

A klímaváltozás hatása a kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea*) elterjedésére és produkciójára

Doktori (PhD) értekezés

Gulyás Krisztina
okleveles meteorológus
okleveles földtudományi kutató

Tudományos témavezetők:

Dr. Berki Imre: Soproni Egyetem, egyetemi docens
és

Dr. Pongrácz Rita: Eötvös Loránd Tudományegyetem, egyetemi adjunktus

Sopron
2017

A klímaváltozás hatása a kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea*) elterjedésére és produkciójára

Az értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében készült a Soproni Egyetem, Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskolájának (E1) Erdei ökoszisztémák ökológiája és diverzitása programja keretében

Írta:
Gulyás Krisztina

Témavezetők: **Dr. Berki Imre**
Elfogadásra javaslom (igen / nem)

.....
aláírás

Dr. Pongrácz Rita
Elfogadásra javaslom (igen / nem)

.....
aláírás

A jelölt a doktori szigorlaton%-ot ért el.

Sopron,

.....
a Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom (igen / nem)

Első bíráló (Dr.) igen / nem

.....
aláírás

Második bíráló (Dr.) igen / nem

.....
aláírás

Esetleges harmadik bíráló (Dr.) igen / nem

.....
aláírás

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján%-ot ért el.

Sopron,

.....
a Bírálóbizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése:

.....
az EDHT elnöke

NYILATKOZAT

Alulírott **Gulyás Krisztina**, jelen nyilatkozat aláírásával kijelentem, hogy a(z) **A klímaváltozás hatása a kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea*) elterjedésére és produkciójára** című PhD értekezésem önálló munkám, az értekezés készítése során betartottam a szerzői jogról szóló 1999. évi LXXVI. törvény szabályait, valamint a Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskola által előírt, a doktori értekezés készítésére vonatkozó szabályokat, különösen a hivatkozások és idézések tekintetében.¹

Kijelentem továbbá, hogy az értekezés készítése során az önálló kutatómunka kitétel tekintetében témavezető(i)met, illetve a programvezetőt nem tévesztettem meg.

Jelen nyilatkozat aláírásával tudomásul veszem, hogy amennyiben bizonyítható, hogy az értekezést nem magam készítettem, vagy az értekezéssel kapcsolatban szerzői jogsértés ténye merül fel, a Soproni Egyetem megtagadja az értekezés befogadását.

Az értekezés befogadásának megtagadása nem érinti a szerzői jogsértés miatti egyéb (polgári jogi, szabálysértési jogi, büntetőjogi) jogkövetkezményeket.

Sopron, 2017. november 13.

.....
Gulyás Krisztina
.....
doktorjelölt

¹ 1999. évi LXXVI. tv. 34. § (1) **A mű részletét – az átvevő mű jellege és célja által indokolt terjedelemben és az eredetihez híven – a forrás, valamint az ott megjelölt szerző megnevezésével bárki idézheti.**

36. § (1) Nyilvánosan tartott előadások és más hasonló művek részletei, valamint politikai beszédek tájékoztatás céljára – a cél által indokolt terjedelemben – szabadon felhasználhatók. Ilyen felhasználás esetén a forrást – a szerző nevével együtt – fel kell tüntetni, hacsak ez lehetetlennek nem bizonyul.

Tartalom

Kivonat.....	6
Rövidítésjegyzék.....	7
1. BEVEZETÉS.....	9
1.1. Témaválasztás indoklása.....	9
1.2. Kutatás célkitűzései.....	11
2. A KUTATÁSI TÉMA SZAKIRODALMÁNAK ISMERTETÉSE.....	13
2.1. Globális és regionális klímaváltozás.....	13
2.2. Magyarországon jelentkezett változások.....	15
2.3. Éghajlati jövőkép.....	17
2.3.1. <i>Várható regionális változások.....</i>	<i>17</i>
2.3.2. <i>Modell bizonytalanságok.....</i>	<i>19</i>
2.4. Klímaváltozás hatásai az erdőkre.....	21
2.4.1. <i>Klimatikus szélsőségek hatásai.....</i>	<i>22</i>
2.4.2. <i>Fafajok elterjedésének megváltozása.....</i>	<i>26</i>
2.4.3. <i>Növedékben történő változások.....</i>	<i>28</i>
2.4.3.1. <i>Faállományok növekedését mérő-és megfigyelő rendszerek.....</i>	<i>30</i>
2.5. Kocsánytalan tölgy (<i>Quercus petraea</i>) jellemzése.....	34
2.5.1. <i>A vizsgált fafaj jelenlegi elterjedése.....</i>	<i>34</i>
2.5.2. <i>Termőhelyi igényei.....</i>	<i>34</i>
2.5.3. <i>Gazdasági jelentősége.....</i>	<i>35</i>
3. ADATOK ÉS MÓDSZEREK.....	37
3.1. Éghajlati adatbázisok.....	37
3.1.1. <i>Múltbeli éghajlati adatok.....</i>	<i>37</i>
3.1.2. <i>Jövőbeli éghajlati adatok.....</i>	<i>38</i>
3.2. Erdészeti adatbázisok.....	39
3.3. Elterjedés vizsgálatokhoz alkalmazott módszerek.....	43
3.4. Produkció vizsgálatokhoz alkalmazott módszerek.....	51
4. KLÍMA ADATOK KIÉRTÉKELÉSE.....	54
4.1. Az éghajlat változásának alakulása hazánkban 1961-2010 között.....	54
4.2. A jövőben várható trendenciák.....	60
5. EREDMÉNYEK.....	65
5.1. Elterjedési modellek eredményei.....	65
5.1.1. <i>Maximális valószínűségi osztályozás modell.....</i>	<i>65</i>
5.1.2. <i>Bioclim modell.....</i>	<i>72</i>
5.1.3. <i>Domain modell.....</i>	<i>74</i>
5.1.4. <i>One-class SVM modell.....</i>	<i>76</i>

5.2. Produkción vizsgálat eredményei	78
5.2.1. <i>Termőhelyi tényezők hatása a fatermőképességre</i>	78
5.2.2. <i>Az éghajlati tényezők és a fatermőképesség kapcsolatának feltárása többváltozós statisztikai módszerekkel</i>	81
5.2.3. <i>Fatermőképesség jövőbeli változásának becslése regressziós egyenes illesztéssel</i> ..	85
5.2.4. <i>Fatermőképesség, és fatermési osztály becsült változásainak eredményei</i>	87
6. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE	91
6.1. Elterjedési modellek eredményeinek kiértékelése	91
6.2. Produkciónváltozás becslési eredményeinek kiértékelése	93
7. ÖSSZEHASONLÍTÁS TEREPI MÉRÉSEKKEL	97
8. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS TOVÁBBI TERVEK	100
9. ÖSSZEFOGLALÁS	105
10. TÉZISEK	108
11. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	110
12. TÁBLÁZATJEGYZÉK	111
13. ÁBRAJEGYZÉK	112
14. IRODALOMJEGYZÉK	115
15. MELLÉKLETEK	127

Kivonat

*A klímaváltozás hatása a kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea*) elterjedésére és produkciójára*

Doktori disszertációmban a kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea* Matt. Liebl.) magyarországi potenciális jövőbeli elterjedését, valamint produkciójának becsült változásának elemzését végeztem el három jövőbeli időszakra (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100). Vizsgálataimhoz 12 regionális klímamodell eredményét használtam fel, melyek alapján hazánk területén a 21. század végére az éghajlat melegedésére és szárazabbá válására számíthatunk. A modellszimulációk alapján a fafaj szempontjából kiemelten fontos kritikus időszak (július) átlaghőmérséklete 3,9°C-kal emelkedhet meg, a csapadékösszege pedig akár 34,5%-kal csökkenhet az 1981-2010-es referencia időszakhoz képest. Ebből adódóan a kocsánytalan tölgy számára a klimatikusan optimális terület beszűkülésére számíthatunk. Az elterjedés becsült változásaira négy modellt alkalmaztam (maximális valószínűségi osztályozó, bioclim, domain, one-class SVM), amelyek mindegyike egyetért a vizsgált fafaj elterjedésének csökkenésében, és kijelölik a klímaváltozás kedvezőtlen hatásaira különösen érzékeny, veszélyeztetett területeket. Ezek a Cserhát, Heves-Borsodi-dombság, Bükkalji-dombságok, Cserhát-vidék, Kelet-Zselic valamint Nyugat-Zselic. E tájak sérülékenységet a produkció vizsgálatok eredményei is megerősítették. Ezekhez a vizsgálatokhoz egy országos monitoring hálózat adatsorait, az ún. Faállományok Növekedésének Mérése (FNM) program adatait, valamint saját terepi mérések adatait is használtam. Az eredményeim alapján várhatóan a veszélyeztetett területek lévő kocsánytalan tölgy állományok fatermőképessége a jelenleginek 80-85%-ára csökkenhetnek a 21. század végére. Ennek valószínűleg jelentős ökológiai és ökonómiai következményei is lehetnek, amelyekre az agrár-szféra gazdasági szereplőinek és szakigazgatási szervezeteinek fel kell készülnie.

Kulcsszavak: *Quercus petraea*, klímahatás vizsgálat, elterjedés csökkenés, fatermőképesség változás

Abstract

*The effects of climate change on the distribution and production of sessile oak (*Quercus petraea*)*

The aim of this doctoral dissertation is to estimate the potential future distribution and production of sessile oak forests (*Quercus petraea* Matt. Liebl.) in Hungary. I have used 12 regional climate model simulations to analyse projected climate change for three time periods (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100). The results show that both the annual temperature and the frequency of long-term dry periods are likely to increase by the end of the 21st century. Regarding vegetation, the critical period is July which has high importance because it is projected that average July temperatures may increase by 3.9°C and precipitation may decrease by 34.5% when compared to the reference period (1981-2010). If these projections prove correct, climate conditions will become unsuitable for sessile oak forests. I have utilized four stochastic species distribution models (maximum likelihood, bioclim, domain, one-class SVM) to estimate future potential distribution. The results of the models show considerable shrinkage of sessile oak distribution in the most sensitive regions to climate change. The distribution models and the production change investigations determined these sensitive regions to be: Cserhát, Heves-Borsodi-Hills, Bükkalji-Hills, Cserhát-territory, Kelet-Zselic, and Nyugat-Zselic. By the end of the 21st century, the projected production capacity of these particularly vulnerable regions may decrease by as much as 80-85% of the current production value. It is extremely likely that these processes, which play an important role in the climate-dependent forestry sectors, will have severe ecological and economic consequences for stakeholders in the agricultural sector as well.

Keywords: *Quercus petraea*, climate change impacts, spatial distribution shrinkage, production capacity changes

Rövidítésjegyzék

A	Kor [év]
ABE	Agyagbemosódásos barna erdőtalaj
AOGCM	Globális kapcsolt légkör-óceán modell
AUC	Pontossági érték (<i>Area Under Curve</i>)
BFÖLD	Barnaföld
BTI	Bükk tolerancia index [mm/°C]
CS-KTT	Cseres-kocsánytalan tölgyes klíma
dBTI	Bükk tolerancia index változás [mm/°C]
dEQ	Ellenberg-index változás [°C/mm]
dFA	Ierdészeti szárazsági index változás [°C/mm]
dH	De Martonne-féle ariditási index változás [mm/°C]
dmodEQ	módosított Ellenberg-index változás [°C/mm]
dP	Csapadékösszeg változás [%]
dT	Átlaghőmérséklet változás [°C]
dTAI	Thornthwaite-féle szárazsági index változás [mm/°C]
EA	Elegyarány [%]
EQ	Ellenberg-index [°C/mm]
EVH	Erdővédelmi Hálózat
EVH I.	Az EVH nagyterületi egészségi állapotfelmérés rendszere
EVH II.	Az EVH intenzív monitoring hálózata
FA	Faktor analízis (Factor Analysis)
FAI	Erdészeti szárazsági index [°C/mm]
FNM	Faállományok Növekedésének Megfigyelése program
FNM1	Az FNM első három felvételi ciklusának (1993-2007) összefoglaló neve
FNM2	Az FNM negyedik ciklusától kezdődő felvételek (2008 -) összefoglaló neve
FPR	Hibás pozitív arány (<i>False Positive Rate</i>)
FTK	Fatermőképesség [m ³ /ha/év]
FTO	Fatermési osztály
GCM	Globális éghajlati modell
GYT	Gyertyános-tölgyes klíma
H	De Martonne-féle ariditási index [mm/°C]
H _g	Átlagmagasság „A” korban [m]
H _m	Mért átlagmagasság [m]
H _r	Referencia magasság (BÉKY, 1981) [m]
KMBE	Karbonátmaradványos barna erdőtalajon
KTT	Kocsánytalan tölgy
LHE	lejtőhordalék erdőtalajon
MASH	Homogenizációs eljárás (<i>Multiple Analysis of Series for Homogenization</i>)

MISH	Interplációs eljárás (<i>Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Database</i>)
MLC	Maximális valószínűségi osztályozás (<i>Maximum Likelihood Classification</i>)
modEQ	Módosított Ellenberg-index [$^{\circ}\text{C}/\text{mm}$]
NÉBIH	Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal
OMSz	Országos Meteorológiai Szolgálat
P	Havi csapadékösszeg [mm]
$p_1, p_2, p_3,$	Chapman-Richards függvény paraméterei
b_1, b_2	Chapman-Richards függvény állandó értékei
PBE	Podzolos barna erdőtalajon
PCA	Főkomponens-analízis (<i>Principal Component Analysis</i>)
PGBE	Pszeudoglejes barna erdőtalajon
P_{IV-X}	Növekedési időszak (április-október) csapadékösszege
P_{VII}	Kritikus időszak (július) csapadékösszege
P_{V-VIII}	Fő növekedési időszak (május-augusztus) csapadékösszege
P_{XI-III}	Nyugalmi időszak (november-március) csapadékösszege
RA	Ranker talaj
RBE	Rozsdabarna erdőtalaj
RCM	Regionális éghajlati modell
RCP	Sugárzási kényszer megváltozásán alapuló forgatókönyvek (<i>Representative Concentration Pathways</i>)
R_{nap}	Napi csapadékösszeg [mm]
ROC	Érzékenységi görbe (<i>Receiver Operating Characteristic Curve</i>)
SBE	Savanyú, nem podzolos barna erdőtalajon
SRES	Kibocsátási forgatókönyvek (<i>Special Report on Emissions Scenarios</i>)
TAI	Thornthwaite-féle szárazsági index [$\text{mm}/^{\circ}\text{C}$]
$T_{\text{átlag}}$	Havi átlaghőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]
T_{IV-X}	Növekedési időszak (április-október) átlaghőmérséklete
T_{max}	Havi maximum hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]
T_{min}	Havi minimum hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]
T_n	Napi középhőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]
TPR	Igaz pozitív arány (<i>True Positive Rate</i>)
T_{VII}	Kritikus időszak (július) átlaghőmérséklete
T_{V-VIII}	Fő növekedési időszak (május-augusztus) átlaghőmérséklete
T_x	Napi maximum hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]
T_{XI-III}	Nyugalmi időszak (november-március) átlaghőmérséklete
ÜHG	Üvegházhatású gáz
κ	Cohen-féle kappa együttható vagy kappa index
σ_P	Csapadékösszeg szórása
σ_T	Átlaghőmérséklet szórása

„Olyan mértékben gázolt bele a legfontosabb kulcsághozaknak tekintett ügyekbe a világ minden táján, hogy arra senki nem számított.”

Dr. Faragó Tibor a klímaváltozásról

1. BEVEZETÉS

1.1. Témaválasztás indoklása

Földünk éghajlati képe változott a múltban, a jelenben, és a jövőben is változni fog. Nem mindegy azonban, hogy ezek a globális skálájú folyamatok milyen amplitúdóval és sebességgel mennek végbe. Múltbeli idősorokból kiderül, hogy a felmelegedési és az eljegesedési fázisok sokkal hosszabb ideig tartottak, ellentétben a jelenlegi, gyors felmelegedési periódustól, amelyre még nem volt példa Földünk történetében (IPCC, 2013). A napjainkban tapasztalható gyors klímaváltozás befolyásolja életünk minden területét. Hatással van a mezőgazdaságra, az energiagazdaságra, a vízgazdálkodásra, erdőgazdálkodásra és nem utolsósorban az egészségünkre is. A klímaváltozás a 21. század legnagyobb kihívásai közé tartozik. Éppen ezért minél több információval kell rendelkezünk, hogy a társadalom számára szükséges megelőzési, felkészülési és alkalmazkodási lehetőségeket megfogalmazzuk (COST FP0703 ACTION, 2009; EU WHITE PAPER, 2009; MÁTYÁS et al., 2014). Éghajlatkutatóként fontosnak tartom a klímaváltozás komplex hatáselemzését, különösen az időjárás függő ágazatokban, mint az erdőgazdálkodásban. Doktori disszertációmnak éppen ezért választottam ezt a témát.

Az éghajlati rendszer változásainak vizsgálatára alapvetően két módszer létezik. Az első a meteorológiai mérésen alapuló adatsorok elemzése. Ezek bizonyítják az átlaghőmérsékletek emelkedését, a szélsőségesen meleg nyarak, aszályos időszakok, valamint a nagy csapadékot adó időjárási események gyakoriságának növekedését Európa legnagyobb részén (SREX, 2011; HREX, 2012; EASAC POLICY REPORT, 2013). Másik módszer a globális és regionális klímamodell szimulációk eredményeinek kiértékelése. Ezek alapján a múltbeli tendenciák tovább folytatódhatnak a 21. században is. Európa szerte az átlaghőmérsékletek növekedésére, a csapadékmennyiség éven belüli eloszlásának megváltozására, valamint a szélsőséges időjárási események (hőhullámok, aszályok, hirtelen lezúduló nagy csapadékok, extrém szélviharok) gyakoriságának és intenzitásának emelkedésére számíthatunk (BARTHOLY és PONGRÁCZ, 2005, 2007; SZALAI és MIKA, 2007; BARTHOLY et al., 2009b; GÁLOS et al., 2012). Ezzel a két módszerrel teljes képet kaphatunk

az éghajlat változásairól és azok hatásairól, így disszertációmban én is ezt a két módszert választottam.

A klimatikus szélsőségek növekvő száma sokkal inkább próbára teszi az élővilág alkalmazkodóképességét, mint az éghajlati átlagokban jelentkező lassú változások (MÁTYÁS et al., 2010; RASZTOVITS et al., 2014). Ennek hatására az utóbbi évtizedekben egyre gyakrabban fordulnak elő tömeges erdőkárok (CSÓKA et al., 2009). Ezek a kihívások előrevetítik azokat a nehézségeket, amelyekkel az erdőgazdálkodás szembesülhet a prognosztizált klímaváltozás hatására (NAGY, 2009). Az éghajlat szárazabbá válása miatt, a hatások legelőször a fajok elterjedésének alsó szárazsági határán jelentkeznek (MÁTYÁS et al., 2010). Mivel Magyarország területén több erdészetileg fontos faj szárazsági határa húzódik (BERKI et al., 2007; MÁTYÁS et al., 2009b; MÁTYÁS et al., 2010; CZÚCZ et al., 2011), ezért az erdőgazdálkodóknak kiemelten fontos feladata, hogy felkészüljön ezekre a változásokra.

Doktori disszertációm vizsgált faja a kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea* Matt. Liebl.), mivel elterjedése az ország leghumidabb tájaitól egészen a száraz alföldperemi tájakig húzódik. A kocsánytalan tölgy (KTT) nemcsak hazánk, hanem Európa kiemelten fontos fafajái közé is tartozik. Hazánkban az akác és a csertölgy után a harmadik legnagyobb területtel rendelkezik, vagyis e tölgyesek alkotják a magyar erdők mintegy 6,4%-át, amely kb. 137'000 hektár területet jelent (ERDŐLELTÁR 2010-2014; <http://portal.nebih.gov.hu/erdoleltar>). A klíma változásával azonban a vitalitásában, elterjedésében és növedékében is változásokra számíthatunk, melynek oka elsősorban a különböző éghajlati modellek által prognosztizált hosszantartó csapadékhiány lehet. Az 1980-as években a „nagy tölgypusztulás” néven ismerté vált kárláncolati események miatt számos kutatás jelent meg a klíma melegedésének és szárazodásának kedvezőtlen hatásairól (IGMÁNDY et al., 1984; JAKUCS, 1984). E szakirodalmi vonatkozások alapjaiban határozták meg dolgozatom témáját, mivel ezek a problémák rendkívüli nehézségeket hozhatnak az erdészetek számára. Nem kizárt, hogy a jövőben előfordulhatnak hasonló kárláncolati események is, melyekre fel kell készülnünk. Éppen ezért, szem előtt tartva az elmúlt évtizedek változásait és a jelenlegi állapotokat, célom hogy a jövőben várható tölgyelterjedést, a várható produkcióváltozást és a lehetséges következményeket elemezzem, valamint kiértékeljem. Mindezek ismerete nélkülözhetetlen az erdészeti gyakorlat szempontjából, hiszen annak alapfeladata, hogy a jövőben várható klimatikus feltételek mellett is gazdaságosan üzemeltethető stabil erdőket hozzon létre.

1.2. Kutatás célkitűzései

A dolgozat alapvető célja, hogy értékelje a hazánkat is érintő éghajlatváltozás hatását a kocsánytalan tölgy (KTT) erdőállományokra, és megbecsülje annak jövőben várható változásait a 21. század végéig. Ebből adódóan a jövőbeli változások becslésére regionális klímamodell szimulációk eredményeit dolgoztam fel, és ezek alapján készítettem potenciális (lehetséges) jövőbeli tölgyelterjedési térképeket, valamint a növedék változásának vizsgálatára – VEPERDI (2014) munkája alapján – a fatermőképesség változás becslését végeztem el matematikai statisztikai módszerekkel.

Régi tapasztalat, hogy egy erdei termőhely termőképességét a rajta növe faállomány dendrometriai paraméterei közül a magasság jelzi a legmegbízhatóbban (PRETZSCH, 2009). Éppen ezért választottam a fatermőképesség – mint a produktív jellemező számszerű $[m^3/ha/év]$ érték – vizsgálatát, mivel az átlag famagasság alapján számítható ki. A dolgozat célja, hogy feldolgozza és kiértékelje a fatermőképesség várható jövőbeli változásait egy már meglévő erdészeti adatbázis segítségével. Erre a célra a Faállományok Növekedésének Megfigyelése monitoring program adatait választottam, és ennek eredményeit hasonlítottam össze terepi mérési eredményekkel. A terepi mérések célja egyrészt az összehasonlíthatóság volt, másrészt hogy egy, az országot átszelő száraz-nedves klímagradiens mentén megvizsgáljam a hazai kocsánytalan tölgy állományok állapotát.

Mivel a kocsánytalan tölgy a klímaváltozás hatásaira érzékeny fafajok közé tartozik, így a kutatás további céljai közé tartozik, hogy meghatározza azokat a legfontosabb éghajlati tényezőket, amelyek befolyásolják e fafaj elterjedését, ill. növekedését.

Számos hazai és nemzetközi szakirodalom témája a klímaérzékeny bükk elterjedésének és növekedésének jövőbeli változása (RASZTOVITS et al., 2014; HORVÁTH és MÁTYÁS, 2016), így céljaim közé tartozik a kocsánytalan tölgyre vonatkozó klímahatás vizsgálatok szakirodalmának bővítése is.

Disszertációmban áttekintem a klímaváltozással foglalkozó nemzetközi és hazai kutatásokat, kitekintek az éghajlat valamint az időjárás okozta erdészeti károkra. Feldolgozom az eddigi tudományos eredményeket a tölgy potenciális jövőbeli elterjedéséről, valamint a várható növedékéről. Ezt követően végzem el vizsgálataimat, melyek a következő pontokban foglalhatók össze:

- Számszerűsítom és feltárom a kapcsolatokat a múltbeli éghajlati idősorok, ill. azokból meghatározható különböző klimatikus indexek, és az adott fafaj elterjedése között.

- A regionális klímamodell eredmények alapján meghatározom a 21. század végére várható potenciális elterjedést.
- Kimutatom és megadom azokat a legfontosabb termőhelyi tényezőket, ezen belül kiemelten azokat az éghajlati paramétereket, amelyek a leginkább hatással vannak a vizsgált fafaj növedékére.
- A feltárt kapcsolatok alapján olyan konzisztens becslést készítek, amely bemutatja a kocsánytalan tölgyek fatermőképességének változását.
- Az elterjedési modellek valamint a produkcióváltozás becslésének eredményei alapján meghatározom azokat a területeket, ahol a legnagyobb változásokra számíthatunk. Beazonosítom tehát azokat az erdészeti kistérségeket, amelyek leginkább ki vannak téve a klímaváltozás negatív hatásainak.

A disszertáció hipotézisei:

- A kocsánytalan tölgyek egészségi állapota az éghajlatváltozás hatására kialakuló kedvezőtlen klimatikus körülmények miatt romlik, amely a jövőben az aszályok gyakoriságával és intenzitásával összefüggésben valószínűleg tovább súlyosbodik.
- A megváltozott klimatikus viszonyok a fafaj életterének (areájának) szűkülését, elterjedésének csökkenését vonja maga után.
- A vízhiány várható növekedésével a kocsánytalan tölgy elterjedési határa kelet, délkelet felől húzódik vissza a 21. század végére.
- Vertikális elterjedését illetően valószínű, hogy a magassabb térszínek csapadékosabb területei felé bővül areája.
- Azokon a termőhelyeken, ahol a prognosztizált klímaváltozás hatására a szárazság egyre gyakrabban fordul elő, fatermőképesség csökkenés következhet be, és ezzel összefüggésben fatermési osztály romlás is.
- A klímaváltozás hatására gyakoribb szélsőséges időjárási események (pl.: aszály) következtében kiritkuló állományokban a radiális (átmérő) növekedés erősödik, a magassági növekedés gyengül.
- A fent említett folyamatoknak súlyos ökonómiai hatásai is lehetnek, amelyen az erdőgazdálkodási stratégiák enyhíthetnek (pl.: megfelelő fafajválasztással).

2. A KUTATÁSI TÉMA SZAKIRODALMÁNAK ISMERTETÉSE

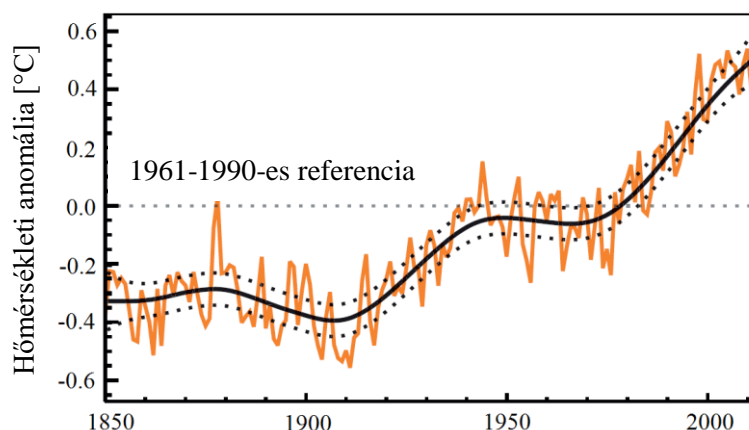
2.1. Globális és regionális klímaváltozás

A Meteorológiai Világszervezet (WMO) az Egyesült Nemzetek Környezeti Programjával (UNEP) közösen 1988-ban létrehozta az Éghajlatváltozás Kormányközi Testületet, vagyis az IPCC-t (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). Az IPCC feladata, hogy összefoglalja és tájékoztassa a társadalmat a már publikált tudományos szakirodalom alapján a klímaváltozás kockázatairól, annak hatásairól és átfogó képet adjon a várható változásokról (www.ipcc.ch; www.wmo.int). A 2013-ban megjelent ötödik helyzetértékelő jelentésében (az előző jelentésekhez hasonlóan) rendszerezte az éghajlat változásának megfigyelt globális trendjeit, azok okait és a társadalmi-gazdasági hatásait. Ennek értelmében az eddigi tudományos eredmények szerint a közelmúltban megfigyelt, és mért meteorológiai adatok alapján tisztán látható az éghajlati rendszer fokozatos felmelegedése az 1900-as évektől kezdődően (IPCC, 2013). Ebben az emberi tevékenység hozzájárulása szintén világos, a népesség- és a gazdasági növekedés, valamint ennek következtében az üvegházhatású gázok kibocsátásának megnövekedése révén.

Maga az üvegházhatás természetesen van jelen a Földön, nélküle a bolygón sem lenne élet. A felszínközeli átlaghőmérsékletet $+33^{\circ}\text{C}$ -kal emelik a légköri üvegház gázok (röviden ÜHG) (HASZPRA et al., 2010; BARTHOLY et al., 2011). Ezek között a legjelentősebb a vízgőz, azonban önmagában ezzel még nem magyarázható a jelenlegi klíma ilyen fokú megváltozása (LACIS, 2010). A szén-dioxid, metán, nitrogén-oxidok, ózon stb... mind hatékony ÜHG-k közé tartoznak, amelyek légköri koncentrációja megemelkedett az ipari forradalomtól kezdődően (PÉCZELY, 1998). Bizonyítható, hogy ezek közül a gázok közül a szén-dioxid (CO_2) koncentrációjának folyamatos növekedése nagyon szoros kapcsolatban áll a hőmérséklet emelkedésével (FORSTER et al., 2007). Koncentrációja az elmúlt két évszázadban 280 ppm-ről 390 ppm-re nőtt, és **2017-re** már **elérte a 405 ppm-et** is (www.co2.earth). Még az optimista becslések szerint sem valószínű, hogy a 21. század végére 560 ppm alatt tartható lenne (CARTER et al., 2007). Ennek azért is van nagy jelentősége, mert a CO_2 a fotoszintézisre gyakorolt hatásán keresztül befolyásolja a növények életfolyamatait (LARCHER, 1980; LONG, 1991). A növekvő CO_2 szint növeli a fotoszintézis intenzitását, vagyis pozitívan befolyásolja a produkciót, azonban egy bizonyos koncentráció felett már a sztómák záródása, a fotoszintézis intenzitásának csökkenése következik be (ÁCS et al., 1991), ami viszont már negatívan hat a produkcióra. A CO_2

koncentrációjának megváltozása tehát nemcsak az éghajlat melegedésén keresztül (közvetve), hanem közvetlenül is hat a növényzere.

A globális skálájú változásokat tekintve az **átlaghőmérséklet** (a szárazföldi- és az óceáni felszínekkel együtt) napjainkban az 1880-es évekhez viszonyítva $0,85^{\circ}\text{C}$ -kal emelkedett (1. ábra). Az elmúlt 30 évet tekintve ez a tendencia felerősödött, és elérte a **$0,2^{\circ}\text{C}$ -os évtizedenkénti emelkedést**, annak ellenére, hogy a napsugárzásból származó éghajlati kényszer csökkent (BARTHOLY et al., 2011). Amennyiben csak a szárazföldi felszín hőmérsékletének változását tekintjük, akkor azt mondhatjuk, hogy több mint 1°C -os emelkedés detektálható az 1880-es évekhez képest (JONES et al., 2012; LAWRYMORE et al., 2011; HANSEN et al., 2010; MULLER et al., 2013). Amennyiben ez a trend a jövőben is folytatódik, a melegedés mértékét nem lehet 2°C alatt tartani. Ez azért is fontos, mert a földi átlaghőmérséklet e határt meghaladó emelkedésének következtében olyan elhúzódó, illetve ugrásszerű következmények léphetnek fel, amelyeket később már nem lehet visszafordítani (NÉS, 2008; JOSHI et al., 2011).



1. ábra: Globális felszíni (szárazföldi- és óceáni felszín) átlaghőmérséklet anomália az 1961-1990-es időszakhoz képest a HadCRUT4 éves adatsorai alapján. Fekete vonallal az adatokra illesztett simított görbe, szaggatott vonallal a 90%-os konfidencia intervallumok (IPCC, 2013).

A **csapadék** a legváltozékonyabb meteorológiai paraméter, ezért tendenciáit globális skálán nem is lehet megfogalmazni. Az azonban tisztán látható, hogy a melegebb levegő nagyobb párafeltevő képessége miatt több a nedvesség a légkörben, ezáltal gyorsabbá vált a hidrológiai ciklus és megnőtt a csapadékhullás intenzitása (ILYÉS et al., 2016). A csapadék mennyiségében **az északi hemiszférán növekedés** tapasztalható az 1900 - 2005 közötti időszakra vonatkozóan, míg a **trópusi területeken csökkenés** jellemző (CRU TS 3.10.01 adatbázis alapján MITCHELL és JONES, 2005). Az éves összegekben történő csökkenés (pl.:

a mediterrán területeken) annak ellenére bekövetkezett, hogy a hirtelen lezúduló nagy csapadékok gyakorisága megnőtt.

