



KÖRNYEZETI HATÁSOK

A vegetáció válasza a klímaváltozásra

Napjainkban már rendszeresen olvashatunk olyan, a Föld klímájához kapcsolódó szélsőségekről, hogy milyen kicsire zsugorodott az Északi-sark körüli jégtakaró, hogy az elmúlt hónap átlaghőmérséklete olyan magas volt a Földön, mint még egyszer sem, mióta megbízható műszeres méréseket végeznek. Míg egy-egy ilyen szélsőséges esemény önmagában semmit sem bizonyít, mára annyi adat gyűlt össze mind a szélsőségek gyakoriságának növekedéséről, mind az átlagértékek trendszerű változásáról, hogy tudományos konszenzus alakult ki a klímaváltozás létéről, és arról is, hogy ezt az emberi tevékenység okozza.

Az ENSZ Éghajlat-változási Kormányközi Testület (IPCC) legfrissebb (2014) jelentése szerint a Föld átlaghőmérséklete 0,9 °C-ot emelkedett a XX. század folyamán. Ugyanez a jelentés a XXI. század végéig várható további hőmérséklet-emelkedést 0,3–4,8 °C közé teszi, elsősorban a széndioxid-kibocsátás mértékétől függően. A hőmérséklet jövőbeli változásához képest a csapadékmennyiség mértéke nehezebben becsülhető. A csapadékváltozás várhatóan nagy regionális különbségeket mutat majd. Így

például Dél-Európában nagy valószínűséggel a csapadék csökkenése, míg Észak-Európában a csapadékmennyiség növekedése várható. Magyarország e két nagy régió határán helyezkedik el, ahol az éves csapadék mennyisége várhatóan nem fog jelentősen változni, azonban csapadékosabb telekre és szárazabb nyarakra számíthatunk.

A nagy vegetációs, vagyis növényzeti övek elhelyezkedését alapvetően a klíma határozza meg; ez figyelhető meg globális léptékben (biomok) és a magashegyi



Hazánkban a kutatók a virágzás időpontjának legnagyobb változását az orchideák közül a majomkosbornál figyelték meg (FOTÓ: MOLNÁR V. ATTILA)

övezetesség esetében is. Ebből következik, hogy arra a kérdésre nem nehéz a válasz: a klímaváltozás hatással lesz-e a vegetációra? A válasz csak „igen” lehet. Érdekes és fontos kérdés lehet viszont, hogy mely hatások jelentkezhetnek először és melyek később, mely növényfajok vagy vegetációtípusok a legérzékenyebbek, vagy, hogy a klímaváltozás hatását hogyan módosíthatják (erősíthetik vagy gyengíthetik) más tényezők hatásai.

Az egyik legkönnyebben detektálható válaszreakció, amit a növények a melegedésre adhatnak, a fenológiai változások, vagyis az életmenet valamilyen rendszeresen ismétlődő eseményének időpontváltozása (pl. rügyfakadás, virágzás). A ma már gyakran több évtizedet átívelő fenológiai adatsorok egyértelműen mutatják pl. a mérsékelt övben a növények egyre korábbi rügyfakadását és virágzását. Az egyik leghosszabb ilyen jellegű adatsor a japán cseresznyefák virágzásának időpontja, amit az 1600-as évek végétől feljegyeznek, és ami ugyancsak mutatja az utóbbi évtizedekben korábban kezdődő virágzást.

Különösen hasznosak és meggyőzőek azok a vizsgálatok, amelyek több élőlénycsoport párhuzamos megfigyelését végzik. Az oroszországi Karéliában 1970 óta

