

ALKALMAZOTT ELEMZÉSI MÓDSZEREK A KÖRNYEZETI TÉNYEZŐK FÁK NÖVEKEDÉSÉRE GYAKOROLT HATÁSÁNAK VIZSGÁLATÁBAN

Manninger Miklós¹, Edelenyi Márton², Pödör Zoltán³ és Jereb László²

¹*Erdészeti Tudományos Intézet*

²*Nyugat-magyarországi Egyetem, Faipari Mérnöki Kar*

³*Nyugat-magyarországi Egyetem, Erdőmérnöki Kar*

Kivonat

A fák növekedésének vizsgálata az erdészeti kutatások egyik központi témája. A klímaváltozással kapcsolatos tanulmányok további ösztönzést adnak a környezeti tényezők és a növekedés összefüggéseinek vizsgálatához. A szakirodalmi áttekintés az anyagok meghatározott szempontok szerinti kiválasztása után az utóbbi évtized ebben a témában megjelent hazai és európai cikkeit foglalja össze a vizsgált paraméterek (földrajzi eloszlás, fajok, meteorológia paraméterek, növekedési adatok) és azok értékelésekor alkalmazott statisztikai eljárásokat illetően.

Kulcsszavak: növekedés, klímaváltozók, mérési és elemzési módszerek

OVERVIEW OF THE APPLIED METHODS IN THE RESEARCH OF THE IMPACT OF ENVIRONMENTAL FACTORS ON TREE GROWTH

Abstract

Investigation of tree growth is one of the main issues in forest research. The climate change studies provide further motivation to examine relationship between tree growth and environmental factors. The review of selected articles published in the last decades in Hungary and Europe summarizes the data (geographical distribution, tree species, meteorological parameters, different growth data) used in the evaluations and the applied mathematical and statistical procedures.

Keywords: tree growth, climatic factors, methods of measurements and evaluation



BEVEZETÉS

A fák növekedési folyamata régóta az erdészeti kutatások fontos területe. Ma a kutatási téma aktualitását – tágabban értelmezve – a klímaváltozás vizsgálata adja. A környezeti tényezőknek a fák növekedésére gyakorolt hatása közvetlenül nem szolgáltat érveket a klímaváltozás mellett vagy épp ellene, de mindenképpen segít helyükre tenni azoknak a lehetséges (prognosztizált) változásoknak a hatásait, amelyek a szak-sajtóban és a közmédiában is nagy nyilvánosságot kapnak.

A kiemelt érdeklődés, melyet a nagyszámú kutatás jelez, indokolja a szakirodalmi áttekintés fontosságát, és ezen belül külön is érdekes, hogy az utóbbi időszak publikációi egyre összetettebb statisztikai-informatikai eszközöket alkalmaznak a vizsgálatok során. Jelen áttekintésben a hazai és az európai vonatkozású, az ezredfordulótól napjainkig megjelent cikkeket vesszük figyelembe. A szakirodalmi áttekintés lehetőségét az teremtette meg, hogy az Erdészeti Tudományos Intézet által működtetett intenzív monitoring adataival a szerzők már több közös elemzést végeztek.

Az áttekintés témája sok szakterületet érint, maguk a környezeti tényezők is számosak lehetnek, és a növekedés fogalma is elég tág. A fák növekedését is többféle módon jellemezhetjük. Cikkünkben azokkal a kutatásokkal foglalkozunk, amelyek a növekedést az átmérő változásaként definiálják függetlenül attól, hogy ezt az adatot közvetlenül mérik (átmérő-, illetve kerületmérés) vagy származtatják (évvgyűrelemzés).

A sokféle környezeti tényező közül a léghőmérsékletet és a csapadékot, tehát a két legáltalánosabban használt meteorológiai tényezőt emeltük ki. Ezen belül is külön figyelmet fordítottunk az olyan publikációkra, amelyekben e tényezők valamilyen időszaki és/vagy késleltetett hatásait vizsgálták.

Figyelembe véve a rendkívül széleskörű szakirodalmat és saját kutatási előzményeinket, az áttekintésből ki kellett hagynunk a témához köthető, de a fenti szempontoknak csak részben megfelelő cikkeket, így például azokat, amelyek a magassági növekedésre gyakorolt hatásokat vizsgálták. Ugyanígy kiestek az áttekintésből azok is, melyek a felsorolt tényezők közül vagy a növekedést vagy a meteorológiai jellemzőket nem elemezték. Ezek közé tartoznak az önálló növekedési modellekkel foglalkozó cikkek (pl. Biondi és Waikul 2004, Monty és mtsai 2008), és ugyancsak nem vettük a részletesebb feldolgozás során figyelembe azokat sem, melyek általánosságban, elméleti szinten fogalmazták meg a fák növekedésének és a környezeti tényezőknek az összefüggéseit.

A hazai szak-sajtóban a listában szereplőkön túl számos további cikk jelent meg a témakörhöz kapcsolódóan (Szabados 2007, Somogyi 2008, Nagy 2009, Mátyás és mtsai 2010), de a kiválasztási feltételek miatt ezek kikerültek a feldolgozási körből.

A részletesebb elemzés összesen 30, köztük 4 magyar és 26 külföldi cikkre alapoz. Az értékelés során először összefoglaljuk a vizsgálatok lényegesebb bemeneti adatait, majd áttekintjük az egyes vizsgálatok céljait és az értékelés során felhasznált módszereket, végül röviden megfogalmazzuk legfontosabb következtetéseinket.

AZ ELEMZÉSEKBE ALKALMAZOTT BEMENETI ADATOK

Ebben a fejezetben a növekedés és a környezeti tényezők kapcsolatának vizsgálatában alkalmazott adatokat tekintjük át. Ismertetjük a vizsgált területek földrajzi eloszlását, az értékelésekbe bevont fafajokat, a felhasznált meteorológiai és növekedési adatokat, külön kiemelve a kutatások egyéni jellemzőit. Az adatokat és az alkalmazott módszereket az 1. táblázatban foglaljuk össze. A táblázatban megadjuk a kutatások alapvető célkitűzésén (növekedés-környezeti tényezők vizsgálata) túli további értékelési szempontokat is.