Az időjárási szélsőségek gyakoriságában és intenzitásában is változások tapasztalhatók. Ezen éghajlati események változását összefoglaló SREX (2011) jelentés (*Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*) alapján a változásokat az alábbi pontokban foglaltam össze:

- A meleg szélsőségek esetében emelkedő tendencia lépett fel (mind globális és regionális szinten), gyakoribbá váltak a nyári napok, hőségnapok, forró napok, trópusi éjjelek száma*.
- Európa legnagyobb részén kevesebb alkalommal fordulnak elő hideg szélsőségek, azonban intenzitásuk erősebbé vált.
- A száraz időszakok gyakorisági növekedése egész Dél-Európában (Mediterrán régióban) megfigyelhető, azonban térbeli változékonyság mutatkozik Közép- és Észak-Európában. Az aszályos időszakok hossza és intenzitása egész Európában megnövekedett.
- Növekedő tendencia figyelhető meg a hirtelen lehulló nagy csapadékmennyiségek gyakoriságában és intenzitásában is Európa legnagyobb részén.
- A szélviharok intenzitása és gyakorisága növekedett, ezen belül a téli viharok száma Észak- és Nyugat Európában emelkedett.
- Nyugat- és Közép Európában a komoly viharok (amelyek veszélyes időjárási jelenségekkel rendelkeznek pl.: jégeső, zivatar) gyakoriságának és intenzitásának emelkedése figyelhető meg.

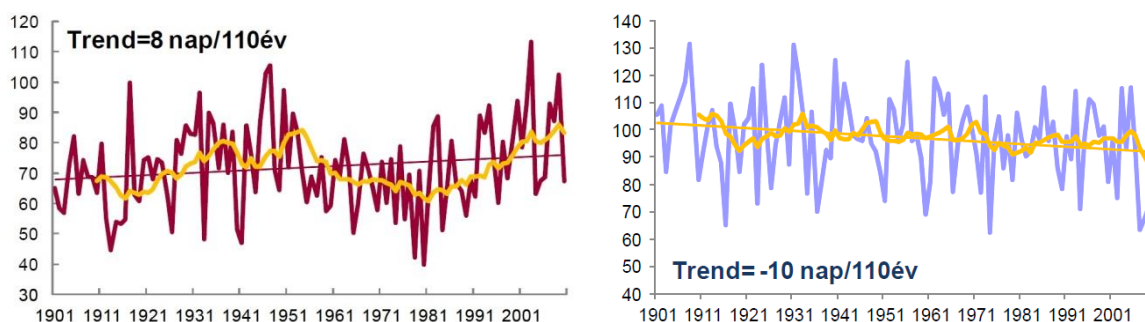
2.2. Magyarországon jelentkezett változások

Hazánkban az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSz) végzi a meteorológiai méréseket, megfigyeléseket, gyűjti és elemzi a hosszútávú adatsorokat. Mivel megbízható, minőségileg ellenőrzött és folytonos adatsorokból lehet csak következtetéseket levonni az éghajlat hazai tendenciáiról, éppen ezért nagy hangsúlyt fektetnek a homogenizációs és interpolációs eljárásokra (SZENTIMREY, 2006; SZENTIMREY és BIHARI, 2007). Az így létrehozott klimatológiai adatbázisból kapott eredmények alapján **az eddigi hazai mérések kezdete óta a legmelegebb 10 év az 1990-2009 közötti időszakban volt** (LAKATOS, 2010). A lineáris trendillesztés alapján 1,0 °C-os évi középhőmérséklet emelkedés következett be a múlt évszázad elejétől 2009-ig. Az éven belüli eloszlást tekintve a nyarak hőmérsékletének emelkedése volt a legnagyobb mértékű: 1,2°C (LAKATOS, 2010). A csapadék éves összegeit

* A különböző szélsőségek mérőszámainak jelentése az 1. mellékletben található

illetően csökkenés figyelhető meg, melynek értéke 7% volt 1901-2009 között, éven belüli eloszlásában pedig jelentős átrendeződés tapasztalható. **Gyakoribbá váltak a hosszan tartó nyári száraz időszakok**, amelyeket egy-egy intenzív nagy csapadékú esemény követ. A téli csapadékösszeg enyhe növekedést mutat, amely a hőmérséklet emelkedő jellege miatt egyre gyakrabban eső formájában hullik (LAKATOS, 2010).

Az IPCC által 2011-ben közreadott SREX jelentéshez hasonlóan, Magyarországon is készült egy tanulmány a hazai szélsőséges éghajlati események tapasztalt és várható változásaira. Ez a HREX jelentés (*Hungarian Report on Extreme Events*), amely az éghajlati szélsőségek megfigyelt magyarországi tendenciáit tartalmazza, valamint a kockázatok kezelésére és az alkalmazkodási stratégiákra tesz javaslatot. A jelentés alapján a nyári napok száma (napi maximum hőmérséklet $T_x > 25^\circ\text{C}$) megnövekedett 8 nappal 1901-től napjainkig, melyben a legintenzívebb növekedés az 1981-2010-es időszakra tehető (2. ábra). Ezzel párhuzamosan a hóhullámos napok száma (napi középhőmérséklet $T_n \geq 25^\circ\text{C}$), és a forró napok száma ($T_x \geq 35^\circ\text{C}$) is megnövekedett. Országos **átlagban 10 nappal kevesebb napon lép fel fagypont alatti hőmérséklet**, vagyis a fagyos napok számában ($T_x < 0^\circ\text{C}$) csökkenés tapasztalható (2. ábra) (BARTHOLY et al., 2011; HREX, 2012).



2. ábra: Nyári napok (balra) és fagyos napok (jobbra) számának változása Magyarországon, tíz éves mozgó átlaggal és becsült lineáris trendekkel 1901-2010 között (HREX, 2012)

A csapadék változása kevésbé nyilvánvaló, mint a hőmérsékleté mivel a megjelenő tendenciák általában nem szignifikánsak. Az extrém csapadékú napok ($R_{\text{nap}} \geq 20 \text{ mm}$) esetében kis mértékű növekedés tapasztalható országosan, illetve a száraz időszakok hossza (azon időszak maximális hossza, amikor $R_{\text{nap}} < 1 \text{ mm}$) megemelkedett. Nagyon valószínű, hogy a tendenciák a jövőben is folytatódni fognak (GÁLOS et al., 2015; VAHAVA report, 2010; BARTHOLY et al., 2011), amely jelentősen befolyásolja fafajaink egészségi állapotát és növekedését. Az elmúlt évtizedekben a szárazodás, és az aszályos periódusok növekedésének hatására kialakuló vitalitás gyengülés a rovarkárók jelentős erősödését vonta

maga után. A tömegszaporodási események (gradációk) megemelkedtek, és nem kizárt, hogy új károsítók is megjelenhetnek a jövőben (CSÓKA et al., 2009; MÁTYÁS et al., 2010). A rovarkárok és betegségek növekedésével olyan komplex kárláncolati események mehetnek végbe, melyek hatására végső esetben tömeges mortalitás (pusztulás) is bekövetkezhet. Erre több példa is volt már hazánkban (a már korábban említett „*nagy tölgypusztulás*”, lucpusztulás az 1990-es évektől kezdődően, tömeges bükk pusztulás Zala megyében (LAKATOS és MOLNÁR, 2009) a 2000-es évek elején), és nagyon valószínű, hogy a jövőben is bekövetkezhetnek hasonló káresemények.

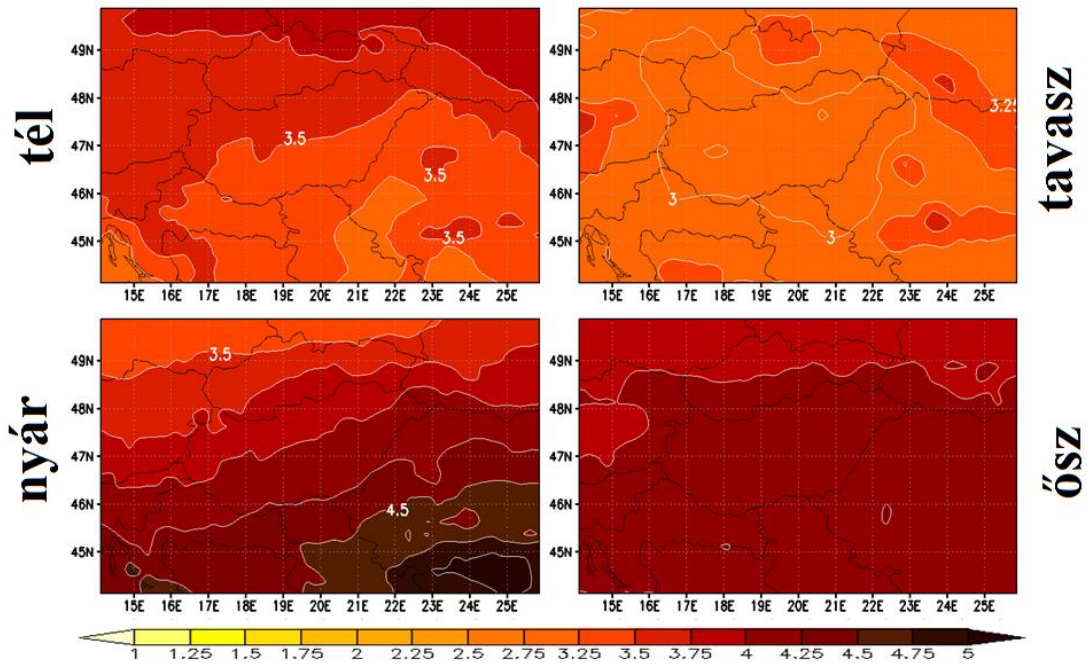
2.3. Éghajlati jövőkép

A jövőbeli klíma várható változásaira ma már rendkívül sok globális (GCM) ill. regionális (RCM) éghajlati modell áll rendelkezésünkre. A nagy klímakutató központok folyamatos fejlesztéseinek köszönhetően a modellek elérték azt a szintet, hogy képesek megbízhatóan leírni az éghajlati rendszer elemeit, azok viselkedését és a közöttük lévő összetett kölcsönhatásokat (ANDRÉ et al., 2013).

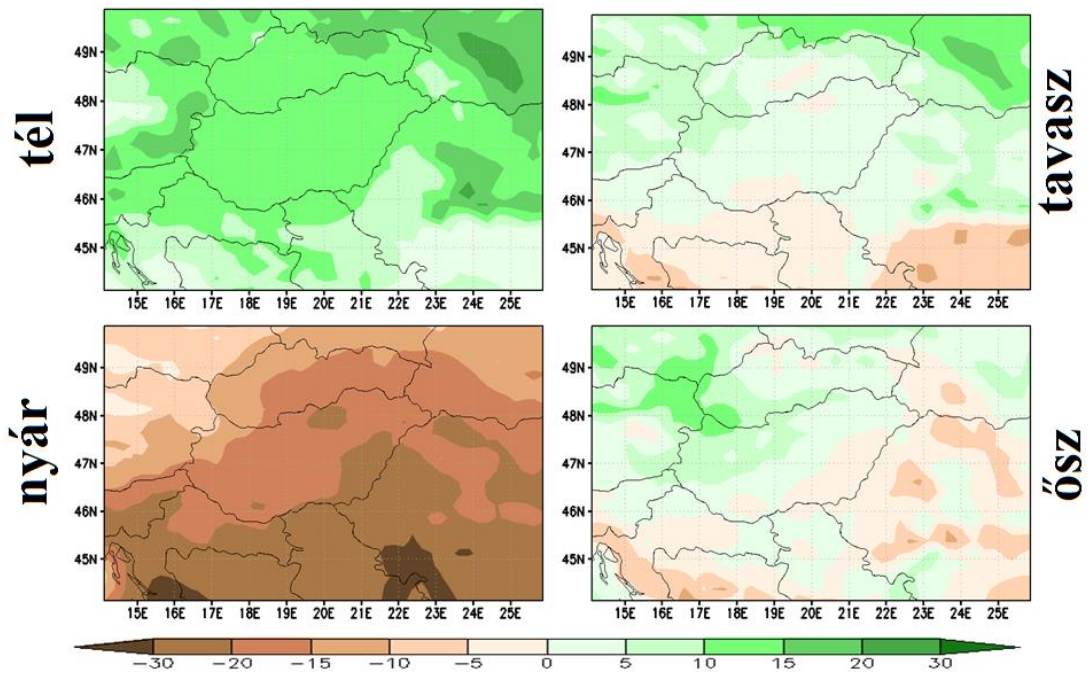
2.3.1. Várható regionális változások

Az éghajlat melegebbé válása minden modell esetében egyértelmű, és a 21. század végéig nincs szignifikáns különbség az egyes modellbecslések között. Hazánkban a **hőmérséklet emelkedését minden évszakban valószínűnek tartják a különböző modellek**, ezen belül nyáron várható a legnagyobb mértékű emelkedés (3,5 – 4°C) (3. ábra). Ezzel párhuzamosan megnövekedhet az időjárási szélsőségek gyakorisága, úgymint az aszályos időszakok vagy a hirtelen lezúduló nagy csapadékú események (BARTHOLY et al., 2009a; KIS, 2017).

Több regionális klímamodell alapján a **Kárpát-medencében csökkenhet a csapadék éves mennyisége**, és az éven belüli eloszlásában is komoly változásokra számíthatunk (BARTHOLY et al., 2009a; GÁLOS et al., 2015). Jelentős csapadékcsökkenés várható nyáron, amely akár -20 – -25%-ot is elérheti (4. ábra). Télen a csapadékösszeg emelkedését prognosztizálják a modellek (+10 – 15%), ez azonban a hőmérséklet emelkedése miatt inkább eső formájában következhet be. Az átmeneti időszakokban (tavasszal és ősszel) nincs szignifikáns változás, bár a modellek bizonytalansága igen nagy (BARTHOLY et al., 2009a).



3. ábra: Várható hőmérsékletváltozás (°C) térbeli eloszlása 2071-2100-ra (referencia periódus: 1961-1990). 11 modell szimuláció alapján készített kompozittérképek (BARTHOLY et al., 2009a)

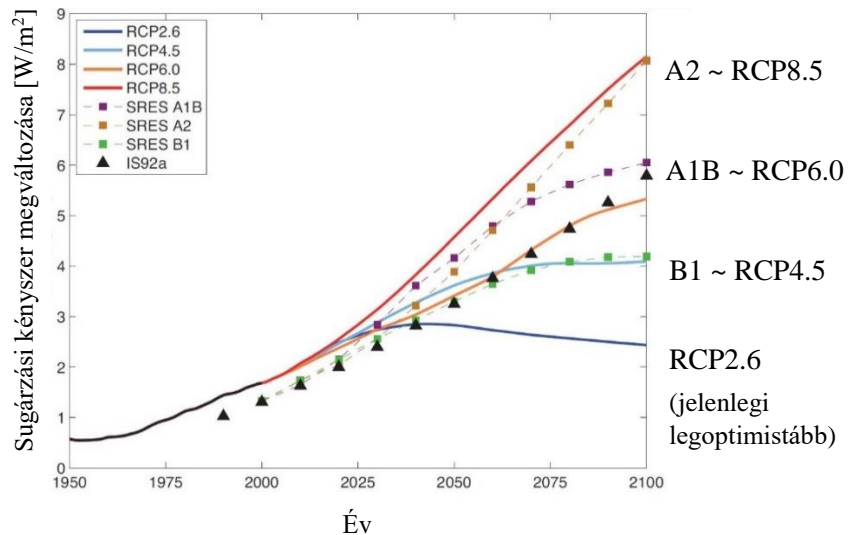


4. ábra: Várható csapadékösszeg változás (%) térbeli eloszlása 2071-2100-ra (referencia periódus: 1961-1990). 11 modell szimuláció alapján készített kompozittérképek (BARTHOLY et al., 2009a)

2.3.2. Modell bizonytalanságok

A jövőre vonatkozó éghajlati modell szimulációk **számos bizonytalansággal terheltek**. Az éghajlati rendszer belső változékonyságából adódó bizonytalanságok mellett a külső kényszerek megváltozására vonatkozó ismereteink hiányosak. A tudomány ugyanis nem képes előrejelezni azt, hogy hogyan alakul a jövőben a népességnövekedés, a gazdasági fejlődés, vagy hogy milyen mértékű lesz a globális emisszió mértéke. Ezek a legbizonytalanabb elemei az éghajlati modelleknek, és éppen ezért négy emissziós scenáriót (SRES - *Special Report on Emissions Scenarios*) dolgoztak ki, amelyek különböző feltételezések (forgatókönyvek) az emberi tevékenység, a gazdasági fejlődés és a környezetkímélő technológiák elterjedésének várható alakulásáról (NAKICENOVIC és SWART, 2000). Az egyes scenáriók (A1, A2, B1, B2) között megkülönböztethetünk pesszimista, optimista, ill. átlagos jövőképet, attól függően, hogy milyen gazdasági növekedéssel, technológiai fejlődéssel vagy népesség növekedéssel számolnak. Az A1 scenáriót további 3 (A1F1, A1T, A1B) forgatókönyvre bonthatunk, attól függően, hogy a feltételezések szerint milyen energiahordozók felhasználásával növekszik majd a gazdaság (fosszilis tüzelőanyagok (A1F1), alternatív energiahordozók (A1T) vagy többféle (A1B)).

Az elmúlt évtized tapasztalatai az antropogén eredetű kibocsátás alakulásáról szükségessé tették azonban a SRES scenáriók felülvizsgálatát, és a fejlődési irányhoz, valamint ütemhez jobban illeszkedő új forgatókönyvek kidolgozását. Ezek az ún. stabilizációs (RCP – *Representative Concentration Pathways*) scenáriók, amelyek alapja a 2100-ra feltételezett sugárzási kényszer megváltozása (vagyis az üvegházhatású gázok és aeroszol részecskék felhalmozódásából adódó energetikai kényszer megnövekedése) (MOSS et al., 2010). Alapvető különbség a két forgatókönyv típusnál, hogy míg a SRES az ÜHG-k koncentrációját veszi alapul, addig az RCP az ezekből adódó energetikai kényszer megváltozását [W/m^2]. Ezek a forgatókönyvek már a nevükben is magunkban hordozzák a 2100-ra feltételezett változást (pl. RCP4.5 = 4,5 W/m^2 sugárzási kényszer növekedés 2100-ra). Az egyes scenáriókat meg lehet feleltetni egymásnak (pl.: az A2 és az RCP8.5 scenáriók szinte megegyeznek egymással), van közöttük azonban olyan is, amely a nemzetközi összefogás és az új kibocsátási korlátozások betartásának feltételezésével, sokkal kedvezőbb képet mutat, mint a korábbi legoptimistább B1 scenárió (5. ábra).



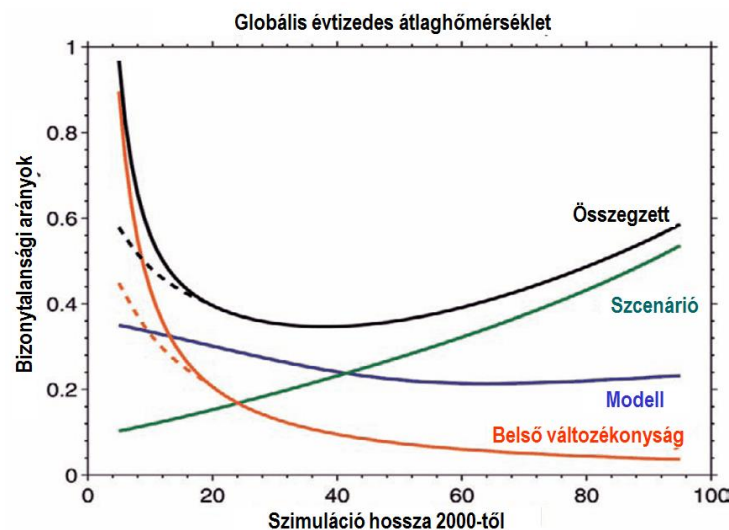
5. ábra: A „rég” SRES és az „új” RCP forgatókönyvek összehasonlítása a 2100-ra feltételezett üvegházhatású gázok koncentrációja okozta energetikai kényszer változása alapján (IPCC, 2013)

A forgatókönyvek nagy száma mellett azt is figyelembe kell vennünk, hogy **nem tudják a modellek tökéletesen leírni a valóságot**, hiszen csak véges folyamatokat vehetnek figyelembe. Mivel a leírt folyamatok idealizáltak, így közelítő módszerekkel oldhatók meg a leírt egyenletrendszerek, fizikai parametrizációk segítségével (CUBASCH et al., 1995; DÉQUÉ és PIEDELIEVRE, 1995). A fizikai parametrizáció alkalmazása két esetben történik, (1) ha a modell ráctávolságánál kisebb skálájú folyamatot akarunk figyelembe venni, vagy ha (2) a leírt folyamatok bonyolultsága miatt csak egyszerűsített leírásmódot építhetünk be a modellbe. Az utóbbihoz tartoznak azok a fizikai folyamatok is, amelyeket még napjainkra sem sikerült tökéletesen leírni (pl.: felhőfizikai folyamatok, csapadékképződés) (SZÉPSZÓ és HORÁNYI, 2008).

A regionális klímamodellezésben további bizonytalanságot ad, hogy hogyan írjuk le azokat a nagyskálájú folyamatokat, amelyek az adott térség éghajlatában szerepet játszanak. Ezt a globális éghajlati modellek (GCM) eredményeinek felhasználásával tehetjük meg, vagyis ezek adják a határfeltételeket. Ezt úgy hívjuk, hogy a globális modellek „meghajtják” a regionális éghajlati modelleket (RCM) (WILBY et al., 1998). Mivel GCM-ekből is rendkívül sok létezik, - hiszen különböző módon írják le az egyes fizikai folyamatokat és más-más egyszerűsítésekkel élnek - ezért a meghajtott RCM-ek eredményei is különbözőek lesznek. A határfeltételek beállításai mellett a regionális klímamodell eredmények nagy érzékenységet mutatnak arra is, hogy milyen területen, milyen felszíni jellemzőkkel és felbontással kell leírni az éghajlati paramétereket (ANDRÉ et al., 2013). Összegezve tehát, az éghajlati modell szimulációkban három nagy bizonytalansági tényezőt különböztethetünk meg:

- 1) az éghajlat természetes belső változékonyságából származó,
- 2) modellek eltéréséből származó,
- 3) és a forgatókönyv választásból származó bizonytalanságok.

Számszerűsítve ezeket azt mondhatjuk, hogy a modell eredmények bizonytalansága a szimulált időszak elején a legmagasabb, majd az időszak közepére csökken, és a végére ismét megnövekszik, a forgatókönyv választásából adódó bizonytalanságok erős megnövekedésével párhuzamosan (6. ábra).



6. ábra: Modell bizonytalanságok számszerűsítése (HAWKINS és SUTTON, 2009 nyomán)

2.4. Klímaváltozás hatásai az erdőkre

Az éghajlat változása alapjaiban hat az erdei növénytakasulásokra, hiszen a hó, víz- és tápanyag ellátáson keresztül befolyásolja azok életfolyamatait. A növekvő CO₂ szint növeli a fotoszintézis intenzitását (KRAMER, 1981; CURE és ACOCK, 1986; MEDLYN et al., 2000), ezáltal gyorsul a biomassza produkció, azonban bizonyos szén-dioxid koncentráció felett már a sztómák záródása, a fotoszintézis intenzitásának csökkenése következik be (KIMBALL és IDSO, 1983; ÁCS et al., 1991). A faállományok növekedésének szempontjából tehát a CO₂ koncentráció változása igen jelentős hatással bír. Számos ellentét tapasztalható azonban a kutatásokban, hiszen Európa észak-nyugati részén a CO₂ növekedésével a fanövedék gyorsuló tendenciája a jellemző (SPIECKER et al., 1996; SPIECKER, 1999; THEURILLAT és GUIBAN, 2001; PRETZSCH et al., 2014). Közép- és Dél-Európában viszont a gyakori szárazságok miatt nincs gyorsuló fanövekedés, sőt esetenként fékeződik a növekedés (HORVÁTH és MÁTYÁS, 2014; ILLÉS et al., 2014; FÜHRER et al., 2015). Ezeknek az ellentéteknek az oka, hogy a száraz időszakok gyakorisága, a vízhiány okozta stressz Közép-

és Dél-Európában erősen megnövekedett (SREX, 2011). A CO₂ mellett az egyéb antropogén eredetű légköri gázok is befolyásoló tényezők, mivel a száraz és nedves ülepedés folyamata során bekerülnek a faállományok elemforgalmába (VIG, 2002).

A faállományok növekedését azonban nem csak a különböző légköri gázok (pl.: CO₂, NO_x) befolyásolják, hanem a klimatikus körülmények megváltozása is. Ilyen a csapadék mennyiségének és eloszlásának, a tenyészidőszak hosszának, a hőmérséklet és az időjárási extrémumok gyakoriságának megváltozása (VIG, 2002). A klíma hosszútávú hatásait a növedékre hosszú lejáratú kísérletekkel, intenzív monitoring rendszerekkel lehet kimutathatni, azonban az éghajlat változásának vannak olyan kedvezőtlen hatásai is, amelyek hirtelen és gyors lefolyással következnek be. Ilyenek az időjárási szélsőségek okozta erdőkárok (pl.: aszály, tűz, fagykár stb...), amelyek kiváltó okai lehetnek a vitalitás gyengülésnek, megbetegedéseknek, növedékben történő visszaesésnek, és súlyos esetben a mortalitásnak is.

2.4.1. Klimatikus szélsőségek hatásai

A **legnagyobb kihívást jelentő problémák közé tartozik a vízhiány**, ennek következtében pedig az aszály és a szárazság okozta vízstressz. A vízhiány, mint stressz megjelenésével az erdő vízháztartásában jelentős változások lépnek fel, amelyre a vegetáció válaszreakciója lehet vitalitásromlás (növekedés lelassulása, levélvesztés, levél elszíneződés, csúcsszáradás), vagy akár a teljes pusztulás is (MÁTYÁS et al., 2010). A reakció függ attól, hogy mennyi ideig áll fenn a csapadékhiány és hogy mennyire ellenálló a vegetáció, vagyis mekkora a tűrőképessége (MÁTYÁS és GÁLOS, 2010; MÁTYÁS et al., 2010). Míg egy-egy évben előforduló vízhiány főként a növedék csökkenésében jelentkezik, addig a több egymást követő évben létrejövő hosszantartó szélsőséges aszály esetében már mortalitás is bekövetkezhet (CSÓKA et al., 2009). A száraz, aszályos időszakok nemcsak a fajok vitalitására, hanem a termőhelyi tényezők más elemeire is hatással van (BIDLÓ et al., 2014).

A súlyosabb aszályos periódusokat képes túlélni a virágoskőrös (*Fraxinus ornus*), a molyhostölgy (*Quercus pubescens*), a cser (*Quercus cerris*) és a fekete fenyő (*Pinus nigra*). **Szárazságra** azonban igen **érzékenyek** a bükk (*Fagus sylvatica*), a luc (*Picea abies*), és a **kocsánytalan tölgy** (*Quercus petraea*) (HORVÁTH et al., 2001) fajok.

ALLEN és mtsai. (2010) alapján világszerte 88 jól dokumentált aszály okozta erdőpusztulás történt az 1970-es évek óta. Az 1990-es és a 2000-es évek eleje kiemelkedő volt, a szárazság okozta famortalitás szempontjából, melyekben az erdei fenyő, a bükk és a

tölgy fajok pusztulása volt a legjellemzőbb. Ezekből az esetekből az Európában jelentkező aszály indukálta mortalitást foglalja össze az *1. táblázat*, amelyek 1970-2010 között léptek fel. Piros színnel jelöltem azokat az eseteket, amikor a kocsánytalan tölgyeket is érintő pusztulások történtek.

Az időjárási szélsőségek hatása, mint kiderült az 1980-as években történt „*nagy tölgypusztulás*” néven ismerté vált kárláncolati eseményekben is jelentős szerepet játszott. Több kutatás jelent meg a témában, amelyek sokszor egymásnak ellentmondó véleményt és eredményt mutattak be (IGMÁNDY et al., 1984; JAKUCS, 1984; BERKI, 1993; THOMAS et al, 2002; MÉSZÁROS et al., 2009). IGMÁNDY (1987) szerint a kórtünetek arra utalnak, hogy a törzsek végső pusztulását az edényeket eltömő kórokozó, vagy kórokozók idézhették elő. VAJNA (1989) értékelése alapján azonban járványról szó sincs, az okokat inkább az abiotikus tényezők (pl.: aszály) és a biotikus tényezők (pl.: tömegszaporodásra képes lombfogyasztó rovarok rágása) valamint a lokális légszennyezésben kell keresni. Végeredményben megállapítható, hogy egy komplex kárláncolati esemény mehetett végbe, melyet SZONTÁGH (1985, 1986, 1987) több közleményében is kifejtett. Ezekben fő okként szerepelt a szárazság, és az extrém időjárási események, amelyek hatására a legyengült állományokban további biotikus károk léptek fel.

1. táblázat: Aszály és hőhullám okozta famortalitás Európában 1970-2010 között, piros színnel kiemelve a kocsánytalan tölgyeket is érintő eseteket (ALLEN et al., 2010 alapján)

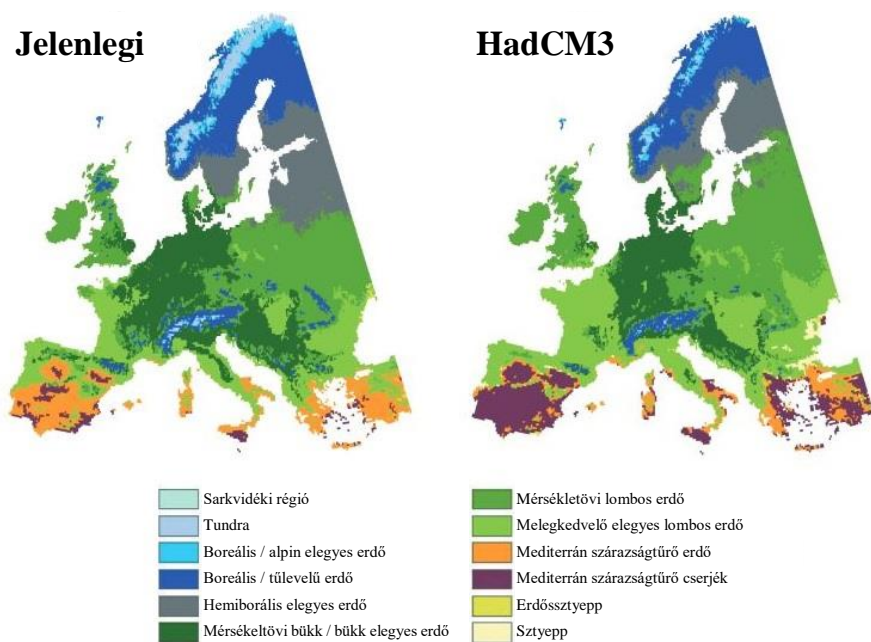
	Helyszín	Év(ek)	Domináns fafaj	Mortalitás térbeli koncentrációja	Klíma anomália	Mortalitás szintje	Érintett terület	Kapcsolódó biotikus tényezők	Referencia
1.	Magyarország	1978-1980	<i>Quercus spp.</i> , <i>Quercus robur</i>	egyenetlen, foltonként	időjárasi extrémek	> 35% ~ 2,5 Mm ³ faanyag veszteség	főként az Északi-középheg.	<i>Tortix viridiana</i> , <i>Geometridae</i>	JAKUCS (1984); SZONTÁGH (1985); IGMÁNDY (1987); BERKI (1993)
2.	Franciaország	1980 – 1985	<i>Quercus spp.</i> , <i>Quercus robur</i>	egyenetlen, foltonként	szezonális aszály	10 – 50 %	~500'000 ha	<i>Ips typographus</i> , <i>Argiles</i> , <i>Scolytus</i>	NAGELEISEN (1994); NAGELEISEN et al., (1991); DELATOUR (1983)
3.	Németország	1982-1983	<i>Quercus robur</i> , <i>Quercus petraea</i>	nincs jelenítve	szélsőséges aszályok	~ 10 %	kistérségi	<i>Phytophthora spp.</i> , <i>Armillaria spp.</i>	THOMAS ÉS HARTMANN (1996); HARTMANN (1996)
4.	Lengyelország	1979 – 1987	<i>Quercus robur</i> , <i>Quercus spp.</i>	nincs jelente	szezonális aszály	111'000 m ³ faanyag veszteség	táji	<i>Tortix viridiana</i> , patogének, <i>Ophiostoma spp.</i>	SIWECKI és UFNALSKI (1998)
5.	Görögország	1987 – 1989	<i>Abies alba</i> Mill. x <i>A. cephalonica</i> Loud.	közepes magassági szinten	több éves aszály	1,8 % / év	kistérségi	betűző szű és más rovarok	MARKALAS (1992); KAILIDIS és MARKALAS (1990)
6.	Nagy-Britannia	1985-1989	<i>Quercus robur</i> , <i>Quercus petraea</i>	déli régiók	több éves aszály	~ 18 %	kistérségi	<i>Agrilus pannonicus</i> , <i>Scolytus intricatus</i>	GREIG (1995); GIBBS és GREIG (1997)
7.	Olaszország (Dél-Tirol)	1992	<i>Pinus sylvestris</i>	alacsonyabb déli régiók	több éves aszály	nincs jelentve	kistérségi	különböző rovar fajok	MINERBI (1993)
8.	Dél-Ausztria	1990 – 1996	<i>Pinus sylvestris</i> , <i>Pinus nigra</i>	alacsonyabb déli régiók	szezonális aszály	27.6 – 49.2	táji	különböző rovar fajok	CECH és TOMICZEK (1996)
9.	Olaszország (Aosta)	1985 – 1998	<i>Pinus sylvestris</i>	déli régiók	több éves aszály	nincs jelentve	kistérségi	<i>Armillaria spp.</i>	VERTUI és TAGLIAFERRO (1998)
10.	Spanyolország	1994, 1998	<i>Quercus spp.</i> , <i>Pinus spp.</i> , <i>Juniperus spp.</i>	foltonként, déli részen	több éves aszály, nyári aszályok	0 – 19.4 fafaj függvénye	kistérségi	nincs jelentve	PEÑUELAS et al., (2001); LLORET és SISCART (1995); LLORET et al., (2004); MARTINEZ-V és PIÑOL (2002)
11.	Norvégia	1992 – 2000	<i>Picea abies</i>	foltonként	több éves nyári aszály	2 – 6.6	kistérségi	<i>Polygraphus poligraphus</i>	SOLBERG (2004)

	Helyszín	Év(ek)	Domináns faj	Mortalitás térbeli koncentrációja	Klíma anomália	Mortalitás szintje	Érintett terület	Kapcsolódó biotikus tényezők	Referencia
12.	Magyarország	200-2003	<i>Fagus sylvatica</i>	déli régiók	többéves aszály	140'000 m ³ faanyag veszteség	Bakony, Zala megye ~ 114 ha	<i>Agrilus viridis</i> , <i>Taphrorychus bicolor</i>	LAKATOS és MOLNÁR (2009); RASZTOVITS (2011)
13.	Ausztria (Tyrol)	2001	<i>Pinus sylvestris</i>	alacsonyabb régiók	szezonális aszály	nincs jelentve	kistérségi	nincs jelentve	OBERHUBER (2001)
14.	Görögország (dél és közép régiói)	2000 – 2002	<i>Abies cephalonica</i>	nincs jelentve	több éves aszály	5 – 10 %/év	kistérségi	<i>Phaenops knoteki</i> , <i>Pityokteines spinidens</i>	TSOPELAS et al., (2004); RAFTOYANNIS et al., (2008)
15.	Svájc (Valais)	1973 – 1976 1987 – 1993 1996 – 2000 2000 – 2004	<i>Pinus sylvestris</i>	alacsonyabb déli régiók	több éves nyári aszály, magas hőmérséklet	7 – 59	kistérségi	<i>Phaenops cyanea</i> , <i>Ips acuminatu</i>	WERMELINGER et al., (2008); DOBBERTIN et al., (2007); BIGLER et al., (2006); DOBBERTIN és RIGLING (2006)
16.	Németország (Baden-württemberg)	2003 – 2006	<i>Fagus sylvatica</i>	nincs jelentve	aszály, magas hőmérséklet	~ 98'000 m ³ faanyag veszteség	kistérségi	<i>Taphrorychus bicolor</i> , <i>Trypodendron domesticum</i>	PETERCORD (2008)
17.	Spanyolország	2004 – 2006	<i>Pinus sylvestris</i> , <i>Pinus nigra</i>	nincs jelentve	több éves aszály	nincs jelentve	foltonként, 13'404 ha	nincs jelentve	NAVARRO-CERRILLO et al., (2007)
18.	Oroszország (észak-nyugati régió)	2004 – 2006	<i>Picea obovata</i>	foltonként	aszály, magas hőmérséklet	208 M m ³ faanyag veszteség	~ 1.9 M ha	<i>Ips typographus</i> és gombák	KROTOV (2007); TSVETKOV és TSVETKOV (2007); CHUPROV (2007); SHTRAKHOV (2008); KAUKANEN et al., (2008)
19.	Franciaország (Provance)	2003 – 2008	<i>Pinus sylvestris</i>	alacsonyabb déli régiók	több éves nyári aszály	20 – 80	foltonként ~ 100'000 ha	<i>Tomicus</i> , <i>Ips</i> , <i>Pissodes</i>	VENNETIER et al., (2007); THABEET et al., (2009)
20.	Franciaország	2003 – 2008	<i>Quercus spp.</i> , <i>Fagus sylvatica</i> , <i>Abies spp.</i> , <i>Picea abies</i> , <i>Pinus spp.</i>	alacsonyabb és közepes régiók	nyári aszály, hóhullám	1 – 3%/év	regionális	betűző szú és gombák	BREDA et al., (2006); LANDMANN et al., (2006); ROUAULT et al., (2006);
21.	Franciaország	2006 – 2008	<i>Quercus spp.</i>	északi és közepes régiók	több éves aszály	10 – 70	foltonként ~ 120'000 ha	<i>Platypus spp.</i> , <i>Coroebus spp.</i>	VENNETIER et al., (2008)

A vízstressz fennállásához kapcsolódik az erdőtűz is, hiszen a hosszan tartó szárazság, az intenzív aszály, a klíma melegekedése miatt fellépő hótakaró nélküli telek kedveznek a károk kialakulásának (HORVÁTH et al., 2001). **Hazánkban egyre gyakrabban, és egyre nagyobb területeket érintő erdőtűzkár kerül nyilvántartásba** (NAGY, 2008).