monitorozzák párhuzamosan edényes növények, madarak, rovarok és gombák fenológiai változásait. Kimutatták, hogy míg a növények erőteljesen, a vonuló madarak kevésbé reagálnak az emelkedő hőmérsékletre. Különösen érdekes azoknak az élőlénycsoportoknak vagy fajoknak a válaszreakcióit összevetni, amelyek szoros kölcsönhatásban élnek, mint például a rovarbeporzású virágok és a beporzó rovarok. A kora tavaszi martilapu (*Tussilago farfara*) virágzásának időpontja az utóbbi évtizedekben sokkal korábbra tolódott, mint az egyik fő beporzó csoport, a poszméhek (*Bombus* spp.) megjelenése. A virágzás és a beporzók előfordulása időpontjának ilyen eltérő változása hosszabb távon a beporzás sikerességére is hatással lehet. Magyar kutatók hazai orchideafajok virágzási időpontjának változását vizsgálták a herbáriumi adatlapokon szereplő gyűjtési időpontok alapján. A 39 vizsgált faj közül kilencnél statisztikailag is kimutatható módon korábbra tolódott a virágzás az 1960-as évek után a korábbi időszakhoz képest. Az orchideák átlagosan három nappal korábban virágoznak, de van olyan faj, a majomkosbor (1. ábra), ahol ez a fenológiai eltolódás 14 nap.

A növényzetnek, mint az elsődleges termelő szervezetek összességének, egyik legfontosabb tulajdonsága a primer produkció, azaz, hogy mennyi szenet köt meg és alakít át biomasszává. Mivel ez a folyamat erősen függ a környezeti feltételektől, a klíma változásával ez is módosulhat. A kérdéskör fontosságát növeli, hogy az esetlegesen emelkedő szénmegkötés globális szinten hozzájárulhat a légkör szén-dioxid szintjének csökkenéséhez, és így negatív visszacsatolásként tompíthatja az antropogén eredetű szénkibocsátás hőmérsékletemelő hatását. Közép-európai erdők több mint 140 évre visszamenő fanövekmény-adatait elemezve kimutatták, hogy az 1960-as évektől kezdődően gyorsabban nőnek a fák. Ilyen regionális változások alapján azonban még nem tudhatjuk, hogy mi zajlik globális léptékben. Műholdakra telepített műszerek segítségével becsülve, a XX. század utolsó két évtizedében a globális nettó primer produkció 6%-os növekedését tapasztalták. Érdekes, hogy ennek a növekedésnek majdnem a felét Amazónia adta. A vegetáció növekvő szénmegkötésének, és így a légkörből történő széndioxid-kivonásnak azonban nem lehetett sokáig örülni, mert a XXI. század első évtizedében egy hasonló vizsgálat már egy enyhén csökkenő globális primer produkciót állapított meg. Ennek legfontosabb oka a déli félteke több régióját sújtó aszály volt, ami arra hívja fel a figyelmet, hogy a hőmérséklet-emelkedés és széndioxid-szint emelkedésének esetlegesen kedvező hatását regionálisan felülírhatja a csökkenő csapadék negatív hatása.

A fenológiai változásoknál és a produkció változásánál markánsabb átalakulás, ha módosul a növényzet összetétele: a vegetációt alkotó fajok közül egyes fajok elszaporodnak, mások visszaszorulnak a megváltozó környezeti feltételek hatására. A klímaváltozás hatása-it leginkább azokban a régiókban látjuk – pontosabban a megfigyelt változásokat ott tudjuk legbiztosabban a klímaváltozáshoz kötni –, ahol a hőmérséklet a legfontosabb limitáló környezeti tényező és az emberi tevékenység kevésbé intenzív, így nem írja felül a klíma hatását a magas szélességi fokok mentén elterülő tundrán és a hegységekben. A tundra az a bióm (2. ábra), ahol legkorábban (már az 1980-as években) elkezdtek a klímaváltozás ökológiai hatásainak vizsgálatát. Mára a sok mintaterületen végzett hosszú távú monitorozás egyértelműen kimutatta, hogy a tundrai vegetációban növekszik a fásszárúak (cserjék) és kisebb mértékben a fűvek mennyisége, ezzel párhuzamosan pedig csökken a mohák, zuzmók mennyisége és a nyílt talajfelszín kiterjedése. Nagyon hasonló eredményeket kaptak akkor is, amikor a tundrán mesterséges melegítéses kísérleteket végeztek, ami megerősíti azt a feltételezést, hogy ok-okozati kapcsolat van a melegedés és a megfigyelt vegetációs változások között.

