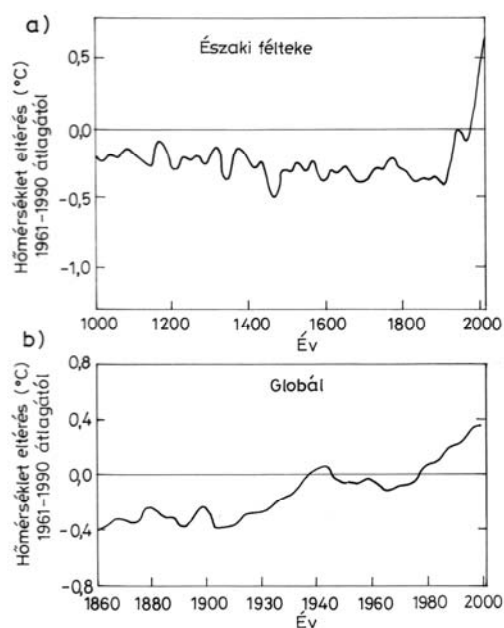
1. ábra. A Vostok jégmag adatok, melyek az utóbbi 150 000 évben az atmoszférikus CO₂, hőmérséklet, CH₄ és óceán szint változását mutatják

Hatodik periódusban, az utóbbi 150 évben, a Föld globális átlagos hőmérséklete kb. 0,8 °C-kal növekedett.

A 14 000 évvel ezelőtt a felmelegedés hirtelen leállt, majd ezt követően 1500 éven belül a klíma lehűlt 6 °C-al és a gleccserek visszatértek, de 11 650 évvel ez előtt a Földön azonban példa nélkül álló gyors felmelegedés jelentkezett. A Föld klímájának változását az évmilliók alatt, a természetes lehűlést és felmelegedést a szoláris energia Föld felszínre jutásának periodikus fluktuációja okozta.

2. Jelenlegi klímaváltozás

A gleccserek az európai Alpokban gyorsan olvadnak és térfogatuknak több mint felét elveszítették 1850 óta. Az utóbbi 150 év alatt az egyik legmelegebb év 1990-ben volt. Az utolsó dekád a húszadik században volt a legmelegebb (2. ábra). Az utóbbi 150 év alatt, a globális átlagos évi hőmérséklet a Föld alsó atmoszférájában, a troposzférában, $0,6 \pm 0,2$ °C-kal melegebbé vált (2. ábra).



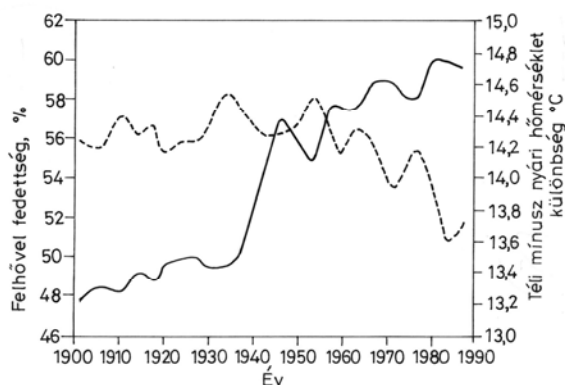
2. ábra. A földi hőmérséklet változása: a). ábra az utóbbi 1000 év alatt; b). ábra az utóbbi 140 év alatt

A felmelegedés a jelenlegi dekádokban általában nagyobb mértékű a magasabb szélességi fokokon és egyes középső kontinentális régiókban. Európában a hőmérséklet-változások 1946-1999 között jelentősek, amelyekben az emberi hatások is benne foglaltatnak. Még az alsó atmoszféra (a troposzféra) melegszik, a felső atmoszféra (a sztratoszféra) lehül.

Az óceán hőmérséklet is nő. Az óceán felszíni hőmérséklete 1976 – 2000 között 0,14 °C-kal emelkedett dekádonként. Az óceán hőmérséklete 1100 m mélységben 1 °C-kal emelkedett egy évszázad alatt.

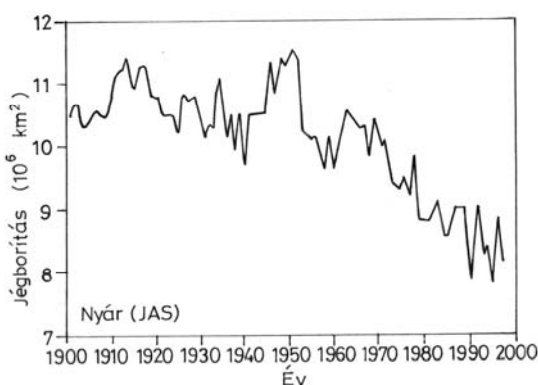
A hőmérséklet és az óceán párolgás növekedései a felhőzet szaporodását idézték elő, legalább is a mérséklet régiókban. A felhőborítás megnőtt ez melegebb telekkel és hidegebb nyárral jár együtt (3. ábra).

A borús felhős állapotok miatt a Föld felszíne kevesebb hőt veszít el éjszaka. Az óceán cirkuláció is változik. Az alpesi gleccserek a Földön drámaian csökkennek. Az Északi féltéken a hó-borítottság 20 %-al csökkent az utóbbi 20 év alatt. A tavaszi hóolvadás a sarki zónában két héttel hamarabb következett be az 1980-as években, mint az 1940-es és 1950-es években. Kanadában a melegebb hőmérséklet hatására a déli határa a folyamatosan fagyott talajnak 120 km-el északabbra tolódott el 1964 és 1990 között.



3. ábra. Évi hőmérséklet tartomány és felhővel való fedettség az USA-ban

A sarki jég jelentősen csökkent az utóbbi 50 év alatt. Az Északi féltekén a nyári tengeri jég kiterjedése 15 %-al csökkent a húszadik század második felében (4. ábra).



