

A klímaváltozás hatása a zonális fafajok egészségi állapotára és elterjedésére

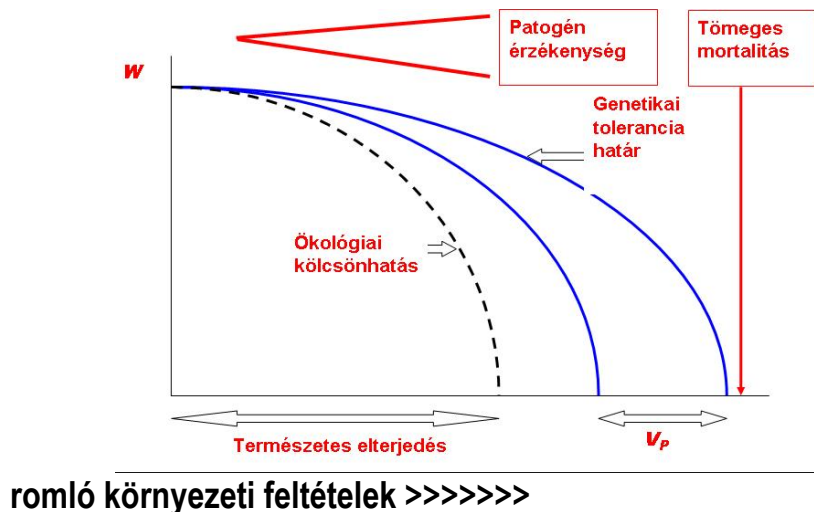
Mátyás Csaba

1. Bevezetés: a megoldandó probléma

Magyarországon (és általában Délkelet-Európa jelentős részén) a zárt koronaszintű erdei ökoszisztémák létfeltételének a határán vagyunk. A kontinens ezen részén, főleg a domb- és síkvidékeken a csapadék, a vízellátás képezi a vegetáció minimumfaktorát. Valamennyi állományalkotó és domináns, egyúttal fontos gazdasági fafaj tekintetében is megállapíthatjuk, hogy a magyarországi előfordulásuk a faji elterjedés alsó ökológiai határán van. A klímaváltozási forgatókönyvek által előre jelzett szárazodás ezért komoly veszélyforrás. A felkészüléshez a várható következmények pontosabb ismerete elengedhetetlen.

2. A klímaváltozáshoz alkalmazkodás természetközeli környezetben: a munkahipotézis

A klímaváltozás természeti (spontán) következményei tekintetében az idő lépték meghatározó. Ellentétben az Európa- (sőt világ-)szerte elfogadott koncepcióval, az erdő esetében spontán fajcserére nem kerülhet sor, a csak elvileg lehetséges migráció (fajvándorlás) a fás növények esetében egy nagyságrenddel (10x) lassúbb mint az előre jelzett változás sebessége. Az alkalmazkodás további spontán lehetőségei közül ezért középtávon az adott faj populációi szintjén megnyilvánuló tolerancia, a populáció fenotipikus plaszticitása, továbbá az öngyérüléssel megvalósuló, genetikai adaptáció jöhet számításba. A plaszticitás ill. adaptációs készség normális határait túllépő hatások következménye az egészségi állapot (kondíció) romlása, a versenyképesség (rátermettség) elvesztése és végül a pusztulás (1. ábra).



1. ábra. A populáció tolerancia és stabilitás ökológiai- genetikai modellje (munkahipotézis). Romló feltételek mellett a rátermettség (W) és a tolerancia rohamosan csökken, a szelekciós nyomás erősödik. A mortalitás a genetikai változatosságon (V_p) belül szelektíven lép fel.

Tekintettel arra, hogy a klímazonális erdőtakarót több évtizede érinti az aszályosság erősödése, feltételezhetőnek tűnt, hogy a vitalitás romlása a hazai erdőállományok növekedése elemzéséből, országos adatok alapján kimutatható. Egyidejűleg közös tenyészkerti kísérleteket is elemzésbe vontunk a megváltozott feltételekre adott válaszreakciók modellezésére, és konkrét előrejelzések megfogalmazására.