2.4.2. Fafajok elterjedésének megváltozása

A klímaváltozás hatásával kapcsolatos kutatások egyik fontos eszköze a különböző fafajok elterjedésére vonatkozó vizsgálatok. Az Európában élő legfontosabb fafajok potenciális (lehetséges) elterjedésének várható változásáról HICKLER és mtsai. (2012) készítettek egy átfogó tanulmányt, melyben 14 fafajt vizsgáltak meg. A fafajokat különböző vegetáció típusokba sorolták be, így pl.: a kocsánytalan tölgy a mérsékletövi lombos erdők típusába tartozik, míg a bükk és a vele elegyes erők egy különálló kategóriát képez, SYKES és mtsai. (1996) klasszifikációja nyomán. Az elterjedés modellezéséhez globális kapcsolt légkör-óceán modellt (AOGCM) használtak fel, mely szerint Észak-Európában átlagosan 4°C-kal, míg Dél-Európában 3,5°C-kal lehet magasabb az átlaghőmérséklet 2071-2100-ra (referencia időszak: 1961-1990). Ezek alapján a **boreális, alpin régiók fafajainak élettere beszűkülhet**, míg a **melegkedvelő mediterrán fafajok** (*Quercus pubescens*, *Pinus hallepensis*) és a **szárazságtűrő cserje fajok elterjedésének növekedése várható** a század végére (7. ábra).



7. ábra: Potenciális jelenlegi (1961-1990) és várható jövőbeli (2071-2100) vegetáció elterjedés Európában a HadCM3 globális éghajlati modell alapján a 21. század végére (HICKLER et al., 2012)

Az észak-európai területeken már jelenleg is több tanulmány számol be az éghajlati anomáliák hatására kialakuló vitalitás csökkenéséről a *Picea abies* (közönséges lucfenyő) és *Abies alba* (közönséges jegenyefenyő) fajok esetében (BRADSHAW et al., 2000; SELÁS et al., 2002; SCHLYTER et al., 2006). Ez előrevetíti a jövőbeli elterjedési területek csökkenését, mivel nagyon valószínű, hogy az extrém időjárási események gyakorisága növekedni fog.

A fenti vizsgálat alapján is látható, hogy meg kell különböztetnünk a fajok északi, déli valamint magassági elterjedési határait (HAMPE és PETIT, 2005; MÁTYÁS et al., 2009a; CZÚCZ et al., 2013). Az északi vagy felső elterjedési határt döntően a hőmérséklet határozza meg (termikus határ). A prognosztizált melegedés hatására tehát, e régiókban kedvezővé válhatnak a feltételek a melegkedvelő fajok elterjedési területeinek növekedéséhez. Ezzel szemben a **déli, vagy alsó (xerikus) határt alapvetően a csapadékelátottság**, vagyis az elérhető vízmennyiség **határozza meg** (HOGG et al., 2008; HLÁSNY és MAREK, 2008; MÁTYÁS et al., 2009a; MÁTYÁS és CZIMBER, 2004). Amennyiben nem áll rendelkezésre a növényzet számára elegendő víz, úgy betegségek, különböző kártételek következhetnek be, és ennek hatására végül az elterjedési határ is visszahúzódhat (JUMP et al., 2009; MÁTYÁS, 2010). Mivel hazánk területén húzódik számos faj alsó (szárazsági) határa, így különösen nagy figyelmet kell fordítani az itt található populációk klíma-válaszreakcióira (MÁTYÁS et al., 2009b; CZÚCZ et al., 2011; FÜHRER et al., 2011).

CZÚCZ és mtsai (2011, 2013) a bükk (*Fagus sylvatica*), valamint a kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea*) fajok elterjedésének vizsgálatára „döntési-fa” modellel készítettek becsléseket a várható jövőbeli változásokra hazánk területére. Az éghajlati adatok alapja az IPCC 4. helyzetértékelő jelentéséhez készült globális általános légköri körzési modellek (GCM) voltak (különböző scenáriókkal), így az elterjedési térképeken a bizonytalanságokat is megjelenítették. Eredményeik szerint a tavaszi és nyári átlaghőmérsékletek, valamint az éves csapadékösszegek a legmeghatározóbb éghajlati tényezők a két faj elterjedésében. A vizsgálatot szárazsági indexek alapján is elvégezték, mely során az Ellenberg-index (*EQ*) bizonyult a legmegfelelőbb magyarázó változónak. Ezekkel az éghajlati tényezőkkel készült **becslési térképeken a bükk esetében drasztikus** (teljesen el is tűnhet), a **kocsánytalan tölgyek esetében pedig jelentős** (kb.: -85%-os) **terület csökkenés várható** a 21. század végére.

A bükk a szárazságra igen érzékeny fajok közé tartozik, így a kedvezőtlenebbé váló klimatikus okok miatt sok tanulmány számol be a jelenlegi areájának várható visszahúzódásáról (CZAJKOWSKY et al., 2005; PEÑUELAS et al., 2007; KRAMER et al., 2010; LINDER et al., 2010; RASZTOVITS, 2011). RASZTOVITS és mtsai. (2012) e faj hazai

elterjedésének várható jövőbeli változására 8 modellt alkalmazott, amelyek közül a mesterséges neurális hálók módszerét (BP-ANN) választotta legalkalmasabbnak. Ez alapján a 21. század közepére (2036-2065) kisebb mértékű (-8%), viszont a század végére jelentősebb (-56,8%) terület csökkenés következhet be. Ez azonban így is egy kedvezőbb becslés az előző (CZÚCZ et al., 2011, 2013) modellszimulációkhoz képest, amelynek valószínűleg az az oka, hogy RASZTOVITS és mtsai. (2012) a CLM regionális klímamodell (RCM) alkalmazták, és nem pedig globális modellt (GCM). Az RCM-ek területi felbontása sokkal finomabb, mint a GCM-eké, így sokkal részletesebb képet adnak a klíma változásának tendenciáiról, és ezek használatával pontosabb eredmények készülhetnek az elterjedésről is.

MÓRICZ és mtsai. (2013) három klímazonális fafaj (bükk, kocsánytalan tölgy és csertölgy) potenciális elterjedését vizsgálta meg a jelenlegi és várható jövőbeli klímában. A REMO regionális klímamodell eredményein alapuló, fuzzy logikát követő niche modellel készült térképek szerint a bükk számára alig marad kedvező terület, néhány foltban maradhat meg csupán hazánkban. **A kocsánytalan tölgy esetében szintén drasztikus csökkenést jelez, helyét a szárazságot jobban tűrő csertölgy foglalhatja el.**

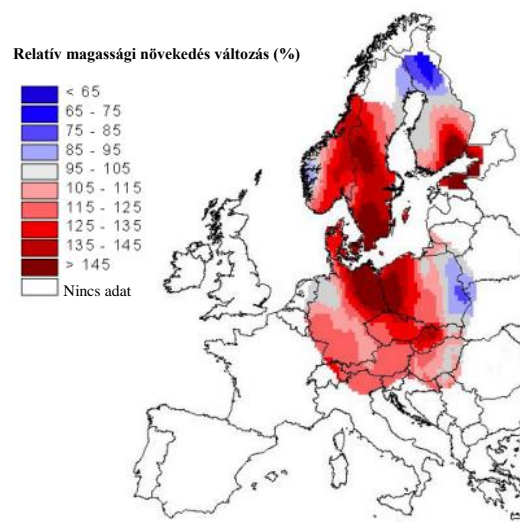
2.4.3. Növedékben történő változások

Ahogy azt korábban említettem Európa számos területén az emelkedő hőmérséklettel és CO₂ koncentrációval arányosan a **fanövedék gyorsuló tendenciáiról** számol be rendkívül sok tanulmány (SPIECKER et al., 1996; SPIECKER, 1999; THEURILLAT és GUIAN, 2001; SOMOGYI, 1998, 2007, 2008; SOLYMOS, 2009; PRETZSCH et al., 2014). Azon termőhelyeken **ahol a víz nem limitáló tényező**, (tehát nincs, vagy nem túl gyakran lép fel szárazság okozta stressz) mind az átmérő mind a famagasság tekintetében valóban gyorsuló tendencia lépett fel. Közép- és Dél-Kelet Európa azon területein azonban, **ahol jelentős a szárazság okozta vízstressz éppen ellenkező** folyamatokról számolnak be a kutatók (HORVÁTH és MÁTYÁS, 2014; ILLÉS et al., 2014; FÜHRER et al., 2015; GULYÁS és BERKI, 2016; ILLÉS és FONYÓ, 2016; GULYÁS et al., 2017). A növedék változásának nyomon követésére, és a trendek meghatározására, éppen ezért a hosszúlejárátú fatermési kísérletek nagy jelentőséggel bírnak.

A Soproni-hegyvidék hosszú lejárátú kísérleti területeinek feltáró átmérő növekedési és kompetíciós vizsgálatait HORVÁTH (2012) végezte el. Eredményei alapján egy kocsánytalan tölgyes - bükkös erdőrészletben 1990 és 2005 közötti felvételek között jelentős törzsszám csökkenés mellett, enyhe körlapösszeg növekedés, valamint jelentős fatérfogat növekedés

tapasztalható. Az általa alkalmazott növtér index jelentősen megnőtt (a törzsszám csökkenés miatt), tehát az állományok gyérülése (amelynek lehetnek biotikus és abiotikus okai) során nem magassági, hanem inkább az átmérő növekedés következett be. Ezek alapján tehát a klímaváltozás hatására kialakuló egyre gyakoribb száraz, és aszályos időszakok okozta famortalitás pozitívan hathat az átmérő növekedésre. BERKI és mtsai. (2016) is megerősítik, hogy az extrém aszályok hatására kiritkult kocsánytalan tölgy állományok túlélő fái, nagyobb növtérrel ezáltal több víz-, és tápanyaggal rendelkeznek, így nagyobb átmérőnövekedést mutatnak, mint a kevésbé gyérült állományok. Terepi méréseim és megfigyeléseim alapján is több helyszínen tapasztalható volt, hogy a szárazság hatására kiritkult kocsánytalan tölgy állományokban intenzív radiális (átmérő) növekedés jelentkezett. A terepi mérési eredmények részletes bemutatása a dolgozat 7. fejezetében található.

A magassági és átmérő növedék változásának vizsgálatára az *European Forest Institute* (EFI) elindította a RECOGNITION (*Relationships Between Recent Changes of Growth and Nutrition of Norway Spruce, Scots Pine and European Beech Forests in Europe*) projektet. Ennek célja az volt, hogy meghatározza a dendrometriai paraméterek változásait Észak- és Közép-Európa három fontos fafajára (bükk, erdei- és lucfenyő) vonatkozóan (www.efi.int). Eredményeik alapján magassági növedék gyorsulás lépett fel 1961-2000 között Európa jelentős részén, amely egyes esetekben meghaladta a 40%-ot is (pl.: Németország észak-keleti régiói, Dél-Skandinávia). A tanulmányban Magyarországra vonatkozóan kismértékű növekedés mutatkozott, egyes területein viszont nem volt egyértelmű trend kimutatható (8. ábra).



8. ábra: Relatív magassági növekedés változás (%) a RECOGNITION projekt eredményei alapján (www.efi.int)

A nem egyértelmű változás egyik oka az lehet, hogy hazánk területéről összesen három mintaterületet vontak be a vizsgálatba, amely alapján nem lehet kimutatni a magassági növekedés változását. Másik oka az lehet, hogy valóban egy olyan átmeneti zónában helyezkedik el a Kárpát-medence, ezen belül is hazánk, ahol már a gyakori aszályok, és a vízhiány következtében nem nő, hanem stagnál, vagy éppen csökken a fák magassági növekedése (SZABADOS, 2007).

2.4.3.1. Faállományok növekedését mérő-és megfigyelő rendszerek

Magyarország erdeinek állapotáról, növekedési viszonyairól többféle monitoring rendszer tájékoztat. Ilyen az **Erdővédelmi Mérő-és Megfigyelő Rendszer (EMMRE)**, amely 1988-ban jött létre, vagy az 1993 óta működő **Fállományok Növekedésének Megfigyelése (FNM) program** (KOLOZS et al., 2009). A ciklikusan ismétlődő mérési programok mellett az **Országos Erdőállomány Adattár** adhat képet hazánk erdőállományainak jelenlegi állapotáról.

a) Országos Erdőállomány Adattár

Az 1971-ben létrejött, országos lefedettséggel rendelkező adattár tartalmazza az összes hazai erdőrészlet azonosítóit, termőhelyi adatait, fafaj összetételét, fakészletét, növedékét, egészségi állapotát, valamint a 10 éves üzemtervi/erdőtervi ciklusra vonatkozó szakmai feladatokat (SZMORAD, 2013; <http://portal.nebih.gov.hu>). A nagy mennyiségű adat alkalmas országos statisztikák kiértékelésére és erdőterületeken elvégzett munkák időbeli és térbeli értékelésére. Mivel az ország területének összes erdőrészletéről vannak benne információk, így **elterjedés vizsgálataimhoz ezt az adatbázist használtam fel.** A *3.2 fejezetben* részletesen is kitérek arra, hogy pontosan mely adatokat használtam fel ebből az adatbázisból.

b) EVH I. rendszer - nagyterületi egészségi állapotfelmérés

Az 1988-ban létrejött EVH I. rendszer alapfeladata a magyarországi erdők évenkénti egészségügyi állapotfelmérése (KOLTAY et al., 2011). Nemzetközi metodika szerint a mintavételi területek úgy létesültek, hogy az ország teljes területét lefedő 4 km × 4 km-es elméleti háló került kialakításra. Az elméleti háló azon rácspontjai, amelyek erdőterületre estek, mintavételi pontot létesítettek.

A kijelölt pontokon 4 égtáj szerint 25 m-re eső területen, a legközelebbi hat álló fa kerül bele a vizsgálokba. Minden évben megnézik e mintafákon a lomkorona elszíneződését, lombvesztés jellegét, kiterjedését, az ágelhalások és törzskárok, valamint a gyökfőben előforduló károsodások mértékét (KOLTAY et al., 2011).

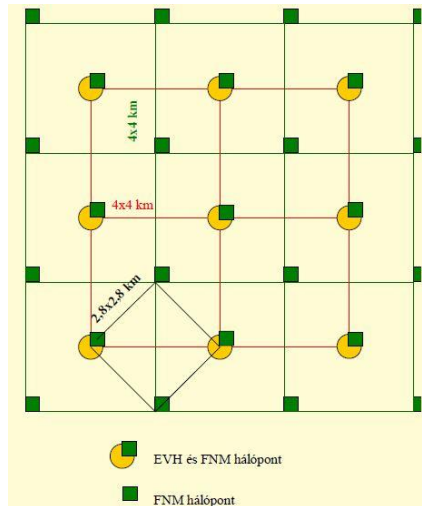
c) EVH II. rendszer – intenzív monitoring hálózat

Az intenzív monitoring hálózat 1993 óta működik, és legfőbb célja a légszennyezés, valamint az egyéb károsító tényezők hatásának vizsgálata. Az EVH II. rendszer része az ICP Forests (*International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests*) nemzetközi hálózatának (www.icp-forests.net), így a mérések az ICP tagállamai által közösen elfogadott nemzetközi módszerekkel történnek. Mintavételi helyek ott létesültek ahol az ország teljes területét lefedő 16 km x 16 km-es elméleti háló rácspontjai erdőterületekre estek. Ezeken a helyszíneken ötévente végeznek magasság méréseket, ezáltal folyamatosan követhető a magassági növedék változása.

d) FNM rendszer – Faállományok Növekedésének Megfigyelése

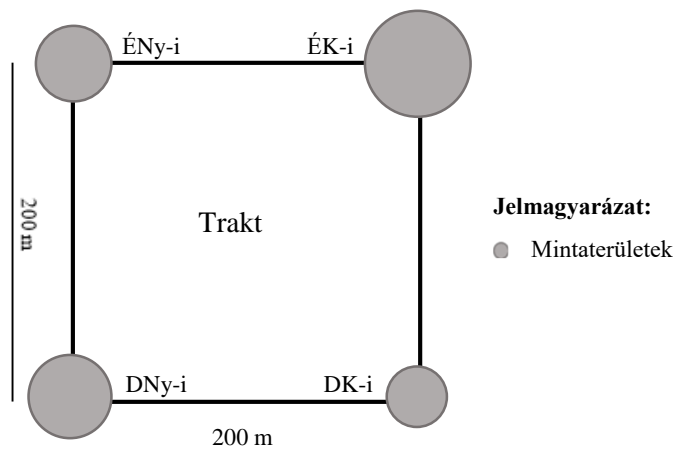
Disszertációmban a kocsánytalan tölgy produkciójának vizsgálatához az FNM mérőhálózat adatait dolgoztam fel, így e hálózat mérési módszereit, és a felvételezési eljárást részletesebben mutatom be.

Az FNM hálózat az ország erdőállományának növekedési viszonyairól nyújt hiteles képet, egy-egy konkrét fafaj alkotta faállomány részletes megfigyelésével (KOLOZS et al., 2009). Ez a mérőhálózat 1993- óta működik, igazodva a már korábban kialakított EVH rendszerhez. Mintavételi pontok az EVH I. elméleti 4 km x 4 km-es hálózatának déli irányú 2 km x 2 km-es eltolásával jöttek létre (9. ábra). Így elméletben egy **2,8 km x 2,8 km-es hálózat** alakult ki. Ha a háló **rácspontja erdőterületre estett ott mintapont** (hálópont) **létesült**.



9. ábra: Az EVH és FNM hálópontjainak kijelölése (KOLOZS et al., 2009)

Minden egyes hálóponton, egy 200 m x 200 m-es négyzet, ún. trakt lett illesztve úgy, hogy a trakt sarokpontjai kijelölik a mintavételi területek középpontjait (10. ábra). Egy trakton tehát 4 mintavételi pont létesült, amelyben a faegyedek felvételezése történhetett állomány leírásos, vagy egyedi felvételezési módszerrel.

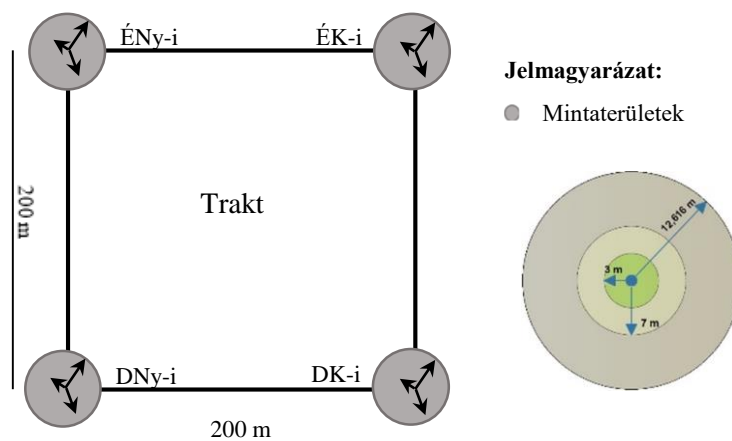


10. ábra: FNM mérőhálózat sematikus felvételi traktja egyedi felvételezésű módszerrel történő négy mintaponttal (KOLOZS et al., 2009 nyomán)

Állományleírásos módszer abban az esetben indokolt, amikor pl.: megközelíthetlenség miatt nem lehetett egyedileg felvételezni a mintapont mintafáit. Ekkor az adatott mintapontra vonatkozó adatokat az esetek többségében az Országos Erdőállomány Adattárból írták ki. Egyedi felvételezésű mintapontokon, **minimum 4 maximum 25 m sugarú körökben** történt az adatgyűjtés. A különböző sugarú körök méretét a mintafák száma határozta meg. **Minden egyes mintaterületen 15 -25 db mintafa**

kerül bele a felvételezésbe, így egy fiatal, sűrű állomány esetében kisebb, míg idősebb, ritkább állomány esetében nagyobb mintakörre volt szükség.

A felvételezések 5 évenként ismétlődnek (felvételi ciklusonként), vagyis 1993-1997 között a felvételek 1. ciklusa, 1998-2002 között a 2. ciklusa stb... történt meg. A harmadik ciklust követően, 2007-ben történt felülvizsgálat során azonban némileg módosult az FNM felvételezések módszertana. Ezek alapján, az első három ciklus azonos módszerekkel történő felvételeinek neve FNM1-re módosult, míg a későbbi, új módszerrel történő adatfelvételek FNM2-ként kerültek nyilvántartásra. Az új **FNM2 rendszer alapvetően az állandó sugarú** (3 m, 7 m és 12,6 m) koncentrikus **körök** által reprezentált mintapontok **felvételezésében különbözik** az előző FNM1 rendszertől. Ennek értelmében minden mintapontot, három koncentrikusan elhelyezkedő sugarú mintakör segítségével felvételeznek FieldMap rendszerrel (11. ábra).



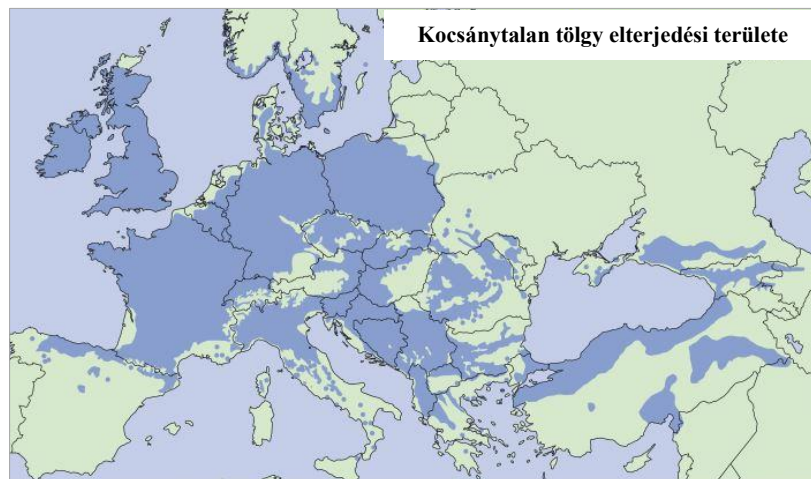
11. ábra: FNM2 mérőhálózat sematikus felvételi traktja egyedi felvételezésű módszerrel történő négy mintaponttal, állandó sugarú körös felvétellel (KOLOZS et al., 2009 nyomán)

Tehát nem a mintafák száma, hanem az állandó terület (500 m^2) határozza meg azt, hogy mennyi mintafa kerül a felvételezésbe. Ez a módszer így alkalmas lehet arra, hogy a szárazság okozta famortalitás hatását vizsgálni tudjuk. Az állandó sugarú körben lévő mintafák darabszáma ugyanis egy jó indikátor a mortalitás változásának nyomon követésére. Ezzel szemben, az FNM1 esetében egy mintafa „kiesése” (abiotikus vagy biotikus okok miatt) megoldható egy új mintafa bevonásával, így a darabszám nem változik a felvételezések során. Ez alkalmatlanná teszi a mortalitás változásának vizsgálatára.

2.5. Kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea*) jellemzése

2.5.1. A vizsgált faj jelenlegi elterjedése

Az egész Európában elterjedt fajok közé tartozó kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea* Matt. Lieb.) szubatlanti és szubmediterrán viselkedésű faj (EEA TECHNICAL REPORT, 2006). Megtalálható egészen Észak-Spanyolországtól Dél-Skandináviáig (12. ábra), és bár európai elterjedésűnek mondható, Kis-Ázsia észak-nyugati részén, valamint a Kaukázusban és a Kaszpi-tó mellékén is előfordul (EATON et al., 2016; DUCOUSSO és BORDÁCS, 2004). Alapvetően **a domb-és hegyvidéki fajok közé tartozik**, így az Alpok vonulata kettéosztja, létrehozva ezzel két optimumot Franciaország, és Magyarország területén (SZAPPANOS, 1989). Hazai előfordulására jellemző, hogy az alacsonyabb térszintekben zonális megjelenésű, a magasabb hegységekben viszont a melegebb déli felvési oldalakon jelenik meg (SZAPPANOS, 1989).

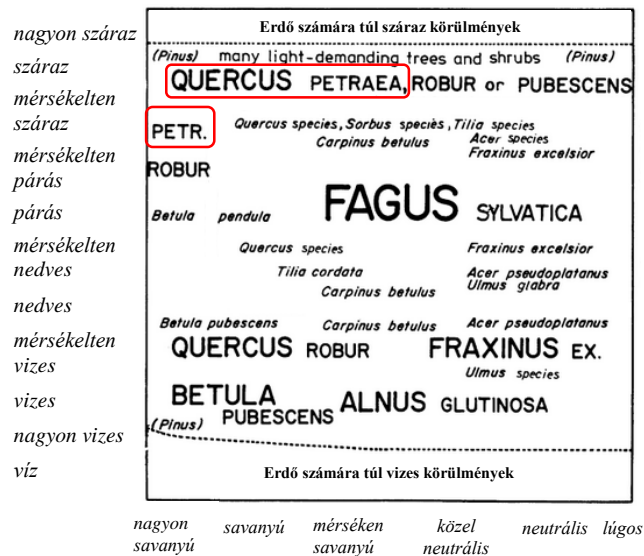


12. ábra: A kocsánytalan tölgy európai elterjedése (DUCOUSSO és BORDÁCS, 2004)

2.5.2. Termőhelyi igényei

Éghajlati igényei alapján, mérsékelt melegigényes faj. Kedvező, ha az **éves átlaghőmérséklet 9 °C felett alakul**, ez alatt faállományainak minősége és mennyisége sem megfelelő, gyenge vagy közepes növekedésű állományokat eredményez (BÉKY et al., 1987). Kivétel azonban a Magas-Bakony területe, mivel itt az alacsonyabb éves átlaghőmérsékletet, a kedvező csapadékviszonyok ki tudják egyenlíteni (SZODFRIDT, 1967). Hazánk területén tömegesen ott fordul elő, ahol **az éves csapadékösszeg 650 - 800 mm között** alakul. A legjobb kocsánytalan tölgyes állományok 700 mm-es éves csapadékösszeg felett fordulnak elő, de 800 mm felett kiszorítja a bükk (SZODFRIDT, 1967). Megtalálható 550 - 600 mm-es éves csapadékösszegek esetében is, de csak nagyon kedvező talajviszonyok mellett

(SZAPPANOS, 1989). A vegetációs időszakban 400 - 450 mm csapadékösszeg szükséges számra, 450 mm felett a csapadékviszonyok a bükknek kedveznek, így az átveszi helyét (SZODFRIDT, 1967). JÁRÓ (1962) alapján előfordulási területein a júliusi 14 órás légnedvesség 52 - 56% között alakul, tehát **kerüli a túl száraz területeket**. ELLENBERG (1996) szerint viszont a száraztól a mérsékleten nedves termőhelyekig, valamint a savanyútól a mérsékleten savanyú talajokig bárhol megtalálható (13. ábra).



13. ábra: Különböző fafajok talaj savanyúsági (x tengely) és nedvességi (y tengely) igényei Közép-Európában. A vizsgált fafaj piros színnel kiemelve (ELLENBERG, 1996 nyomán)

Klímajelző fafaj, azonban széleskörű elterjedése is mutatja, hogy az éghajlati körülményekkel szemben toleránsabb, mint más fafajok (pl.: bükk). A klímaváltozásra adott válaszreakciót ezért nehezebb meghatározni. Az alapkőzetet illetően inkább a lösz vagy a löszös homok szerkezeten létrejött talajok felelnek meg számára. Előfordul azonban sziklás, köves vázталajokon, rendzinán, rankeren és barnaföldön is. Mégél a savanyú, erősen savanyú, podzolos barna erdőtalajokon, ill. barna erdőtalajok többi típusán is. **Legjobb állományai** viszont a **mély termőrétégű agyagbemosódásos barna erdőtalajokon** élnek (SZAPPANOS, 1989). Ha a helyi klíma megfelel, akkor a talajtípussal szemben nem igényes, a talajhibákat (pl.: glejt) azonban kerüli. A magas talajvíz, pangóvíz, árterek vízjárása nem kedvező a számára, így a többletvízhatástól független termőhelyeken találjuk meg leginkább (SZODFRIDT, 1967).

2.5.3. Gazdasági jelentősége

A kocsánytalan tölgy gazdasági szerepét elsősorban kedvező műszaki tulajdonságai, és területi térfoglalása határozza meg. Jó minőségű faanyagát felhasználja a papír-, bútór és az

építő ipar is. Az egyik legkeresettebb fafajunk (MÁRKUS, 1987). **Gazdasági jövedelmezőségét csak a bükk múlja felül** hazánkban. A többi keménylombos fafajnál pedig akár kétszeresen is jövedelmezőbb (LETT et al., 2016).