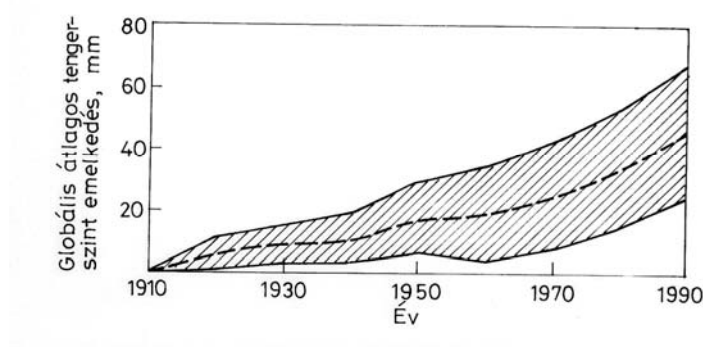
4. ábra. A nyári-jég kiterjedése csökkenése az Északi féltekén 1901-1999 periódusban

A tengerszint nő, példa nélkül álló mértékben. Ahogy a víz melegszik, térfogata expandál. Kb. kétharmada a húszadik századi tengerszint emelkedésnek termális expanzióból ered és egyharmad a gleccserek olvadásából, a sarki jégsapkákból származik, melyek édes vizet adnak az óceánnak. A globális átlagos tengerszint emelkedés $\pm 2,4$ mm/év mértékben emelkedett (5. ábra).

A klímaváltozásra a Föld válasza az utolsó 150 év alatt jóval gyorsabbak, mint az előző történelmi periódusokban. Nem kétséges, hogy a húszadik században az emberiség megváltoztatta a Föld klímáját a nagy mennyiségű üvegházi gázok kibocsátásával (Öllös, 2009). A változások:

- történelmileg gyors troposzférabeli, 1 °C-os felmelegedés,
- sztratoszférabeli lehűlés a troposzférabeli befogott hő visszatartása miatt a nagyobb üvegházi gáz koncentráció következtében.
- megnövekedett az atmoszférikus vízgőz a mérsékelt szélességi fokokon,
- erősebb a felhőképződés és csökkentek nappali-éjszakai hőmérséklet különbségek a mérsékelt zónákban.
- erősebb tengerparti szelek, óceán felszíni áramlások,

- csökkenő hó- és jégborítás, az alpesi gleccserek fogyása, fagymentes időszakok növekedése a mérsékelt régiókban,
- átlagos globális tengerszint emelkedés kb. 2,4 cm/dekád.



5. ábra. Globális átlagos tengerszint emelkedés 1910-1990 periódusban

2.1. A klímaváltozás okai

A klímaváltozást befolyásoló fontosabb tényezőket *Mika* (2002) foglalja össze:

A légkör üvegházhatása

A légkör üvegházhatásának antropogén erősödése miatt a jövő század közepére a Föld hőmérséklete magasabbra emelkedhet, mint a történelem során valaha. Ezért olyan üvegházhatású gázok bizonyított emelkedő tendenciája a felelős, mint elsősorban a szén-dioxid (CO₂), a metán (CH₄), a dinitrogén-oxid (N₂O) és a halogénezett szénhidrogének. E gázokon keresztül a Nap sugarai szinte zavartalanul lejutnak a felszínre, de az onnan kiinduló, nagyobb hullámhosszú energia egy részét e gázok (továbbá a felhők és a vízgőz) elnyelik és visszazugározzák a felszín irányában.

Az emberi tevékenység éghajlat-módosító hatásának veszélyességét fokozza, hogy az üvegházhatású gázok többségének igen hosszú a légköri tartózkodási ideje. A metán már 8-12 év után kikerül a légkörből, de a legfontosabb freonfajták csak 10-200, a dinitrogén-oxid mintegy 120 év elteltével bomlik el a légkör felsőbb rétegeiben. A légkört antropogén eredetű többletként terhelő szén-dioxid molekulák akár 200 évet is e közegben tartózkodhatnak, mielőtt azokat az óceán, vagy a bioszféra elnyelné.

A hosszú élettartam következménye, hogy e gázok koncentrációja a Föld területén közel egyenletesen oszlik el. Ha valamikor az emberiség képes lesz megállítani a légköri üvegházhatást fokozó gázok kibocsátásának növekedését, a korábbi kibocsátások következményeit az utókor még hosszú időn át tapasztalni fogja. Sőt, minthogy a legtöbb ilyen gáz kibocsátása ma meghaladja a nyelők kapacitását, a kibocsátás szinten maradása is még emeli a koncentrációkat.

A legfontosabb üvegházhatású gázok és néhány jellemzőjét az *1. táblázat* mutatja. A táblázat utolsó sorában számszerűsített Globális Melegítő Potenciál azt mutatja meg, hogy 1 kg gáztöbblet légkörbe kerülése adott időtartam (100 év) alatt összesen hányszor erősebb sugárzási hatást fejt ki, mint 1 kg széndioxid. Látható, hogy a bemutatott gázok mindegyikének nagyobb a potenciális melegítő képessége, mint a szén-dioxidé.

1. táblázat A legfontosabb üvegházhatású gázok és néhány jellemzőjük

Megnevezés	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CFC-11 (CCl ₃ F)	HCFC-22 (CHF ₂ Cl)

Kezdeti koncentráció (1750-ben)	278 ppm	700 ppb	275 ppb	Nulla!	Nulla!
Koncentráció 1998-ban	365 ppm	1745 ppb	314 ppb	268 ppt	132 ppt
Eddigi elsődleges sugárzási hatás	1,46 Wm ⁻²	0,48 Wm ⁻²	0,15 Wm ⁻²	0,07 Wm ⁻²	0,03 Wm ⁻²
Növekedés	0,4%/év	0,4%/év	0,03%/év	-0,5%/év	+4%/év
Légköri élettartam (év)	50-200	8-12	120	45	12
Globális Melegítő Potenciál (100 év)	1	23	296	4600	1700

Megjegyzések: 1 ppm = 10⁻⁶; 1 ppb = 10⁻⁹; 1 ppt = 10⁻¹² térfogat-arány.