3. Állományalkotó, klímaindikátor (zonális) fafajok vitalitásának vizsgálata

A természetközeli erdőállományok fontos domináns, klímaindikátor fafajai a kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea* LIEBL.), a cser (*Quercus cerris* L.) és a bükk (*Fagus sylvatica* L.). Megvizsgáltuk, hogy **milyen módon jelentkezik a klíma szárazodásának hatása az előbb említett fafajok vitalitásában** országos szinten, ahol a vitalitást magassági növekedésmenttel jellemeztük. Ennek során az ERTI 30-40 évvel ezelőtt gyűjtött fatermési adatait vetettük egybe az Állami Erdészeti Szolgálat által az FNM (Faállományok Növedékének Megfigyelése) monitoring rendszer keretében 10 év óta gyűjtött faállomány adatokkal. Ezáltal lehetőség nyílt a jelenlegi növedéktrendek egybevetésére a több évtizeddel korábbiakkal.

Kocsánytalan tölgy

Az FNM felvételek átlagmagasság-adataiból számított trendvonal mintegy 50 éves korig átlagosan 1–1,5 méterrel a fatermési táblák trendvonala felett halad. Ezt követően 100 éves korig a mageredetű fatermési tábla trendvonalával szinte teljes mértékben megegyezik.

Ez mindenképpen arra utal, hogy az elmúlt 10 év során a kocsánytalan tölgyesek átlagos magassága, illetve magassági növekedésmentje nem haladta meg szignifikánsan az 1960–1980 időszakban mért faállomány-adatok alapján megállapított országos átlagértékeket, **vagyis az elmúlt 30–40 év során a szóban forgó adatok egybevetése nem utal szignifikánsan nagyobb magassági növekedésre, de növedékviSSzaesésre sem.**

Csertölgy

Az FNM adatokra szerkesztett trendvonal átlagosan 1 méterrel magasabb a fatermési tábla (1983) adataira szerkesztett trendvonalnál. Miután a szóban forgó cser fatermési tábla az 1962–1982. időszakból származó faállomány-felvételi adatokon alapulnak, megállapítható, hogy a cser faállományok átlagmagassága az 1993–2003 időszakban átlagosan mintegy **1 méterrel haladja meg az 1962–1982 időszakban mért átlag-magasság adatokat.**