Az erdészeti kutatások egyik központi kérése lett napjainkban, hogy a klímaváltozásnak milyen gazdasági következményei lehetnek (pl.: Agrárklíma, Agrárklíma2, AGRATÉR projektek). FÜHRER és mtsai. (2011) eredményei szerint, a legfontosabb klímajelző fafajok esetében (bükk, gyertyán, kocsánytalan tölgy és cser) **várhatóan csökkenni fog a fatermőképesség**, és ezzel párhuzamosan **a fatermési osztályok is rosszabb kategóriába kerülhetnek**. Ezáltal **az elérhető hozam is csökkenhet**, amely számításaik szerint egy optimista scenárió esetén is 47 millió Ft-ra tehető a Bakony erdészeti tájon. Egy pesszimistább forgatókönyv szerint ez az érték évi 327 millió Ft hozam kiesést is jelenthet, amely már megkérdőjelezi az erdőgazdálkodás eredményességét (FÜHRER et al., 2011). A tanulmány szerint a kocsánytalan tölgy esetében a várható hozam az 1. scenárió esetében 4%-kal, míg a 2. scenárió esetében 18%-kal csökkenhet.

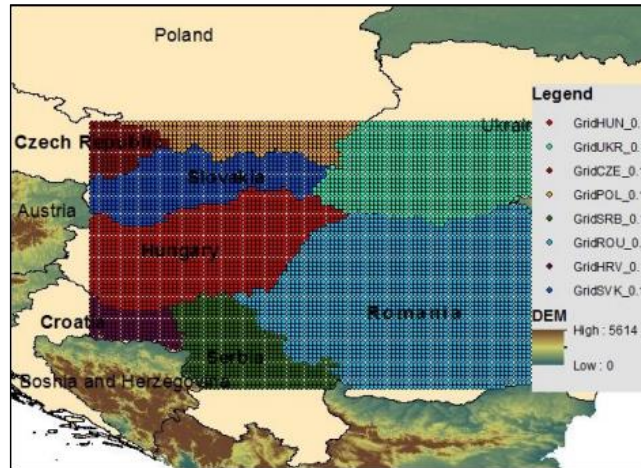
3. ADATOK ÉS MÓDSZEREK

3.1. Éghajlati adatbázisok

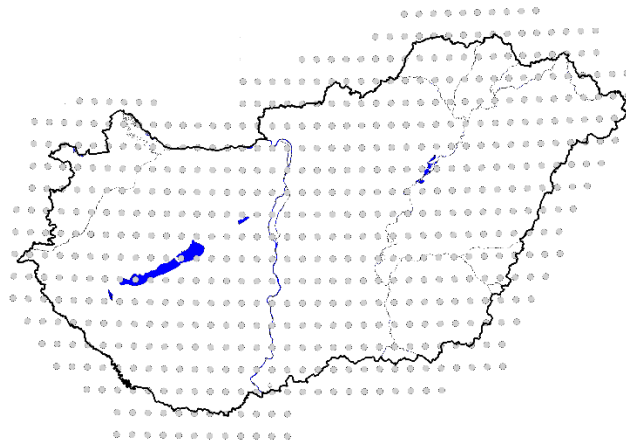
A kocsánytalan tölgy hazai elterjedésének, valamint produkciójának vizsgálatához megfelelő mennyiségű, és minőségű éghajlati adatra van szükség. Ebből adódóan, mind a múltbeli, mind a jövőbeli éghajlati adatbázisok kiválasztásánál fő szempont volt, hogy minél finomabb térbeli felbontással rendelkezzenek az adatok, továbbá hogy könnyen hozzáférhető és kezelhetőek legyenek.

3.1.1. Múltbeli éghajlati adatok

A fenti kritériumok miatt, **a múltbeli klíma változásának elemzéséhez** az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) által létrehozott **Carpatclim** (www.carpatclim-eu.org) **éghajlati adatbázist választottam**. Ez az adatbázis $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ térbeli felbontásban tartalmaz éghajlati adatokat (kb.: $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$), ami más éghajlati adatbázisokkal szemben (pl.: WorldClim (HIJMANS et al., 2005), E-OBS (HAYLOCK et al., 2008)) sokkal finomabb. A szakirodalmi vonatkozások alapján megbízható MASH (*Multiple Analysis of Series for Homogenization*) homogenizációs eljárással, valamint MISH (*Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Database*) interpolációval készült (SZENTIMREY és BIHARI, 2007; LAKATOS et al., 2013). A Carpatclim hátránya azonban, hogy céltartományán már kivülesett hazánk nyugati része (*14. ábra*), így szükséges volt az adatbázis kiegészítése a 17° szélességtől nyugatra. E területi kiegészítést az „Agrárklíma” (TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV) és az „Agrárklíma2” (VKSZ_2012-1-2012-0034) c. projektek keretein belül készült el, így létrejött egy Magyarországot lefedő teljes éghajlati adatbázis (CZIMBER, 2014; MÁTYÁS et al., 2014; CZIMBER és GÁLOS, 2016) (*15. ábra*). **A területi kiegészítést Czimber Kornél** (Soproni Egyetem, Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet) **végezte el** további OM SZ meteorológiai állomások adatainak bevonásával a Digiterra Map GIS szoftver programban (www.digiterra.hu). Az adatok feldolgozásához egy éghajlati lekérdező, és elemző modult is készítettem (CZIMBER, 2014; CZIMBER és GÁLOS, 2016), így az éghajlati térképeket ebben a rendszerben készítettem el (lásd *4.1 fejezet*). Az adatbázis raszter típusú havi felbontású csapadékösszeg és hőmérséklet fedvényeket tartalmaz, amelyek 1961-2010 között érhetőek el $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ térbeli felbontásban.



14. ábra: Carpatclim adatbázis célterülete



15. ábra: A dolgozatban alkalmazott éghajlati adatbázis térbeli felbontása és célterülete (Magyarország teljes területére kiegészített Carpatclim)

Disszertációmban a múltbeli éghajlati adatokból készített térképeket mind az elterjedés vizsgálatokhoz, mind a produkció becsléséhez felhasználtam. Összesen három 30 éves időszakot elemeztem (1961-1990; 1971-2000; 1981-2010), amelyek közül referencia időszaknak a legutóbbi harminc éves periódust választottam.

3.1.2. Jövőbeli éghajlati adatok

A várható **jövőbeli klíma változásának vizsgálatához 12 regionális klímamodell eredményeit használtam fel**, amelyek az ENSEMBLES EU FP6 projekt keretein belül készültek (VAN DER LINDEN és MITCHELL, 2009; www.ensembles-eu.org) (2. táblázat). A modell szimulációk 2100-ig tartalmaznak havi átlag-, maximum-és minimum hőmérséklet, valamint csapadékösszeg adatsorokat, amelyeket a hamburgi Max Planck Intézet szolgáltatott az „Agrárklíma és Agrárklíma2” c. projektekhez.

Az adatok térbeli felbontása $0,22^\circ \times 0,22^\circ$ (kb.: $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$), és a Carpatclim adatokhoz hasonlóan elérhető a Digiterra Map GIS szoftver éghajlati lekérdező, és elemző moduljában (CZIMBER, 2014). Ezeket az adatokat is három 30 éves időszakra bontva vizsgáltam meg, amelyek a 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 időszakok.

2. táblázat: A dolgozatban felhasznált 12 regionális klímamodell (VAN DER LINDEN és MITCHELL, 2009)

Modell neve	Szcenário	Vizsgálható paraméterek
C4IRCA3_HadCM3Q16	A1B	$T_{\text{átlag}}, T_{\text{max}}, T_{\text{min}}, P$
DMI-HIRHAM5_ARPEGE	A1B	$T_{\text{átlag}}, T_{\text{max}}, T_{\text{min}}, P$
ETHZ-CLM_HadCM3Q0	A1B	$T_{\text{átlag}}, T_{\text{max}}, T_{\text{min}}, P$
KNMI-RACMO2_ECHAM5-r3	A1B	$T_{\text{átlag}}, T_{\text{max}}, T_{\text{min}}, P$
MPI-M-REMO_ECHAM5	A1B	$T_{\text{átlag}}, T_{\text{max}}, T_{\text{min}}, P$
SMHIRCA_BCM	A1B	$T_{\text{átlag}}, T_{\text{max}}, T_{\text{min}}, P$
DMI-HIRHAM5_ECHAM5	A1B	$T_{\text{átlag}}, P$
METO-HC_HadRM3Q0_HadCM3Q0	A1B	$T_{\text{átlag}}, P$
METO-HC_HadRM3Q16_HadCM3Q16	A1B	$T_{\text{átlag}}, P$
METO-HC_HadRM3Q3_HadCM3Q3	A1B	$T_{\text{átlag}}, P$
SMHIRCA_ECHAM5-r3	A1B	$T_{\text{átlag}}, P$
SMHIRCA_HadCM3Q3	A1B	$T_{\text{átlag}}, P$

ahol: $T_{\text{átlag}}$ – havi átlaghőmérséklet [$^\circ\text{C}$]

T_{max} – havi maximum hőmérséklet [$^\circ\text{C}$]

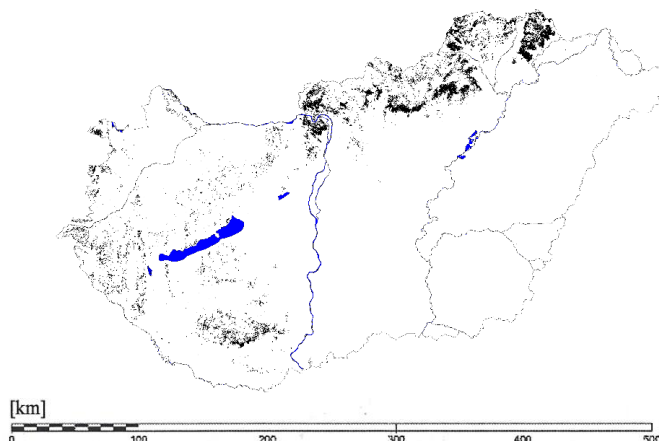
T_{min} – havi minimum hőmérséklet [$^\circ\text{C}$]

P – havi csapadékösszeg [mm]

3.2. Erdészeti adatbázisok

Az **elterjedés vizsgálatokhoz** a már korábban említett **Országos Erdőállomány Adattár** (a továbbiakban adattár, lásd 2.4.3.1 fejezet) erdőrésztlet szintű **adatsorait használtam fel**. Azért választottam ezt az adatbázist az elterjedési vizsgálataimhoz, mivel minden egyes hazai erdőrésztletről tartalmaz információt, és az elterjedés modellezéséhez nagy mennyiségű adatra van szükség. Az adattári adatokból leválogattam azokat az erdőrésztleteket, ahol a kocsánytalan tölgy főfafajként szerepelt. Ez azt jelenti, hogy az elterjedési vizsgálataimba csak azon erdőrésztletek adatait vontam be, **ahol a kocsánytalan tölgy elegyaránya (EA) több mint 50% volt** (16. ábra). A leválogatásra azért volt szükség, mert a disszertáció célja nem az elegyfajként megjelenő kocsánytalan tölgyek, hanem a magas elegyarányban megjelenő gazdaságilag is rentábilis KTT állományok vizsgálata. Így összesen 35 708 erdőrésztlet alapján készítettem el az elterjedés potenciális (lehetséges) jelenlegi, valamint becsült jövőbeli változásainak térképeit. Ezzel a szűréssel a kiválasztott faj térfoglalása hazánkban 128 883 ha, amely átlagosan $153 \text{ m}^3/\text{ha}$ élőfakészletet jelent. A Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal (NÉBIH) által közreadott erdőleltár alapján (ERDŐLELTÁR 2010-2014; <http://portal.nebih.gov.hu/erdoleltar>) a faj teljes hazai

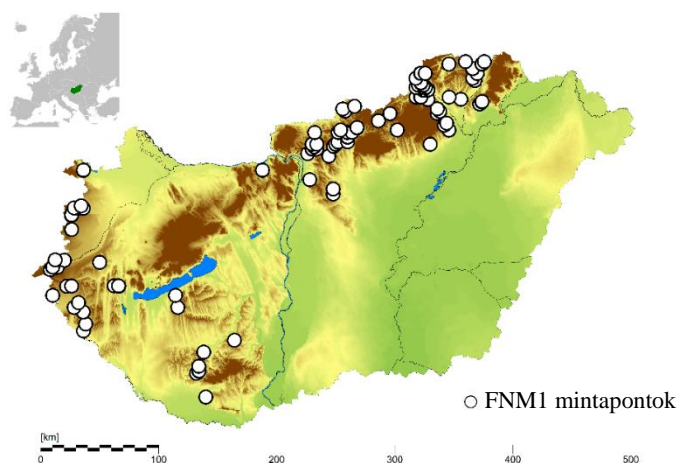
térfoglalása 137 592 ha. Tehát összesen 8 709 ha erdőterületet nem tudtam figyelembe venni a vizsgálatok során.



16. ábra: Felhasznált kocsánytalan tölgy erdőrészek (adattári adatok)

Az adattári adatok előnye, hogy a nagy mennyiségű adatsorok számos statisztikai vizsgálatra, valamint az elterjedés elemzéséhez is alkalmasak. Hátránya azonban, hogy az adatok sokszor pontatlanok, így a növedék változásának tanulmányozására nem alkalmazható. **A produkció változásának vizsgálatára** ezért a NÉBIH, Erdészeti Igazgatóság, **Faállományok Növekedésének Megfigyelése (FNM1) program adatsorait használtam** fel 1993-2007 között (lásd korábban 2.4.3.1. fejezet). Mivel a legutolsó felvételi ciklus 2017-ben került lezárásra, és még nem elérhetőek az adatai, így **dolgozatomban a már lezárt, és azonos módszerekkel történő első három felvételi ciklus (FNM1) adatait használtam**. Ebben az esetben is (az elterjedési vizsgálatokhoz hasonlóan) **50%-os elegyarány feletti** mintapontokat vontam be az elemzésbe. Az adatok 5 éves ismétlésű méréseket (ciklusokat) tartalmaznak, tehát ez az adatsor 3 felmérési ciklust jelent. Vizsgálataimhoz az FNM1 mintapontok korát, elegyarányát, záródását, átlagmagasságát, átlagátmérőjét és a termőhelyi adatait használtam fel. Ez összesen 584 mintapontot (1 752 felmérést) jelent. A statisztikai vizsgálatok azonban nem adtak értékelhető eredményt az éghajlati paraméterek és a dendrometriai paraméterek összefüggésére abban az esetben, amikor minden mintapontot bele vettem a vizsgálatba. Ennek valószínű oka, hogy a helyi domborzati mikroklíma, tehát a mintapontonként erősen eltérő lejtőszög valamint kitettség erősen befolyásolták az adatokat. Dolgozatomnak azonban nem célja a mikroklíma hatásának vizsgálata a választott fafajra, hiszen ehhez az erdőállományon belül kihelyezett mikroklíma állomások adataira lenne szükség. A klíma nagytérségű (makro) hatását vettem figyelembe, hiszen a dolgozatban használt Carpatclim adatbázis is makroklímát jellemző adatokat tartalmaz, ezért szükséges volt az FNM1 adatok szűrése. A továbbiakban tehát **csak**

azokat a mintapontokat vizsgáltam a **produkciónak változásának elemzése során, amelyek zonális termőhelyűek** voltak, így csökkentve a mikroklíma hatását. Az FNM1 mintapontokból csak a **sík, ill. közel sík fekvésű valamint mély, és igen mély termőréteggel rendelkező KTT** mintapontokat választottam. A szűrést követően 139 mintapont (417 felmérés, összesen 2 106 db mintafa) adatai álltak rendelkezésemre (17. ábra). Ez azt jelenti, hogy a **produkciónak változásának jelenlegi, valamint jövőbeli alakulásának becslésére a teljes FNM1 adatbázis mintapontjainak mintegy ¼-ét** használtam.

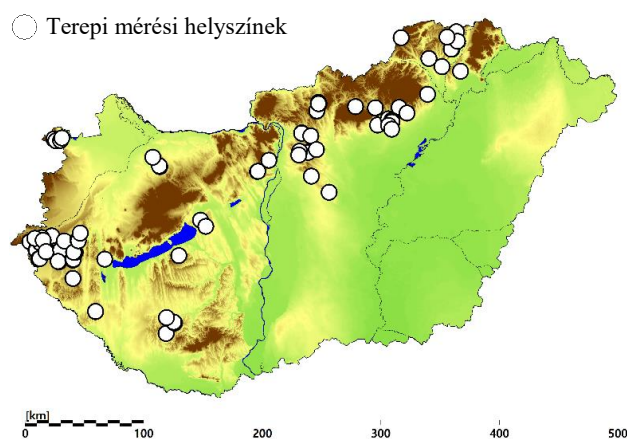


17. ábra: Szűrés után kiválasztott kocsánytalan tölgy FNM1 mintapontok

Az FNM1 adatbázis mellett terepi méréseket is végeztem az ország különböző KTT állományaiban. Ennek oka, hogy az FNM1 bár pontos helyszíni méréseken alapul, de a mintapontok raster rácshálóhoz igazodnak, amely megnehezíti az adatok hasznosíthatóságát. A dolgozatban ugyanis olyan helyszínek tölgyeseit vizsgálom, amelyek zonális termőhellyel rendelkeznek, vagyis ahol a növekedés „csak” a klímától függ, tehát nincs talajhiba vagy a termékenységét befolyásoló egyéb tényező. Az FNM metodikájának nem ez volt a célja, így a monitoring pontoknak csak egy része esik zonális termőhelyre (összesen 139 mintapont). Kiegészítésképpen, ill. az összehasonlíthatóság miatt egy száraz-nedves klímagradiens mentén terepi méréseket végeztem témavezetőmmel Dr. Berki Imrével. A mérési helyszínek a Soproni Egyetem, Környezet-és Földtudományi Intézetének kutatási területei, melyeken minden évben azonos mérési módszerekkel és mérési eszközökkel (TruePulse 360B lézeres magasságmérő, hagyományos (nem digitális) átlaló) történnek a felmérések. Ebbe a mérési sorozatba kapcsolódtam bele 2015-ben, így két éve végzem én is a helyszínek bejárását, a kocsánytalan tölgy állományok egészségügyi állapotfelmérését ill. a magasság és az átmérő mérését. Az eddigi mérésekről már korábban

is megjelentek mind a módszertant, mind az eredményeket bemutató szakirodalmak (BERKI et al., 2014; GULYÁS és BERKI, 2016; BERKI et al., 2016), így jelen disszertációban csak azokat a felmérési eredményeket mutatom be, melyek esetében részt vettem a terepi munkában ill. az adatfeldolgozásban.

Összesen 83 kocsánytalan tölgy állományban mértük fel a fák törzsátmérőjét és magasságát. A kiválasztott mérési helyszínek a 18. ábrán láthatók.



18. ábra: A terepi mérések helyszínei, jelölve a száraz-nedves klímadienst

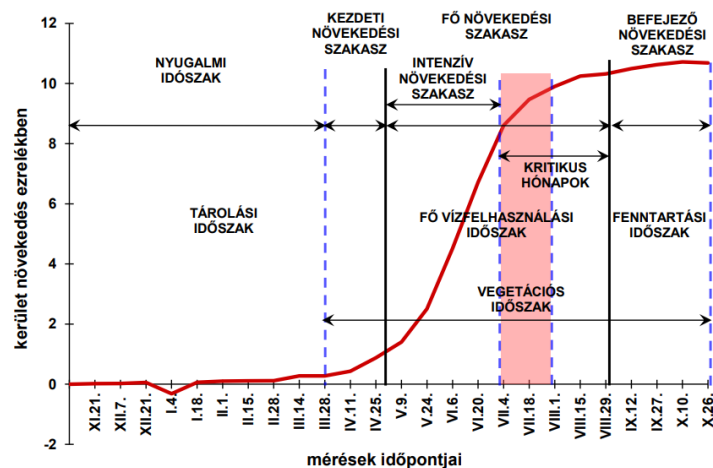
A 83 helyszín közül 50 állományban jelöltünk ki 50 m x 50 m-es kvadrátot, melyekben meghatároztuk az állományok ún. relatív állománysűrűségét [%] is (BERKI et al., 2016). A relatív sűrűség kiszámítása az alábbiak szerint történt: REINECKE (1933) alapján a faállományok maximális törzsszámát az illető állomány átlagátmérője határozza meg, vagyis (1) kiszámítottuk az állományok átlag törzsátmérőjét, majd (2) a BÉKY (1981) fatermési táblái alapján az adott átlag átmérőhöz tartozó hektáronkénti törzsszámot választottuk maximális törzsszámnak (100%-nak). Ezt követően (3) a maximális törzsszám [db/ha] és az adott vizsgált állomány egy hektárján lévő törzsszám [db/ha] hányadosa megadja az ún. relatív állománysűrűséget [%].

A területen lévő 20 legmagasabb faegyed alapján meghatároztuk a felsőmagasságot, valamint a megmért faegyedek egyharmada alapján kiszámítottuk az átlagmagasságot. A mért magassági értékeket BÉKY (1981) mageredetű kocsánytalan tölgy fatermési tábláinak III. fatermési osztályán adott életkorhoz tartozó középértékeihez viszonyítottuk, ezeket 100 % -nak tekintve. Az összehasonlítás eredményeként megállapítottuk az ún. relatív felsőmagasságot [%]. Mind a relatív felsőmagasságot, mind a relatív állománysűrűséget összehasonlítottuk a Carpatclim múltbeli éghajlati adatbázis 1981-2010-es éghajlati paramétereivel.

3.3. Elterjedés vizsgálatokhoz alkalmazott módszerek

A kocsánytalan tölgyek elterjedéséhez az Országos Erdőállomány Adattár adatait, a referencia időszak (1981-2010), valamint a jövőbeli három időszak (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) klímaterképeit használtam fel. A vizsgálatba bevont éghajlati paramétereket és indexeket a 3. táblázat foglalja össze. **Az éghajlati adatokat** erdészeti szempontból jelentős **élettani szakaszokra bontva értékeltem** FÜHRER (1994) munkája alapján, mivel ez a felbontás sokkal inkább meghatározza a fafajok fiziológiai folyamatait, mint pl.: az évszakos felbontás.

A fák öko-fizikai folyamataiban (vagyis az átmérő, ill. magassági növekedésében) figyelembe kell venni a fő vízfelhasználási szakaszokat. Ezek alapján beszélhetünk tárolási (vagy nyugalmi) és vegetációs időszakokról. A vegetációs időszakon belül további növekedési időszakokat különböztethetünk meg, ezek a kezdeti, fő növekedési és befejező növekedési szakaszok (FÜHRER et al., 2015). A fő növekedési időszakban, amikor a legnagyobb vízfelhasználás történik a csapadék mennyisége kritikus jelentőségű, ezért ezt az időszakot kritikus időszaknak is nevezik (19. ábra). A késő tavasz és a kora nyár (május-július) csapadéka tehát kiemelten fontos. Kritikus hónapok a július és az augusztus, de FÜHRER (2010) munkája alapján kritikus időszaknak kimondottan a júliusi hónapot jelöli meg (19. ábrán pirossal jelölve). A felosztást tekintve tehát az év hónapjai megfeleltethetők az egyes élettani szakaszoknak, vagyis a **nyugalmi** (novembertől márciusig), a **növekedési** (áprilistól októberig), a **fő növekedési** (májustól augusztusig) és a **kritikus** (július) **időszakoknak**, amelyekkel jól leírható a fák növekedése (FÜHRER, 2010). Dolgozatomban ezért az éghajlati paramétereket ebben a felosztásban vizsgáltam meg mind az elterjedés, mind produkció változásának kiértékelése során.



19. ábra: Fa fajok éven belüli vízfelhasználási szakaszai (FÜHRER, 1994; 2010)

3. táblázat: A dolgozatban felhasznált éghajlati paraméterek és indexek

Éghajlati jellemző	Rövidítés / Számítás módja
Átlaghőmérséklet	Éves átlag = $T_{\text{átlag}}$ Nyugalmi időszak (november-március) = $T_{\text{XI-III}}$ Növekedési időszak (április-október) = $T_{\text{IV-X}}$ Fő növekedési időszak (május-augusztus) = $T_{\text{V-VIII}}$ Kritikus időszak (július) = T_{VII}
Csapadékösszeg	Éves átlag = P Nyugalmi időszak (november-március) = $P_{\text{XI-III}}$ Növekedési időszak (április-október) = $P_{\text{IV-X}}$ Fő növekedési időszak (május-augusztus) = $P_{\text{V-VIII}}$ Kritikus időszak (július) = P_{VII}
Thornthwaite-féle szárazsági index	$\text{TAI} = 1,65 \cdot \left(\frac{P}{T_{\text{átlag}} + 12,2} \right)^{\frac{10}{9}}$
De Martonne-féle ariditási index	$H = \frac{P}{T_{\text{átlag}} + 10}$
Ellenberg-index	$\text{EQ} = \frac{T_{\text{VII}}}{P} \cdot 1000$
Módosított Ellenberg-index	$\text{modEQ} = \frac{T_{\text{VII}}}{P_{\text{IV-X}}} \cdot 1000$
Erdészeti szárazsági index	$\text{FAI} = \frac{T_{\text{VII-VIII}}}{P_{\text{V-VII}} + P_{\text{VII-VIII}}} \cdot 100$
Bükk tolerancia index	$\text{BTI} = \frac{0,2 \cdot P_{\text{III}} + 0,5 \cdot P_{\text{IV}} + P_{\text{V}} + P_{\text{VI}} + P_{\text{VII}} + 0,8 \cdot P_{\text{VIII}}}{(T_{\text{VI}} + T_{\text{VII}} + T_{\text{VIII}})/3}$

Az éghajlati jellemzők összesen 16 éghajlati raszter réteget jelentenek az 1981-2010-es referencia időszakra vonatkozóan, és további 3 x 16 raszter réteget a jövőbeli időszakokra (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100). Az éghajlati paraméterek mellett egy 200 m x 200 m-es felbontású digitális domborzat térképet is felhasználtam, így **összesen 65 réteggel dolgoztam** az elterjedési modellekben.

Összesen 4 modellel vizsgáltam meg az elterjedés változását (maximális valószínűségi osztályozó, bioclim, domain, one-class SVM modellek). Mindegyik modell esetében első lépésben a potenciális jelenlegi elterjedés térképét készítettem el, ami az éghajlati és a domborzati tényezőktől függő lehetséges KTT elterjedés. Minél több éghajlati paramétert adok meg a modellben annál valószínűbb, hogy a potenciális (lehetséges) elterjedés meg fog egyezni a valóságos elterjedéssel. Ezek azonban tökéletesen sosem egyeznek meg, hiszen csak éghajlati és domborzati paraméterekkel nem lehet leírni a fajok elterjedését. Számos más tényezőt is figyelembe kellene venni, pl.: genetikai talajtípus, fizikai féleség, termőréteg vastagság, emberi tényezők.

Mind a klímaterképeket, mind az adattári adatokat a Digiterra Map szoftver (www.digiterra.hu) segítségével dolgoztam fel, így technikai megfontolások alapján egy modell esetében is ezt a programot használtam. Ez a maximális valószínűség osztályozó modell.

Maximális valószínűségi osztályozás (Maximum Likelihood Classification - MLC):

Az MLC osztályozási rendszer a legelterjedtebb matematikai statisztikai módszerek közé tartozik (RICHARDS és JIA, 1999). Lényege, hogy egy ismeretlen területre vagy ismeretlen paraméterre (λ) a megfigyelési értékek (k) alapján (ami lehet pl.: az adott fafaj előfordulása/hiánya) egy speciális értékbecslést ad, amely a likelihood függvény maximuma (LUKÁCS, 2006).

1. egyenlet:

$$L_{(k,\lambda)} = P(X = k) \frac{\lambda^k - e^{-\lambda}}{k!}$$

ahol: $L(k, \lambda)$ - a maximum likelihood függvény

$P(X=k)$ - annak a valószínűsége, hogy X a megfigyelési (k) értékkel egyenlő

λ - a keresett paraméter

A Digiterra Map azonban alapvetően nem elterjedési vizsgálatokhoz készült. A Digiterra az erdőgazdálkodásban, a környezet-és természetvédelemben valamint a mezőgazdaságban ez az egyik leginkább alkalmazott térinformatikai szoftver. Előnye, hogy hatékonyan és könnyen alkalmazható, hiszen az éghajlati térképek is már ebben a programban készültek el. Hátránya azonban, hogy mivel nem elterjedési vizsgálatokhoz készült, így vannak olyan statisztikai módszerek, amelyek nem érhetőek el ebben a rendszerben. Ilyen például a modellek bevalására vonatkozó statisztikák, amelyek segítenek eldönteni a modell elfogadásának vagy elvetésének problémáját. **Éppen ezért összehasonlítottam a Digiterrával készített térképeket a ModEco (GUO és LIU, 2010; <http://gis.ucmerced.edu/ModEco/>) szoftverrel készített eredményeimmel, amely kifejeztem ökológiai modellezésre alkalmazott program.** Azért is választottam a ModEco programot, mert nemzetközileg is elismert, jól használható szoftver és így az eredményeimet összehasonlíthatom szakirodalmi hivatkozásokkal.

A ModEco általános modellezési eljárása a következő:

1. Környezeti rétegek bevitele (domborzat, éghajlat, talajtípus, stb...)
2. Fafaj adatok (pl.: megjelenési ponttérkép típus)
3. Modellfuttatást megelőző statisztikai vizsgálatok (pl.: faktor fontossági analízis)
4. Modell kiválasztás és futtatás (összesen 10 modell típus választható)
5. Validáció (beválási statisztikák készítése pl.: AUC – pontossági érték)
6. Jövőbeli környezeti rétegek bevitele (jövőbeli klíma térképek)
7. Modellfuttatás az új környezeti rétegekkel
8. Kiértékelés

A vizsgált fafajra vonatkozó adatsorok meghatározzák, hogy milyen modellek és algoritmusok használhatók a ModEco programban. Mivel egy fafajra (*Quercus petraea*) vonatkoznak az adatok, ez a „one-class data” vagyis az egy osztályozó típusba tartozó modellekre szűkíti le a módszereket. Ennél a típusnál a „*Persence only*” (csak megjelenési) modellek alkalmazhatók (ENGLER et al., 2004). Ebbe tartozik a **bioclim, a domain és a one-class support vector machines** (one-class SVM) modell típusok, így vizsgálataimhoz ezeket **alkalmaztam**.

Bioclim

A bioclim a leggyakrabban alkalmazott klasszikus „klíma-fülke” (*climate envelope*) modellek közé tartozik (BUSBY, 1986). A „klíma-fülke” elképzelés szerint a populációk mai előfordulási területei alapján, a jelenlegi és várható jövőbeli klíma paramétereiből, valamint a fajok fiziológiai tűrőképességéből megbecsülhető azok jövőbeli elterjedése (HUFNAGEL és SIPKAY, 2007). Ez tehát a niche elmélet (HUTCHINSON, 1958) szerint meghatározza a környezeti tényezők egy adott intervallumát, amelyeken belül az adott populáció képes előfordulni. **Az algoritmus alapja így a hasonlóságok keresése a környezeti paraméterek és az előfordulás között** (ELITH et al., 2006). Ez a modell annak köszönheti népszerűségét, hogy egyszerűen és gyorsan használható. **Nem szükséges hozzá hosszú futtatási idő, azonban** a környezeti paraméterek intervallumokba történő lehatárolásával **az eredményei bizonytalansággal terheltek**, hiszen a valóságban a populációk elterjedésében nincsenek ilyen empirikus korrelációkon alapuló korlátok (LOUTO et al., 2005).

Domain

A bioclim modell egy tovább fejlesztett változata, amelyben **az algoritmus meghatározza az egyes cellák** (fafaj előfordulások) átlagos, **többváltozós távolságát a környezeti rétegektől** (CARPENTER et al., 1993). Ez az ún. Gower metrikus távolság, amely átskálázásával 0-1 közötti értékekkel adható meg a potenciális (lehetséges) elterjedés (RISSLER et al., 2006). Ez a modell **érzékenyen reagál a mintaszámra** (pl.: a fafaj előfordulásának darabszámára). Kutatások szerint minél magasabb a mintaszám, annál magasabb a futtatási idő és annál magasabb a bizonytalansága is. Alacsony mintaszám esetén jobb eredmények érhetőek el e modell alkalmazásával (WISZ et al., 2008).

One-class support vector machines (Egyosztályos szupport-vektor gépek)

Ez a modell a tanuló algoritmusok csoportjába tartozik, amelyet VAPNIK (1995) alkalmazott először. A modellben alkalmazott tanulóvektorok **alapfeladata, hogy a többváltozós térben** (környezeti rétegekben) **lineáris, vagy nemlineáris függvényekkel történő célosztályt** (megfigyelési mintát) **különítsenek el** (GUO et al., 2005). A módszer azonban **rendkívül számítás, és nagy memória igényű**, amely megnehezíti alkalmazását (RUSSEL et al., 2003). A dolgozatomban felhasznált három ModEco-ban alkalmazott modell közül **a szakirodalom szerint ez a legmegbízhatóbb** (DRAKE et al., 2006; GUIBAN et al., 2006), azonban a mintaszám nagyságára a domain modellhez hasonlóan igen érzékeny.