Az antropogén halogénezett szénhidrogének száma több mint 100.

A számítások szerint az a változás, amely a légköri energia-háztartásban az ipari forradalom kezdete óta az üvegházgázok koncentrációjának növekedése miatt bekövetkezett, a légkör alsó rétegeinek energia-bevétele tekintetében, megközelíti a 2,5 Wm⁻²-t, és az eddigi kibocsátási tendenciák folytatódásával - a század közepére elérheti az 5 Wm⁻²-t, a század végére pedig a 9 Wm⁻²-t (IPCC, 2001).

További antropogén éghajlat-módosító hatások

Az éghajlatunkat befolyásoló antropogén hatások körébe immár bele kell érteni az aeroszoloikat (por, korom, szulfátok, homok, tengeri sók stb.) is, amelyek a napsugárzás egy részét visszaverik, illetve a magasabb légrétegekben elnyelik, ezáltal a felszínre érkező sugárzásmennyiség csökkenését okozzák, s ily módon az üvegházhatással ellentétes hatást váltanak ki.

A légkör e cseppfolyós és szilárd alkotórészei az elmúlt évtizedekben – különösen az iparosodott területeken – jelentősen gyengítették az üvegházgázok okozta felmelegedést. Az aeroszolok egy része ugyanakkor el is nyeli a sugárzást, ami melegítő hatást okoz.

A *növényzet szerkezetének megváltozása* főként a szubtrópusi térségben ér el nyugtalanító mértéket. E körzetekben az éghajlat instabil, bizonyos időszakokban sivatagi jellegű, máskor viszont lehetővé teszi fejlett szavannanövényzet kialakulását. Csakhogy ezekben az években az ember helytelen mezőgazdasággal, a felszaporodó állatállomány pedig a növényzet lelelegelésével kizárja, hogy a szavannanövényzet tartósan fennmaradjon. A másik veszélyforrás a trópusi övben végbemenő nagyarányú, évente Belgium területének megfelelő mértékű *őserdőpusztítás*. Ennek elsődleges éghajlati következménye ugyancsak a hasznosított felszín nagyobb fényvisszaverő-képessége az erdőéhez képest. A növényvel borított felszín annál kevesebb energiát ver vissza, minél dúsabb a vegetáció.

Természetes éghajlati kényszerek

A természetes éghajlati kényszerek az elmúlt évszázadokban befolyásolták a globális éghajlatot. Hatásuk azonban a feltételezett több fokos változások mellett egyre inkább másodlagossá válik. A *naptevékenység* a Nap sugárzásának időbeli ingadozását, esetleg lassú változásait jelenti, amely a látható sugárzás tartományában évtizedes időskálán 0,1%-os nagyságrendű. A Napklíma kölcsönhatások fizikai mechanizmusának a kérdése nem tisztázott.

Egy-egy *vulkán* kitörése során kén-dioxid és más, főleg szilárd alkotórészek kerülnek a levegőbe, amelynek nyomán 1-3 év időtartam során sokszorosára nő a sztratoszférikus aeroszol-ernyő optikai vastagsága. Ehhez járul a kitörést követő hónapokban a még nagyobb optikai vastagságú vulkáni hamu is. Hamu a légkörből néhány hét alatt kiülepedik, ám a kén-dioxid a sztratoszférában kisméretű kénsavcseppekké alakulva néhány évvel a kitörés utánig a sztratoszférában marad. A vulkánkitörések elsődleges hatása a felszínre érkező rövidhullámú sugárzás gyengülésében jelentkezik. A sugárzási hatások eredményeként a felszín közelében csökken, a sztratoszférában (körülbelül 20 km magasságban) viszont emelkedik a hőmérséklet.

Az éghajlati rendszer változékonysága

A légkör, a szárazföldek, az óceánok, a bioszféra és a szilárd víz (krioszféra) alkotta éghajlati rendszer egyike a valaha modellezett legbonyolultabb, nem lineáris rendszereknek. A bonyolult jelenséget ma még egyetlen modell sem képes egymaga figyelembe venni.

Az éghajlati rendszer belső változékonyságának jelensége az *El-Niño*, amely 3-7 évente ismétlődő jelensége elsősorban az alacsony földrajzi szélességekben jelentkezik. Hagyományosan az El-Niño a perui partok halászsainak tapasztalata szerint karácsony táján jelentkezik: a halban gazdag hideg áramlást minden évben hosszabb rövidebb halban szegény, meleg áramlat váltja fel. Napjainkra kiderült, hogy a hideg víz felszínre törésének elmaradása a Csendes óceán hatalmas területein több (1997/98-ban például 5-6) °C-os pozitív hőmérsékleti anomáliát okoz. E jelenség több hónapig, egykét évig fennmarad, és alapjaiban átalakítja az egyenlítői térségek légköri körzését.

Feltételezett katasztrófa-ugrások

Szólnunk kell két olyan hipotézisről, amelyekre nézve ma még tapasztalati eredményekkel is alig rendelkezünk. Az *egyik* szerint Földünk éghajlata egy nagyobb változás esetén közel kerülne egy kritikus elágazási ponthoz, amelyből a további melegedés már a maitól gyökeresen különböző klímába fordulna át. E feltételezett katasztrófaugrás a kezdeti klímamodellek szerint két módon realizálódhatna.