1. táblázat: Az ismertetett adatok és módszerek összefoglalása
 Table 1: Overview of the input data and the applied methods

Szerzők	Helyszín	Fafaj	Az alapvető vizsgálati célkitűzést kiegészítő szempontok	Meteorológiai adatok			Növekedési adat forrása	Módszer
				paraméter	felbontás	mérőállomás		
Bogino és mtsai (2009)	Spanyolország	EF	a kor hatása, az aszályosság szerepe	PR, T	havi	közeli	növedékcsp	2, 4
Bouriaud és mtsai (2005)	Franciaország	LF	fasűrűség, a vízhiány és a növekedés kapcsolata, napi és éves növekedésment	PR, T, T_{min} , T_{max} , GR, VPD	napi	helyi	dendrométer	1
Briffa és mtsai (2002)	északi félgömb	fenyők	a földrajzi elhelyezkedés szerepe	PR, T	havi, időszaki	interpolált adat	növedékcsp	1, 5
Büntgen és mtsai (2006)	Svájc	LF	az aszályosság szerepe	PR, T	havi, éves	helyi és közeli	növedékcsp, korong	2, 7
Büntgen és mtsai (2007)	Szlovákia, Lengyelország	LF, VF, JF, TF	tengerszint feletti magasság	PR, T	havi, időszaki	modell	növedékcsp	1,5
Carrer és Urbinati (2001)	Olaszország	VF, LF, CF	elemzési módszerek összehasonlítása	PR, T, T_{min} , T_{max} , NRD	havi	közeli	növedékcsp	2, 4, 9
Čufar és mtsai (2008)	Szlovénia	B	a fenológia bevonása	PR, T, T_{min} , T_{max}	havi	közeli	korong	2
Feliksik és Wilczyński (2009)	Lengyelország	LF, EF, DF, SZIF, JF	a növekedés és a fafaj összefüggése	PR, T	havi	közeli	növedékcsp	1, 5, 6
Gutiérrez és mtsai (2011)	Spanyolország	MALT	napi és havi növekedésment	PR, T, T_{min} , T_{max} , GR	időszaki	közeli	dendrométer	1
Lebourgeois és mtsai (2004)	Franciaország	KTT	extrém évek vizsgálata	PR, T, T_{min} , T_{max} , NRD	havi	közeli	növedékcsp	2, 4
Lebourgeois és mtsai (2005)	Franciaország	B	a vízhiányindex szerepe	PR, T, T_{min} , T_{max} , VPD, GR, WS	havi	közeli	növedékcsp	2, 4, 5
Mäkinen és mtsai (2000)	Finnország	LF	a földrajzi elhelyezkedés hatása	PR, T	havi	interpolált adat	növedékcsp	1, 5
Mäkinen és mtsai (2002)	Németország, Finnország, Norvégia	LF	földrajzi elhelyezkedés és tengerszint feletti magasság	PR, T	havi	közeli, részben interpolált adat	növedékcsp, korong	1, 5
Mäkinen és mtsai (2003)	Németország, Finnország, Norvégia	fenyők	a vegetációs időszak kezdete és vége, földrajzi elhelyezkedés	PR, T, TS	havi	helyi, részben interpolált adat	növedékcsp, korong	1, 5
Manninger (2004)	Magyarország	LF, B, KTT	növekedés-időszaki csapadék	PR	időszaki	helyi	dendrométer	1
Manninger (2004)	Magyarország	EF, FF, KST, SZNY, A	növekedés-időszaki csapadék	PR	időszaki	helyi	dendrométer	1
Martín-Benito és mtsai (2001)	Spanyolország	FF	a szociális helyzet szerepe	PR, T	havi	közeli	növedékcsp	2, 4
Maxime és Hendrik (2008)	Franciaország	JF, B	fafajok közti különbségek, a tengerszint feletti magasság hatása	PR, T, T_{min} , T_{max}	havi	helyi és közeli	növedékcsp	1
Novák és mtsai (2009)	Csehország	EF	az állománysűrűség hatása	PR, T, SPI	havi, időszaki	helyi és közeli	átmérő, növedékcsp	1, 5



1. táblázat (folytatás)
Table 1 (cont.)

Szerzők	Helyszín	Fajaj	Az alapvető vizsgálati célkitűzést kiegészítő szempontok	Meteorológiai adatok			Növekedési adat forrása	Módszer
				paraméter	felbontás	mérőállomás		
Oberhuber és mtsai (2008)	Ausztria	CF	összefüggések időbeni változása	PR, T, T _{min} , T _{max} , GR	időszaki	közeli	növedékcsp	4, 5, 7
Pärn (2003)	Észtország	EF	a légszennyezés hatása	PR, T	havi	közeli	növedékcsp	3
Pichler és Oberhuber (2007)	Ausztria	LF, EF	növekedés és a 2003-as extrém év kapcsolata, fajajok közti különbség	PR, T	időszaki	helyi és közeli	növedékcsp	1, 4
Piovesan és mtsai (2005)	Olaszország	B	a földrajzi elhelyezkedés, a tengerszint feletti magasság hatása	PR, T, T _{min} , T _{max}	havi	közeliből importált adat	növedékcsp	2, 4, 5
Rybníček és mtsai (2005)	Csehország	LF	extrém évek vizsgálata	PR, T	havi	közeli	növedékcsp	1
Savva és mtsai (2006)	Lengyelország	LF	növekedés-időszaki csapadék, tölgypusztulás	PR, T	havi	közeliből származtatott adat	növedékcsp	1
Szabados (2002)	Magyarország	KTT	növekedés-időszaki csapadék, aszályindex	T	havi	közeli, részben interpolált adat	növedékcsp	1
Szabados (2008)	Magyarország	CS	a vegetációs időszak kezdete és vége, földrajzi elhelyezkedés	PR, PAI	havi, időszaki	közeli	növedékcsp	1
Tuovinen (2005)	Finnország	EF	erdőhatáron túli területek vizsgálata	PR, T, T _{min} , T _{max}	havi	közeli	növedékcsp	1, 2
van der Werf és mtsai (2006)	Hollandia	B, KST	éven belüli összefüggések, növekedés-2003-as extrém év kapcsolata, fajajok közti különbségek	PR, T	havi	közeli	szövetminta, (mikró) növedékcsp	2
Wilczynski és Podlaski (2007)	Lengyelország	VG	összefüggések időbeni változása	PR, T	havi	közeli	növedékcsp	2, 4, 7, 8