Mind a négy modell alkalmazása előtt **megelőző statisztikai vizsgálatokat végeztem** a környezeti tényezők, és az adott fafaj közötti kapcsolatok feltárására. Ennek oka, hogy így a nagyszámú környezeti rétegekből kiválaszthatóvá válnak azok a legfontosabb tényezők, amelyek leginkább hatással vannak az elterjedésre. Azok a rétegek, amelyeknek a hatása az elterjedésre nem szignifikáns, elhanyagolhatóak, így csökkenthető a dimenziószám, a számítási és memória igény. **Erre a célra kiválasztott statisztikai módszerek: a faktor fontossági analízis** (*factor importance analysis*), **a szóródási diagram** (*scatter plot*) és **a gyakorisági hisztogram** (*factor histogram*) elemzése.

Faktor fontossági analízis:

Nem összekeverendő, a statisztikában leggyakrabban alkalmazott faktor analízissel. Míg a faktor analízis csoportokba (faktorokba) osztja **a legfontosabb környezeti tényezőket**, addig **a faktor fontossági analízis sorrendbe teszi őket**, jelen esetben az elterjedésre gyakorolt fontosságuk alapján. **A sorrend kialakításának alapja a Cohen-féle**

kappa együttható, vagy kappa index (κ). A kappa index vagy egyezési index, abból a szempontból vizsgálja meg a tényezőket (pl.: éves csapadékösszeg és az adott fafaj megjelenése), hogy a közöttük lévő egyezés esetleges vagy pedig tényleges (FORMAN, 2003):

2. egyenlet:

$$\kappa = \frac{\text{Pr}_{(a)} - \text{Pr}_{(e)}}{1 - \text{Pr}_{(e)}}$$

ahol: $\text{Pr}_{(a)}$: megfigyelt egyezések aránya

$\text{Pr}_{(e)}$: hipotetikus, alkalmi egyezés

Ennek értelmében a $\kappa = 0$ értéknél, az hogy az adott faktor (pl. éves csapadékösszeg) hatással lenne a fafaj megjelenésére pusztán esetleges (nincs kapcsolat), míg $\kappa = 1$ értéknél tökéletes az egyezés. Ezt a módszert a maximális valószínűség osztályozó modellnél nem tudtam alkalmazni, mivel a Digiterra Map-ben erre nincs lehetőség. A bioclim, domain és one-class SVM modelleknél azonban minden futtatás előtt elvégeztem, így csökkentettem a környezeti paraméterek nagy számát, és lerövidítettem a modell számítási igényét is.

Szóródási diagram

A szóródási diagram vizsgálata (az ökológiai elterjedés szempontjából) egy grafikai eszköz, amely **segítségével kiértékelhetjük, hogy két kiválasztott környezeti tényező mennyire képes leírni az adott fafaj elterjedését** (GUO és LIU, 2010). A szórás kép megmutatja, hogy a két környezeti faktor által kijelölt térben hol található meg a vizsgált fafaj. Ezt a vizsgálatot mind a négy modell esetében elvégeztem. **Gyors és egyszerű vizsgálat** arra, hogy kiválasztásra kerüljenek az elterjedésben legfontosabb éghajlati paraméterek.

Gyakorisági hisztogram

Megadja, hogy **az adott környezeti tényező mellett** (pl.: éves csapadékösszeg) **milyen gyakorisággal található meg a fafaj**. A Digiterra Map-ben csak az előfordulás gyakoriságának eloszlása jeleníthető meg, de a ModEco-ban lehetőség van a háttér eloszlás vizsgálatára is. A háttér eloszlás megmutatja, hogy milyen gyakoriság mellett nem található meg az adott fafaj. Ha a gyakorisági eloszlás hasonló mintát követ a háttér eloszláshoz, akkor az a környezeti faktor elhanyagolható az elterjedés szempontjából (GUO és LIU, 2010). Ez szintén egy hasznos segédeszköz a ModEco rendszerben a paraméterek kiválasztásában.

A megelőző statisztikai vizsgálatokat követően **kiválogatásra kerültek a legfontosabb környezeti tényezők**. Fontos megjegyezni azonban, hogy a modelleknek különböző az érzékenysége, és más-más matematikai formulával dolgoznak, így **nincs egy legjobb környezeti változó, amely leírja az elterjedést** (RASZTOVITS, 2011). Ahogy azt korábban is említettem a modellek érzékenyek a mintaszámra, a bemenő környezeti rétegek darabszámára, ezen kívül a bemenő rétegek is számos „zaj”-jal terheltek. A modellek beválására vagy éppen elvetésére ezért különösen nagy figyelmet kell fordítani.

A modellek elfogadására (vagy elvetésére) beválási statisztikákat készítettem. A beválás eldöntésére különböző analitikai indexeket használtam, melyek csak a ModEco programban érhetőek el. Mielőtt azonban ezeket bemutatnám szükséges a modellek különböző eredményei (ami a potenciális elterjedés) és a „valós”, megfigyelési értékek (jelen esetben az adattári adatok) közötti különbségek részletesebb ismertetése. A modell eredmények kimenetele, és a „valós” értékek közötti kapcsolat összesen négy féle lehet (20. ábra).

„Valós” megfigyelési érték

		Igaz (pozitív)	Hamis (negatív)
Modell eredmény kimenetel	Igaz (pozitív)	<p>True positive = (Igaz pozitív)</p> <p>A modell szerint fafaj előfordulás van az adott helyen, és a „valós” megfigyelési értékek szerint is.</p>	<p>False positive = (hibás pozitív)</p> <p>A modell szerint fafaj előfordulás van az adott helyen, a „valós” megfigyelési értékek szerint azonban nincs.</p>
	Hamis (negatív)	<p>False negative = (hibás negatív)</p> <p>A modell szerint nincs az adott helyen fafaj előfordulás, a „valós” megfigyelési értékek szerint viszont van.</p>	<p>True negative = (Igaz negatív)</p> <p>A modell szerint nincs az adott helyen fafaj előfordulás, és a „valós” megfigyelési értékek szerint sincs.</p>

20. ábra: A modell eredmények kimenetelei és a „valós” megfigyelési értékek közötti kapcsolatok (FAWCETT, 2006 nyomán)

Ezek alapján különböző arányszámokat kaphatunk meg, úgy mint a **True positive rate** („igaz pozitív arány” röviden TPR).

3. egyenlet:

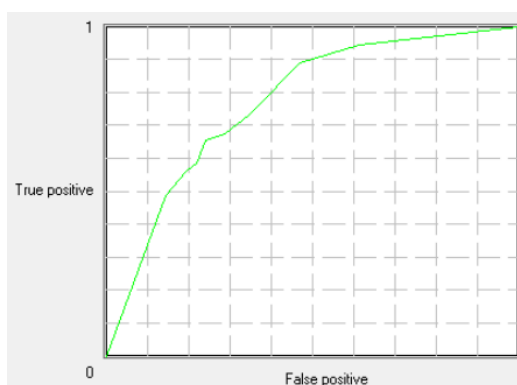
$$\text{True positive rate} = \frac{\text{Igaz pozitív}}{\text{Összes pozitív kimenetel}}$$

Ez tehát a modell által helyesen számított előfordulások (20. ábra bal felső rész) és az összes pozitív kimenetel aránya (GUO et al., 2005; FAWCETT, 2006). Ehhez hasonlóan megalkodható a **False positive rate** („hibás pozitív arány” röviden FPR).

4. egyenlet:

$$\text{False positive rate} = \frac{\text{Igaz negatív}}{\text{Összes negatív kimenetel}}$$

Ez megadja, a modell által helyesen számolt negatív kimenetek (20. ábra jobb alsó rész) és az összes negatív kimenetel arányát (GUO et al., 2005; FAWCETT, 2006). A TPR vs. FPR alapján jön létre az ún. *Receiver Operating Characteristic Curve* (**ROC görbe**). A ROC görbe egy grafikailag is megjeleníthető **érzékenységi görbe**, amely a TPR és az FPR arányokat mutatja be (21. ábra).

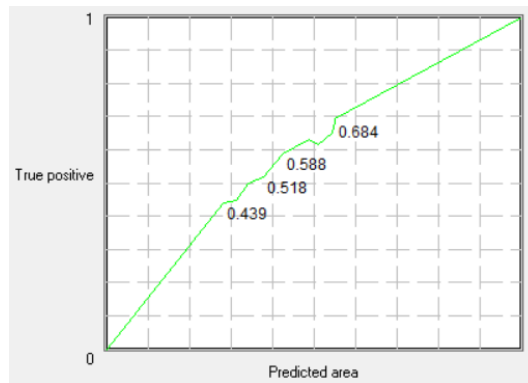


21. ábra: Példa ROC – érzékenységi görbére (GUO és LIU, 2010)

A ROC görbe alatti terület az *Area Under Curve* = **AUC érték**. Ez az analitikai index nagyban hozzájárul a modell elfogadásának/elvetésének döntésében. **Az AUC érték, vagy pontossági érték** kiértékelés a következő módon történik (SWETS, 1988):

- 1) AUC = 0,5-0,6 – random beválás, a modell nem elfogadható
- 2) AUC = 0,6-0,7 – kedvezőtlen beválás, elfogadása nem ajánlott
- 3) AUC = 0,7-0,8 – kedvező beválás, elfogadható eredmény
- 4) AUC = 0,8-0,9 – jó beválás, elfogadható eredmény
- 5) AUC = 0,9-1,0 – kiváló beválás, pontos eredmény

A ROC görbéhez hasonlóan létrehozható a TPR vs. *predicted area*, amely a modell által előrejelzett elterjedési terület (potenciális elterjedés) és a pozitív értékek arányát mutatja be (22. ábra).



22. ábra: Példa „igaz pozitív arány” vs. „előrejelzési terület” görbére (GUO és LIU, 2010)

Ezek alapján, disszertációmban a következő analitikai indexeket használtam, amelyek segítségével eldöntöttem, hogy a modellek mennyire megbízhatóak, melyik modell eredménye elvethető vagy éppen megtartható:

- *True positive rate (TPR)*
- *Receiver Operating Characteristic Curve (ROC)*
- *Area Under Curve (AUC)*
- *True positive rate vs. predicted area (TPR vs. predicted area)*

3.4. Produkció vizsgálatokhoz alkalmazott módszerek

A produkció változásának becslésére az FNM1 mintapontok adatait (lásd 2.4.3.1 fejezet), valamint a referencia és jövőbeli időszakok éghajlati adatait használtam fel. A becslés során az FNM1 mintapontok kora és átlagmagassága VEPERDI (2008) alapján **kiszámoltam a fatermőképességet (FTK)**. A fatermőképesség [$\text{m}^3/\text{ha}/\text{év}$], az összfatermés fatermési modell szerinti hektáronkénti átlagnövedéke 100% sűrűség és 100% elegyarány feltételezésével, fafajonként meghatározott korban (VEPERDI, 2008). A fafajonként meghatározott kor (referencia kor) meghatározása, a rendelkezésre álló kor-adatok megközelítőleg kétharmadában jelölhető ki (VEPERDI, 2008). Mivel az FNM1 adatbázisban szereplő kor-adatok 110 évig terjedtek, így ennek megfelelően 75 évben jelöltem ki a referencia kort.

Az FTK értékek kiszámításához a Chapman-Richards aszimptotikus függvényt alkalmaztam (RICHARDS, 1959; CHAPMAN, 1961), amelynek alkalmazását Dr. Veperdi Gábor (Soproni Egyetem, Erdővagyon-gazdálkodási és Vidékfejlesztési Intézet) javasolta.

5. egyenlet:

$$H_r = p_1 \cdot (1 - e^{p_2 \cdot 75})^{p_3}$$

$$H_g = p_1 \cdot (1 - e^{p_2 \cdot A})^{p_3}$$

$$FTK = b_1 \cdot \left(\frac{H_r}{H_g} \cdot H_m \right) + b_2 \cdot \left(\frac{H_r}{H_g} \cdot H_m \right)^2$$

ahol H_r : referencia magasság 75 korban (Béky, 1981) [m]
 H_g : átlagmagasság „A” korban [m]
 A : az FNM1 mintapontok mintafáinak kora [év]
 H_m : az FNM1 mintapontok mintafáinak mért átlagmagassága [m]
 p_1, p_2, p_3 : Chapman-Richards függvény paraméterei (4. táblázat)
 b_1, b_2 : az FTK függvény állandó paraméterei (4. táblázat)
 FTK : fatermőképesség [$m^3/ha/év$]

4. táblázat: Az FTK függvény paraméterei (RICHARDS, 1959; CHAPMAN, 1961; VEPERDI, 2014 által módosítva)

KTT	Paraméterek				
	p_1	p_2	p_3	b_1	b_2
mageredet*	26.218714	-0.026710	1.556116	0.17004475	0.00794821

*Mivel az adatok között sarj eredetű kocsánytalan tölgy mintapontok nem szerepeltek, így csak a mageredetű FNM1 adatokból származó paramétereket közlöm.

Az 5. egyenlet alapján kiszámított fatermőképességi értékeket **összehasonlítottam a termőhelyi tényezőkkel**, melyhez Statistical13 (www.statsoft.com) programot használtam. Az összehasonlítás célja, hogy kiválasztásra kerüljenek azok a legfontosabb termőhelyi tényezők (ezek között elsősorban az éghajlati paraméterek) amelyek szignifikáns kapcsolatban vannak a fatermőképességgel.

Mivel a genetikai talajtípusnak és a termőréteg mélységének jelentős hatása van a fatermőképességre (BIDLÓ et al., 2014), így a jövőbeli becslésekhez ezeket is felhasználtam. Azonban ezek kategórikus változók, (és nem folytonosak) így a legtöbb statisztikai vizsgálathoz nem alkalmazhatók. Ebből adódóan **szükséges volt egy átfogó folytonos változó elkészítése**, amely jól jellemzi a termőhelyi adottságokat. Ezt a komplex változót **PATOSKAI (2012) disszertációja nyomán készítettem el**. Munkájában ún. faktorszámokat (dimenzió nélküli viszonyszámokat) határozott meg a termőhelytípus-változatok jellemzésére. Ezek a faktorszámok megmutatják, hogy egy adott területen lévő állomány az átlagosnál magasabb, vagy gyengébb termőhellyel rendelkezik-e. A kiszámítás során az adott állomány termőhelytípus-változatának fatermőképességi értékét osztjuk az országos

átlagos fatermőképességi értékkel (ugyanazon termőhelytípus-változat esetében). Ezáltal egy 1-hez közeli értéket kapunk, amely az ún. faktorszám (PATOCSKAI, 2012). Ha ez a dimenzió nélküli viszonyszám 1-nél magasabb, akkor az adott állomány az átlagosnál jobb, ha 1-nél kisebb, akkor pedig gyengébb termőhellyel rendelkezik (6. egyenlet).

6. egyenlet:

$$\text{Faktorszám} = \frac{\text{adott termőhelytípus – változat fatermőképessége [m}^3\text{/ha/év]}}{\text{országos átlagos fatermőképesség [m}^3\text{/ha/év]}}$$

Mivel az országos átlagos fatermőképesség minden egyes termőhelytípus-változatra nem állt rendelkezésemre, így a fenti alapötletet követve csak az FNM1 mintapontokra alkalmaztam a 6. egyenletet. Így ún. **osztótényezőket határoztam meg**, amely csak abban különbözik PATOCSKAI (2012) munkájától, hogy az FNM1 adott mintapontjának fatermőképességét (adott termőhelytípus-változaton lévő állomány FTK értékét) osztottam el az összes (rendelkezésemre álló) mintapont átlagos fatermőképességi értékével. **Ez tehát nem érvényes az országban lévő összes KTT állományra**, csak az FNM1 helyszínekre.

A termőhelyi tényezőkön belül külön megvizsgáltam az éghajlati adatokat, az elterjedés modellezésénél is alkalmazott erdészeti szempontból fontos élettani szakaszokra bontva. Ezek kapcsolatát a fatermőképességgel többváltozós statisztikai módszerekkel vizsgáltam meg, amelyek a **főkomponens-analízis** (*principal component analysis*, röviden PCA), valamint a **faktor analízis** (*factor analysis*, röviden FA). Azért választottam ezeket a módszereket, mert ezek segítségével könnyen értelmezhetővé válik, hogy mely éghajlati változók befolyásolják a leginkább a fatermőképességet. Ezeket felhasználva pedig becslést adhatok a jövőbeli FTK értékére vonatkozóan.

A PCA lényege, hogy feltárja a kapcsolatokat az egyes változók között, és főkomponensekbe (csoportokba) sorolja be őket. Az analízis során használt főkomponensek az eredeti változók lineáris kombinációi (HORVÁTH-SZOVÁTI és VÁGVÖLGYI, 2014), amelyek célja a dimenziószám csökkentés (kevesebb változó) mellett a legkisebb információvesztés.

Az FA az adathalmaz mögött rejlő háttérösszefüggések feltárására szolgál, amely segítségével a változókat csoportosíthatjuk és értelmezhetjük. A két eljárás közötti fő különbség, hogy míg a PCA esetében a csoportoknak (főkomponenseknek) nem szükséges jelentést tulajdonítani, az FA eljárásnál ez elvárás (HORVÁTH-SZOVÁTI, 2013).

4. KLÍMA ADATOK KIÉRTÉKELÉSE

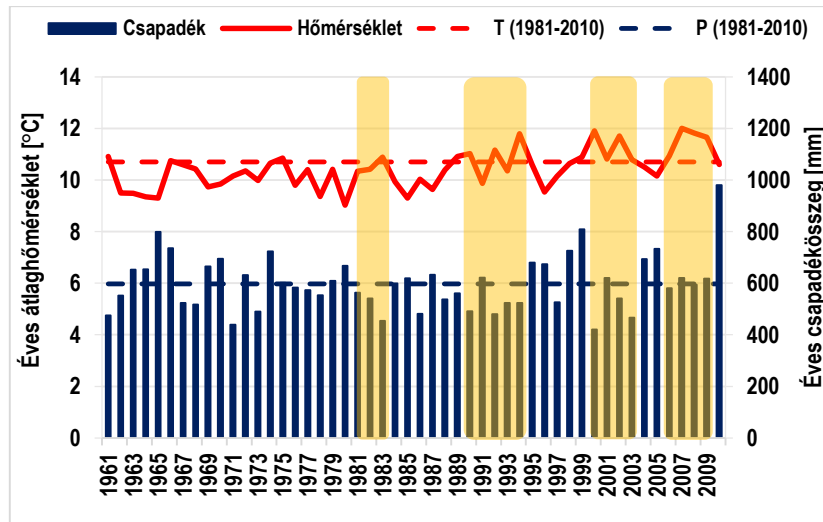
A kocsánytalan tölgy elterjedésének és produkciójának elemzése előtt a múlt és jövőbeli éghajlati adatokat értékeltem ki. Először (4.1 fejezet) az éghajlat változásának múltbeli (1961-2010) ezt követően (4.2 fejezet) a jövőbeli (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100) trendjeinek elemzését és kiértékelését végeztem el.

4.1. Az éghajlat változásának alakulása hazánkban 1961-2010 között

A múltbeli klímaadatok értékelése előtt fontos megjegyezni, hogy ezek az eredmények mérési adatsorokon alapulnak, tehát nem modellel előállított becslési értékekről van szó. Ennek a kihangsúlyozása azért szükséges, mert a száz, százhusz éves vágásfordulóval rendelkező fafajok (mint a kocsánytalan tölgy) természeténél figyelembe kell venni a hosszútávú éghajlati tendenciákat. Tehát fontos, hogy ez alatt az 50 év alatt (1961-2010) is már mérhető volt hazánk éghajlatának melegekedése, valamint a csapadékeloszlás éven belüli átalakulása.

A Carpatclim adatok alapján az éves átlaghőmérséklet emelkedése egyértelmű. Az 1990-es évek után egyre gyakrabban fordultak elő a referencia időszakhoz képest (1981-2010) melegebb évek, amelyek gyakran párosultak az átlagnál alacsonyabb csapadékösszeggel (23. ábra). Ez a tendencia gyakran több egymást követő évben is előfordult pl.: 1981-1983, 1990-1994, 2000-2003, 2006-2009 (23. ábra). Ez azt jelenti, hogy megnövekedtek a száraz, aszályos időszakok gyakoriságai (SPIONI et al., 2015).

Az éves csapadékösszegek trendjeiben nem fedezhető fel szignifikáns változás, azonban mind az extrém nagy, ill. kis csapadékú évek gyakoriságában növekedés tapasztalható. Az extrém nagy csapadékú évek növekedésével megnő a kockázata az eróziós károknak, amely a termőréteg vastagságának gyors csökkenését eredményezheti. A termőréteg vastagsága pedig alapvetően meghatározza a fafajok növekedését (BIDLÓ et al., 2014). Az extrém kis csapadékú évek gyakoriságával megnő a kockázata az aszálykár kialakulásának, a fafajok vitalitásgyengülésének, ezzel egyidejűleg a biotikus károk fokozódásának. Ezek alapján tehát a szélsőségek alakulása az egyik legfontosabb éghajlati jellemző, ezért is választottam a dolgozatomban több szárazsági index vizsgálatát.



23. ábra: Országos éves átlaghőmérséklet és csapadékösszeg változás 1961-2010 között, szaggatott vonalakkal az 1981-2010-es referencia időszak átlagai, narancssárga oszlopokkal a több egymást követő száraz évek hossza

A nemzetközi irányvonalaknak megfelelően (WMO, 2007; ARGUEZ és VOSE, 2011) 30 éves periódusokra bontva vizsgáltam meg hazánk éghajlati sajátosságait. Ezek az 1961-1990, 1971-2000, valamint 1981-2010-es időszakok, melyek közül az elterjedés és termelés vizsgálatokhoz a legutóbbi 30 éves referencia időszakot választottam.

Ahogy azt a 3.3 fejezetben említettem a fajok - köztük a kocsánytalan tölgy növekedése is - az év különböző időszakaiban eltérő intenzitású (FÜHRER, 1994; 2010). A fő vízfelhasználási időszakokat tekintve fiziológiailag meghatározó időszakokat különböztethetünk meg (éves, nyugalmi, növekedési, fő növekedési és kritikus időszakok). Ezeknek az időszakoknak van a legnagyobb jelentősége a növekedésre, így az 5. táblázatban összesítettem ezen időszakok hőmérséklet átlagait, és csapadékösszegeit. Meteorológiai szempontból azonban a havi és évszakos felbontás is fontos, így az adatokat megvizsgáltam eszerint is. Ennek eredményei a 2. mellékletben található.

5. táblázat: Országos átlaghőmérséklet (T) [°C] és csapadékösszeg (P) [mm] változás 1961-2010 között élettani szakaszokra bontva

Élettani szakaszok	Hónapok	1961-1990		1971-2000		1981-2010	
		T [°C]	P [mm]	T [°C]	P [mm]	T [°C]	P [mm]
Éves	I-XII	10,0	587,2	10,3	577,8	10,6	596,6
Nyugalmi	XI-III	1,9	203,9	2,2	187,8	2,3	196,8
Növekedési	IV-X	15,9	383,3	16,1	390,0	16,6	400,2
Fő növekedési	V-VIII	18,5	258,4	18,8	252,9	19,4	259,3
Kritikus	VII	20,1	61,1	20,5	63,4	21,2	63,7

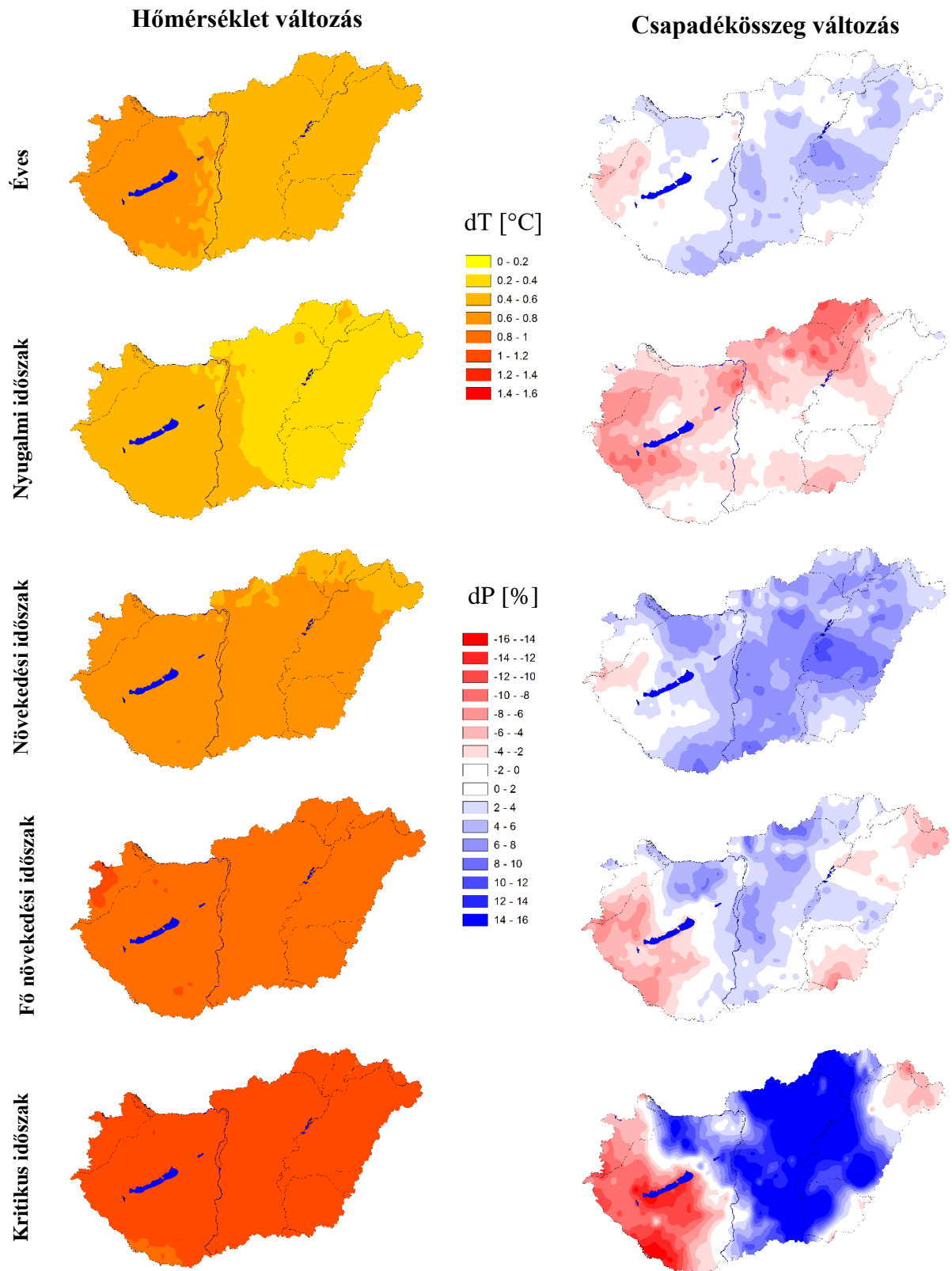
Látható, hogy a **hőmérsékletek esetében minden időszakban növekedtek az átlagok**. Az 1981-2010-es periódusra $0,6^{\circ}\text{C}$ -kal emelkedett az éves átlag az 1961-1990-es időszakhoz képest. A legintenzívebb emelkedés a fő növekedési ($+0,9^{\circ}\text{C}$) és a kritikus időszakban ($+1,1^{\circ}\text{C}$) következett be. A fafajok növekedésének szempontjából ez nem kedvező, mivel a júliusi (és néha az augusztusi) kritikus időszak magas hőmérséklete nagymértékben csökkenti a fotoszintézis intenzitását (FÜHRER et al., 2016). A nyugalmi időszakban $0,4^{\circ}\text{C}$ -kal míg a növekedési időszakban $0,7^{\circ}\text{C}$ -kal nőtt az átlaghőmérséklet 1981-2010-re.

Mivel a csapadék térben és időben a legváltozékonyabb meteorológiai paraméter, ezért változása kevésbé nyilvánvaló, és sokszor a megjelenő tendenciák nem szignifikánsak. Az **éves összegeket tekintve** az 1981-2010-es időszakra **enyhe növekedés volt jellemző** ($+1,6\%$), melyhez nagyban hozzájárult a 2010-es év extrém magas csapadéka. A **nyugalmi időszakban csapadékcsökkenés** mutatható ki ($-3,5\%$), amely a hőmérséklet emelkedő tendenciájával együtt kisebb hófelhalmozódást okoz.

Enyhe csapadékösszeg emelkedés mutatható ki a **növekedési időszakban** ($+4,4\%$) és a **kritikus időszakban** is ($+4,2\%$). A havi eloszlásból kiderül (2. melléklet), hogy növekedési időszak csapadékösszegének megváltozását főként a szeptemberi és az októberi csapadékösszegek növekedése okozta. A **fő növekedési időszakban** nem mutatható ki szignifikáns változás.

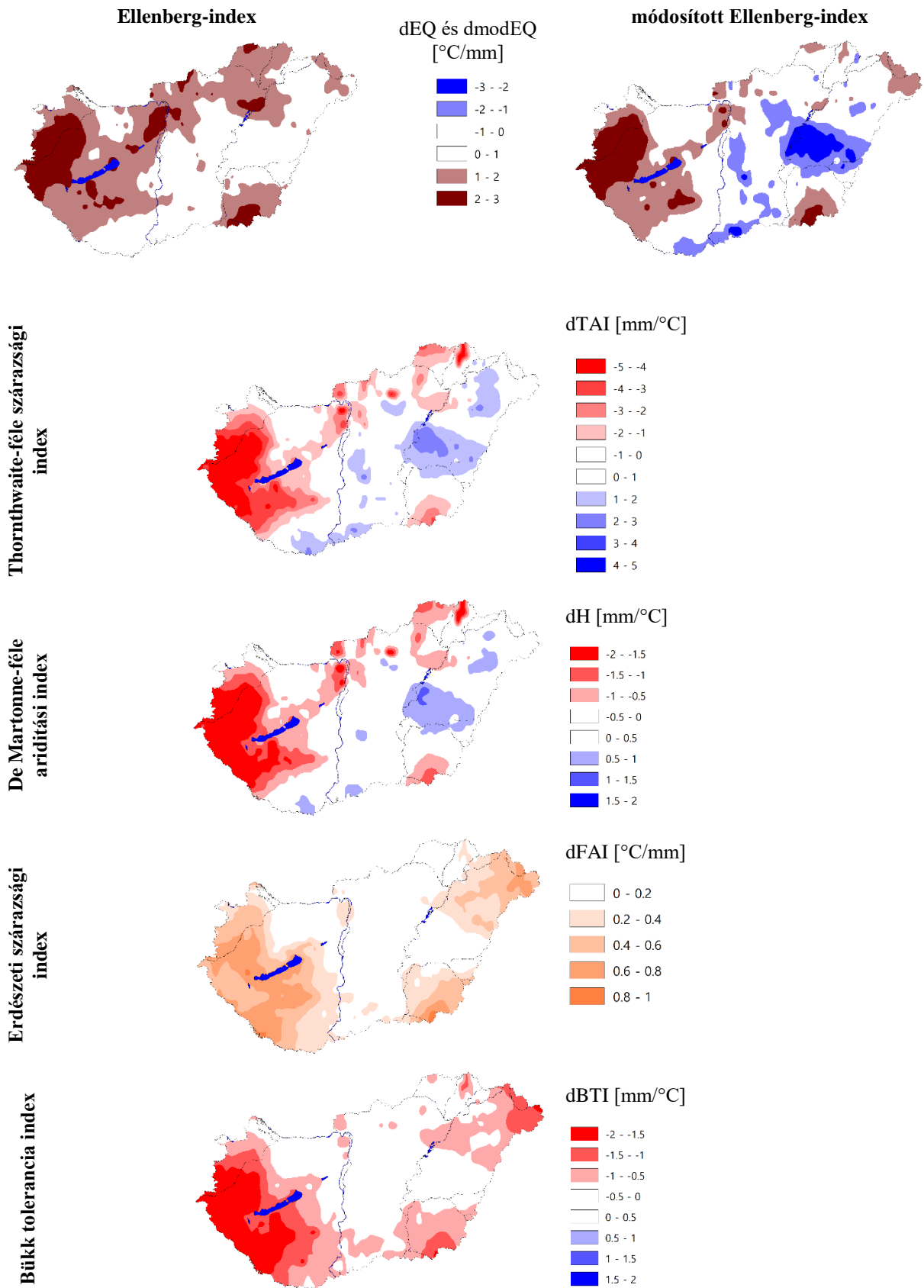
Az éghajlati paraméterek megváltozásának területi eloszlásában igen nagy különbségek adódtak. Míg a déli-dél-nyugati országrész területén a csapadék csökkenése (főleg a kritikus időszakban és a fő növekedési időszakban), addig az ország középső területein (pl.: Duna-Tisza köze, Északi-középhegység) növekedése tapasztalható (24. ábra). Erre a divergenciára azért kell felhívnom a figyelmet, mert az ország dél-nyugati területén találhatóak hazánk legértékesebb (legjobb növekedésű) kocsánytalan tölgy állományai, és a szárazodás növekedésével e területeken megnő a veszélye a vízstressz okozta vitalitás romlásnak. A vizsgáltba bevont **éghajlati indexek** (aszály indexek) **megerősítik, hogy hazánk területének klímája szárazabbá vált** (25. ábra). Az ország középső, Duna-Tisza közti területein – ahol egyébként nincsenek KTT állományok – nem mutatható ki szignifikáns változás, azonban a déli-dél-nyugati valamint az észak-keleti régiókban jelentős szárazodás következett be.