Az egyik lehetőség akkor lépne fel, ha az óceánok függőleges síkú körforgásának, az *óceáni szállítószalagnak* mai rendszere lefékeződne, vagy hirtelen átalakulna. Ekkor ugyanis legyengülne a földrajzi szélességek közötti energiacsere, ami bizonyítottan utoljára a tízezer évvel ezelőtt, a mainál hidegebb klímájú évtizedekben fordult elő. Ekkor a földi klíma néhány évtized alatt több fokos ingásokat produkált, ami egy nagyságrenddel gyorsabb változást jelentene, mint amire az üvegházgázok miatt számítanunk kell. Előfordulhat tehát, hogy a kezdeti kis melegedést hirtelen erős lehűlés, vagy hirtelen felmelegedés követné, vagyis teljesen prognosztizálhatatlanná válna a klíma. E szállítószalag fő motorja a só koncentrációk különbsége az egyenlítői, illetve a sarkvidékeken.

A *másik* minőségi ugrás akkor következhet be, ha az északi félgömb tengeri jégtakarója teljesen elolvad, amire utoljára 4 millió évvel ezelőtt, a mainál 4-5 °C-kal magasabb globális átlaghőmérsékleten volt példa. Az sem zárható ki teljesen, hogy a várható felmelegedés miatt a távolabbi jövőben a nyugat-antarktiszi jégtáblát a tenger alatt rögzítő kapcsolat elvékonyodhat, ami azzal jár, hogy a jéghátság az áramlatokkal az alacsonyabb szélességek felé sodródva végül is elolvad. Ez az 5-7 méter szintemelkedéssel járó olvadás azonban mai ismereteink szerint lassú, így e katasztrófától a következő száz évben talán még nem kell tartanunk.

Igazolják-e a megfigyelések a prognózisokat?

A Föld története során globális átlagban a mainál több fokkal melegebb és hidegebb éghajlat is előfordult a mainak nagyjából megfelelő kontinens elhelyezkedés mellett. A 19. század második felétől kezdődően a Föld átlaghőmérséklete kisebb ingadozásokkal körülbelül 0,6 °C-kal emelkedett. A felmelegedés tényét a felszíni léghőmérséklet mérései mellett több más környezeti elem (hótakaró, tengeri jég kiterjedés és vastagság az északi félgömbön, a gleccserek visszahúzódása stb.) idősorai is alátámasztják.

További kérdés: mennyire egyértelmű, hogy a tapasztalt melegedés az emberi tevékenységnek tudható be? A klíma tényleges (mérési hibáktól független) változása három valószínűleg egymással párhuzamosan ható - okra vezethető vissza. Ezek: a) az éghajlati rendszer belső ingadozásai (minden külső hatás nélkül); b) természetes külső tényezők (vulkánosság, naptevékenység stb.); c) antropogén hatások (üvegházgázok, aeroszolok, felszínhatás stb.).

Tisztázandó az is, hogy milyen a természetes és az antropogén, ezen belül az üvegházgázok hatásainak aránya. Az utóbbi 150 év hőmérsékleti trendjeit leginkább az antropogén és természetes külső tényezők együttes hatása írhatja le.

Várható regionális és magyarországi változások

A *legnagyobb változás* az Északi Félgömb magas szélességein várható, ahol a melegedés - főleg a hideg félévben - többszörösen meghaladja a globális átlag változását. A mérsékelt

szélességeken a cirkuláció övezeteinek és képződményeinek áthelyeződése miatt a változások előjelének több kombinációja lehetséges a kisebb térségekben. Számos modelleredmény mutat arra, hogy a *vízháztartás övezetes eloszlásának* jelentős módosulására számíthatunk: trópusi és arktikus területek nedvességellátottsága fokozódhat, egyes mérsékeltövi térségek csapadékhiánytól szenvednének. Az éghajlatváltozás szempontjából a különböző földrajzi térségek eszerint más és más rizikófaktorral rendelkeznek. Egyesek gazdaságának kifejezetten előnyös, másoknak közömbös vagy előnytelen lenne a klíma eltolódása egy globálisan melegebb állapot felé.

Meglehetősen *vitatott kérdés* az is, hogy a felmelegedéssel párhuzamosan nő-e az éghajlat változékonysága, illetve szélsőségessége. Egyes, főleg az átlagok tendenciájával összecsengő szélsőséges éghajlati események (árvizek, aszály, trópusi ciklonok stb.) gyakorisága és mértéke természetesen megnőhet, esetleg pusztán az „átlag” eltolódásának hatására is anélkül, hogy a változékonyság mérőszámai módosulnának. A rendelkezésre álló adatok és modellkísérletek alapján ma még nem eldönthető, hogy van-e a változékonyságban valamilyen eltolódás.

Hazánkban a klímaváltozás kockázatának megítélésekor lényeges, hogy a Kárpát-medence a nedves óceáni, a száraz kontinentális és a nyáron száraz, télen nedves, mediterrán éghajlati régiók határán helyezkedik el. E határzónában az éghajlati övek kisebb eltolódása is oda vezethet, hogy országunk átcsúszik a három hatás valamelyikének uralma alá.

A hőmérséklet hazai változása 0,5 - 4 °C-ig terjedő tartományán várható. A forgatókönyvek fő állítása hogy az üvegházhatás erősödésével a hazai éghajlat szárazabbá és napfényben gazdagabbá válása várható, legalábbis a melegedés kezdeti, néhány évtizedes tartományán.

2.2. Klímaváltozás és a vízgazdálkodás kapcsolata

Internet <http://www.lovassy.hu/online/hirek/vizprojekt/pdf/global.pdf>: víz (H₂O) az egyik legfontosabb anyag a Földön. Az élethez is nélkülözhetetlen. A földi vízkészlet döntő többsége a világtengerben hullámszik, az édesvízkészlet 90%-a pedig a hó és jégtakarókban van. A víznek elenyésző része a felszín alatti, és csupán néhány ezreléke a felszín feletti, tavakban és folyókban lévő édesvíz. E két utóbbi mennyiség biztosítja az életet a Földön.