Fajajok jelölése: LF – lucfenyő, VF – vörösfenyő, CF – cirbolyafenyő, EF – erdeifenyő, JF – jegenyefenyő, TF – törpefenyő, FF – fekete-fenyő, DF – duglaszfenyő, SZIF – szitkafenyő, B – bükk, KTT – kocsánytalan tölgy, KST – kocsányos tölgy, MALT – magyaltölgy, VG – vadgesztenye, CS – csertölgy, SZNY – szürkenyár, A – akác

Paraméterek jelölése: PR – csapadék, PAI – Pálfi-féle súlyozott csapadék, T – átlaghőmérséklet, T_{min} – minimum hőmérséklet, T_{max} – maximum hőmérséklet, TS – hőösszeg, RH – relatív páratartalom, GR – globálsugárzás, WS – szélsősebesség, VPD – páratelítettségi hiány, NRD – csapadékos napok száma, SPI – egyedi időszaki indexek

Módszerek rövidítései: 1 Pearson-féle lineáris korreláció-(regresszió)-elemzés, 2 bootstrap korreláció-elemzés, 3 válaszfüggvény-elemzés, 4 bootstrap válaszfüggvény-elemzés, 5 főkomponens analízis, 6 klaszter analízis, 7 mozgó intervallumok, 8 evolúciós elemzés, 9 neurális háló

A vizsgálatok földrajzi megoszlása

Az áttekintett szakirodalomban a vizsgálatok egész Európára kiterjednek. Az elemzések többnyire egy földrajzi értelemben szűkebben vett régió mintaterületeire vonatkoznak (Carrer és Urbinati 2001, Lebourgeois 2004, Manninger 2004, Bouriaud és mtsai 2005, van der Werf 2007, Wilczynski és Podlaski 2007, Pichler és

Oberhuber 2007, Cufar és mtsai 2008, Oberhuber és mtsai 2008, Felksik és Wilczyński 2009, Gutiérrez és mtsai 2011, Maxime és Hendrik 2011). Egy adott országon belül több régiót vizsgált Szabados (2002), Tuovinen (2005), Manninger (2008), Martín-Benito és mtsai (2008), Szabados (2008), Bogino és mtsai (2009), Novák és mtsai (2010).

Briffa és mtsai (2002) az északi félgömb 387 fenyővel borított mintaterületét (köztük észak- és dél-európaiakat) vették figyelembe kutatásukban. Pärn (2003) három északkelet-észtországi ipari terület közelében lévő, légszennyezett erdő növekedését elemezte. Piovesan és mtsai (2005) az olasz-félsziget bükköseitől kialakított hálózat évgyűrűelemzési adatait tanulmányozták. A hálózat a teljes félszigetet lefedi, és a domboktól a magas hegyekig széles tengerszint feletti magasságtartományban tartalmaz adatokat. Franciaországban Lebourgeois és mtsai (2005) a RENECOFOR hálózat 15 idős, különböző klíma- és talajviszonyokkal jellemezhető bükkös állományát vizsgálták. Savva és mtsai (2006) a Tatra lengyelországi részén 10 különböző tengerszint feletti magasságú terület mintáit használták.

Mäkinen és mtsai (2000), valamint Büntgen és mtsai (2006) egy országon (Finnországon, illetve Svájc) belül szintén több régió adatait vették figyelembe tanulmányukban. Nagyobb földrajzi régióra, Közép- és Észak-Európára vonatkozó megállapításaikat ismertették Mäkinen és mtsai 2002-ben és 2003-ban, míg Büntgen és mtsai (2007) a Tatra lengyel és szlovák részéről származó adatsorokat vizsgálták.

Vizsgált fajok

A feldolgozott cikkekben szereplő fajok közül hazai szempontból nagyobb jelentőségű a tűlevelűek közül az erdeifenyő (7 cikkben vizsgálják), a lombosok közül a bükk (6), a kocsánytalan tölgy (3), a kocsányos tölgy (2), a cser (1), a szürkenyár (1) és az akác (1). Az elemzések leggyakoribb faja a nálunk egyre inkább visszaszoruló lucfenyő (12). A vizsgálatba vont fajok közül hazai előfordulású még a jegenyefenyő (3), a fekete-fenyő (2), a vörösfenyő (2) és a duglaszfenyő (1). Az elemzések Magyarországon erdészeti szempontból kevésbé fontos fajokra is kiterjednek, így a cirbolyafenyőre (2), a törpefenyőre (1), a szitkalucra (1), a magyal-tölgyre (1) és a vadgesztenyére (1).

Környezeti (meteorológiai) adatok

A kutatásokban a hőmérsékleti és csapadékadatokat legtöbb esetben a közeli meteorológiai állomások adataiból, ritkábban modellekből vagy helyben mért adatokból számolták, illetve származtatták. A tanulmányozott cikkekkel kapcsolatban elmondható, hogy a környezeti tényezők és a növekedés kapcsolatának elemzésében a meteorológiai paramétereket leginkább a havi átlagos léghőmérséklet és a havi szabad területi csapadékösszeg képviseli. Az ettől való eltérés – néhány kivételtől eltekintve – a bevont paraméterek számának növelését jelenti.