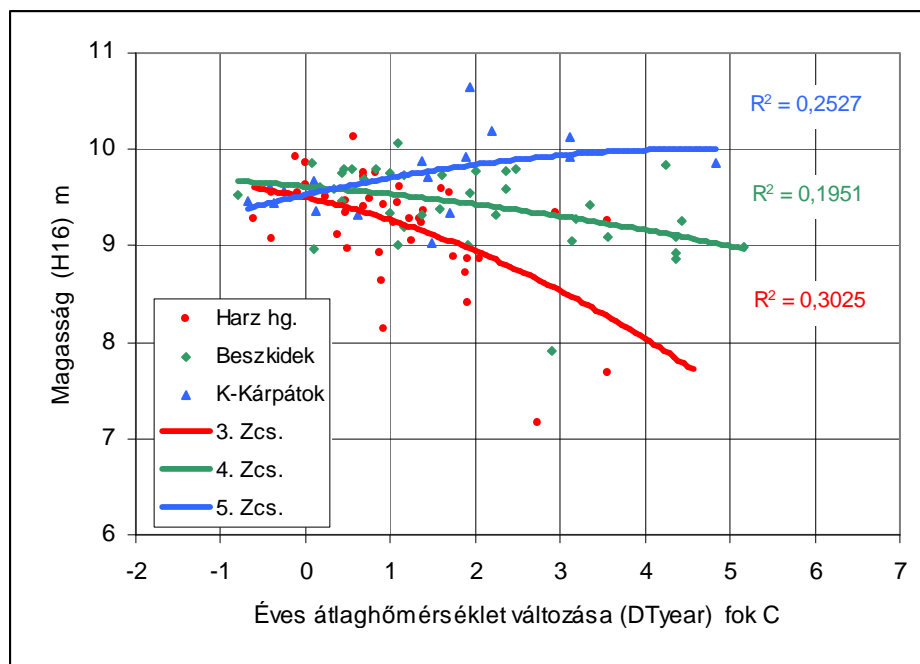
Bükk

Az FNM faállomány-felvételek átlagmagasság-adatainak növekedésmentjei alapján kimondható, hogy tartományuk legalább egy fatermési osztállyal meghaladja az országos fatermési tábla adattartományát (!). Miután a szóban forgó bükk fatermési tábla az 1962–1982. időszakból származó faállomány-felvételi adatokon alapulnak, megállapítható, hogy a bükk faállományok átlagmagassága **az 1993–2003 időszakban átlagosan mintegy 4-5 méterrel haladja meg az 1962–1982 időszakban mért átlagmagasság adatokat.** Feltétlenül fel szeretnénk azonban hívni a figyelmet, hogy ez az igen jelentősnek mondható eltérés **nem feltétlenül a növedékgyorsulással magyarázható**, bár nem kizárt, hogy ez a folyamat is szerepet játszik ebben a jelenségben. A kérdés egyértelmű tisztázása végett mindenekelőtt meg kell vizsgálni azt, hogy a fatermési tábla szerkesztésének alapját képező hosszúlejáratú minta-területek megfelelően képviselik-e az országos átlagot. Ugyanakkor a cser és kocsánytalan tölgy között mért reakciókülönbség valószínűsíthető.

4. Produkció előrejelzése származási kísérletek alapján

Az erdei- és lucfenyő valamint a bükk közös tenyészkeri kísérletek igazolják, hogy a vizsgált fajok az elterjedési területen belül az eltérő termikus viszonyokhoz eltérő módon alkalmazkodtak, ennek megfelelően a tenyészkerben, egységes klimatikus feltételek mellett a magassági növekedésben megnyilvánuló válaszreakciójuk specifikus, és egyszerű regressziós függvénnyel leírható. Az elmúlt években végzett vizsgálatokból az is kiderült, hogy az egyes klimatikus paraméterekkel szembeni érzékenység is földrajzi körzetenként változó.

Az elemzések kimutatták, hogy a *fenotípusos plaszticitás* (fenotípusos alkalmazkodóképesség) nemcsak genetikailag meghatározott, populáció specifikus tulajdonság, hanem bizonyos földrajzi térségekben *jellegzetes evolúciós eltéréseket mutat*. Példaként a lucfenyő 16 éves kori magassága reakcióját mutatjuk be három kiválasztott térségre. A 2. ábrán látható, hogy a származási helyhez képest 4°C évi átlag hőmérséklet emelkedés a Keleti-Kárpátok populációi esetén gyakorlatilag változatlan magassági növekedést eredményez. Ugyanakkor a Harz-hegység populációi hasonló hőmérsékletemelkedésre átlagosan 15%-os növekedés-csökkenéssel reagáltak. Azokban az esetekben, ahol a kísérlet klímája megegyezett a populáció eredeti klímájával, mindhárom zónacsoport átlagos növekedése azonos volt ($H_{16} \approx 9,5$ m). Tehát a Keleti-Kárpátok populációi plaszticitása szélesebb (ez a körülmény, más összefüggésben, jó ideje ismert a lucfenyő nemesítésben). A jelenség felhívja a figyelmet a származás-kiválasztás, illetőleg általában a szaporítóanyag-ellenőrzés fontosságára.



2. ábra. Éves átlaghőmérséklet változásának hatása a lucfenyő magassági növekedésére, 16 éves korban. A bemutatott 3 származási csoport fenotípusos plaszticitása jelentős eltéréseket mutat (legjobb: K. Kárpátok).

A fenyő modellfajok elemzéséből az is megállapítható, hogy a helyi viszonyokhoz alkalmazkodott populációk hőmérséklet-emelkedésre adott válaszreakciója szorosan összefügg az elterjedési területen belül elfoglalt helyzetükkel. Az área déli, szárazsági határán előforduló populációk a változásra növekedéscsökkenéssel válaszolnak. A származási kísérletek ezért egyértelműen megerősítik a bevezetőben ismertetett hipotézist.