A globális felmelegedés következtében a gleccserek is visszahúzódnak, mivel nyáron több jég olvad el, mint amennyi télen újrafagy. 2007-re csupán 27 gleccser maradt abból a 150-ből, amit 1900 táján jegyeztek fel. A gleccserek 90%-a tehát elolvadt.

Az ENSZ tanulmánya szerint a Himalája gleccsereinek zsugorodása gyorsabb az átlagosnál, ami emberek százmillióira lehet katasztrofális hatással, mivel hét nagy folyót táplál ez a jég és így a világnépesség 40%-a számára biztosít ivóvizet. Ha 5°C-ot emelkedik a Föld-bolygó hőmérséklete, akkor felolvad az összefüggő jégtakaró Szibériában. Az ott található jég 10%-ban metánt tartalmaz, mert a vízmolekulák csapdába zárják a metánmolekulákat. Ha mindez felszabadul (a jelenség Nyugat- Szibériában már zajlik), akkor 450 milliárd tonna metán jut a légkörbe, ami olyan, mintha 23-szor annyi CO₂ jutna ki a légkörbe.

A globális felmelegedés okozta jégolvadás miatt hatalmas tömegű édesvíz kerülhet az Atlanti-óceánba, s emiatt akár meg is szűnhet a Golf-áramlás. Ettől aztán több mint 10°C-ot csökkenhet Észak-Európa téli középhőmérséklete. Ha több édesvíz jut a tengerbe, leállhat a sűrűbb víztömegek süllyedése, gyengülhet a Golf-áramlat. Egyesek szerint a Golf délebbre tolodása a következő évtizedekben már éreztetni fogja a hatását, a nagy lehülés pedig 200 év alatt következhet be. Az időszakos állóvizek egyre nagyobb hányada szárad ki. A kiszáradás oka lehet helytelen vízgazdálkodás is (pl. a mezőgazdaság túlzott öntözési igényei) de az üvegházhatású gázok kibocsátása miatti globális klímaváltozás ugyancsak.

Az éghajlat szárazabbá válása, a hőmérséklet és a párolgás növekedése következtében kisebb lesz az éves vízlefolyás. Tavaink zsugorodnak, egyesek el is tűnhetnek. A csapadék a téli hónapokban nő, a nyáriakban csökken. Télen emelkedik az árhullámok gyakorisága, míg a befagyással kapcsolatos események rövidülnek. A nyári hónapokban a kisvizek ideje hosszabbodik, a tavakban az alacsony vízállások gyakorisága nő. Fokozódik az árhullámok gyakorisága és intenzitása is, ugyanakkor súlyosabb vízhiány várható a talajokban. Mindezek a folyamatok csökkentik a vizek öntisztuló képességét, és növelik a fertőzések kockázatát. Az

éghajlatváltozás következtében a hasznosítható vízkészleteink csökkennek, fogy a megújuló felszín alatti vízkészletünk is, főként az Alföldön. Mindeközben nő a növények öntözővíz-igénye, a lakosság személyi fogyasztása. A felszín alatti vízkészletek kihasználtsága a 21. század derekán az Alföld egyes térségeiben megközelíti a kritikus szintet. A vízért való versengés növeli a vízfogyasztók közötti konfliktusokat, gyakoribbá teheti a vízkorlátozást. Valószínűsíthető, hogy nő az eső eredetű téli árvizek gyakorisága és nagysága, illetve a téli, tavasz eleji olvadásos árvizek a mainál korábban jelentkeznek majd. A síkvidék árvízi védelmében előtérbe kell helyezni a hullámtér szélesítését, az árvizek kiengedését az árterekre, az épített tározókba. Ilyen eljárásán alapul a Tiszavölgyére kidolgozott Vásárhelyi-terv. Az áradások elleni védelem miatt fontos a csapadék minél teljesebb visszatartása a vízgyűjtő területén, a lefolyás lassítása, amit hosszabb távon az erdősítéssel, rövidebb távon zápor-tározók kiépítésével lehet megoldani

Ladányi (2009) kutatásai ráirányították a figyelmet arra, hogy a klímaváltozás a jól megfigyelhető közvetlen hatásain túl több olyan következménnyel is járhat, amire eddig kevés figyelem irányult. A csapadék mennyiségének csökkenése például a Duna-Tisza közén jelentős talajvízcsökkenést eredményezett, ami nemcsak jelentős károkat okoz a gazdálkodásban, de hatására jelentősen átalakulóban van a természetes vegetáció is. A hidrológiai hatásokra érzékeny talajok, mint pl. a szikesek jelentősen átalakulnak és ennek eredményeképpen a vegetációban is „kényszer-vándorlás” figyelhető meg. A területen egyre kevesebben tudnak megélni a mezőgazdaságból, sok terület kerül ki évről évre a művelés alól. A termés mennyiségének és minőségének változása miatt a gazdák intenzívebb öntözésre kényszerülnek, amelyhez a vizet ugyanabból a vízbázisból emelik ki, amelynek kritikus csökkenése magát a problémát okozza, ezáltal még inkább táplálja azt az öngerjesztő folyamatot, ami a Homokhátság legmagasabb részén talán már visszafordíthatatlan.