1981-2010 vs. 1961-1990



24. ábra: Hőmérséklet (balra) és csapadékösszeg (jobbra) alakulása az éven belüli eltérő növekedési időszakokban az 1981-2010-es és 1961-1990-es időszakok összehasonlítása alapján Magyarországon

1981-2010 vs. 1961-1990



25. ábra: Különböző szárazsági indexek alakulása az 1981-2010-es és 1961-1990-es időszakok összehasonlítása alapján Magyarországon

A 25. ábra tartalmazza az elterjedés és a termelés vizsgálatokhoz kiválasztott összes ariditási index változását az elmúlt 50 évben. Ezek az indexek alkalmasak az aszályok számszerűsítésére, mivel a csapadék havi vagy éves összegein kívül hőmérsékleti adatokat is tartalmaznak. Előnyük, hogy ezek az indexek a mezőgazdasági, erdészeti és a hidrológiai aszály vizsgálatára is használhatók. Az Ellenberg-index (EQ), a módosított Ellenberg-index (modEQ), az Erdészeti szárazsági index (FAI) és a bükk tolerancia index (BTI) a fajok elterjedésére és speciális igényeire képzett mérőszámok, ezért is választottam ezeket a mutatókat. Jól jellemzik a fajok, illetve a növényföldrajzi övek elterjedésének klimatikus határait.

A két harminc éves időszak összehasonlítása alapján (1961-1990, 1981-2010) az Ellenberg-index alakulása esetében az ország dél-nyugati és északi-, észak-keleti területein erős szárazság jellemző. Ez a tendencia főként az erős júliusi hőmérséklet növekedése miatt alakult ki. Azonban míg az Ellenberg-index egy átfogóbb (éves csapadékösszegein alapuló) éghajlati mutató, addig a módosított Ellenberg-index már részletesebb, a növekedési időszak csapadékösszegein alapuló jellemző. Ennek az indexnek a vizsgálata alapján kimutathatók olyan területek is (pl.: Nagykunság), ahol inkább humiditás volt a jellemző. A De Martonne-féle ariditási index (H), a Thornthwaite-féle szárazsági index (TAI), és a bükk tolerancia index nagyon hasonló képet mutatnak az éghajlatunk alakulásáról. Különbség csupán annyi, hogy a TAI index esetében erősebb a szárazodás a déli-délnyugati országrészben, a BTI esetében pedig egyáltalán nem mutatkoznak olyan területek, ahol humiditás következett volna be. A FAI index esetében is jelentős szárazság mutatható ki, annak ellenére hogy ez a skálán elsőre nem látszik. A FAI index alapján behatárolható erdészeti klíma kategóriák szerint – bükk ($FAI < 4,75$), gyertyános-tölgyes ($4,75 \leq FAI < 6,0$), cseres-kocsánytalan tölgyes ($6,0 \leq FAI < 7,25$), erdős-sztyepp ($7,25 \leq FAI$) – azonban kiderül, hogy már $FAI = 1$ [$^{\circ}C/mm$] változás esetében már egy klíma osztály változás következik be (FÜHRER, 2010). Tehát az ország déli és déli-nyugati területein már egy klíma osztály romlás következett be. Fontos megjegyezni, hogy az ország déli része az erdős-sztyepp klíma kategóriába tartozik (amely alatti kategória még nincs hazai körülmények között), viszont az adatok alapján már most egy klíma osztállyal alacsonyabb kategóriába tartozik. Éppen ezért szükséges újra értékelni ezeket az osztályokat, és akár új kategóriákat bevezetni (pl.: sztyepp klíma bevezetése (GÁLOS, 2016)), mivel a regionális klímamodellek eredményei szerint nagyon valószínű, hogy az aszályok gyakorisága és a száraz időszakok hosszának növekedése a jövőben is folytatódni fog (MÁTYÁS és GÁLOS 2010).

4.2. A jövőben várható trendenciák

A vizsgálataimba bevont 12 regionális klímamodell eredményeit harminc éves időszakokra bontva vizsgáltam meg. Ezek a 2011-2040, 2041-2070 és 2071-2100-as időintervallumok. Az éves átlaghőmérsékletek változása esetében minden modell szimuláció emelkedő tendenciát jelez hazánk területére. A 2011-2040-es időszakban kisebb mértékű (átlagosan +0,9°C), a század közepére (2041-2070) intenzívebb (+2°C), majd a század végére 3,2°C-os emelkedést prognosztizálnak (6. táblázat). Az éves csapadékösszegek esetében nem mutatható ki szignifikáns változás. Kezdetben inkább stagnálás (-0.2%) majd enyhe növekedés (+0,6%), a 2071-2100-as időszakra pedig csökkenés (-1,3%) valószínűsíthető (6. táblázat). Ezek az átlagos értékek, modelltől függően azonban beszélhetünk optimista (pl.: SMHIRCA_BCM) és pesszimista (pl.: METO-HC_HadRM3Q16_HadCM3Q16) jövőképről is. Érdekes tehát megvizsgálni az adatok szórását (σ) is, ill. nem szabad megfeledkeznünk a modellek bizonytalanságairól sem. Mivel mind a 12 modellszimuláció azonos A1B forgatókönyv alapján készült, így a bizonytalanságok az eltérő modell választásból adódnak. A bizonytalanságok a modellezett időszak elején általában alacsonyabbak, majd a szimuláció végére erősen megnövekednek (HAWKINS és SUTTON, 2009). Ezt bizonyítja, hogy a hőmérséklet ($\sigma_T = 0,44$) és a csapadékösszeg ($\sigma_P = 5,50$) szórása is a 2011-2040-es időszakra vonatkozóan alacsonyabb, majd a század végére fokozatosan növekszik (2071-2100-ra $\sigma_T = 1,08$ és $\sigma_P = 9,84$).

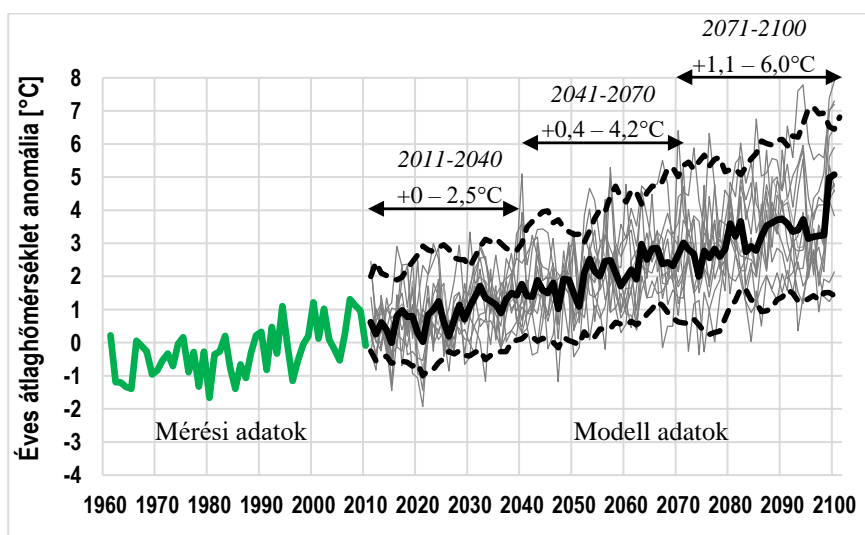
6. táblázat: Az éves átlaghőmérséklet és éves csapadékösszeg várható változásai 12 regionális klímamodell eredményei alapján a 21. század végéig

Modell neve	2011-2040		2041-2070		2071-2100	
	dT	dP	dT	dP	dT	dP
C4IRCA3_HadCM3Q16	+1,1	+1,9	+2,5	+2,6	+4,0	+0,6
DMI-HIRHAM5_ARPEGE	+0,5	-4,7	+1,2	-5,2	+1,5	-16,4
ETHZ-CLM_HadCM3Q0	+1,4	-4,5	+2,6	-5,2	+3,9	-9,5
KNMI-RACMO2_ECHAM5-r3	+0,9	-4,5	+1,9	-0,1	+3,2	+4,3
MPI-M-REMO_ECHAM5	+0,8	-1,8	+1,9	-0,8	+3,2	+3,6
SMHIRCA_BCM	+0,3	+1,4	+1,2	+2,3	+1,7	+5,2
DMI-HIRHAM5_ECHAM5	+0,5	+2,6	+1,4	+7,1	+2,7	+4,6
METO-HC_HadRM3Q0_HadCM3Q0	+1,5	+0,9	+2,9	-1,0	+4,4	-6,8
METO-HC_HadRM3Q16_HadCM3Q16	+1,7	-10,1	3,3	-15,2	+5,3	-20,0
METO-HC_HadRM3Q3_HadCM3Q3	+0,7	+8,2	+2,0	+8,2	+3,0	+0,5
SMHIRCA_ECHAM5-r3	+0,6	-1,4	+1,7	+4,7	+2,9	+5,3
SMHIRCA_HadCM3Q3	+0,7	+9,1	+1,9	+10,1	+2,6	+13,1
ÁTLAG:	+0,9	-0,2	+2,0	+0,6	+3,2	-1,3
SZÓRÁS:	0,44	5,50	0,67	6,98	1,08	9,84

ahol dT – Átlaghőmérséklet változás [°C]

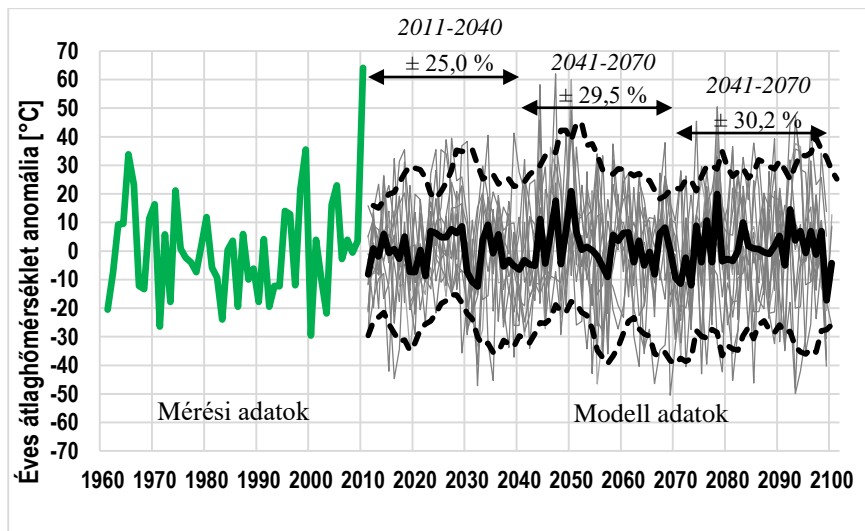
dP – Csapadékösszeg változás [%]

Pesszimistább előrejelzések alapján a 21. század utolsó harmadában előfordulhatnak olyan évek is, amelyekben akár 6 - 7°C-os hőmérséklet emelkedés is lehet az 1981-2010-es referencia időszakhoz képest (26. ábra). Még az optimista becslések szerint is 2,5°C - 3°C-os növekedésre számíthatunk 2071-2100-ra. Figyelemmel kell lenni azonban az eltérő modell becslések közötti bizonytalanságokra, amelyet jól reprezentálnak a 26. és 27. ábrák. A 12 regionális klíma modell erősen eltérő eredményit (szürke vonalak) nem érdemes külön-külön elemezni, helyette informatívabb az adatokra illesztett alsó és felső burkoló görbék, amelyek jelzik a modell becslések határait. Ezek alapján akár +0 – 2,5°C-os hőmérsékleti anomáliára is számíthatunk a 2011-2040-es időszakra, majd a bizonytalanságok növekedésével a század közepére (2041-2070) +0,4 – 4,2 °C-os eltérés, végül a 21. század végére akár +1,1 – 6,0 °C-os eltérés is előfordulhat (26. ábra).



26. ábra: Mért (zöld vonal) és modellezett (szürke vonalak) éves átlaghőmérséklet eltérés [°C] az 1981-2010-es időszakhoz képest. Fekete vastag vonallal a 12 modell átlaga, szaggatott vonalakkal a modellek alsó és felső határoló görbéje (GÁLOS et al., 2013 nyomán).

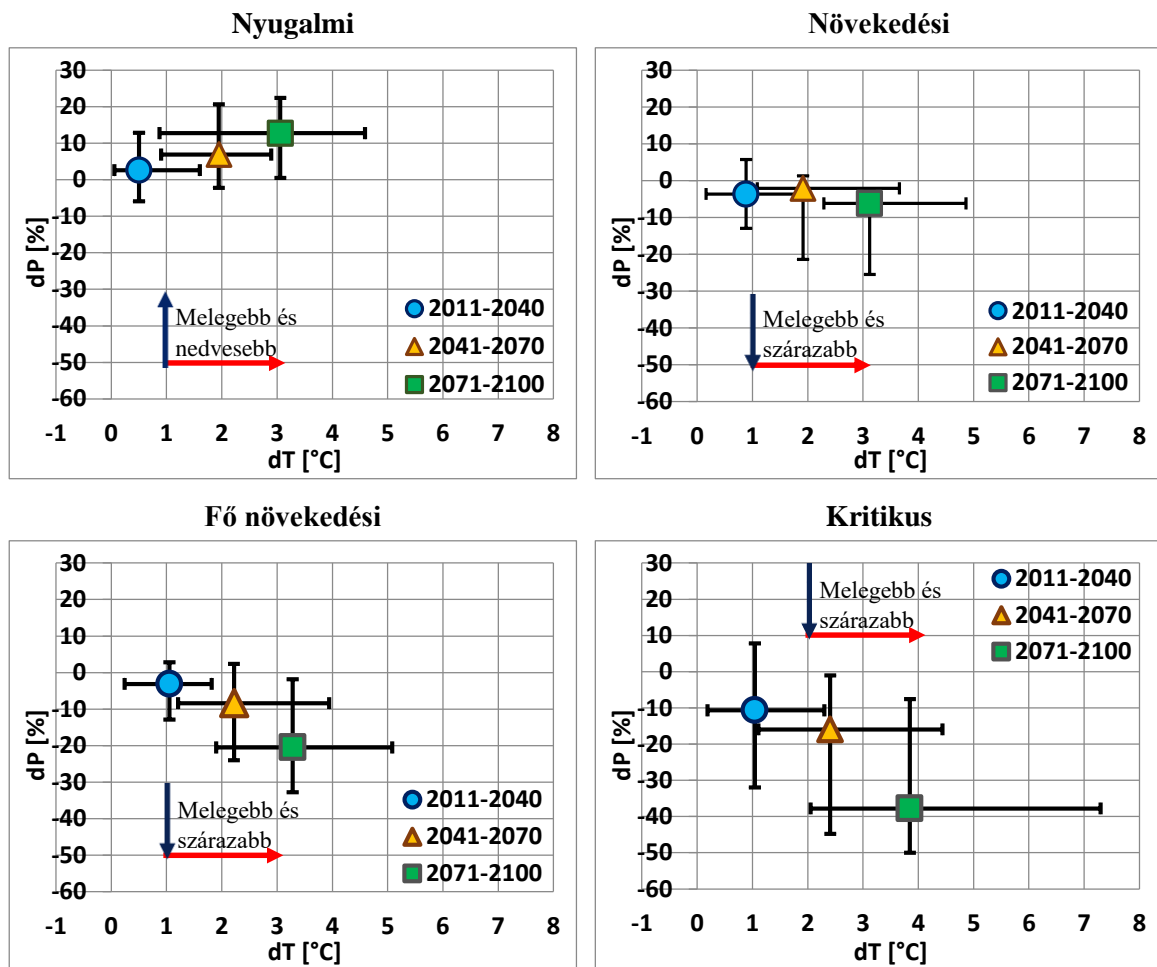
Az éves csapadékösszegek eltérése sokkal nagyobb szórást mutat, mint a hőmérsékleté (27. ábra). Ebből az következik, hogy várhatóan megnövekszik mind az extrém csapadékos, mind a szélsőségesen száraz időszakok gyakorisága is, valamint hogy a csapadékösszegek szimulációja sokkal több bizonytalansággal terhelt, mint a hőmérsékleté. A modellekre illesztett alsó és felső határoló görbék alapján az adatok a század végére egyre erősebb szórást mutatnak, és kis mértékű csökkenés, vagy inkább nem egyértelmű trend mutatható ki.



27. ábra: Mért (zöld vonal) és modellezett (szürke vonalak) éves csapadékösszeg eltérés [°C] az 1981-2010-es időszakhoz képest. Fekete vastag vonallal a 12 modell átlaga, szaggatott vonalakkal a modellek alsó és felső határoló görbéje (GÁLOS et al., 2013 nyomán).

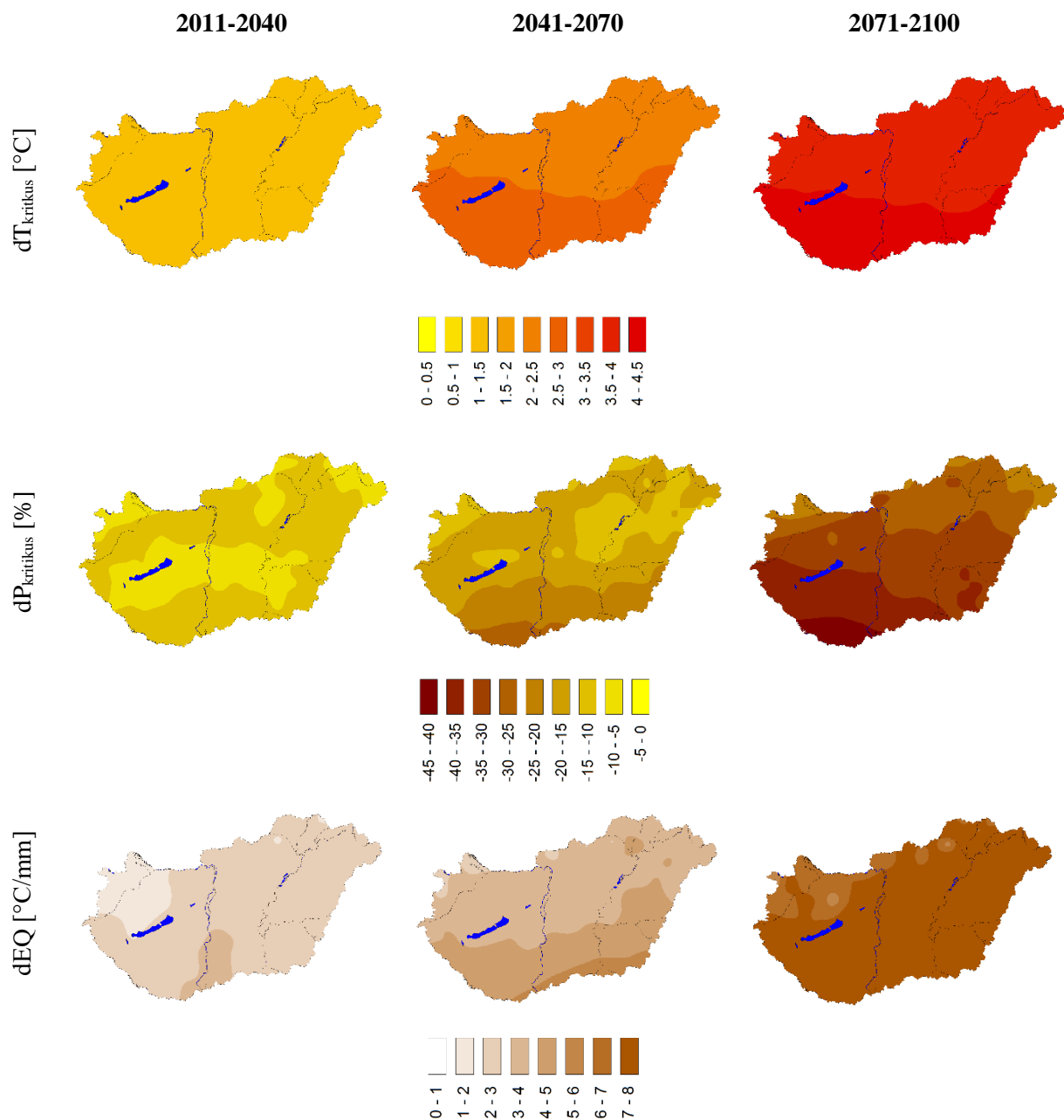
A változások éven belüli eloszlását tekintve a hőmérséklet esetében nyáron prognosztizálható a legintenzívebb emelkedés, ezen belül is a kritikus időszakban (júliusban). A modell becslések alapján országosan 2011-2040-re 1,2°C-kal, 2041-2070-re 2,4°C-kal, majd a 21. század végére akár 3,9°C-kal is megnövekedhet a júliusi átlaghőmérséklet (referencia időszak: 1981-2010). Az emelkedő tendencia a nyugalmi, növekedési és fő növekedési időszakokban is szignifikáns. A század végére a nyugalmi időszakban 3,2°C-os, a növekedési időszakban 3,3°C-os, míg a fő növekedési időszakban akár 3,5°-os emelkedésre is számíthatunk.

A csapadékösszegek csökkenése a növekedési (-11,4%), fő növekedési (-21,1%) és kritikus (-35,3%) időszakokban valószínűsíthető. Ezzel ellentétesen a csapadék mennyiségének növekedését mutatják a modellek a nyugalmi időszakban (átlagosan +11,0%), melynek legfőbb oka a decemberi (+16,3%) és januári (+15,5%) csapadékösszegek növekedése. A 28. ábrán fő élettani szakaszonként bontva vizsgáltam meg az átlaghőmérséklet és csapadékösszeg adatsorokat, feltüntetve a modellek különböző eredményeiből származó bizonytalanságokat is (vízszintes és függőleges hibasávok). A modellek eredményei a fő tendenciákban megegyeznek (pl.: hőmérsékletek emelkedése, kritikus időszak csapadék csökkenése), azonban jelentős különbségek adódtak pesszimista és optimista modellek között. A modellek által prognosztizált évszakos felbontású változásokat a 3. mellékletben összegeztem.



28. ábra: Hazai hőmérséklet és csapadékviszonyok becsült változása a XXI. század végéig fő élettani szakaszokra bontva 12 regionális klíma modell alapján. Kék körökkel a 2011-2040, narancssárga háromszögekkel a 2041-2071, zöld négyzetekkel a 2071-2100-as időszakok átlagai, vízszintes és függőleges hibásávokkal a modellekből származó bizonytalanságok láthatók.

A becsült változások területi eloszlását tekintve nagyon valószínű, hogy az ország déli-délnyugati része lesz leginkább kitéve a klímaváltozás hatásainak (29. ábra). A század végére várhatóan 4,0 - 4,5°C-kal emelkedhet meg e régióban a kritikus időszak átlaghőmérséklete, a csapadékösszegek pedig akár 40 - 45%-kal is csökkenhetnek. A kritikus időszak hőmérsékletének és csapadékösszegének megváltozása igen jelentős hatással bír a kocsánytalan tölgy állományok vitalitására, ezért ezek a területek az érzékeny, sérülékeny régiók közé tartoznak. Hazánk éghajlatának várható szárazabbá válását a szárazsági indexek is megerősítik. A fafajok elterjedéséhez leginkább alkalmazott Ellenberg-index értéke a század végére akár 7 – 8 °C/mm-rel is megnövekedhet, ami azt jelenti, hogy erősen szárazzá válhat hazánk éghajlata (29. ábra). Ennek következtében jelentősen megváltozhatnak fafajaink jelenlegi elterjedési határai.



29. ábra: Kritikus időszak átlaghőmérsékletének (fent), csapadékösszegének (közép), valamint az Ellenberg-index (lent) becsült várható változásai 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 időszakokra Magyarországon. Referencia időszak: 1981-2010

A kocsánytalan tölgyek elterjedésének és produktójának vizsgálatát ezekre az eredményekre, pontosabban a Digiterra Map szoftverrel elkészített raszter térképekre és az excel táblázatokra alapozva készítettem el.

5. EREDMÉNYEK

A dolgozat eredményeit két fő részben fejtem ki. Az adattári adatokon alapuló, négy elterjedési modellel készült potenciális (lehetséges) jelenlegi és becsült jövőbeli KTT elterjedési vizsgálatok eredményeivel kezdem (5.1 fejezet). Ezt követően mutatom be az FNM1 adatokon alapuló jelenlegi és becsült jövőbeli fatermőképesség (FTK) változásának eredményeit (5.2 fejezet). Az elterjedési modellek eredményeinek kiértékelése a dolgozat 6.1 fejezetében, a fatermőképesség becslési eredményeinek kiértékelése a 6.2 fejezetben található. A terepi mérések eredményeit külön a 7. fejezetben mutatom be.

5.1. Elterjedési modellek eredményei

5.1.1. Maximális valószínűségi osztályozás modell

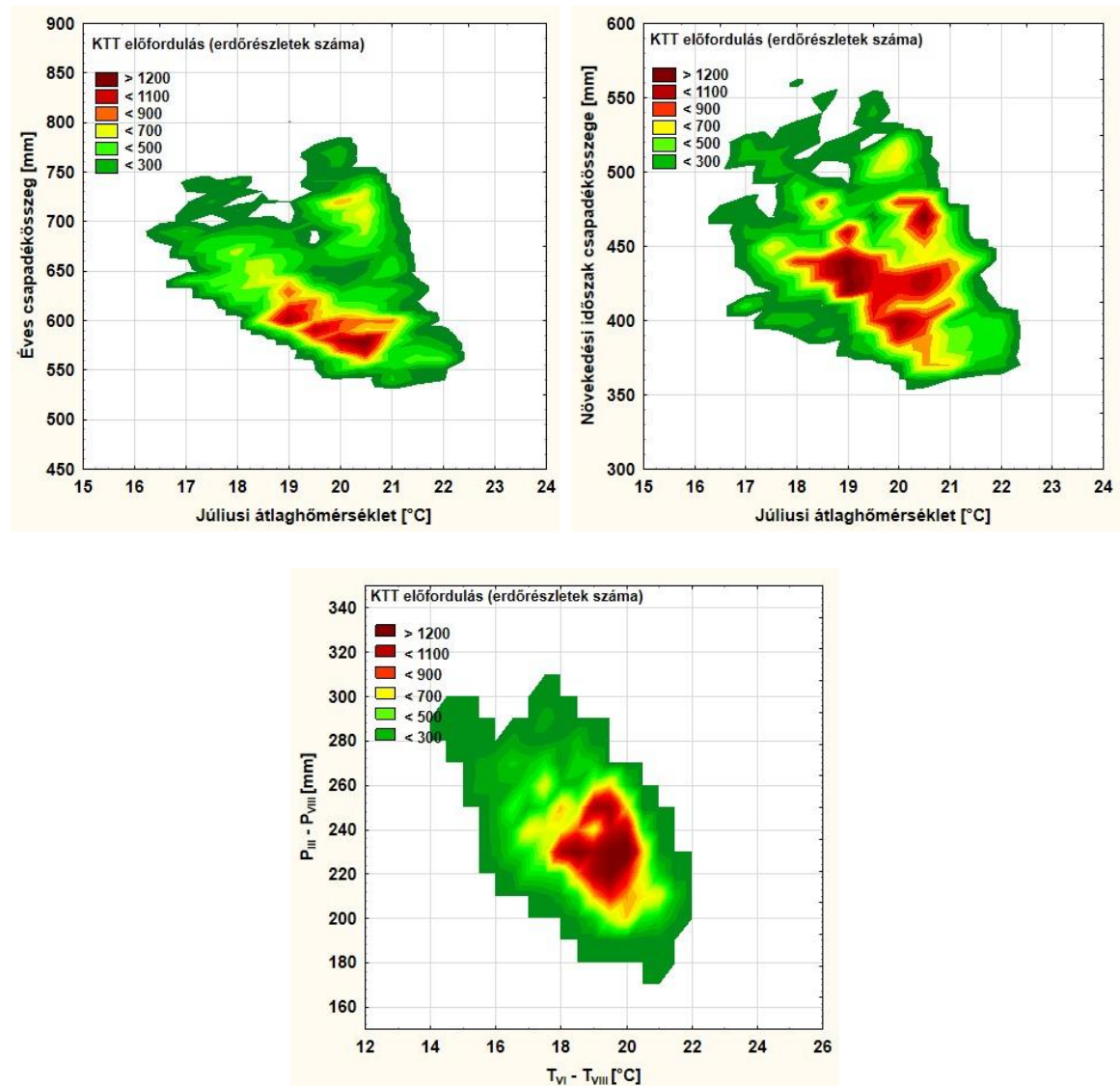
Ennek a modellnek az eredményeit a Digiterra Map programban készítettem el, alkalmazása előtt azonban első lépésben meg kellett határoznom azokat az éghajlati paramétereket, amelyek a vizsgált fafaj elterjedése szempontjából a legmeghatározóbbak. Ennek oka, hogy a vizsgálatba bevont összesen 65 raszter réteg együttes használata erősen leterhelte a programot, megnövelte a futtatási időt és mivel érzékenyen reagál a modell a bemenő rétegek darabszámára, így a bizonytalanságai is megnövekedtek. A futtatásokat megelőzően ezért statisztikai vizsgálatokat végeztem, amelyek a szóródási diagramok és a gyakorisági hisztogramok.

A szóródási digaramokon két tetszőlegesen kiválasztott környezeti változó által behatárolt térben látható a hazai tölgy előfordulás. A vizsgálatok szerint az elterjedést legjobban magyarázó hőmérsékleti változók: (1) éves átlaghőmérséklet, (2) kritikus időszak átlaghőmérséklete, ill. a csapadékösszeg változók esetében: (1) éves csapadékösszeg, (2) növekedési időszak csapadékösszege. Ez alapján az elterjedésre két fő éghajlati tényező van hatással. Egyrészt meghatározóak a hosszútávú átlagok, vagyis az éves átlagok, ezen kívül jelentős hatással vannak a fő vízfelhasználási időszakban bekövetkező szélsőségek. Ezt megerősíti, hogy az éghajlati szárazsági indexek között az ezekre a változókra épülő Ellenberg-index (EQ), a módosított Ellenberg-index (modEQ) valamint a bükk tolerancia index (BTI) mutatatta a legerősebb összefüggéseket a jelenlegi elterjedéssel. Az EQ és az elterjedés kapcsolata nem meglepő, hiszen ezt az indexet speciálisan az elterjedés klimatikus határainak meghatározására fejlesztették ki (STANDOVÁR és KEREKES 2003, JENSEN et al. 2004). Alapvetően a bükk (*Fagus sylvatica*) elterjedésének vizsgálatára készült, azonban

alkalmasnak bizonyul a kocsánytalan tölgy becsült jövőbeli elterjedési változásának elemzésére is (CZÚCZ et al., 2013).

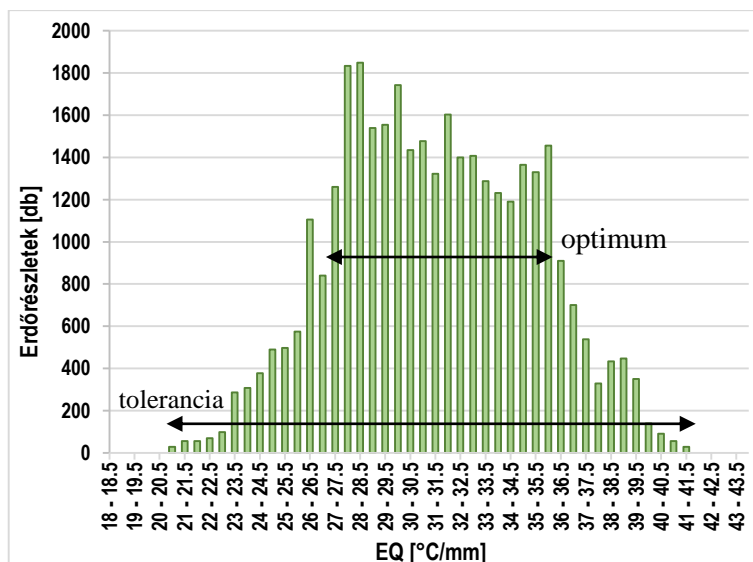
Az Ellenberg-indexet meghatározó júliusi átlaghőmérséklet és az éves csapadékösszeg függvényében jelenítettem meg a 30. ábrán (balra) a hazai KTT előfordulás szóródási diagramját. A diagramon vörös és narancssárga szín jelöli a legmagasabb előfordulást (erdőrészetek darabszámát), így látható, hogy 19 – 21°C közötti júliusi átlaghőmérsékletnél, valamint az 570 – 610 mm-es éves csapadékösszegeknél található meg a leggyakrabban a vizsgált fafaj. Az a klímater, ahol hazánk területén megjelenik ez a fafaj (zöld és sárga területek) a júliusi középhőmérséklet esetében 16,5 – 22,0°C közöttinek, az éves csapadékösszeg esetében 500 – 770 mm közöttinek adódott. E határokon kívül a tölgy előfordulásának valószínűsége igen alacsony. Ez azt jelenti, hogy az Ellenberg-index 27 – 36 °C/mm közötti tartományán fordul elő ez a fafaj a leggyakrabban. A módosított Ellenberg-indexet meghatározó júliusi átlaghőmérséklet és a növekedési időszak csapadékösszege által kijelölt klímaterben (30. ábra jobbra) a KTT előfordulás hasonló képet mutat. Ebben az esetben azonban a növekedési időszak csapadékösszege alapján két magasabb gyakorisággal rendelkező területet különböztethetünk meg (380 – 440 mm között és 460 – 480 mm között), vagyis magasabb szóródási képet mutat, mint az EQ. A legalacsonyabb szóródási képet a bükk tolerancia indexet meghatározó nyári átlaghőmérséklet ($T_{VI-VIII}$) és a márciustól augusztusig tartó súlyozott csapadékösszeg ($P_{III-VIII}$) (lásd 3. táblázat) mutatta. Ekkor a kocsánytalan tölgy hazai előfordulása egy jól behatárolt klíma térben körülhatárolható (30. ábra lent). A nyári átlaghőmérséklet ($T_{VI-VIII}$) 18,0 – 20,5 °C, és a márciustól augusztusig tartó csapadékösszeg ($P_{III-VIII}$) 210 – 260 mm közötti tartományán fordult elő a leggyakrabban, ami azt jelenti, hogy a $BTI = 13,5 – 18,0$ mm/°C közötti értékei esetében egy optimum közeli tartomány rajzolódik ki, amely esetében a legnagyobb valószínűség mellett fordul elő ez a fafaj.