Várható változások egy egyszerűsített +2°C-os forgatókönyv esetére, luc modellfafajra

A 16 éves korban történt magasságmérések szerint a luckísérlet származásainak több mint 90 %-át kedvezőtlenül érintené a felmelegedés. Még a jó növekedésű, plasztikus származások (Harz) magassága is csökkenne (2. ábra, 1. táblázat). Kivételt képez a Keleti-Kárpátok zónacsoport, mely más országok kísérleteiben is kiválóan alkalmazkodott a megváltozott környezethez. Figyelembe kell azonban venni, hogy a vizsgált helyszín (600 m tszf., Mátra hgys.) a kárpáti populációk számára – a melegedés ellenére – nem jelent pessimumot, és a

jövőbeni feltételezett +2°C feletti melegedést tapasztalt populációk száma csekély. Nagyobb biztonsággal jelez előre a Harz zónacsoport ($R^2=0,30$), átlagosan 6% növedékvesztés, az alsó szélsőérték 21%. Nagyon konzervatív előrebecslésként +2°C melegedésre 10(-15)% *juvenilis növedékvesztés*et prognosztizálhatunk. Ez az érték a kísérletnél kedvezőtlenebb helyszíneken, pl. Nyugat-Magyarországon várhatóan rosszabb lesz.

1. táblázat Magassági növekedés változása 2° C felmelegedés esetén. (Az adatok a zónacsoportba sorolt származások 16 éves kori átlagára vonatkoznak!)

Zónacsoport	Magasság (H_{16})			
	Jelenlegi klímában		+ 2° C változás	
	m	%	m	%
3. Harz-hegység	9,5	100	8,9	94 (min.79)
5. Kelet-Kárpátok	9,5	100	9,8	103

A 10%-os növedék visszaesést a kompetíciós készség elvesztéseként értelmezhetjük, míg a 15% a tolerancia veszélyes lecsökkenését jelzi. Ebben a helyzetben fellépő klimatikus szélsőségek tömeges mortalitást válthatnak ki. Hasonló eredményeket kaptunk az erdeifenyő származási kísérletek elemzéséből is.

Az elvégzett elemzés alapján igazolható, hogy a növedék ellentmondásos alakulását Európában (lassulás és gyorsulás egyidejűsége) jól magyarázzák a közös tenyészkerti kísérletek. Ugyanakkor viszont az eddigi vizsgálatok még nem voltak elegendőek arra, hogy a genetikai toleranciahatár pontosabb meghatározását lehetővé tegyék. Ehhez a vizsgálatok folytatására van szükség.

A terepi kísérletek tapasztalatai alapot szolgáltatnak arra, hogy az egységesen feltételezett +2°C hőmérséklet emelkedési scenárióra valószínűsítsük a növedék visszaesését azokon a kedvezőbb adottságú területeken is, ahol jelenleg gyorsulás mérhető.

Jelentősebb mortalitás fellépése az alábbi tényezők függvénye:

- azonos klimatikus feltételek mellett a fafajok a klimatikus szárazodásra érzékenység sorrendjében reagálnak, azaz legelőször a bükk, majd a kocsánytalan tölgy és végül a cser,
- a mortalitás fellépésére egymást követő szárazságesemények nyomában kell számítani,
- a károk a klíma változásának leginkább kitett területeken jelentkeznek, egyrészt az ariditási elterjedési határ közelében, illetve ott, ahol a korábbi időszakokhoz képest leggyorsabb a klíma kedvezőtlenre fordulása.