A hegységekben megfigyelhető magassági zonáció kialakításában a hőmérsékletnek meghatározó szerepe van, így joggal várhatjuk, hogy a klíma melegedésének hatására idővel az egyes fajok és vegetációtípusok magassági elterjedése is megváltozik. Sok helyen meg is figyeltek már ilyen változásokat. Franciaország hat hegységében, 0–2600 m tengerszint feletti magassági tartományban, 1905–1985, illetve 1986–2005 között készült 4000–4000 felvétel alapján vizsgálták meg, hogyan változtak meg 171 faj magassági előfordulási adatai. Az összes faj átlagában a fajok előfordulási optimuma (az a magasság, ahol legnagyobb valószínűséggel előfordul) 66 méterrel magasabbra tolódott. 49 esetben az elmozdulás statisztikailag is kimutatható, és ebből 41 faj esetében ez felfelé történt. Legnagyobb változást a hegyvidéki élőhelyekre specializálódott növények, illetve a fűfélék esetében detektáltak. Egy másik megközelítési mód, hogy a fajok hőmérsékletigényét a teljes elterjedési területük klímája alapján jellemzik,

és azt vizsgálják, hogy egy adott helyen hosszú idő alatt (egy melegedő klímában) mely fajok szaporodnak fel. Egy széleskörű vizsgálatban, amelyben Európában és Észak-Amerikában több évtized elteltével végzett, ismételt felvételezéseket értékelték, a legtöbb esetben kimutatható volt egy „termofilizáció”, vagyis a melegkedvelő fajok felszaporodása és a hidegkedvelők visszaszorulása. Európai magashegységek csúcsi régióit vizsgálva, már egy nyolcéves vizsgálat (2001–2008) során is megfigyelték a termofilizáció jelenségét. Ez azért aggasztó, mert ezek azok az élőhelyek, ahonnan a hidegkedvelő fajok már nem tudnak magasabbra húzódni, így idővel a lokális kihalás fenyegetheti őket.

A növényzeti összetétel változásának legdrasztikusabb esete, amikor markánsan különböző vegetációtípusok (pl. erdő és gyepek) váltják egymást, akár a határok fokozatos elmozdulásával, akár egy nagy területre ki-

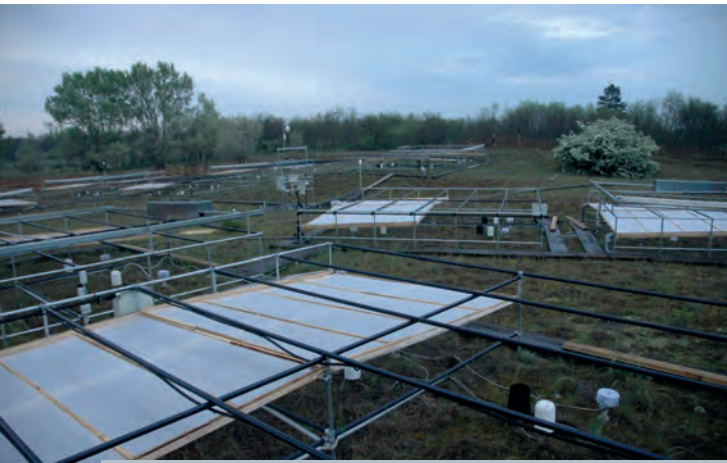


Fenyők (*Pinus edulis* és *P. ponderosa*) tömeges pusztulása Új-Mexikóban a 2002–2003 évi szárazság következtében
(PHILLIPPE DIEDERICH GETTY IMAGE)