Többben (Carrer és Urbinati 2001, Lebourgeois és mtsai 2004, Bouriaud és mtsai 2005, Lebourgeois és mtsai 2005, Piovesan és mtsai 2005, Tuovinen 2005, Cufar és mtsai 2008, Gutiérrez és mtsai 2011, Maxime és Hendrik 2011) a hőmérséklet átlaga mellett figyelembe vették a minimumot és a maximumot is. Néhány tanulmány felhasználta a páratelítettségi hiányt (VPD) és a globálsugárzást (Carrer és Urbinati 2001, Lebourgeois és mtsai 2005). Lebourgeois és mtsai (2005), illetve Cufar és mtsai (2008) a csapadékos napok számát is bevonták a vizsgálatokba, valamint utóbbiak fenológiai fázisokat (lombfakadás, lombelszíneződés) is figyelembe vettek. Egy cikkben a szélesebséget is megemlítik (Lebourgeois és mtsai 2005). A két alapvető paraméter közül – a csapadékadatok bizonytalansága miatt – csak a hőmérsékleti adatokat használták Savva és mtsai (2006).

A közvetlen mért meteorológiai paraméterek mellett több esetben származtatott adatokat is használtak az összefüggések keresésekor. Ez lehet új paraméter, például egyedi időszaki mutató, de lehet összevonás is, amire leginkább az időszaki csapadékösszegek hozhatók fel példaként.



Az északi félgömbön végzett vizsgálatokban Briffa és mtsai (2002) a vizsgált év előtti júniustól az adott év szeptemberéig képezték paramétereiket (16 hónap), illetve időszaki összevonásokat is használtak, mint pl. októbertől márciusig és májustól augusztusig. Különbőféle időszaki csapadékösszegek – köztük a Pálfai-féle súlyozott csapadékösszeg – hatását elemezte Szabados (2002, 2008). Mäkinen és mtsai (2003) az egyes állományokra a vegetációs időszak hosszának megállapításához meghatározták az effektív hőösszeget, melyhez minimum hőmérsékletként az 5 °C-ot definiálták. Manninger (2004) a koronán áthulló és a törzsön lefolyó adatokból állományi csapadékot számolt, továbbá az egyes paramétereiket a növekedési (nyugalmi, fő, illetve befejező növekedési) időszakokra is vonatkoztatta. Bouriaud és mtsai (2005) vízháztartási modellből származó vízhiánnyal számoltak. Az osztrák Alpokban végzett elemzéseik során Lebourgeois és mtsai (2005) a részletes napi meteorológiai adatokat más termőhelyi és állományi adatokkal (például potenciális evapotranspiráció és levélfelületi index) kiegészítve egy vízháztartási modellhez használták fel. Az így kapott havi vízhiányindex szorosabb kapcsolatot mutatott, mintha a havi csapadékösszeggel számoltak volna. Büntgen és mtsai (2007) 18 hónapos ablakot képezték a meteorológiai adatokból az előző év májusától az aktuális év októberéig, továbbá többféle időszaki összegzést is vizsgáltak. Az osztrák Alpokban végzett elemzéseik során Pichler és Oberhuber (2007) háromhavi időszaki változókat alkalmaztak a havi átlaghőmérsékletek átlagolásával és a havi csapadékmennyiségek összegzésével. Manninger (2008) az alföldi mintaterületek adatainak értékelésekor is a növekedési (szervesanyag-képzési) időszakok csapadékösszegeit használta. Novák és mtsai (2010) egyedi időszaki csapadék- és hőmérsékleti indexeket vezettek be. Gutiérrez és mtsai (2011) a növekedésmérések előtti 5, 10, 15 és 30 napra határozták meg az időszaki meteorológiai paramétereiket. Maxime és Hendrik (2011) meghatározta a kései fagyok számát április és június között a tengerszint feletti magasság hatásának elemzéséhez.

Növekedési adatok

A növekedéshez felhasznált adatokat alapvetően két módszerrel határozták meg. A legelterjedtebb eljárás az évgyűrűelemzés, melynek mind a terepi, mind a feldolgozási része jól kidolgozott. Az elemzésekhez leggyakrabban növedékcsoport vettek a fából, ritkábban a kidöntött fából vágott korongot használták fel. Egyes kutatásokban az évgyűrűszélességen túl a korai és kései pászta szélességét (Lebourgeois és mtsai 2004, Tuovinen 2005, Lebourgeois és mtsai 2005, Savva és mtsai 2006, van der Werf és mtsai 2006, Pichler és Oberhuber 2007, Martín-Benito és mtsai 2008), olykor sűrűségét (Briffa és mtsai 2002, Büntgen és mtsai 2007) is meghatározták.

A növekedési adatok másik forrása a mellmagassági átmérő, illetve a kerület mérése. Ezek a módszerek a mérések gyakoriságától és az alkalmazott mérőeszközöktől függően az átmérő éven belüli kismértékű változását (növekedés és zsugorodás) is képesek kimutatni, automata mérőeszközök esetén akár a napon belülieket is (Manninger 2004, Bouriaud és mtsai 2005).

Manninger (2004) a kézi és automata kerületmérő szalagokat egyidejűleg alkalmazta. A heti gyakorisággal mért kézi mérőeszközökkel határozta meg az éves kerületnövekedést a vegetációs időszak előtt lemért kezdőkerület arányában, míg az automata szalagok órás adatai alapján értékelte a környezeti tényezők napi hatását.

Bouriaud és mtsai (2005) a törzsön különböző magasságban rögzített, az átmérő változását sugárirányban mérő automata mérőeszközöket (az ún. pontdendrométereket) alkalmaztak. Az órás adatokból konvertálták az éves növekedési görbét, illetve ebből határozták meg az éven belüli vizsgálatok számára az 5 napos növekedési értékeket.

Gutiérrez és mtsai (2011) kézi kerületmérő szalagokkal vizsgálták a növekedést. Az átlagos mintavételezési gyakoriság 28 ± 1 nap volt, de tavasszal és ősszel sűrűbben (17 ± 1 nap), míg nyáron és télen ritkábban (39 ± 2 nap) mértek. A kapott értékeket korrigálták, szűrték, majd havi átmérőváltozást számoltak belőlük. A kerületmérésből számolt évgyűrűszélességeket mintafából vett korongok adataival hasonlították össze.