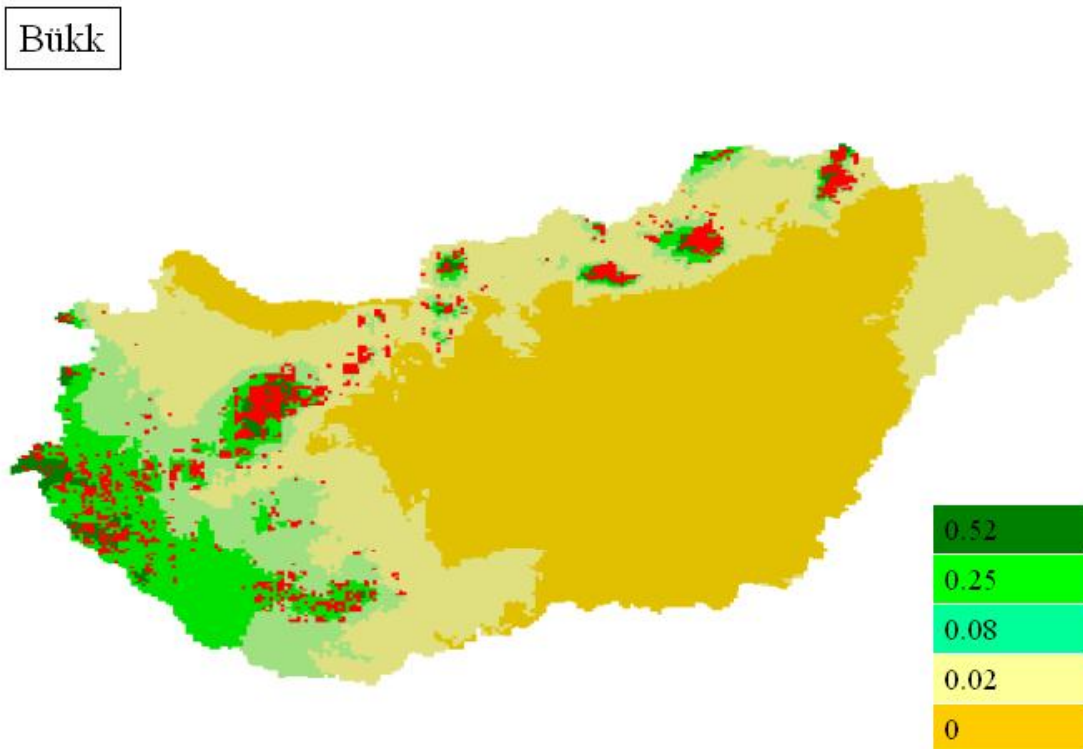
5. Bioklimatikus modellezés

A modellezés célja elsősorban az állományalkotó, domináns fafajok előfordulási (tolerancia-) határainak, valamint ezek jövőben várható (különböző scenárióknak megfelelő) elmozdulásainak térbeli megjelenítése.

A modellhez felhasznált bemenő adatok az ÁESZ-től (erdőrészlet szintű faállomány jellemzők) származnak. A felhasznált erdészeti adatokat többszörös szűrésnek vetettük alá. Az elemzésbe csak a klímajellemző fafajokat, és csak a zonálisnak tekinthető előfordulásokat vontuk be.

A klimatikus paraméterek és a faállomány típusok közötti összefüggések meghatározásához és térbeli megjelenítéséhez többféle módszert használtunk, többszörös regressziós modellt, az ún. fuzzy-logikára épülő számításokat, és az ún. "Classification Tree Analysis" (CTA) módszert. Utóbbi módszerrel kaptuk a legjobban leíró modelleket. A kapott modell megbízhatóságát a ROC-görbék módszerével ellenőriztük.

A jelenlegi projekt során elsősorban a bükk által dominált erdőtípus elterjedésével foglalkoztunk részletesebben, mivel a bükk klímaérzékenysége közismerten nagy. A kapott modellek alapján megállapítható, hogy a *bükk elterjedését a nyári középhőmérséklet és az éves csapadék hányadosaként számított Ellenberg index-szel lehet legjobban értelmezni*. A modellnek a klimatikus változók adatbázisa segítségével történő térbeli kiterjesztése után megrajzolt térkép tájékoztat arról, hogy Magyarország különböző pontjain mekkora valószínűséggel fordulhat elő bükk által dominált erdőrészlet (3.ábra). A modell megbízhatósága "jó".



3. ábra. A bükk előrejelzett előfordulási valószínűsége a CTA modell alapján a jelenlegi klímaviszonyokra. A piros négyzetek a tényleges előfordulásokat jelölik.

6. Genetikailag meghatározott alkalmazkodási válaszreakciók: a kísérletek általános tanulságai

A közös tenyészkertek kvantitatív adatainak elemzése megerősíti, hogy lehetőség van az előrejelzett klimatikus forgatókönyvek hatásának szimulálására. A rátermettség fontos jellemzőire vonatkozóan (pl. növekedés, fenológia, betegség-tolerancia) a fajok határozott klimatikus alkalmazkodottságot mutatnak, ennek mintázata fajonként eltérő. A klímaváltozás esetére *nem lehet az egyes fajokra sem egységes reakciót feltételezni. Fajon belül a populáció válaszreakciója az áréában elfoglalt helyszíntől függ.*

Általánosságban, a faj elterjedés ariditási (szárazsági), vagyis alsó határán a melegebb növedék visszaesést és növekvő mortalitást eredményez, a kísérleti területek adatai szerint. Az elterjedés kellően humid részén, illetőleg a termikus (felső) határon változatlan növekedés, vagy növedékgyorsulás várható.