Várallyay (2008) elemzése szerint a szélsőséges hidrológiai és talaj-nedvességforgalmi helyzetek (árvíz, belvíz, túlnedvesedés, ill. aszály, gyakran ugyanabban az esztendőben, ugyanazon a területen) valószínűsége, gyakorisága, tartama és intenzitása a jövőben növekedni fog. A légköri csapadék tér- és időbeni változása, intenzív esők gyakorisága, változó eső/hó arány és gyors hóolvadás, változó művelési ág és vetésszerkezet változása egyre gyakoribb lesz. Ilyen viszonyok között Magyarországon (amely a hidrogeológiai szempontból zárt Kárpát-medence legmélyebb fekvésű része) fontos tény, hogy a talaj a legnagyobb potenciális természetes víztározó. A talaj 0 – 100 cm-es réteg-összetételében a lehulló-csapadék jelentős hányadának tározására képes. Ez a potenciális vízraktározó képesség azonban gyakran nem hasznosul eredményesen az alábbi okok miatt:

- a felszínre jutó víz talajba szivárgását akadályozza a talaj pórustereinek vízzel telítettsége, a felszíni rétegek fagyott volta, a talaj felszínén, ill. felszín közeli rétegeiben kialakuló víz át nem eresztő, igen lassú víznyelésű réteg
- a talajba beszivárgott víz nem tározható el a növény számára hasznosítható formában, hanem a talaj gyenge víztartó képessége miatt mélybe, vagy a felszín közeli talajvízbe szivárog.

Ezek miatt egyaránt növekszenek a felszíni lefolyás, a párolgási, ill. szivárgási veszteségek, s fokozódik a szélsőséges vízháztartási helyzetek kockázata. Következésképpen mindent meg kell tenni azért, hogy a talaj felszínére jutó víz minél nagyobb hányada szivárogjon be a talajba, s tározódjon ott növények számára hasznosítható formában. Az ezt célzó beavatkozások nélkülözhetetlen elemei egy hatékony talaj- és vízgazdálkodásnak, valamint egy eredményes környezetvédelemnek.

Az ország – hosszú idősoros megfigyeléseken alapuló – átlagos évi csapadékmennyisége jelentős térségi változatosságot tükröz, az Alföld középső részének 500 mm/év értékeitől kezdve az Alpokalja 850 mm/év feletti értékeiig.

Ma már egyre inkább elfogadott tény az, hogy a klímaváltozás következtében módosulhat egyrészt a rendelkezésre álló víz mennyisége, másrészt annak minősége is. A víz mennyiségét tekintve a hosszan tartó aszályos időszakok, valamint az árvizek, belvizek okozhatnak

nehézséget. A minőség a kisebb vízmennyiség miatt a vizek öntisztuló képességének csökkenése által romolhat, mivel az egyes szennyezések lebomlása lassabb lesz. További degradáló hatást eredményez a nagymértékű csapadék, mivel növeli a szennyvíz- és csatornarendszerek terhelését. A rendelkezésre álló édesvízkészlet a következő évtizedekben a világon különleges stratégiai szerepet nyer. Ebben a vonatkozásban a felszín alatti vízkészletek szerepe különösen fontos lesz. De a hőmérsékleti anomáliáknak köszönhetően az éghajlat szárazabbá és melegebbé válásával egyre gyakoribb aszályokra is lehet majd számítani. Az előzőekben említett hatások, a vízhiány vagy az aszály nem csak vízgazdálkodási probléma lesz. Közvetlen hatással vannak az emberekre, a természetes élővilágra és a vizet felhasználó és attól függő olyan gazdasági ágazatokra, mint a mezőgazdaság, a turizmus, az ipar, az energia és a közlekedés (Mrekva, 2010).

A folyók mentén természetes és elkerülhetetlen, hogy árvizek keletkezzenek. Néhány ilyen áradás szezonálisan következik be köszönhetően egy téli vagy tavaszi esőzésnek, ami hóolvadással párosul, megtelnek a vízgyűjtők túl sok vízzel és túl gyorsan. A nem várt hirtelen vagy hosszantartó esőzések szintén folyami áradáshoz vezetnek. A csapadék telíti a talajt, és ennek eredményeképpen a lehulló csapadék egy megnövekedett hányada egyenesen a vízfolyásokba áramlik, befolyik a mellékfolyókba, majd a főmederbe.

Tengerparti országoknál viharos hullámzás akkor történik, amikor a vihar kombinálódik a dagálllyal. A szél viharos ereje a tengervizét a part felé sodorja. Amikor ez dagálllyal és nagy hullámzással párosul hatalmas mennyiségű víz gyűlik össze a part mentén és hatalmas területek kerülnek víz alá. A tengerparti áradást okozhatja tengerár is, amit cunaminak is neveznek. Ilyenkor alakulnak ki a hullámok a tengerfenéken bekövetkező földrengésnek vagy vulkanikus tevékenységnek köszönhetően. Az effajta tevékenységek eredménye a rendkívül gyorsan mozgó árhullám, amely elérve a partot – mely hullámtörőként viselkedik – roppant károkat okoz.

Özönyszerű vagy hirtelen áradás bárhol bekövetkezhet, a természeti csapások között az egyik leggyakrabban előfordulóak és az általuk okozott kár is a legnagyobbak közül való. Nagy intenzitású esőzés okozza néhány órás periódus alatt. Hirtelen árhullám kevesebb, mint egy perc alatt kialakulhat, mégis elegendő energiával rendelkezhet ahhoz, hogy járdarészeket, házakat stb. elsodorjon. Ilyen feltételek mellett a talaj nem képes adszorbeálni a nagytömegű esővizet, és a víz egyszerűen a felszínen folyik le. A nagyfokú urbanizáció egyik velejárója ez a jelenség. Az özönvíz-szerű áradások alatt a települések utcái könnyedén kisebb vízfolyásokká válnak, míg a pincék a mennyezetig megtelnek vízzel és a csatornahálózatok túlterhelődnek, megnövelve az egészségügyi kockázatot. Sárfolyamot vagy földcsuszamlást okozhat a heves esőzés, miáltal a talaj telítődik és megcsúszik a lejtőn, földcsuszamlás és áradás kombinációjához vezetve.

A víz az éghajlatváltozás által legerősebben befolyásolt erőforrás, ezért talán a klímaváltozás által egyik legsúlyosabban érintett terület a vízgazdálkodás. Mint már a korábbiakban említésre került a csapadékeloszlás időbeli és térbeli megváltozása következtében a folyók vízjárása, árhullámai is változnak, egyre gyakoribbak lesznek az aszályok és az árvizek.