Novák és mtsai (2010) a növekedést a fiatalabb állományokban az átmérő mérésével, az idősebb állományokban évgyűrűelemzéssel határozták meg.

AZ ÉRTÉKELÉSEKBEN ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

A növekedés és a környezeti tényezők kapcsolatrendszerének vizsgálata az adatok jellege miatt idősorok közti relációk keresését jelenti. A függő változó a növekedési adatsor, míg a független változók a különböző környezeti paraméterek. Néhány cikkben (Manninger 2004, van der Werf és mtsai 2007, Gutiérrez és mtsai 2011) az éven belüli növekedést vizsgálták a meteorológiai paraméterekkel összefüggésben, azonban az áttekintett cikkek többségében éves növekedési adatokat és jellemzően havi bontású meteorológiai paramétereket használtak.

Az elemzések egyik alapvető célja a növekedéssel szignifikáns kapcsolatot mutató havi (időszaki) környezeti paraméterek meghatározása, amihez tehát adott a megfelelő módon képzett függő változó (növekedés) és több környezeti paraméter mint független változó.

Az áttekintett szakirodalom alapján jól körülhatárolhatóak azok az elemzési módszerek, amelyeket akár éves, akár éven belüli növekedés esetén a fenti összefüggés-elemzésekben alkalmaztak. Az adatsorok időbelisége releváns tényező, így az alapmódszer a lineáris korrelációelemzés. Ez önmagában azonban még nem feltétlenül elégséges egy ilyen komplex rendszer vizsgálatára, így a ténylegesen alkalmazott módszerek ennek az alaptéchnikának valamiféle továbbfejlesztései. Áttekintésünkben megemlítünk még olyan speciális módszereket is, amelyeket nemcsak közvetlenül az elemzésben, hanem pl. az adatsorok előkészítésében (évgyűrűadatok csoportosítása) is alkalmaztak.

Főkomponens analízis, klaszterelemzés

A két módszer adatok előkészítése során is alkalmazható. A vizsgálatokhoz szükség van a faegyedek növekedési adataiból előállított fajfajra (régiora stb.) vonatkozó összevont növekedési adatokra. Az egységes növekedési mutató képzésére a legegyszerűbb lehetőség az átlagolás lenne. Ennek a módszernek azonban több hátránya is van, ugyanis elfedi a különböző mértékű növekedést produkáló egyedek közti különbségeket, illetve az egyéb jellegű különbözőségeket (domináns-alászorult egyedek, különböző klímaviszonyok stb.).

Amennyiben nem áll rendelkezésre kötött csoportosítási szempont, akkor valamilyen módon nekünk kell csoportosítani a növekedési adatsorokat és egységes mutatót képezni. Erre az egyik lehetőség a főkomponens elemzés (PCA), amely az adathalmaz leíró eredeti változók lineáris kombinációival képez úgynevezett főkomponenseket. Ezek segítségével adekvát módon leírható az eredeti adathalmaz varianciája.

A módszer egyik nagy előnye az adatredukció, így alkalmas lehet a növekedést reprezentáló évgyűrű adatsorok csoportosítására és egységes növekedési adatsorok előállítására (Mäkinen és mtsai 2000, Briffa és mtsai 2002, Mäkinen és mtsai 2002, Mäkinen és mtsai 2003, Büntgen és mtsai 2007, Oberhuber és mtsai 2008, Novák és mtsai 2010).

Az évgyűrűadatsorok csoportosításának másik lehetséges módja a klaszter-analízis (Piovesan és mtsai 2005), amely egy adathalmaz pontjainak hasonlóság szerinti csoportosítását jelenti.

Feliksik és Wilczyński (2009) az erdei-, a luc-, a duglász-, a szitkaluc- és jegenyefenyő növekedését klaszterelemzéssel vizsgálták, míg a különböző évgyűrűadatsorok közti hasonlóságokat, illetve különbözőségeket meghatározó faktorok kijelölésére főkomponens analízist alkalmaztak.



Pearson-féle lineáris korreláció-elemzés, regresszió-számítás

A statisztikai alkalmazások gyakori problémáját jelentik azok a vizsgálatok, melyek során azt elemezzük, hogy egy vagy több független változó milyen hatással van a függő változóra, milyen erős a kapcsolat közöttük, illetve hogyan írható le függvényyszerűen ez a reláció. A kapcsolatelemzésnek az első fajtája a korreláció-, az utóbbi a regressziószámítás.

A módszer alkalmas a növekedés mint függő változó és külön-külön az egyes havi környezeti paraméterek közti korreláció meghatározására. Rybníček és mtsai (2009) például Csehországban az Orlické-hegység 800 méteres tengerszint feletti magasságban élő lucfenyőinek növekedési adatait vetették így össze a havi meteorológiai komponensekkel.

A vizsgált cikkek között azonban kevés olyan található, amely a lineáris korreláció-elemzést önmagában alkalmazta, mert a cikkek általában tartalmaztak más elemzéseket is. Így például Savva és mtsai (2006) a tengerszint feletti magasság szerepét vizsgálták, illetve Gutiérrez és mtsai (2011) részletesen elemezték az évgűrűadatsorokat. Hasonló vizsgálatot végzett Maxime és Hendrik (2011).

Válaszfüggvény-elemzés

A válaszfüggvény-elemzés (RF) egy speciális többváltozós regressziós technika a havi meteorológiai paraméterekre alkalmazott PCA eredményeként előállított főkomponensek és a növekedési adatok között. Az RF gyakorlatilag az a regressziós egyenlet, amelyet a fenti paraméterekre alkalmazott többváltozós regresszió eredményeként kapunk.