terjedő cserével. A klímaváltozás kapcsán ilyen példa a hegyekben a felső erdőhatár magasabbra tolódása a melegedés következtében (gyep erdővé alakulása) és a meleg, illetve szárazság hatására bekövetkező erdőpusztulás. Az egyik legjobban dokumentált esettanulmány Észak-Spanyolországból ismert, ahol régi és új fényképek összehasonlításával és részletes dendrokronológiai vizsgálattal mutatták ki a bükk alkotta felső erdőhatár magasabbra húzódását a XX. században. Ahogy a legtöbb ilyen megfigyelésnél, ebben az esetben is probléma azonban, hogy a melegebbé váló klíma mellett más tényező is magyarázhatja a felső erdőhatár elmozdulását: leginkább a csökkenő legeltetés és ettől

nem függetlenül a tüzek ritkábbá válása. Ebben a konkrét esetben a melegedésnek legalább a részleges szerepét valószínűsíti, hogy a bükk alsó határának elmozdulását is kimutatták, ahol egy tölgyfaj váltja fel a bükköt.

Miközben a melegedő klíma az erdő megtelepedését segíti ott, ahol korábban a hideg volt a korlátozó tényező (felső erdőhatár, tundra), az erdőzóna száraz és meleg oldalán, vagy akár annak belsejében is, a szárazabbá vagy melegebbé váló klíma az erdő pusztulását okozhatja. Egy 2010-ben készült globális áttekintés 88 olyan tömeges erdőpusztulást gyűjtött össze, amelyek 1970 óta történtek és szárazsággal és melegedéssel, vagy ezekkel kapcsolatos szélsőségekkel hozhatók összefüggésbe. Az egyik legnagyobb területre kiterjedő ilyen esetet Észak-Amerika délnyugati részén dokumentálták, ahol a 2002–2003-as rendkívüli szárazság hatására a becslések szerint 12 000 km² területen pusztult ki az ottani nyílt erdei vegetáció egyik domináns



Csapadék-manipulációs kísérlet a Kiskunságban Fülöpháza közelében. A vizsgálatban az egyszer előforduló szélsőséges aszály és a gyakran visszatérő, de mérsékelt csapadékváltozás (szárazság, illetve csapadéktöbblet) önálló és együttes hatásait vizsgáljuk (FOTÓ: KRÖEL-DULAY GYÖRGY)

fenyőfaja (*Pinus edulis*; **3. ábra**). Fontos megjegyezni, hogy a tömeges pusztulást nemcsak közvetlenül az aszály, hanem az aszály és az erősen stresszelt fákat érő szúinvázió együttesen okozta. Algériában az 1999 és 2002 közötti extrém száraz időszak okozta az Atlasz cédrus tömeges pusztulását. A terület Szahara felőli részén a pusztulás a legszárazabb és legmelegebb élőhelyeken kezdődött, de idővel minden élőhelyre kiterjedt, míg a tengerpart közelében kisebb mértékű volt, és csak a melegebb, déli oldalakat érintette.

Az eddigi példákból is kitűnhet, hogy miközben a klímaváltozás hatásai a növényi működés és a vegetáció szerveződésének sok szintjén megfigyelhetőek,

a megfigyelt változások megbízható interpretálása számos nehézséggel és bizonytalansággal is terhelt. Ezek közül az egyik legfontosabb, hogy a klíma megváltozásával párhuzamosan egyéb folyamatok is zajlanak, mint például az emberi tájhasználat megváltozása vagy az invazív fajok megjelenése. A felső fahatár magasabbra tolódásánál már szóba került, hogy a jelenséget a melegedés mellett a legeltetés felhagyása ugyanúgy okozhatja. Ugyanakkor az erdei aljnövényzet melegedés okozta termofilizációját az erdőhasználat erősítheti, de akár gyengítheti is. A korábban már említett vizsgálatban megfigyelték, hogy míg az erdők többségében termofilizáció történt, néhány esetben ezzel ellentétes folyamatot találtak. Kiderült, hogy azokban az erdőkben szorultak vissza a melegkedvelő fajok, ahol az erdőhasználat a korábbihoz képest zártabb lombkoronaszintet tartott fenn, tehát a tájhasználat hatása — legalábbis időlegesen — felülírhatja a klíma hatását. Ugyanerre példa egy tundrán végzett, legeltetéssel kombinált melegítési kísérlet: összhangban a korábbi vizsgálatokkal, a melegítés önmagában a produkció, és különösen a cserjék tömegességének növekedéséhez vezetett, míg legeléssel kombinálva a melegítés nem okozott produkciónövekedést a kezeletlen parcellákhoz képest.