A jövő stratégiai lépéseit a megfelelő vízgazdálkodási politika – az élőhelyek vízmegtartó képességének helyreállítása, az esetleges vízpótlási lehetőségek kidolgozása – kialakításával kell megterveznünk. Törekednünk kell a vízellátottság, az ivóvíz minőségének, mennyiségének védelmére, csökkenteni kell a felszín alatti vízkészletek igénybevételét, az ipari és egyéb vízhasználatot. Javítani kell a szennyvíztisztítás hatásfokát, és tervezett módon fel kell készülni az árvizekre és aszályos időszakokra.

A vízgazdálkodás számára nélkülözhetetlen jövőbeli intézkedések:

- a víztakarékos módszerek kidolgozása, hatékony vízhasználat,
- fokozott vízvisszatartás,
- árvízi kockázati térképek és kockázatkezelési tervek elkészítése,
- megnövelt befogadóképességű csatornarendszerek kiépítése,

- kapacitásfejlesztés,
- korszerű öntözési módszerek alkalmazása, a klímaváltozás hatásait figyelembe vevő településfejlesztés,
- a nagyvízi meder visszaállítása, a partmenti és a belvízjárta területek beépítésének csökkentése,
- hatékony csapadékvíz-gazdálkodás.

3. Jövőbeni klímaváltozás

Arrhenius (1896) megjósolta, hogy a fosszilis üzemanyag égetés (szén) a következő 3000 éven át megduplázza az atmoszférabeli CO₂ koncentrációt, aminek hatására az átlagos globális hőmérséklet kb. 5 °C-al nő. Ez a becslés igaz maradt mostanra is, de alábecsülte a növekedés mértékét. Az atmoszférabeli CO₂ koncentráció 100 év alatt 30 %-al nőtt, 18-szor gyorsabban nőtt, mint ahogy *Arrhenius* becsülte és várhatóan megkétszereződik XXI. évszázad vége előtt. Ezzel párhuzamosan a hőmérséklet is példa nélkül állóan gyorsan nő.

Számos forrás gyakorol hűtő hatást a Földre. A vulkáni aktivitás, aeroszokok, az atmoszférabeli por növekedése a kisugárzást csökkenti. Így a napsütés csökkenése, ami a Földet éri, a klímára hűtő hatású.

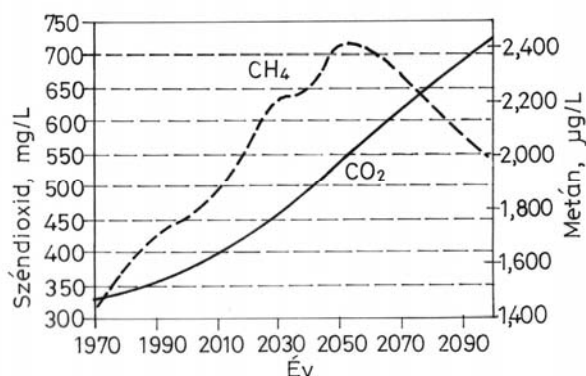
A kén természetes és antropogén forrásokból ered. A természetes kén vegyületeket egyes, az óceánban létező plankton fajok bocsátják ki és a kén a felhőkben kondenzációs magokat képeznek (*Charlson et al.*, 1987). A fosszilis fűtőanyag, különösen a nagy kéntartalmú szén, ként bocsát ki az atmoszférába. Az ilyen emisszió, várhatóan, növeli az atmoszféra kén tartalmát, 160-270 %al az 1994-2040 periódusban. A kén részecskék belégzése az emberi légzőszervek betegségét okozzák, és jelentős légszennyezést hoznak létre, savas esőket és ökoszisztéma károsodását eredményezik. A kis kén részecskék vagy aeroszokok az atmoszférában visszaverik a szoláris energiát. Az Északi féltekén, a negatív kisugárzó lehűlés, a szulfát aeroszokok miatt, egyenlő a pozitív kisugárzás melegekedéssel (az antropogén üvegházi gázok következtében).

A növények, a fotoszintézis révén, a CO₂-t felveszik és szerves szenné alakítják. A megnövekedett atmoszférikus CO₂ növeli a növényzet szaporodását. 1960 óta, az évszakos atmoszférikus CO₂ változás amplitúdója alacsonyabb nyáron, amint a növényzet a CO₂-t felveszi és nagyobb télen, ahogy a növények elhalnak.

Az erdőirtás nagy mennyiségű tározott szenet szabadít fel. Az erdő és talajuk kb. 2000 billió tonna szén tartalmaznak. A tározott szén az Amazonas erdőségben a jelenlegi 30 éves fosszilis üzemanyag elégetésével egyenlő.

A talaj a legnagyobb szárazföldi széntározó, közel háromszor több szenet tartalmaz, mint a növényzet. A szén kb. kétharmada az erdei ökoszisztémában a talajban és a tőzeg formájában van jelen. Az üvegházi felmelegedés a mikroorganizmusok metabolikus sebességét növeli, amelyek a talajban lévő szerves anyagot oxidálják. A 0,03 °C/év üvegházi hőmérséklet emelkedés 1990-2050 között 61 Gt szenet, mint CO₂ szabadít fel a talaj szerves anyagaiból, ami kb. 19 %-a a fosszilis elégetéssel felszabadult CO₂-nak.

A magasabb hőmérséklet elősegíti a talaj nitrogén átalakulását atmoszférikus üvegházi kéjgázzá (N₂O). Az üvegházi gázok koncentrációja a jelenlegi évszázadban is folyamatosan nő. Az atmoszférikus CO₂ az ipari periódus előtti szinteket megkétszerezi 2100 előtt. 2100-ra az atmoszférikus CO₂ nagyobb, mint 700 mg/L, a CH₄ 2050 körül 2400 ppb koncentrációjú lesz (6. ábra).