A megvizsgált szóródási diagramok alapján jövőbeli elterjedési térképek készítésére az Ellenberg-indexet (EQ) és a bükk tolerancia indexet (BTI) választottam.



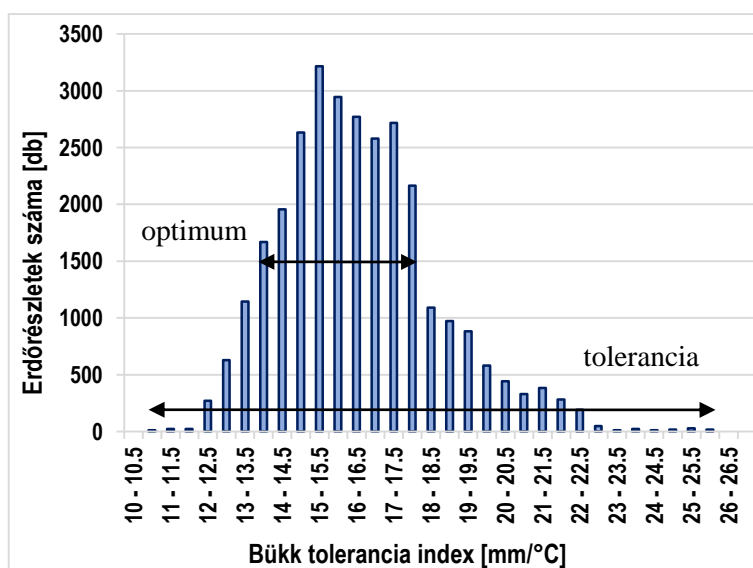
30. ábra: Hazai kocsánytalan tölgy állományok előfordulásának szóródási diagramjai az Ellenberg-index (fent balra), a módosított Ellenberg-index (fent jobbra) és a bükk tolerancia index (lent) függvényében

A kocsánytalan tölgy erdőrészek **Ellenberg-index** szerinti gyakorisági hisztogramja megerősíti, hogy ez alapján jól behatárolható a **jelenlegi, valóságos elterjedés** így alkalmas jövőbeli elterjedési térképek készítésére. Kirajzolódik egy optimum közeli tartomány, amely esetében a faj a legnagyobb valószínűség mellett megtalálható. Ez az érték 27 – 36 °C/mm közöttinek adódott (31. ábra). Ezen kívül egy tolerancia határ is kimutatható, amelyen kívül már nem található meg hazánk területén e faj, mivel az már túl nedves és hűvös ($EQ \leq 20^\circ\text{C}/\text{mm}$) vagy már túl száraz és meleg ($EQ \geq 41,5^\circ\text{C}/\text{mm}$) lenne számára (31. ábra).



31. ábra: Hazai kocsánytalan tölgy előfordulásának hisztogramja az Ellenberg-index függvényében

Ehhez hasonlóan a bükk tolerancia index alapján készített gyakorisági hisztogramon is elkülöníthetők a tolerancia, és optimumközeli tartományok. Ebben az esetben a tolerancia határérték 10,5 – 26,0 mm/°C közöttinek, az optimum pedig 13,5 – 18,0 mm/°C közöttinek adódott (32. ábra). E határokon kívül nem jelenik meg hazánkban a vizsgált fafaj.

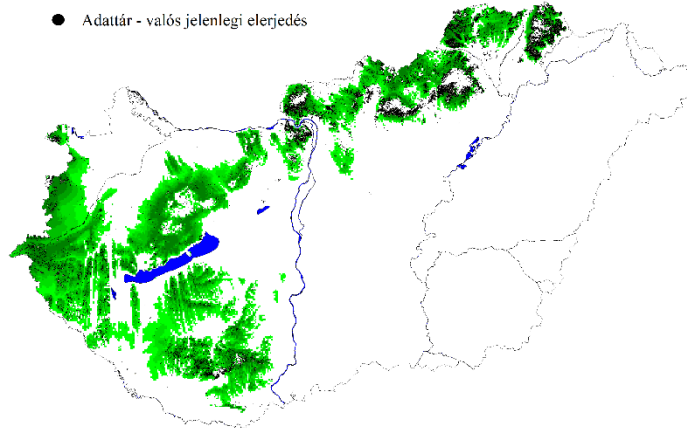


32. ábra: Hazai kocsánytalan tölgy előfordulásának hisztogramja a bükk tolerancia index függvényében

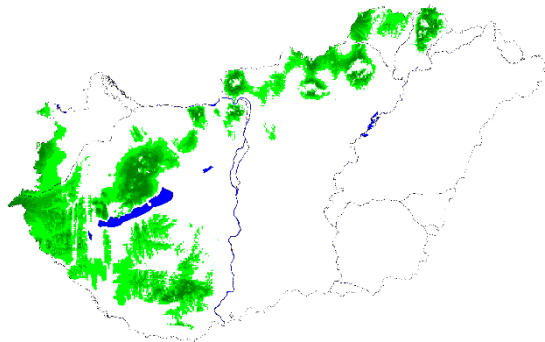
Felhasználva ezt a két indexet, és a behatárolt optimum valamint tolerancia határértékeket a 33. és 34. ábrán elkészítettem a potenciális (lehetséges) jelenlegi és becslőt jövőbeli elterjedési térképeket a 21. század végéig.

MLC - Jelenlegi potenciális elterjedés (1981-2010)

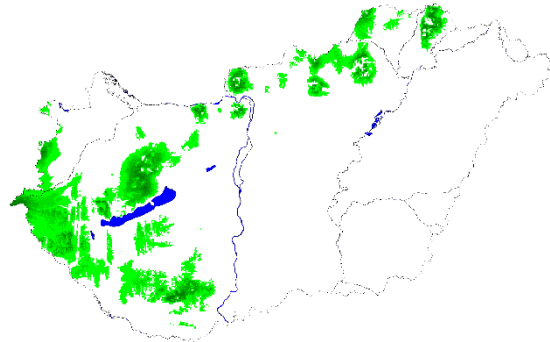
● Adattár - valós jelenlegi elterjedés



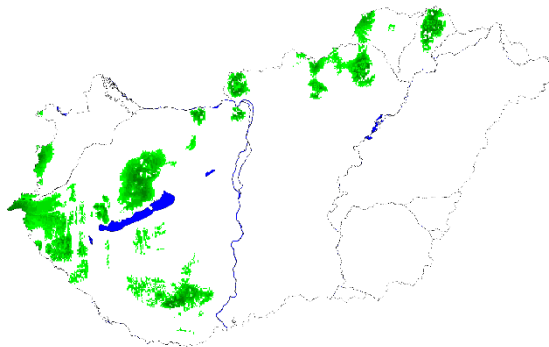
2011-2040 vs. 1981-2010



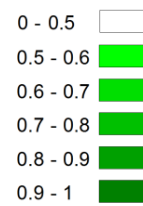
2041-2070 vs. 1981-2010



2071-2100 vs. 1981-2010



Maximális valószínűség



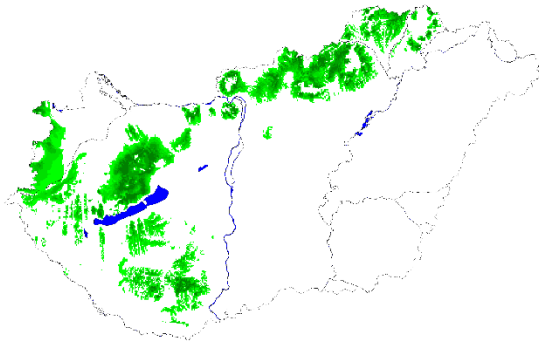
33. ábra: Kocsánytalan tölgy jelenlegi potenciális elterjedése és becsült jövőbeli változása 12 regionális klímamodell szimuláció átlaga alapján 3 időszakra (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100) a maximális valószínűségi osztályozás (MLC) módszerével. Az osztályozás alapja: Ellenberg-index (referencia időszak: 1981-2010)

MLC - Jelenlegi potenciális elterjedés (1981-2010)

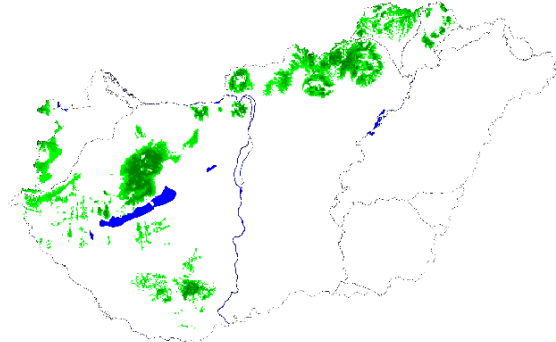
● Adattár - valós jelenlegi elterjedés



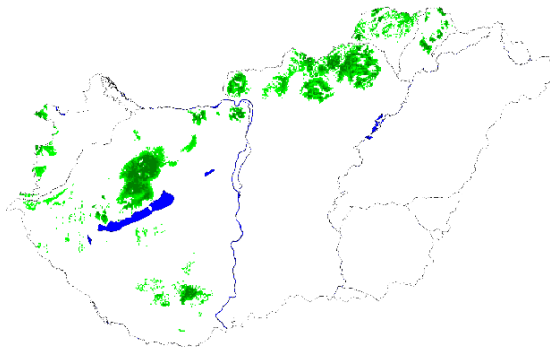
2011-2040 vs. 1981-2010



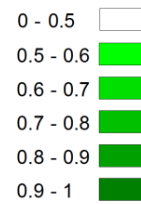
2041-2070 vs. 1981-2010



2071-2100 vs. 1981-2010



Maximális valószínűség



34. ábra: Kocsánytalan tölgy jelenlegi potenciális elterjedése és becsült jövőbeli változása 12 regionális klímamodell szimuláció átlaga alapján 3 időszakra (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100) a maximális valószínűségi osztályozás (MLC) módszerével. Osztályozás alapja: bükk tolerancia index (referencia időszak: 1981-2010)

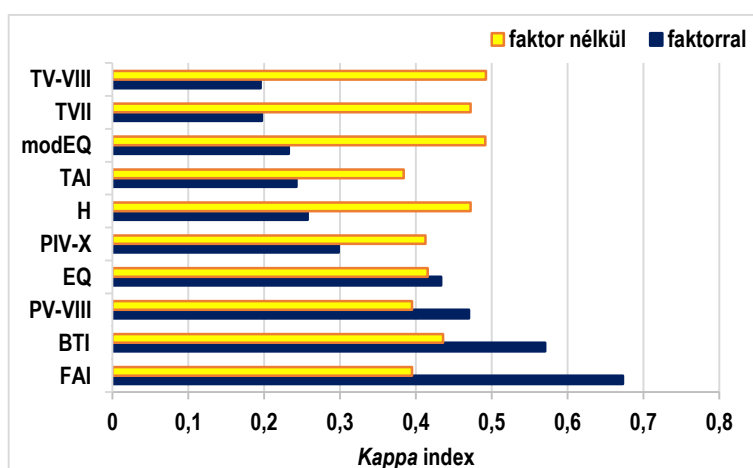
Az Ellenberg-index-szel végzett futattás alapján a jelenlegi potenciális elterjedés térképe magasabb területi előfordulást mutat a Nyugat-Dunántúli régióban és a Bakonyban, mint a valóságos (Adattári adatok) (33. ábra). Ennek egyik oka, hogy helyére fenyő állományokat telepítettek, másik oka, hogy az elterjedésben más tényezők is szerepet játszanak, úgymint a domborzati mikroklíma, valamint a termőhely többi tényezője is (genetikai talajtípus, termőréteg vastagság stb...). Az Északi-középhegység területén a potenciális elterjedés azonban nagyon jó egyezést mutat az Adattári adatokkal. A jövőbeli becslési térképek eredményei alapján a KTT számára a klimatikusan megfelelő területek nagyon valószínű hogy csökkenni fognak. Az EQ alapján a 2011-2040-es időszakban a csökkenés inkább az Északi-középhegységet érintheti, míg 2041-2070-re már a déli-dél-nyugati országrészben is jelentőssé válhat. A 2071-2100-as időszakra intenzív csökkenést jelez előre a modell (országosan mintegy -48%-os területvesztés), így előfordulhat, hogy a vizsgált fafaj az Északi-középhegységben csak foltokban lesz megtalálható.

A bükk tolerancia index esetében a gyakorisági hisztogram szűkebb optimum közeli tartományt mutatott, és ez a lehetséges jelenlegi elterjedés térképén is jól látszik (34. ábra). A jövőben megfelelő elterjedési területek az előző futattáshoz hasonlóan valószínűleg csökkenni fognak. Különbség a két eredmény között viszont az, hogy a BTI szűkebb tartományon értelmezi a tolerancia és optimum közeli határokat így erősebb csökkenő tendenciát is jelez, főként a déli-dél-nyugati országrészben. Országos szinten akár -56%-os elterjedési területvesztés is bekövetkezhet e modell eredményei szerint a 21. század végére. A két futattás azonban megegyezik abban, hogy a kocsánytalan tölgy elterjedése a magasabb térszintek felé indulhat el, vagyis a klímaváltozás hatásaira érzékenyebb bükk (*Fagus sylvatica*) helyét foglalhatja el a jövőben.

Mivel a szóródási-, és gyakorisági hisztogramok alapján az éves átlaghőmérséklet és a növekedési időszak csapadékösszege is az elterjedés szempontjából meghatározó tényezőként szerepelt, így ezek alapján is készítettem elterjedési térképeket, amely a dolgozat 4. mellékletében található.

5.1.2. Bioclim modell

A bioclim modell futtatása előtt faktor fontossági analízist végeztem az éghajlati tényezők és a tölgy előfordulás összefüggésére. A módszer során kiszámított *kappa index* értékek sorba rendezése megadja, hogy mely paraméterek határozzák meg leginkább az elterjedést. Ezek alapján e modellnél a legmeghatározóbb éghajlati jellemzők közé tartozik a FAI index ($\kappa = 0,66$), a bükk tolerancia index ($\kappa = 0,57$), a fő növekedési időszak csapadékösszege ($\kappa = 0,47$) és az Elleberg-index ($\kappa = 0,43$). Magasabb értékeket adott a De-Marton féle ariditási index ($\kappa = 0,26$), a Thorntwaite-féle szárazsági index ($\kappa = 0,24$) és a módosított Ellenberg-index ($\kappa = 0,23$), ezek hatása azonban elhanyagolhatónak számítottak. Ennek oka, hogy amennyiben nem alkalmazom ezeket a faktorokat, akkor magasabb κ értékek adódtak. Ennek bemutatására a 35. ábrán jelöltem a 10 legnagyobb *kappa* értékkel rendelkező éghajlati tényezőt, ahol kék sáv jelöli a *kappa* index értékeit, amennyiben alkalmazom az adott faktort, és sárga sáv, amennyiben elhanyagolom.



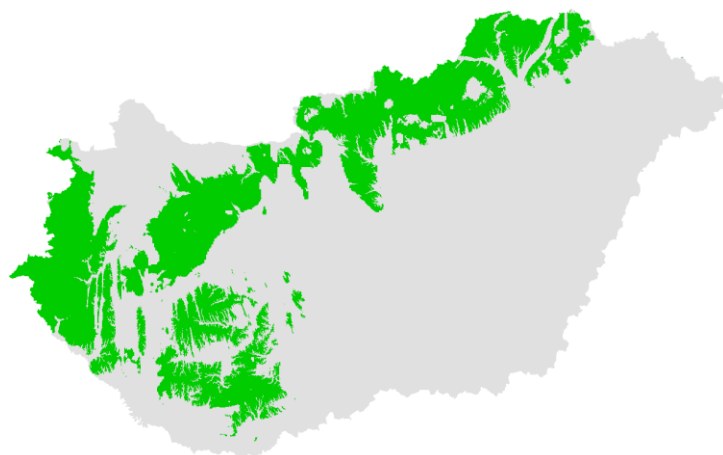
35. ábra: A 10 leginkább meghatározó éghajlati paraméter a kocsánytalan tölgy elterjedésére a bioclim modell alapján. Kék sáv jelöli a *kappa* értékeket, ha a modell számol az adott faktorral, sárga sáv, pedig ha elhanyagolja.

Ezek alapján kihagytam azokat a tényezőket, amelyek elhanyagolhatónak számítottak és a megelőző statisztikai vizsgálatok eredményei szerint jó beválás mellett alkalmazható volt ($AUC > 0,86$) a modell (7. táblázat). A becslés alapján a Dél-nyugati országrészt erősebben érintheti az elterjedési területek csökkenése, amelynek oka, hogy a modellben alkalmazott FAI index értékei e régióban szignifikánsan megnövekedhetnek a század végére (36. ábra).

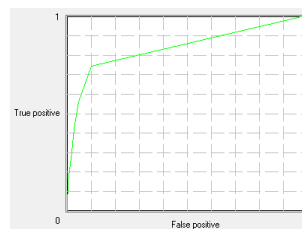
7. táblázat: Bioclim modell beválási statisztikái

	True Positive Rate (TPR)	ROC	Area Under Curve (AUC)	TPR vs. predicted area
Bioclim	0,792	0,898	0,862	0,891

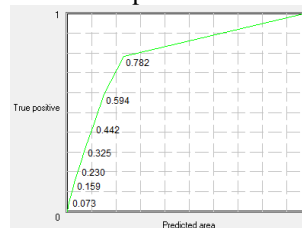
Jelenlegi potenciális elterjedés (1981-2010)



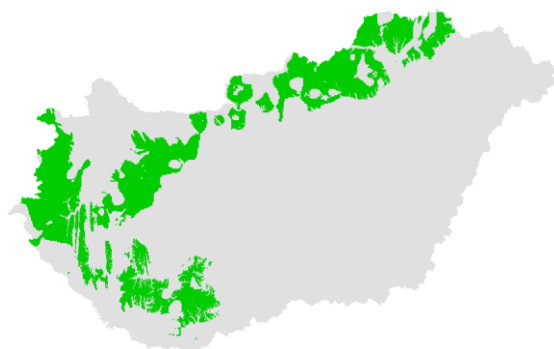
ROC



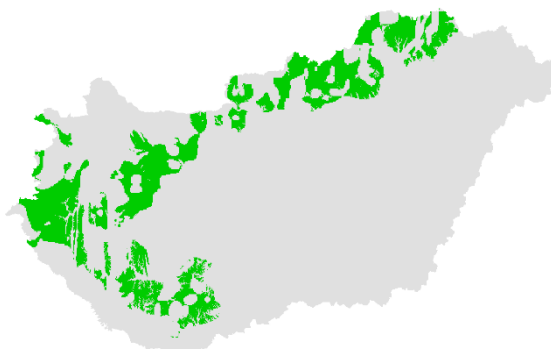
TPR vs. predicted area



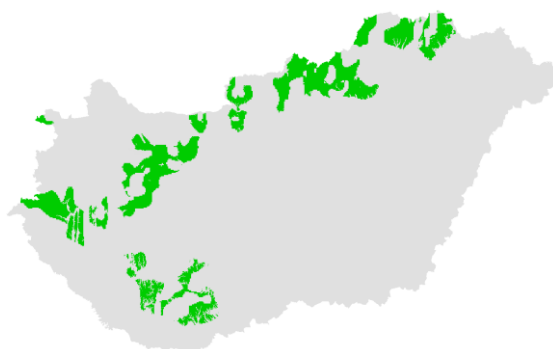
2011-2040 vs. 1981-2010



2041-2070 vs. 1981-2010



2071-2100 vs. 1981-2010

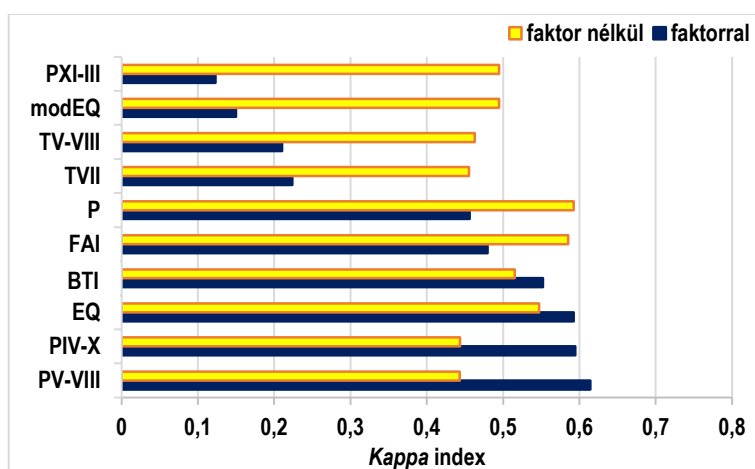


■ Quercus petraea
■ Absence
■ Null value

36. ábra: Kocsánytalan tölgy jelenlegi potenciális elterjedése és becsült jövőbeli változása 12 regionális klímamodell szimuláció átlaga alapján 3 időszakra (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100) a bioclim modellel. Referencia időszak: 1981-2010

5.1.3. Domain modell

A kappa index vizsgálatának eredménye alapján e modellnél a legfontosabb tényezők közé tartozik a fő növekedési időszak ($\kappa = 0,61$), és a növekedési időszak csapadékösszege ($\kappa = 0,59$). Az éghajlati indexek között az Ellenberg ($\kappa = 0,58$) és a bükk tolerancia ($\kappa = 0,55$) indexek adtak magasabb értékeket. Megjelenik a 10 legfontosabb tényező között a júliusi hőmérséklet ($\kappa = 0,22$) és a fő növekedési időszak hőmérésklete is ($\kappa = 0,21$), azonban ezek hatása a modell szerint elhanyagolhatóan számíthatnak (37. ábra). Ennek valószínűleg az az oka, hogy az Ellenberg-, ill. bükk tolerancia indexek már tartalmazzák ezeket a faktorokat, ezért nem szükséges még egyszer alkalmazni a modellben.



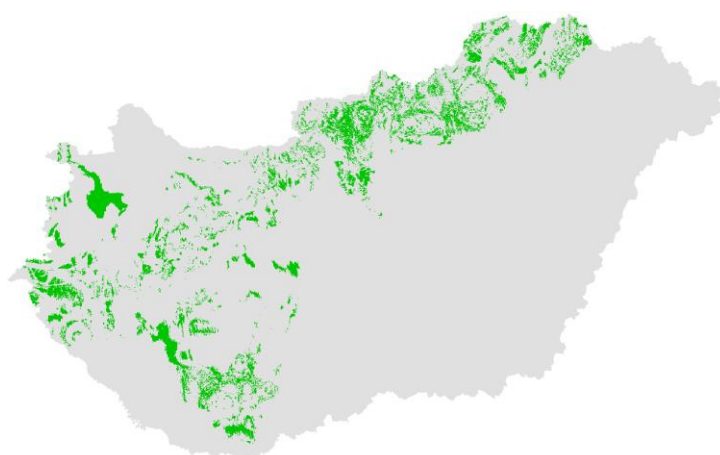
37. ábra: A 10 leginkább meghatározó éghajlati paraméter a kocsánytalan tölgy elterjedésére a domain modell alapján. Kék sáv jelöli a kappa értékeket, ha a modell számol az adott faktorról, sárga sáv, pedig ha elhanyagolja.

A legfontosabb tényezők figyelembe vételével a statisztikai eredmények azt mutatják, hogy a modell beválása éppen hogy eléri a jó minősítést ($AUC > 0,80$). Ez azt jelenti, hogy a modellezett és a valóságos elterjedés között ebben az esetben már jelentős különbségek adódtak (8. táblázat). A 38. ábrán látható, hogy sokkal szűkebben jelöli ki a klimatikusan megfelelő területeket a kocsánytalan tölgy számára, így a kiindulási (potenciális jelenlegi) térkép is már erős bizonytalansággal terhelt. A futtatás során a bizonytalanságok tovább halmozódtak, ezért lehetséges, hogy e modell eredményeként akár teljesen eltűnhet hazánk területéről a vizsgált fafaj a 21. század végére.

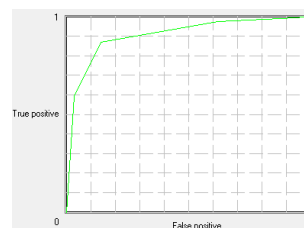
8. táblázat: Domain modell beválási statisztikái

	True Positive Rate (TPR)	ROC	Area Under Curve (AUC)	TPR vs. predicted area
Domain	0.776	0,818	0.8011	0.782

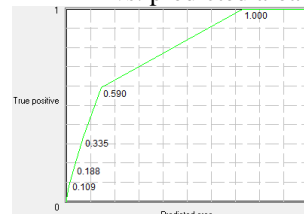
Jelenlegi potenciális elterjedés (1981-2010)



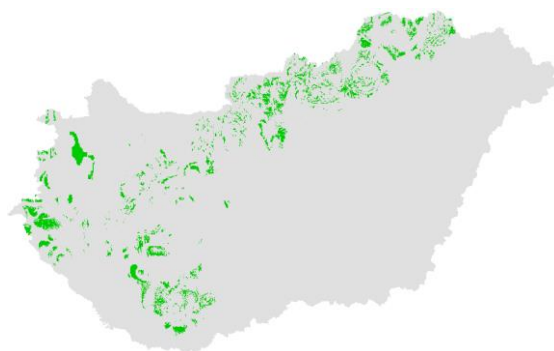
ROC



TPR vs. predicted area



2011-2040 vs. 1981-2010



2041-2070 vs. 1981-2010



2071-2100 vs. 1981-2010

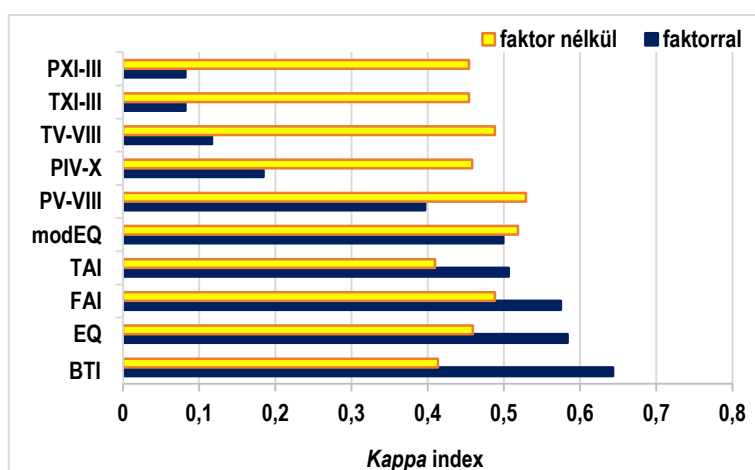


■ Quercus petraea
■ Absence
□ Null value

38. ábra: Kocsánytalan tölgy jelenlegi potenciális elterjedése és becsült jövőbeli változása 12 regionális klímamodell szimuláció átlaga alapján 3 időszakra (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100) a domain modellel. Referencia időszak: 1981-2010

5.1.4. One-class SVM modell

A lefuttatott faktor fontossági analízis alapján e modell esetében is a bükk tolerancia index ($\kappa = 0,64$), az Ellenberg-index ($\kappa = 0,58$) és a FAI ($\kappa = 0,57$) index adott magas *kappa* értékeket, hasonlóan a bioclim modellhez. A TAI ($\kappa = 0,50$) és a modEQ ($\kappa = 0,49$) is fontos tényezőknek számítanak, ezeken kívül a 10 legfontosabb éghajlati tényező rangsorában a fő növekedési időszak ($\kappa = 0,39$) és a növekedési időszak csapadékösszege ($\kappa = 0,18$) is megjelenik (39. ábra). A nyugalmi időszak hőmérséklete ($\kappa = 0,08$), valamint csapadékösszege ($\kappa = 0,08$) elhanyagolható hatású az elterjedésre e modell szerint.



39. ábra: A 10 leginkább meghatározó éghajlati paraméter a kocsánytalan tölgy elterjedésére a one-class SVM modell alapján. Kék sáv jelöli a kappa értékeket, ha a modell számol az adott faktoral, sárga sáv, pedig ha elhanyagolja

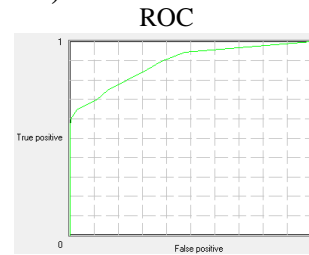
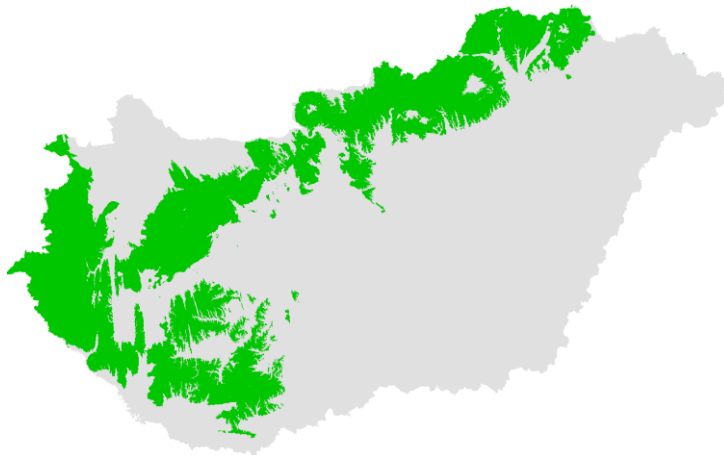
Az előzetes statisztikai adatok alapján jó beválás mellett ($AUC > 0,87$) elfogadható a modell (9. táblázat). A jelenlegi potenciális elterjedés szerint az ország dél-nyugati része és az egész Bakony térsége is klimatikusan alkalmas terület. Ez megegyezik az MLC modell eredményeivel, ugyanakor itt is meg kell jegyezni, hogy a felülbecslésnek az az oka, hogy e területeken a kocsánytalan tölgy helyét telepített fenyő állományok veszik át, ill. a termőhely többi tényezője nem jelenik meg a modellben.

A jövőre vonatkozó becslési térképek alapján hasonló eredményt kaptam, mint a bioclim modellnél, vagyis az elterjedési területek csökkenése főként a déli-dél-nyugati országrészt fogja valószínűleg erősebben érinteni (40. ábra).