Végezetül meg kell említeni az özönnövények terjedését, mint ami a klímaváltozással párhuzamosan zajló folyamat. A délről származó jövevényfajok megtelepedése és terjedése esetén nagyon nehéz eldönteni, hogy azért terjed-e egy faj, mert most vált számára kedvezővé a klíma, vagy, mert csak most hurcolták be.

További nehézséget okoz, hogy a klímaváltozásra adott válaszok gyakran nem lineárisan változnak a klímaváltozás mértékével, vagy a változás kezdete óta eltelt idővel, hanem gyakran késleltetve, akár ugrásszerűen jelentkezhetnek. Mivel a környezet variabilitásához hozzászokott a vegetáció, így egy darabig pufferelni képes a megváltozó környezet hatását, ám a negatív hatások akkumulálódhatnak. Észak-amerikai nyarasok (*Populus tremuloides*) esetében mutatták ki, hogy a több évig tartó szárazság során folyamatosan romlik a fák vízzállító képessége. Ez sokáig nem látszik a fák életképességén, azonban egy idő után a fák pusztulását okozza. Ugyancsak fontos lehet, hogy a vizsgált rendszer stabil, egyensúlyi állapotban van-e, vagy éppen egy korábbi bolygatásból regenerálódik. Egy Európa hat országában folyó kísérletben azt találtuk, hogy azok a területek, amelyeket valamilyen más bolygatás ért, már egy kisebb szárazság- vagy hőkezelésre is érzékenyen reagáltak. Egy dániai csarabost (*Calluna vulgaris*) például a kísérlet ideje alatt érte egy csarabot fogyasztó bogár (*Lochmaea suturalis*) tömeges elszaporodása, aminek következtében

a csarab nagy része kipusztult, függetlenül a kezelésektől. Noha a szárazság- és hőkezelésnek semmilyen hatása nem volt a növényzetre a csarabpusztulás előtt, a szárazságkezelés hirtelen nagyon fontos lett, mert akadályozta a regenerációt, ami így a kontrollparcellákban megtörtént, de a szárazságkezeltekben nem. Ez az eredmény azért fontos, mert azt mutatja, hogy ha csak stabil, egyensúlyi állapotban levő rendszereket vizsgálunk, akkor könnyen alulbecsülhetjük a klímaváltozás várható hatásait.

Azon túl, hogy a válaszok nem lineárisan változnak az idővel, vagy a klímaváltozás erősségével, arra is van példa, hogy a kezdeti hatások idővel teljesen eltűnnek, vagy akár ellentétes irányba fordulnak. Ez utóbbit láttuk korábban a globális primer produkció esetében is, amikor a produkció növekedését idővel a csökkenés váltotta fel. Hasonló dolog történt egy kaliforniai gyepek kísérletben is. Amikor a csapadék mennyiségét növelték, az első két évben a diverzitás és a produkció drasztikus növekedését tapasztalták, ami a nitrogénkötő kétszikűek felszaporodásának volt köszönhető, amelyek hasznosítani tudták a több csapadékot. Az így feldőszuló nitrogén azonban leginkább az egyéves füveknek kedvezett, amelyek olyan nagy tömegben nőttek, és olyan sok avart képeztek, hogy az a következő évben drasztikusan csökkentette a kétszikűek csírázását. Így negyedik évre a produkció a kontrollparcellák szintjére, a diverzitás pedig az alá esett. Számos kísérletben megfigyelték (elsősorban melegítési vagy széndioxid-dúsításos kísérletekben), hogy a produkció a kezdeti erős válasz után idővel visszaállt az eredetihez hasonló szintre, a rendszer akklimatizálódott az új körülményekhez. A rövid- és hosszú távú válaszok ilyen jelentős eltérése azt jelenti, hogy a rövidtávú válaszokból gyakran nem következtethetünk a hosszú távúakra. Ezt azért fontos észben tartani, mert a legtöbb kutatás csak néhány évig tart, így nem szabad csak az ezekből származó eredményekre támaszkodni.