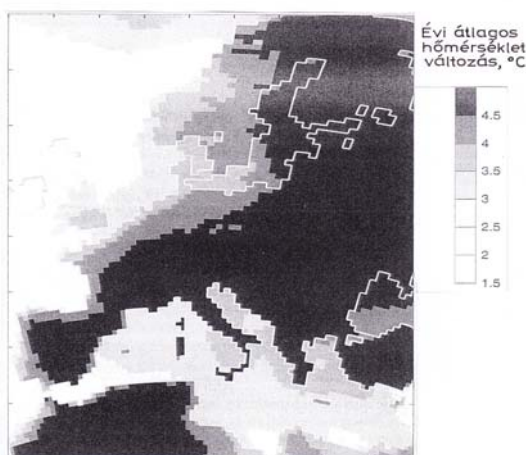


6. ábra. Széndioxid és metán koncentráció az atmoszférában 1970 - 2000 periódusban

A globális átlagos felmelegedés 1,4 °C-ról 5,8 °C-ra emelkedik az 1990 - 2100 periódusban. A hőmérsékletek télen és a magasabb szélességi fokokon a globális átlagos hőmérséklet több mint kétszeresre nőhet.

A csapadék nő az északi szélességi régióban télen és az északi magas-szélesség régióban és az Anktarktiszon mind télen, mind nyáron. December-január-februárban a csapadék nő a tropikus Afrikában és csökken Ausztráliában télen és a Földközi-tenger régióban nyáron (*Giogi et al.*, 2001). A szélsőségesen meleg napok gyakorisága nő és a szélsőségesen hideg napok gyakorisága várhatóan csökken. A szélsőséges hőmérséklet és csapadék, amely jelenleg átlagosan 20 évenként várható, gyakoribbá válik.

A felmelegedés növekszik kontinensnyi területeken, különösen a magas szélességi régiókban télen, de csökken június-augusztusban Dél-Ázsiában és Dél-Amerikában. Az európai nyári hőmérséklet kb. 1,5-4 °C-al nő 2080-ra (*7. ábra; Viner, 2002*).



7. ábra. Az előre jelzett évi átlagos hőmérséklet növekedés Európában 2070-2099 periódusban.

Az előre jelzett klímaváltozás bizonytalansága nő a XXI. század után. A hosszú-idejű hőmérsékleti trendek attól függenek, milyen mértékben sikerül az emissziókat csökkenteni, ill. az atmoszférabeli üvegházi gázok koncentrációját stabilizálni. Minél hosszabb ideig tart a CO₂ stabilizálás, annál nagyobb lesz koncentrációja. A hőmérsékletek a CO₂ stabilizálás után is nőnek a klíma rendszer inerciája miatt, ami számos évszázadot igényel a stabilizáláshoz.

Ha a fosszilis-üzemanyag fogyasztás folytatódik, az atmoszféra CO₂ a következő évszázadokban megnégyszereződik, ami a globális átlagos hőmérséklet 7 °C-os emelkedését idézi elő, a következő 500 éven belül.

Irodalom

- Charlson R.J., Lovelock J.E., Andrese M.O., Warren S.G.* (1987): Oclanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature* 326(6114).
- Georgi F., Hewitson B.* (2001): Regional climate information-evaluation and projections. Cambridge University Press.
- Hardy J.T.* (2004): Climate change. John Wiley and Sons Ltd.
- Ladányi, Zs* (2009): Klímaváltozás hatása egy Duna-Tisza közti mintaterületen. Természetföldrajzi folyamatok és formák. Kiss T. (szerk). Geográfus Doktoranduszok IX. Országos Konferenciájának Természetföldrajzos Tanulmányai, 2009, Szeged <http://www.geo.u-szeged.hu/konf/index.html>
- Kutzbach J.* (1989): historical perspectives: climatic changes throughout the millennia. In: De Fries R.S. and Malone T F, eds Global Change and our Common Future. Washington D.C.: National Academy.
- Mrekva, L.:*
http://www.hidrologia.hu/vandorgyules/27/dolgozatok/04mrekva_laszlo_Klima.htm
- Öllős G.* (2009): Az üvegházhatás és az óceánok vízszintje. *Vízmű Panoráma* 4.
- Várallyay, Gy* (2008): Talaj–víz kölcsönhatások a klímaváltozás tükrében. MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet, Budapest. Talajvédelem különszám 2008 (szerk.: Simon L.)
- Viner D.* (2002): Elements of a Global Climate Model. Norwich, UK. Climatic Research Unit, University of East Anglia.
- Mika, J.:* A GLOBÁLIS KLÍMAVÁLTOZÁSRÓL. Egy meteorológus kutató szemszögéből. Országos Meteorológiai Szolgálat Fizikai Szemle 2002/9. 258
- A globális klímaváltozás lehetséges hatásai a Föld vízháztartására és hazánk vízügyi helyzetére:* <http://www.lovassy.hu/online/hirek/vizprojekt/pdf/global.pdf>

Összefoglalás

A felmelegedést igen valószínű, hogy a jövőben globális folyamatnak kell, tekinti. A tengervízszint emelkedés lassú, de elkerülhetetlen folyamat. Az óceáni szállítószalag nagy átrendeződése miatt, összességében fennáll a veszélye, hogy a mainál több fokkal magasabb hőmérsékletig eljutva, a klímaváltozás folyamata felgyorsul. A várható klímaváltozás hitelt érdemlő, regionális léptékű tudományos részleteinek megrajzolásával még adósak vagyunk.

Ökológiailag Magyarország a legmagasabb sérülékenységi területbe tartozik. A magyarországi átlaghőmérséklet növekedése majdnem másfélszer gyorsabb a globális klímaváltozás értékénél. Magyarországot erősen sújtja a felmelegedés, egyre szárazabbá válik az éghajlat.