Az RF-elemzés fő célja, hogy a lehető legzártabb módon írja le a környezeti paraméterek és a növekedés közti statisztikai kapcsolatokat, azaz megmutatja, hogy melyek azok a környezeti paraméterek, amelyek hatással vannak a növekedésre, továbbá meghatározza a feltárt kapcsolatok erősségét és irányát.

A módszer lényege a környezeti elemekre vonatkozó PCA alkalmazásában rejlik, ami egyrészt átláthatóbbá teszi az elemzést a független változók számának jelentős csökkentésével, másrészt a kapott főkomponensek növekedéssel való összevetése miatt alkalmas a több, illetve különböző típusú független változók együttes hatásainak elemzésére. Az eljárást Pärn (2003) alkalmazta cikkében. Más cikkek az RF-elemzés kissé módosított, bővített verzióit használták, hogy javítsák a módszer és az együtthatók megbízhatóságát (lásd: a bootstrap-korreláció és válaszfüggvény-elemzés).

Bootstrap-korreláció és válaszfüggvény-elemzés

A regressziós technikák problémája a tesztelhetőség, illetve az együtthatók szignifikanciájának meghatározása. Az alap bootstrap eljárás egy olyan módszer, amely párhuzamosan teszti a regressziós együtthatókat és az RF stabilitását. A módszer lényege, hogy az RF-elemzést sokszor megismételjük az eredeti halmaz különböző részhalmozain. Az ilyen módon javított korreláció- és RF-elemzés rendkívül széles körben használt eljárás a növekedés-klíma kapcsolatrendszer vizsgálatában (Lebourgeois és mtsai 2004 és 2005, Piovesan és mtsai 2005, Büntgen és mtsai 2006, Martín-Benito és mtsai 2008, Bogino és mtsai 2009), hiszen ötvözi a megbízhatóságot a hatékony elemzési módszerrel. A módszer alkalmas annak a meghatározására is, hogy a különböző típusú klímparaméterek közül melyiknek van erősebb hatása a növekedésre, és kijelöli a növekedés szempontjából releváns időintervallumokat is. Carrer és Urbinati (2001) a fenti két módszert a neurális hálókkal vetették össze.

Mozgó időintervallumok vizsgálata, evolúciós módszer

Az evolúciós technika minden egyes lépésben egy-egy évvel növeli a kiinduló adatsor hosszát. Az előre evolúció első lépésében a vizsgált intervallum kezdőpontja az időben legkorábbi adat, majd minden egyes lépésben időben előre haladva növeli a vizsgált adatsor hosszát. Hátra evolúció esetében a vizsgált intervallum kezdőpontja az időben legkésőbbi adat, majd minden egyes lépésben időben visszafelé haladva növeli a vizsgált adatsor hosszát. Mozgó intervallumok esetén rögzíteni kell a vizsgált intervallum hosszát, melynek kezdőpontja az időben legkorábbi adatpont, majd minden egyes lépésben időben egy-egy évvel előbbre ugrik az intervallummal. Mindhárom technika esetében minden egyes lépésre kiszámítjuk a korrelációs együtthatókat, így az eljárás végére korrelációs együtthatók sora áll rendelkezésre, melyek alkalmasak arra, hogy a vizsgált változók közti kapcsolatok hosszú távú időbeli változását vizsgáljuk. Az elemzés feltétele, hogy kellően hosszú adatsorok álljanak rendelkezésre.

Ezzel a módszerrel vizsgálták Büntgen és mtsai (2005), valamint Oberhuber és mtsai (2008) a növekedés és a klíma összefüggéseit a korábbi időszakokhoz képest.

Wilczyński és Podlaski (2007) vadgesztenyefák növekedési adataira korreláció- és RF-elemzést végeztek. A rendelkezésre álló adatsorok hossza (1932–2003) lehetővé tette mozgó intervallumok alkalmazását is, és a 70 éves intervallum három, egymást fedő részintervallumra való felosztásával vizsgálták, hogy a fák egyes életkoraiban mennyire különböznek a növekedési és klímaadatok kapcsolatai.

KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK

A környezeti tényezők (időjárási paraméterek) és a fák növekedése közötti összefüggések vizsgálata olyan önmagában is összetett feladat, amelynek nehézségét tovább fokozzák a hosszú idősorok, a fák állományi szintre vonatkozó növekedésének meghatározása, valamint az újabb paraméterek és indexek bevonása. Ezekhez a soktényezős vizsgálatokhoz komplex eszközök szükségesek. Az áttekintett cikkekben az értékelésekhez a szakterület jól bevált elemzési módszereit alkalmazták.

A felhasznált idősorok hossza alapján jellemzően két módszertani eset különböztethető meg. Rövidebb idősorok esetén rendszerint lineáris korreláció- és válaszfüggvény-elemzést, míg a hosszabbak esetében ezek bootstrap változatait, illetve mozgó intervallumokat és evolúciós technikát használtak.

A cikkekben ismertetett kutatásokban nem volt cél a különböző elemzési lehetőségek összehasonlítása az alkalmazhatóság és a pontosság szempontjából. Azonban a módszerek összevetésére és az értékelések megkönnyítésére létrehozható egy olyan általános informatikai keretrendszer, amely lehetővé teszi a különböző felbontású adatok integrálását, illetve tartalmazza a fentiekben ismertetett elemzési eszközöket. Ez a keretrendszer lehetőséget biztosíthat a módszerek fejlesztésére, valamint új módszerek alkalmazására is.

A vizsgálatokban a legtöbb esetben egyváltozós korrelációelemzést használtak. Indokoltnak tűnik, hogy az egyes változók (pl. időjárási paraméterek) együttes hatását is vizsgáljuk. A feladat megoldására a többváltozós lineáris korrelációelemzés és a parciális korreláció ad lehetőséget.