Ugyanez a jelenség finomabb léptékben, az országon belül is érvényesül: a szárazodás hatása a klimatikus határhelyzetektől távolodva csökken, tehát *a válaszreakció helyszíntől*

függően változik. Egy feltételezett 2°C-os hőmérséklet emelkedés esetére egyelőre annyit állapíthatunk meg, hogy a nedvességre különösen érzékeny bükk esetében a teljes magyarországi dombvidéki előfordulás komoly veszélyeztetettsége valószínűsíthető mind egészségi állapot, mind növekedés tekintetében. A növedék visszaesés a többi fafajt is érinteni fogja, érzékenyséjük és aktuális termőhelyük függvényében.

A fenyőfajokkal végzett terepi kísérletek szerint ***a jelenleg viszonylag kedvezőnek tekinthető termőhelyeken a feltételezett melegedés 15-20%-os növedék visszaesést fog előidézni. Az optimumtól távoli, szélső helyzetű állományokban fellépő tömeges mortalitást a kísérleti adatok ugyancsak igazolják.***

A melegedéssel együttjár a fenológiai fázisok eltolódása is. Vizsgálataink szerint a lehetséges eltolódás mértéke jelentősen meghaladhatja a fajon belül jelenleg kimutatott fenológiai különbségek mértékét. Bükk esetében szélsőséges esetben akár 40 nap eltérés is lehetséges. A kardinális fenológiai időpontok megváltozása a fogyasztó szervezetek, patogének virulenciájára, és szinkronitásuk módosulására ma még felbecsülhetetlen hatással lesz.

Tekintettel arra, hogy a következő évtizedekben várható változások a jelenlegi faállományok legalább felét (a jelenleg még középkorú és annál fiatalabb állományokat) érinteni fogják, az alkalmazkodás lehetősége elsősorban a *fenotípusos plaszticitás* mértékén fog múlni. Ezen tulajdonság fokozott figyelembevétele és további vizsgálata ezért nagyon lényeges és fontos.

A szárazság okozta stressz és a fogyasztók károsításának előrejelzett fokozódása miatt az alkalmazkodó- és ellenállóképesség megőrzése elsőrendű feladattá lép elő. Ez a szaporítóanyag felhasználás genetikai szempontjainak felülvizsgálatát és érvényesítését, és ezen elvek erdőművelésbe való átültetését kívánja meg.

7. Az erdészeti klímazónák várható elmozdulása

A vegetációváltozás modellezésének alapjául az erdőtakarót ma meghatározó éghajlati paraméterek szolgálták. A korábbi eredményekből (Mátyás – Czimber, 2000; Berki és tsai, 2000) már megállapítható, hogy a melegedés és szárazodás súlyosan érintheti a Dunántúl eladdig kedvezőbb klímájú területeit. Az erdőssztyep az Észak-Dunántúlon Szombathely-Körmend vonaláig hatolna előre, „beolvasztaná” az egész Vértest. A Dél-Dunántúlon elsztyeppesedne az egész külső Somogy, Kaposvár-Szigetvár vonaláig. Az Északi-hegyvidéken a változások kevésbé drámaiak. Kivételt képez a Bükk és a Sátor-hegység közé eső dombvidék, egészen a Tornai karsztig.