A klímaváltozás ökológiai hatásaival kapcsolatos említett bizonytalanságok csökkentésének egyik módja lehet, ha a kutatásnál több megközelítést alkalmazunk párhuzamosan. Ez a tudomány minden területéről elmondható, de különösen fontos akkor, ha olyan komplex és hosszú idő alatt kialakuló jelenséggel állunk szemben, mint a klímaváltozás. A témakörben a két leggyakrabban alkalmazott megközelítési mód a hosszú távú megfigyelés és a terepi kísérletezés (4. ábra). A hosszú távú vagy egyéb megfigyelési vizsgálatokkal való változásokat detektálunk, de nem lehetünk benne biztosak, hogy az esetlegesen megfigyelt változásokat a változó klíma vagy valamilyen más tényező

okozza. A terepi klímaváltozás-kísérletek előnye, hogy a klímátényezőket (pl. hőmérséklet, csapadék) mi manipuláljuk, így biztosított az ok-okozati kapcsolat, ám a kísérletek időbeli (évek, esetleg évtizedek) és térbeli (rendszerint néhány négyzetméter) korlátai csökkentik az eredmények általánosíthatóságát.

Más módszerek is léteznek: a tér-idő megfeleltetés során térben, és így klimatikusan elkülönülő ökoszisztémák összehasonlításával próbálunk következtetni a klímaváltozás várható hatásaira. Az őselemtani (paleobiológiai) kutatások a földtörténeti múltban zajlott klimatikus és például vegetációs változásokat vetik össze. Az erősen kontrollált üvegházi vagy labor-kísérletek egyes változások mechanizmusait tárhatják fel. A szimulációs modellezés segítségével pedig hosszú távú hatásokat tesztelhetünk, vagy hipotéziseket generálhatunk. Jó esetben a különböző módszerek hasonló eredményre vezetnek: a tundra esetében a tér-idő megfeleltetés, a hosszú távú megfigyelések és a melegítési kísérletek nagyon hasonló növényzeti változásokat jeleztek. Ugyanakkor a fenológiai változások esetében a hosszú távú megfigyelések a virágzás és a rügyfakadás időpontjának sokkal markánsabb változását jelezték 1 °C hőmérséklet-emelkedésre vitelve, mint a melegítési kísérletek, ami óvatosságra int az eredmények interpretálása során. Akár azonoság, akár eltérés van a különböző módszerekkel kapott eredmények között, több módszer párhuzamos alkalmazása mindenképpen hozzájárulhat a klímaváltozásra adott válaszok jobb megértéséhez.

Összefoglalva elmondható, hogy a klímaváltozásnak sokféle hatása figyelhető meg már jelenleg is a növényvilágban: fenológiai és produkcióbéli változások, a vegetáció összetételének változása, az egyes fajok vagy vegetációtípusok elterjedési határainak elmozdulása. A hatások legtisztábban a tundrán és a hegységben figyelhetők meg. A jövőben egyre több és markánsabb változásra számíthatunk a növényzetben, köztük fokozatos, kis lépésekben történő változásokra, de hirtelen bekövetkező, drasztikus átalakulásokra is. Mivel ezek a változások földtörténeti léptékkal nézve nagyon gyorsak, továbbá más negatív folyamatokkal párhuzamosan zajlanak egy mára már erősen átalakított földfelszínen, ez nagy eséllyel a vegetáció gyorsuló leromlását, eljellegtelenedését, és biotikus homogenizációt jelent. Ennek csökkentésére a természetvédelem adta minden lehetőséget fel kell használni, de hosszabb távon a legfontosabb a klímaváltozás mértékének csökkentése lenne.