Több elemzés is alkalmazott különböző paraméterekből képzett időszakos adatokat. Az intervallumok lehatárolása jellemzően korábbi kutatási tapasztalatokon alapul. Úgy látjuk, hogy az informatikai eszköztár segítségével szisztematikus vizsgálatokra is lehetőség nyílna, tehát az eddigieknél lényegesen nagyobb számú kapcsolatot lehetne elemezni. Ez igaz az időszakos időjárási adatok képzésén és a késleltetett hatásokon alapuló vizsgálatokra egyaránt. Többváltozós vizsgálatoknál a szisztematikus elemzés különösen indokolt.

E cikk szerzőinek a továbblépés irányába tett kezdeti próbálkozásait egy elbírálás alatt lévő cikk ismerteti (Edelényi és mtsai 2011).



ÖSSZEFOGLALÁS

A bevezetőben már említett szempontok szerint áttekintett cikkekben alapvetően éves növekedési adat-sorokat vetnek össze jellemzően havi bontású csapadék és hőmérsékleti adatokkal. A növekedési adatok forrásai között meghatározó az évgyűrélemzés, és csak kis részben származnak egyéb mérési módszerekből. Az éves adatok mellett néhány esetben az éven belüli változásokat is vizsgálták. Az évgyűrélemzéseknél ez a korai és kései pászta szélességének meghatározását jelenti, míg az átmérő-, illetve kerületméréseknél a rendszeres, az automatizálás miatt olykor órás felbontású adatok az éven belüli változások vizsgálatát is lehetővé teszik.

A meteorológiai adatok többségét az országos meteorológiai mérőhálózatok állomásai mérték, és csak néhány esetben volt helyi, a mintaterületeken vagy közvetlen közelében végzett mérés. A vizsgálatok egy részében az országos mérőállomások adatait közvetlenül használták fel, más esetekben interpolált vagy modellekből számított adatokkal dolgoztak. A felhasznált adatok a forrásnak megfelelően szabad területi körülményekre vonatkoznak, tehát sem a termőhelyi, sem az állományviszonyokat nem veszik figyelembe. Kivételt ez alól azok a vizsgálatok jelentenek, amelyek a mintaterületi mérések miatt már eleve állományi csapadékkal dolgoztak, vagy amelyek vízháztartási modellek alkalmazásával ezeket a körülményeket is figyelembe vették.

A havi felbontású adatok alapján több esetben a meglévőkből további környezeti paramétereket is képeztek, amelyek lehetnek időszakai összevonások vagy egyedi indexek és más arányszámok is. Néhány esetben további meteorológiai (például hőösszeg) és/vagy más megfigyelési (például fenológiai) adatokat is bevontak az összefüggések elemzésébe. Több publikáció foglalkozott az időjárás paraméterek késleltetett hatásainak növekedésre gyakorolt hatásával úgy, hogy a növekedési adatokat általában az előző év vegetációs időszakának kezdetétől az adott év vegetációs időszakának végéig tartó időszak (14–18 hónap) környezeti paramétereivel vetették össze.

Összefoglalva megállapítható, hogy a cikkek szerzői egyrészt meghatározták azokat az időszakokat, melyek meteorológiai jellemzői összefüggésben vannak a növekedéssel, másrészt elemezték, hogy a vizsgált környezeti paraméterek közül melyiknek van nagyobb hatása. Sok esetben azt is kimutatták, hogy ezek a kapcsolatok hogyan változnak térben (több mintavételi hely esetén) és időben (hosszú adatsorok esetén), illetve több fafaj esetében elemezték a kapcsolatok függését a fafajtól is.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Biondi, F. and Waikul, K. 2004: DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences* 30: 303–311.
- Bogino, S.; Nieto, M. J. F. and Bravo, F. 2009: Climate Effect on Radial Growth of *Pinus sylvestris* at Its Southern and Western Distribution Limits. *Silva Fennica* 43(4): 609–623.
- Bouriaud, O.; Leban, J.M.; Bert, D. and Deleuze, C. 2005: Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce. *Tree Physiology* 25: 651–660.
- Briffa, K. R.; Osborn, J. T.; Schweingruber, H. F.; Jones, D. P.; Shiyatov, G. S. and Vaganov, A. E. 2002: Tree-ring width and density data around the Northern Hemisphere: Part 1, local and regional climate signals. *The Holocene* 12 (6): 737–757.
- Büntgen, U.; Frank C. D.; Schmidhalter, M.; Neuwirth, B.; Seifert, M. and Esper, J. 2006: Growth/climate response shift in a long subalpine spruce chronology. *Trees* 20: 99–110.
- Büntgen, U.; Frank, C. D.; Kaczka, J. R.; Verstege, A.; Zwijacz-Kozica, T. and Esper, J. 2007: Growth responses to climate in a multi-species tree-ring network in the Western Carpathian Tatra Mountains, Poland and Slovakia. *Tree Physiology* 27: 689–702.