A vizsgálatok szerint az erdőssztyep klíma országos kiterjedése az alábbiak szerint változhat:

2. táblázat. A potenciális erdőssztyep klímájú terület változása Mátyás – Czimber modellje alapján¹

	erdőssztyep_jelen	erdőssztyep_jövő
mill. ha	4,92	7,53
% (ország ter.)	52,9	81,0

A táblázat szerint ***az erdőssztyep potenciális kiterjedése több mint másfélszeresére növekedne.***

A hőmérséklet-emelkedés által elsődlegesen érintett zonális erdőtakaró faállományai a síkvidékeket környező dunántúli dombvidékek cseres-kocsánytalan tölgyesei és a (szárazsági) elterjedési határ közelében fekvő bükkösök lesznek. Jelenleg a bükk potenciálisan az ország

¹ eredeti scenárió: 1,3 °C nyári hőmérséklet-emelkedés és 66 mm csapadék csökkenés

területének 2,4 %-án (222.000 ha) fordulhat elő modellünk szerint. **A melegedési forgatókönyvre ez a terület 0,1 %-ra (7.300 ha) ill. az eredeti potenciális terület 3 %-ára csökkenne!** Az előrejelzett kb. 2°C-os nyári hőmérséklet-emelkedés alapján várható, hogy a bükk uralkodó (elegyarány>50%) fafajként nem, csak elegyként fordul majd elő.

A potenciális területváltozások ismertített mértéke nem jelent azonnali, hanem késleltetett ill. indirekt hatások által kiváltott pusztulást. A percisztencia jelensége miatt a fafajok elterjedésének határvonala *időbeli késéssel követi a klímazóna terület térbeli változását*. A „korrekció” a szélsőséges évek halmozódása idején történik, tömeges pusztulás formájában. Az eredmények felhívják a figyelmet arra, hogy a klímaváltozással a nyolcvanas-kilencvenes években tapasztalt tömeges mortalitás ismételt fellépése várható, amire sokoldalúan célszerű felkészülni.

8. Összefoglalás

A 2003 évben megkezdett klímaváltozás- és produkció vizsgálatok eredményei arra utaltak, hogy a kiválasztott terepi monitoring pontok összesített értékelése alapján a vizsgált fafajok esetében *általános növedékcsökkenés egyelőre nem mutatható ki*. Különösen meglepő, hogy a bükk esetében erőteljes növedékgyorsulást jeleznek az adatok, amelynek valóságát azonban további vizsgálatokkal kell megerősíteni. (Egyelőre egy nem azonosított metodikai hiba valószínűsége nagyobb.)

A rendelkezésre álló származási kísérletek elemzése alapján több modellfajra (erdei, lucfenyő és bükk) próbaképpen alkalmaztuk a klímaváltozás produkcióra gyakorolt hatásának előrejelzését. Az eredmény megerősíti, hogy a klimatikus paraméterek változtatásával az elterjedési terület különböző pontjain a produkció (növedék) változása eltérő trendeket mutat. Legerősebb csökkenés az elterjedési terület déli peremén várható, ez megfelel az elméleti elvárásoknak.

Ezeket az előrejelzéseket megerősíti a bükkre számított bioklíma-modell. Eszerint a potenciális termesztési terület 2°C hőmérsékletemelkedés esetén a jelenleginek mindössze 3%-ára szorul vissza. A kimutatott változás az erdőssztyep-terület alakulására számított korábbi adatokkal összhangban van.

Kiemelendő, hogy a modellezés rámutat arra, hogy a zonális erdőtakaró veszélyeztetettsége országosan nem azonos mértékű. Különösen nagy veszélyben vannak a Dél-Dunántúl értékesebb gyertyános tölgyes és bükkös társulásai.

A kutatási eredmények alapján az erdőművelésben megvalósítandó két legfontosabb feladat a minél takarékosabb vízforgalom biztosítása, valamint az alkalmazkodóképesség javítása faji és genetikai szinten egyaránt.

Központi szerepet kell kapjon a faállomány tartós stabilitásának megőrzése, ami valószínűleg csak az emberi beavatkozások további fenntartásával valósítható meg. Az eredmények alapján nem lehet kétséges, hogy mindazokon a területeken, amelyek hosszabb távú, évtizedes tervezést igényelnek, haladék nélkül végig kell gondolni a lehetséges forgatókönyvek megvalósulása esetére alkalmazandó stratégiákat. A tanulságok levonása az egyes szakterületek nehezen halasztható feladata.

Megjegyzés

A zárójelentésben ismertített eredmények nemzetközi újdonságértéke magas, egyelőre azok igényes publikálására nem kerülhetett sor. A következő 1-2 évben több tanulmányt tervezünk megjelentetni impaktos folyóiratokban az egyes részművekből, ahol az OTKA támogatását fel fogjuk tüntetni.