- Carrer, M. and Urbinati, C. 2001: Assessing climate-growth relationships: a comparative study between linear and non-linear methods. *Dendrochronologia* 19 (1): 57–65.
- Čufar, K.; Prislán, P.; de Luis, M. and Gričar, K. 2008: Tree-ring variation, wood formation and phenology of beech (*Fagus sylvatica*) from a representative site in Slovenia, SE Central Europe. *Trees* 22: 749–758.
- Edelényi M.; Pödör Z.; Manninger M. és Jereb L. 2011: Transzformált idősorok elemzésének bemutatása erdészeti adatokon (kézirat)
- Feliksik, E. and Wilczyński, S. 2009: The effect of climate on tree-ring chronologies of native and nonnative tree species growing under homogenous site conditions. *Geochronometria* 33: 49–57.
- Gutiérrez, E.; Campelo, F.; Camarero, J.J.; Ribas, M.; Muntán, E.; Nabais, C. and Freitas, H. 2011: Climate controls act at different scales on the seasonal pattern of *Quercus ilex* L. stem radial increments in NE Spain. *Trees*, 25(4): 637–646.
- Lebourgeois, F.; Cousseau, G. and Ducos, Y. 2004: Climate-tree-growth relationships of *Quercus petraea* Mill. stand in the Forest of Bercé ("Futaie des Clos", Sarthe, France). *Annals of Forest Science* 61: 1–12.
- Lebourgeois, F.; Bréda, N.; Ulrich, E. and Granier, A. 2005: Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees* 19: 385–401.
- Mäkinen, H.; Nöjd, P. and Mielikäinen, K. 2000: Climatic signal annual growth variation of Norway spruce (*Picea abies*) along a transect from central Finland to the Arctic timberline. *Canadian Journal of Forest Research* 30: 769–777.
- Mäkinen, H.; Nöjd, P.; Kahle, H. P.; Neumann, U.; Tveite, B.; Mielikäinen, K.; Röhle, H. and Spiecker, H. 2002: Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe. *Forest Ecology and Management* 171: 243–259.
- Mäkinen, H.; Nöjd, P.; Kahle, H. P.; Neumann, U.; Tveite, B.; Mielikäinen, K.; Röhle, H. and Spiecker, H. 2003: Large-scale climatic variability and radial increment variation of *Picea abies* (L.) Karst. in central and northern Europe. *Trees* 17: 173–184.
- Manninger M. 2004: Erdei fák éves és korszaki növekedésmenete és kapcsolódása egyes ökológiai tényezőkhöz. In: Mátyás Cs., Vig P. (ed.): Erdő és Klíma IV., Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron, 151–162.
- Manninger M. 2008: A növekedés és a csapadék összefüggései az alföldi mérések alapján. In: Szulcsán G. (ed.) Kutatói nap, tudományos eredmények a gyakorlatban, Alföldi Erdőkért Egyesület kiadványa, Szeged, 50–53.
- Martín-Benito, D.; Cherubini, P.; del Río, M. and Canellas, I. 2008: Growth response to climate and drought in *Pinus nigra* Arn. trees of different crown classes. *Trees* 22: 363–373.
- Maxime, C. and Hendrik, D. 2011: Effects of climate on diameter growth of co-occurring *Fagus sylvatica* and *Abies alba* along an altitudinal gradient. *Trees* 25: 265–276.
- Mátyás, Cs.; Berki, I.; Czúcz, B.; Gálos, B.; Móríc, N. and Rasztovits, E. 2010: Future of Beech in Southeast Europe from the Perspective of Evolutionary Ecology. *Acta Silvatica & Lignaria Hungarica* 6: 91–110
- Monty, A.; Lejeune, P. and Rondeux, J. 2008: Individual distance-independent girth increment model for Douglas-fir in southern Belgium. *Ecological modelling* 212: 472–479.
- Nagy L. 2009: Éghajlati alkalmazkodóképesség és válaszreakció előrejelzése erdeifenyő (*Pinus sylvestris* L.) populációkon. PhD értekezés (NYME EMK)
- Novák, J.; Slodciák, M.; Kacálek, D. and Dusek, D. 2010: The effect of different stand density on diameter growth response in Scots pine stands in relation to climate situations. *Journal of Forest Science* 56 (10): 461–473.
- Oberhuber, W.; Kofler, W.; Pfeifer, K.; Seeber, A.; Gruber, A. and Wieser, G. 2008: Long-term changes in tree-ring-climate relationships at Mt. Patscherkofel (Tyrol, Austria) since the mid-1980s. *Trees* 22: 31–40.
- Pärn, H. 2003: Radial growth response of Scots pine to climate under dust pollution in Northeast Estonia. *Water, Air, and Soil Pollution* 144: 343–361.
- Pichler, P. and Oberhuber, W. 2007: Radial growth response of coniferous forest trees in an inner Alpine environment to heat-wave in 2003. *Forest Ecology and Management* 242: 688–699.
- Piovesan, G.; Biondi, F.; Bernabei, M.; Di Filippo, A. and Schirone, B. 2005: Spatial and altitudinal bioclimatic zones of the Italian peninsula identified from a beech (*Fagus sylvatica* L.) tree-ring network. *Acta Oecologica* 27: 197–210.
- Rybíček, M.; Cermák, P.; Kolár, T.; Premyslovská, E. and Zid, T. 2009: Influence of temperatures and precipitation on radial increment of Orlické hory Mts. spruce stands at altitudes over 800 m a.s.l. *Journal of Forest Science* 55 (6): 257–263
- Savva, Y.; Oleksyn, J.; Reich B. P.; Tjoelker G. M.; Vaganov A. E. and Modrzyński, J. 2006: Interannual growth response of Norway spruce to climate along an altitudinal gradient in the Tatra Mountains, Poland. *Trees* 20. Springer-Verlag, 735–746.



- Somogyi Z. 2008: Recent Trends of Tree Growth in Relation to Climate Change in Hungary. *Acta Silvatica & Lignaria Hungarica* 4: 17–28
- Szabados I. 2002: Az évgyűrűszélesség és egyes termőhelyi tényezők kapcsolata. PhD értekezés (NYME EMK)
- Szabados I. 2007: Időjárási fluktuáció hatása a produkcióra dendrokronológiai kutatások alapján. In: Mátyás Cs., Vig P. (ed.): *Erdő és Klíma V.*, Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron, 297–306
- Szabados I. 2008: A csapadék hatása a cser évgyűrűméretére *Erdészeti Kutatások* 92: 121–128.
- Tuovinen, M. 2005: Response of tree-ring width and density of *Pinus sylvestris* to climate beyond the continuous northern forest line in Finland. *Dendrochronologia* 22: 83–91.
- van der Werf, G. W.; Sass-Klaassen, G. W. U. and Mohren, G. M. J. 2007: The impact of the 2003 summer drought on the intra-annual growth pattern of beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) on a dry site in the Netherlands. *Dendrochronologia* 25: 103–112.
- Wilczyński, S. and Podlaski, R. 2007: The effect of climate on radial growth of horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.) in the Swietokrzyski National Park in central Poland. *Journal of Forest Research* 12: 24–33.

Érkezett: 2011. május 16.

Közlésre elfogadva: 2011. szeptember 1.