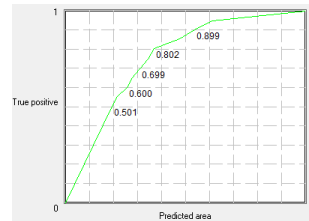
9. táblázat: One-class SVM modell beválási statisztikái

	True Positive Rate (TPR)	ROC	Area Under Curve (AUC)	TPR vs. predicted area
One-class SVM	0.847	0,854	0.870	0.851

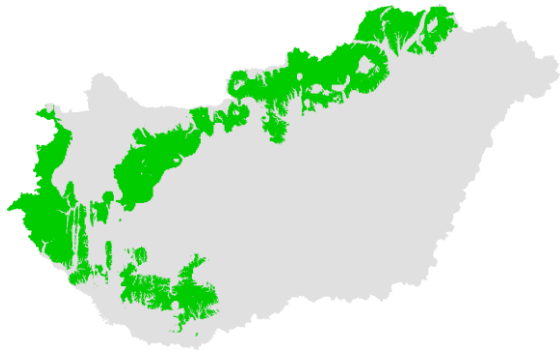
Jelenlegi potenciális elterjedés (1981-2010)



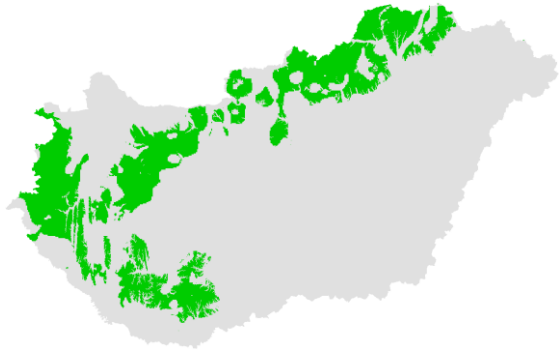
TPR vs. predicted area



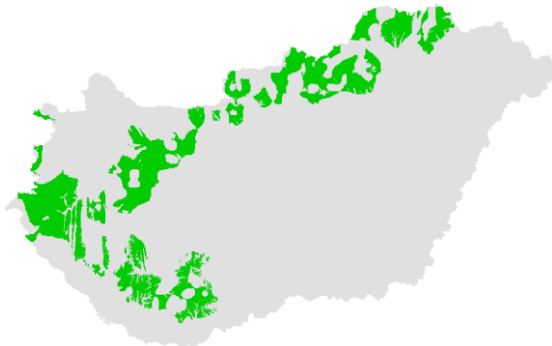
2011-2040 vs. 1981-2010



2041-2070 vs. 1981-2010



2071-2100 vs. 1981-2010

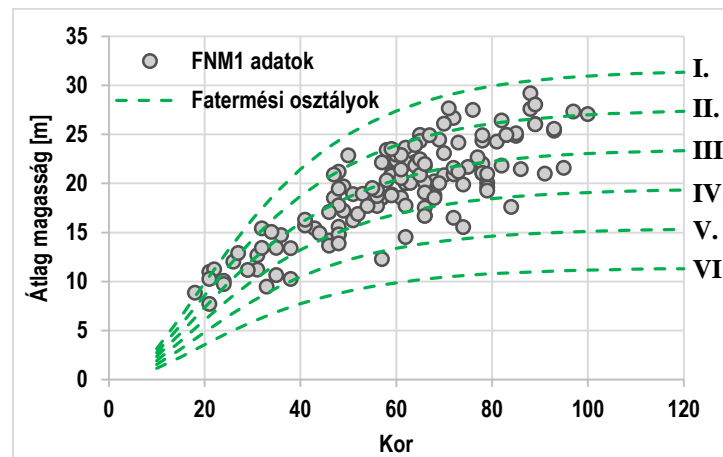


■ Quercus petraea
■ Absence
■ Null value

40. ábra: Kocsánytalan tölgy jelenlegi potenciális elterjedése és becsült jövőbeli változása 12 regionális klímamodell szimuláció átlaga alapján 3 időszakra (2011-2041; 2041-2070; 2071-2100) a one-class SVM modellel. Referencia időszak: 1981-2010

5.2. Produkció vizsgálat eredményei

A kocsánytalan tölgy FNM1 mintapontok közül a zonális termőhellyel (sík, ill. közel sík fekvésű valamint mély, és igen mély termőréteg vastagsággal) rendelkező mintapontokat vizsgáltam meg (lásd 3.2 fejezet). Ezen mintapontok kor-magasság diagramján látható, hogy a legnagyobb részük a II. – IV. fatermési osztályokba sorolható (41. ábra). Tehát a közepes minőségű termőhelyeken lévő mintaterületek túlreprezentáltak, míg a kiváló (I.) és a gyengébb (V. – VI.) fatermési osztályokba tartozó termőhelyek alulreprezentáltak ebben a rendszerben. Az FNM1 összes (584 mintapontot tartalmazó) kocsánytalan tölgy mintaterületéhez tartozó kor-magasság diagram, a fatermési osztályok feltüntetésével megtalálható az 5. mellékletben. Az összes mintapontot tartalmazó diagram alapján is megállapítható, hogy az FNM1 gyenge és kiváló termőhellyel rendelkező mintaterületei csak kevés számban fordulnak elő.



41. ábra: A zonális termőhellyel rendelkező FNM1 adatok kor-magasság diagramja, zöld szaggatott vonalakkal a fatermési osztályok középvonalai (BÉKY, 1981 alapján)

A mintaterületek átlagmagassága, kora, valamint a fatermési táblák (BÉKY, 1981) alapján a Chapman-Richards aszimptotikus függvény segítségével (5. egyenlet) meghatároztam az egyes mintaterületek fatermőképességét. A kiszámított FTK értékeket a termőhelyi tényezők függvényében elemeztem (klíma, genetikai talajtípus, termőréteg vastagság, fizikai féleség), melyből kivételt képzett a hidrológiai jellemző vizsgálata, mivel az összes mintapont többletvízhatástól független kategóriába tartozott.

5.2.1. Termőhelyi tényezők hatása a fatermőképességre

A termőhely legtöbb tényezője kategorikus változó és nem folytonos. Tehát ahogy azt már korábban említettem (3.4 fejezet), több statisztikai vizsgálathoz így nem alkalmazható.

Kiszámítható azonban termőhelytípus-változatonként az FNM1 mintapontok átlagos fatermőképességi értéke. Erre azért volt szükség, mivel egy adott termőhelytípus-változaton lévő állomány FTK értéke elosztva az összes mintapont FTK átlagával megadja az ún. osztótényezőt. Ez a mérőszám már egy folytonos változó, amely alkalmas a legtöbb matematikai statisztikai vizsgálat elvégzéséhez (PATOCSKAI, 2012 nyomán). Az osztótényező egy 1-hez közeli mérőszám, amely ha 1-nél magasabb, akkor az átlagosnál jobb, ha kisebb, akkor pedig gyengébb termőhellyel rendelkező mintapontról van szó. Mivel az osztótényező egy komplex mérőszáma a termőhely „jóságának”, használatával különválaszthatók az éghajlati tényezők, ill. a termőhely többi tényezőjének hatása a produkcióra. Mivel célom a klíma hatásának vizsgálata, és a termőhely többi tényezőjének kiszűrése, így szükségesnek tartom ezt a különválasztást és az osztótényezők alkalmazását.

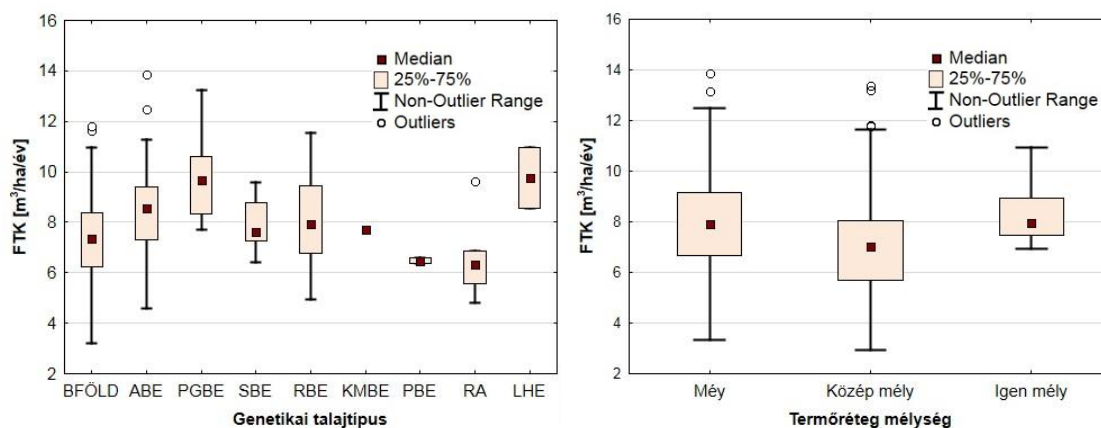
A termőhelytípus-változatonként megvizsgált FTK legmagasabb értékei bükkös klímában (B) agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABE), gyertyános-tölgyes klímában (GYT) pszeudoglejes barna erdőtalajon (PGBE), valamint lejtőhordalék erdőtalajon (LHE) fordultak elő (7,69 – 10,55 m³/ha/év). Jó fatermőképességű értékek általában gyertyános-tölgyes klímában agyagbemosódásos barna erdőtalajon (ABE), barnaföldön (BFÖLD) és savanyú, nem podzolos barna erdőtalajon (SBE) alakultak ki (6,32 – 9,34 m³/ha/év). Közepes növekedés (4,93 – 9,61 m³/ha/év) a cseres-kocsánytalan tölgyes (CS-KTT) és gyertyános-tölgyes klímában karbonátmaradványos barna erdőtalajon (KMBE), podzolos barna erdőtalajon (PBE) és ranker (RA) talajokon található. Gyengébb növekedés általában ott adódott, ahol a termőrétég mélység közepes mélységű volt (10. táblázat). Fizikai féleség szerint nem volt szignifikáns különbség az agyag és vályog talajokon kialakult KTT állományok fatermőképességi értékei között, és csak egy mintaponton volt homok fizikai féleség.

A 10. táblázatban összesítettem a zonális termőhellyel rendelkező (139 mintapont) FNM1 FTK értékeit, ill. a kiszámított osztótényezőket. A meghatározott osztótényezők már folytonos változók, és statisztikai vizsgálatokhoz (későbbiekben regresszió számításhoz lásd 5.2.3 fejezet) is felhasználhatók. A táblázatból kitűnik, hogy mind a három klíma kategóriában (B, GYT, CS-KTT) előfordul 1-nél magasabb értékű osztótényező, ami egyrészt arra utal, hogy a klíma ilyen formájú kategorizálása nem elég a fatermőképességre gyakorolt hatásának vizsgálatához. Másrészt arra utal, hogy a különböző talajtípusok, és a termőrétég mélysége fontos tényezők, amelyek alapjaiban határozzák meg a rajtuk lévő erdőállományok produkcióját (BIDLÓ et al., 2014). Ezt e két tényező függvényében elkészített box-plot diagramok is megerősítették (42. ábra).

10. táblázat: Zonális termőhellyel rendelkező FNMI mintapontok fatermőképességi értékeinek átlaga, maximuma, minimuma, szórása, ill. a kiszámított osztótényezők termőhelytípus-változatanként

Genetikai talajtípus	Termőrég vastagsága	Fizikai féleség	Mintapontok száma [db]	Fatermőképesség [m ³ /ha/év]				Osztótényező
				Átlag	Max.	Min.	Szórás	
Bükkös klíma (B)								
ABE	Mély	Vályog	4	10,55	13,86	8,32	2,56	1,37
Gyertyános-tölgyes klíma (GYT)								
PGBE	Mély	Vályog	10	10,00	13,22	8,32	1,85	1,30
LHE	Mély	Vályog	2	9,76	10,97	8,54	1,71	1,27
BFÖLD	Közép mély	Vályog	7	9,34	11,79	7,40	1,89	1,21
RBE	Mély	Homok	5	8,89	11,54	6,68	2,02	1,15
ABE	Mély	Vályog	44	8,68	12,47	4,60	1,41	1,13
ABE	Közép mély	Vályog	23	8,13	10,30	6,00	1,25	1,05
SBE	Közép mély	Vályog	7	7,82	9,56	6,42	1,04	1,01
PGBE	Közép mély	Agyag	1	7,69	7,69	7,69	-	1,00
RBE	Mély	Vályog	2	7,71	8,53	6,89	1,16	1,00
BFÖLD	Mély	Vályog	4	7,50	8,36	6,39	0,95	0,97
ABE	Igen mély	Vályog	3	7,32	8,11	6,81	0,68	0,95
PBE	Igen mély	Vályog	2	6,48	6,58	6,38	0,14	0,84
RA	Közép mély	Vályog	2	6,32	6,85	5,79	0,75	0,82
RBE	Közép mély	Homok	1	4,93	4,93	4,93	-	0,64
Cseres-kocsánytalan tölgyes klíma (CS-KTT)								
RA	Mély	Vályog	1	9,61	9,61	9,61	-	1,25
KMBE	Közép mély	Vályog	1	7,69	7,69	7,69	-	1,00
BFÖLD	Mély	Vályog	1	7,32	7,32	7,32	-	0,95
ABE	Mély	Vályog	1	7,09	7,09	7,09	-	0,92
PBE	Mély	Vályog	1	6,46	6,46	6,46	-	0,84
ABE	Közép mély	Vályog	3	5,80	6,77	5,06	0,87	0,75
RA	Közép mély	Vályog	4	5,76	6,34	4,80	0,73	0,75
BFÖLD	Közép mély	Vályog	10	6,40	10,97	3,19	2,04	0,83

Ezek alapján a leginkább befolyásoló tényezők közé tartozik a genetikai talajtípus és a termőrég mélység. A fizikai féleség és az FTK nem mutatott szignifikáns kapcsolatot.



42. ábra: A genetikai talajtípus (balra) és termőrég vastagság (jobbra) hatása a fatermőképességre (FTK) a vizsgált zonális termőhelyű FNMI mintapontokon

Mivel a termőhelyi tényezők közül dolgozatomban elsősorban az éghajlat hatását vizsgálom, így a továbbiakban meg kellett határoznom azokat az éghajlati paramétereket is, amelyek a leginkább befolyásolják a fatermőképességet (ennek hatására pedig a fatermési osztályokat). Ehhez többváltozós statisztikai módszereket alkalmaztam.

5.2.2. *Az éghajlati tényezők és a fatermőképesség kapcsolatának feltárása többváltozós statisztikai módszerekkel*

A fatermőképességet (és a fatermési osztályokat) leginkább meghatározó éghajlati paraméterek kiválasztására főkomponens-analízist (*principal component analysis*; PCA), valamint faktoranalízist (*factor analysis*; FA) alkalmaztam. Az előzőekben leírtak alapján (3.4 fejezet) ezekkel a statisztikai módszerekkel csoportokba (főkomponensekbe, ill. faktorokba) rendezhetők az adatok, és kiválaszthatóak azok a tényezők, amelyek megmagyarázzák az adathalmaz teljes varianciájának legnagyobb részét. A vizsgálathoz használt éghajlati adatok a referencia időszak (1981-2010) FNM1 mintapontonkénti 30 éves átlagai voltak, a fafajok fő vízfelhasználási időszakaira bontva (nyugalmi-, növekedési-, fő növekedési-, és kritikus időszakok).

Mindkét eljárást megelőzően ellenőrizni kellett az alkalmazhatóságot. Ez a korrelációs mátrix értékeinek vizsgálatával tehető meg. A módszereket akkor lehet alkalmazni, ha a korrelációs mátrix értékei között sok az abszolút értékben 0,3-et meghaladó érték (HORVÁTH-SZOVÁTI és VÁGVÖLGYI, 2014). A vizsgált mátrix több helyen tartalmaz magasabb, mint |0,3| értéket (6. melléklet), vagyis mind a PCA mind az FA módszer alkalmazható.

A **főkomponens-analízis** során eldönthető a korrelációs mátrix saját értékei, valamint a kummulatív variancia alapján az, hogy hány főkomponenst érdemes választani. Az 1-nél magasabb értékkel rendelkező sajátértékek számát, valamint az adatok varianciájának több mint 80%-át magyarázó főkomponensek számát érdemes választani (HORVÁTH-SZOVÁTI, 2013). Az elvégzett vizsgálat eredménye alapján 3 főkomponens rendelkezik 1-nél nagyobb sajátértékkel. Ezek között az első, az adatsor teljes varianciájának 45,7%-át, a második 30,8%-át a harmadik 13,5%-át magyarázza meg. Ez alapján **3 főkomponenst választottam**, mivel ezek lefedik az adatok teljes varianciájának 90%-át (11. táblázat).

11. táblázat: A főkomponens-analízis során kapott korrelációs mátrix sajátértékei, a magyarázott variancia hányad (%), valamint a teljes variancia (%). Vastag fekete vonallal elválasztva az 1-nél kisebb sajátértékkel rendelkező főkomponenst.

Főkomponensek száma	Saját érték	Variancia hányad %	Össz. variancia %
1	4,567	45,673	45,674
2	3,084	30,843	76,517
3	1,351	13,513	90,031
4	0,802	8,025	98,056

A főkomponenseket értelmezéséhez, szükségesek a korrelációs mátrix sajátvektorai is, vagyis az ún. faktorsúlyok. Ezek alapján beazonosítható, hogy az egyes változók mely főkomponensekbe tartoznak. Amennyiben egy faktorsúly abszolút értékben 0,7-nél magasabb értéket ad egy főkomponenssel, akkor az az adott faktor része a főkomponensnek (12. táblázat). A főkomponens analízis során azonban nem mindig egyértelmű, hogy mik is az egyes főkomponensek jelentései, de ez ennél az eljárásnál nem is elvárás (HORVÁTH-SZOVÁTI és VÁGVÖLGYI, 2014). Az általam vizsgált adatok esetében sem volt egyértelmű a főkomponensek jelentései, így ezt a későbbi faktor analízis során tudtam megadni.

12. táblázat: Az egyes főkomponensekhez tartozó sajátvektorok, piros színnel kiemelve az abszolút értékben 0,7-nél magasabb értékű faktorsúlyok

	PC1	PC2	PC3
FTK	-0,246703	-0,778230	-0,451957
FTO	0,282102	0,717406	0,511451
T _{XI-III}	0,751854	-0,601778	0,165471
T _{IV-X}	0,923255	-0,286464	0,201607
T _{V-VIII}	0,926178	-0,238787	0,215272
T _{VII}	0,932889	-0,225889	0,205605
P _{XI-III}	0,218568	-0,710004	-0,269836
P _{IV-X}	-0,494113	-0,750990	0,362076
P _{V-VIII}	-0,687802	-0,536802	0,472585
P _{VII}	-0,718452	-0,235702	0,549214

Az első főkomponensbe az összes átlaghőmérsékleti érték (nyugalmi időszak, növekedési időszak, fő növekedési időszak és kritikus időszak) valamint a kritikus időszak csapadékösszeg tartozik. Ez a főkomponens inkább a hőmérsékletekkel van kapcsolatban, így ez valószínűleg az éves átlaghőmérséklet főkomponens. A második esetében a fatermőképesség és a fatermési osztály, valamint a nyugalmi időszak és a növekedési időszak csapadékösszei alkotnak egy főkomponenst. Itt nem egyértelmű, hogy mely paraméterekkel lehet a legjobban jellemezni ezt a főkomponenst, ezt a későbbi faktor analízis során tudtam értelmezni. A harmadik főkomponensben nincs 0,7-et meghaladó faktorsúly érték, így ennek az értelmezése is a faktor analízis segítségével történt meg.

Összességében ennek a statisztikai módszernek az eredménye, hogy három főkomponens megmagyarázza a teljes adatsort, de a főkomponensek jelentése nem egyértelmű, így ezeket csak a faktor analízissel együtt lehet értelmezni.

A **faktor analízisnél** az előzőhöz hasonlóan a korrelációs mátrixból kell kiindulni. A sajátértékek alapján az előzőhöz hasonlóan 3 faktort különítettem el. A faktorsúlyok vizsgálatánál lehetőség van az egyes faktorok elforgatására különböző derékszögű forgatások segítségével (pl.: varimax, quartimax, biquartimax, equartimax rotációk), ami megkönnyíti az egyes faktorok értelmezését. A könnyebb értelmezéshez tehát elforgattam a tengelyük mentén a faktorokat varimax rotáció segítségével, így a főkomponens elemzéstől eltérően minden faktor értelmezhetővé vált (13. táblázat).

13. táblázat: Az egyes faktorokhoz tartozó faktorsúlyok varimax rotáció esetén, piros színnel kiemelve az abszolút értékben 0,7-et meghaladó faktorsúlyokat

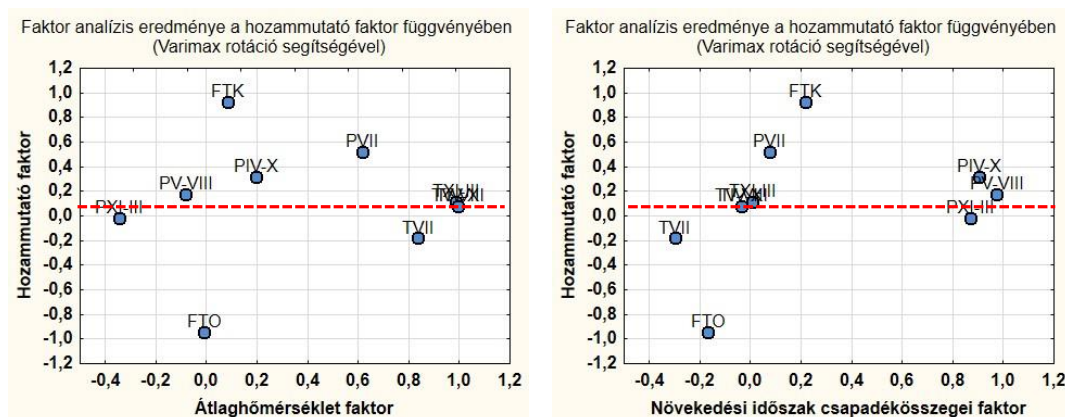
	FA1	FA2	FA3
FTK	-0,024425	0,937703	0,215053
FTO	0,099129	-0,945563	-0,161137
T _{XI-III}	0,944955	0,246093	0,036047
T _{IV-X}	0,968614	-0,034895	-0,188880
T _{V-VIII}	0,955298	-0,079807	-0,205434
T _{VII}	0,836827	-0,083993	-0,222146
P _{XI-III}	0,399517	0,678741	0,066222
P _{IV-X}	0,013632	0,387855	0,908041
P _{V-VIII}	-0,205997	0,180364	0,973729
P _{VII}	-0,334840	-0,090713	0,871766

A kapott eredmény alapján tehát az egyes faktorok a következők:

- 1. faktor (FA1 = éves átlaghőmérséklet faktor):** Szoros pozitív kapcsolat a nyugalmi-, növekedési-, fő növekedési-, és kritikus időszak hőmérsékletével.
- 2. faktor (FA2 = hozammutató faktor):** Szoros pozitív kapcsolatot mutat a fatermőképességek, és szoros negatív kapcsolatot a fatermési osztállyal. Ez nem meglepő, hiszen minél magasabb a fatermőképesség, annál alacsonyabb a fatermési osztály ezért van közöttük negatív kapcsolat.
- 3. faktor (FA3 = növekedési időszak csapadékösszegei faktor):** Szoros pozitív kapcsolatot mutat a növekedési-, fő növekedési-, és kritikus időszaki csapadékösszegekkel.

A kapott faktorok hasonló eredményt adnak a már korábban kapott főkomponensekkel, vannak azonban eltérések (pl.: az első faktorban nem szerepel a kritikus időszak

csapadékösszege, a második faktorban pedig a nyugalmi és növekedési időszak csapadékösszege). Ezzel az eljárással kiegészítve nemcsak az összes faktor értelmezhető, hanem azok egymással való kapcsolata is. Mivel a vizsgálat célja, hogy kimutassa mely faktorok (ezen belül is mely éghajlati tényezők) vannak hatással a hozamra így két dimenzióban ábrázoltam az egyes faktorokat. A hozammutató faktor (43. ábra y tengely) függvényében jelenítettem meg az átlaghőmérséklet (1. faktor) ill. a növekedési időszak csapadékösszegei faktorokat (3. faktor).



43. ábra: Az egyes faktorokszűlyok ábrázolása, piros szaggatott vonal felett a hozammutató faktorra pozitív hatású paraméterekkel

Szakirodalom alapján azok a paraméterek, amelyek pozitív hatással vannak a hozamra (piros szaggatott vonal felett) azok, amelyeknél a hozammutató koordinátára vetített értéke pozitív (HORVÁTH-SZOVÁTI és VÁGVÖLGYI, 2014). Tehát a vizsgált FNM1 adatok esetében az alábbi tényezők hatnak pozitívan a hozamra (fatermőképességre és ennek hatására a fatermési osztályokra):

- a) fő növekedési-, növekedési-, és kritikus időszak csapadékösszegei
- b) nyugalmi-, növekedési, és fő növekedési időszak hőmérsékletei

Külön választható tehát a kritikus időszak hőmérséklete, ami negatív hatással van a hozammutató faktorra. A további hőmérsékleti tényezők lefedik az egész éves átlaghőmérsékletet, így tehát e tényező enyhe pozitív hatással van a hozamra. A csapadékösszegek esetében a fő növekedési-, növekedési-, és kritikus időszakok külön-külön is jól láthatóan szoros pozitív kapcsolatban állnak a hozammutató faktorial.

Összességében tehát megállítható, hogy a hozamra (fatermőképesség és fatermési osztály) pozitív hatású az éves átlaghőmérséklet, és a növekedési időszak csapadékösszegei (növekedési, főnövekedési, kritikus időszak). Negatív hatású a kritikus időszak hőmérséklete. Ez alátámasztja a korábban kapott eredményeimet, amikor az elterjedést

meghatározó éghajlati paramétereket vizsgáltam. Az elterjedésre a kritikus időszak hőmérsékletére épülő Ellenberg-index, valamint a növekedési időszak éghajlati átlagaira épülő bükk tolerancia index mutatta a legerősebb összefüggéseket. A statisztikai eredmények alátámasztják, hogy alapvetően az éves átlagok (és az ezekre épülő éghajlati indexek) ill. a fő vízfelhasználási időszak szélsőségei (és az erre épülő szárazsági indexek) a meghatározó klíma paraméterek. A fatermőképesség változásának becslésére így ezeket alkalmaztam regressziós egyen illesztés módszerével.

5.2.3. Fatermőképesség jövőbeli változásának becslése regressziós egyenes illesztéssel

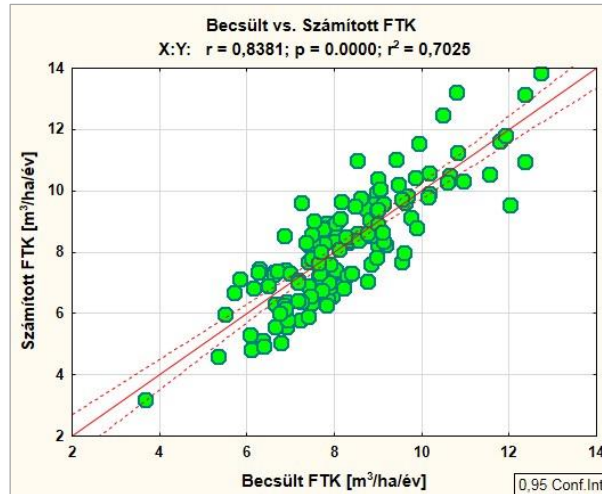
A főkomponens és faktor analízis segítségével kapott legfontosabb éghajlati tényezők alapján (éves átlaghőmérséklet, növekedési-, fő növekedési-, és kritikus időszaki csapadékösszegek) regressziós egyenest illesztettem a fatermőképességi adatokra. Mivel a fatermőképességre a termőhely többi tényezője is szintén hatással van (különösen a genetikai talajtípus és a termőréteg mélység), ezért a regresszió számításba a korábbiakban kiszámított termőhelyet jellemző osztótényezőket is felhasználtam. Ezek alapján a következő összefüggést kaptam:

7. egyenlet:

$$FTK_{\text{becsült}} = -5,74 + (6,79 \cdot \text{osztótényező}) + (0,02 \cdot P_{VI-X}) + (-0,03 \cdot P_{V-VIII}) + (0,04 \cdot P_{VII}) + (0,13 \cdot T_{\text{átlag}})$$

ahol: $FTK_{\text{becsült}}$	becsült fatermőképesség
osztótényező	termőhelyet jellemző dimenzió nélküli mérőszám (11. táblázat)
P_{VI-X}	növekedési időszak csapadékösszeg (április - október)
P_{V-VIII}	fő növekedési időszak csapadékösszege (május - augusztus)
P_{VII}	kritikus időszak csapadékösszeg (július)
$T_{\text{átlag}}$	éves átlaghőmérséklet

A 44. ábrán látható a modell validáció, vagyis a 7. egyenlettel kiszámított FTK értékek (becsült FTK) és a Chapman-Richard egyenlet (5. egyenlet) alapján számított valós FTK értékek (számított FTK) közötti eltéréseket.



44. ábra: A Chapman-Richard egyenlet alapján számított (y tengely) és becslött (x tengely) fatermőképességi értékek közötti eltérés

A becsléssel kapott adatok jól közelítik a valós értékeket ($r = 0,70$), így alkalmas jövőbeli fatermőképesség becslésére is.

Elvégeztem a fatermőképesség és az éghajlati indexek korreláció analízisét is, és ezek alapján megállapítottam, hogy az FTK értékek az Ellenberg-index-szel szoros negatív, míg a Thornthwaite-féle szárazsági index-szel szoros pozitív korrelációban állnak (14. táblázat). Az ellentétes előjel abból adódik, hogy az EQ esetében a kritikus időszak hőmérséklete van elosztva az éves csapadékösszeggel, míg a TAI esetében az éves csapadékösszeg és az éves átlaghőmérséklet hányadosa adja az index értékét (lásd korábban 3. táblázat).

14. táblázat: Éghajlati indexek és fatermőképesség korreláció analízise, félkövérrel kiemelve a két legmagasabb r értéket adó éghajlati indexeket, piros színnel a $p < 0,05$ szinten szignifikáns értékek

Éghajlati index neve	Pearson-féle korrelációs együttható (r)	r^2	Szignifikancia (p)
EQ	-0,478	0,229	0,000
ModEQ	-0,393	0,154	0,000
FAI	-0,275	0,076	0,015
TAI	0,500	0,250	0,000
H	0,419	0,175	0,000
BTI	0,313	0,098	0,000

A kapott korreláció analízis eredményeként az Ellenberg-indexet, és a Thornthwaite-féle szárazsági indexet választottam fatermőképesség becslésére, tehát ezek alapján is készítettem regressziós egyenes illesztést. A korábban kiszámított osztótényezőket ebben az esetben is felhasználtam (8. egyenlet).

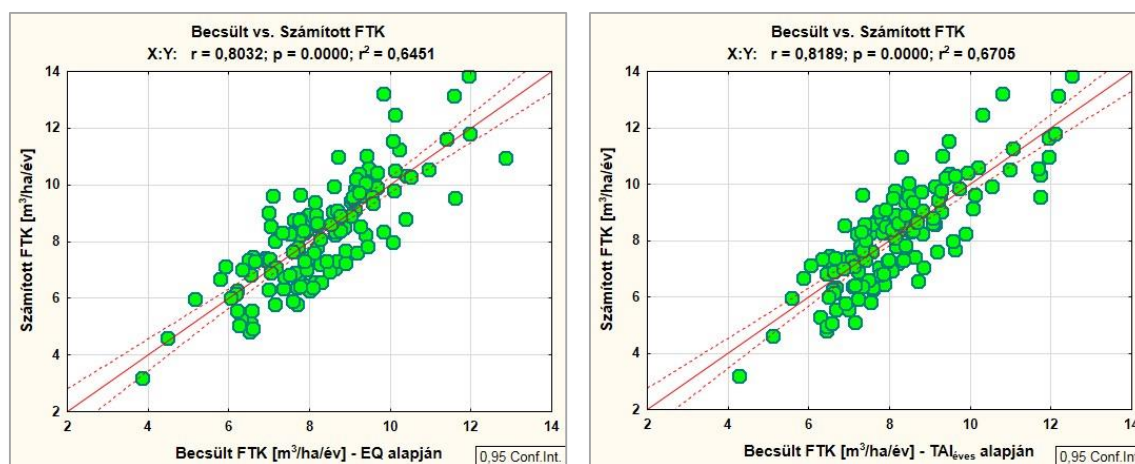
8. egyenlet

$$FTK_{EQ} = 6,96 + (-0,17 \cdot EQ) + (6,62 \cdot \text{osztótényező})$$

$$FTK_{TAI} = -4,40 + (0,09 \cdot TAI) + (6,55 \cdot \text{osztótényező})$$

ahol: FTK_{EQ}	becsült fatermőképesség az Ellenberg-index alapján
FTK_{TAI}	becsült fatermőképesség a Thornthwaite-féle szárazsági index alapján
EQ	Ellenberg-index [$^{\circ}\text{C}/\text{mm}$]
TAI	Thornthwaite-féle szárazsági index [$\text{mm}/^{\circ}\text{C}$]
osztótényező	termőhelyet jellemző dimenzió nélküli mérőszám (11. táblázat)

A két egyenlet alapján kapott becült és valós FTK értékek közötti eltéréseket, vagyis a modell validációt a 45. ábrán szemléltetem. Mind a kettő esetében a becslés jól közelíti a valós értékeket (az Ellenberg-index esetében $r^2 = 0,64$, a Thornthwaite-féle szárazsági index esetében $r^2 = 0,67$), és mind a kettő becslésre igaz, hogy az alacsonyabb FTK értékek esetében felülbecslés, míg magas FTK értékeknél alábecslés mutatkozik. A két eljárás között tehát nincs szignifikáns különbség.

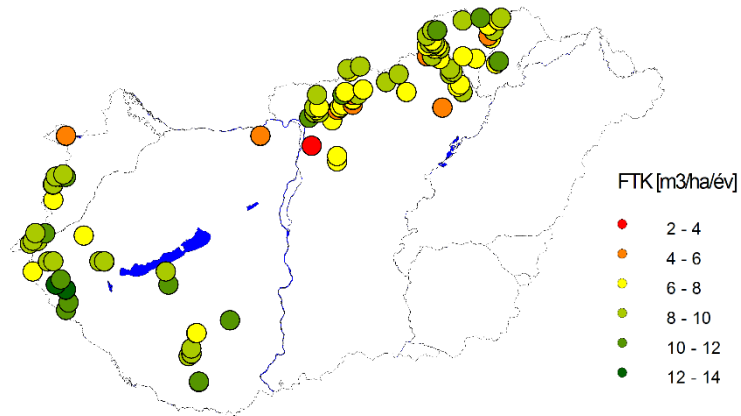


45. ábra: A Chapman-Richard egyenlet alapján számított (y tengely) és becült (x tengely) fatermőképességi értékek közötti eltérés az Ellenberg-index (balra), és a Thornthwaite-féle szárazsági index (jobbra) alapján

5.2.4. Fatermőképesség, és fatermési osztály becült változásainak eredményei

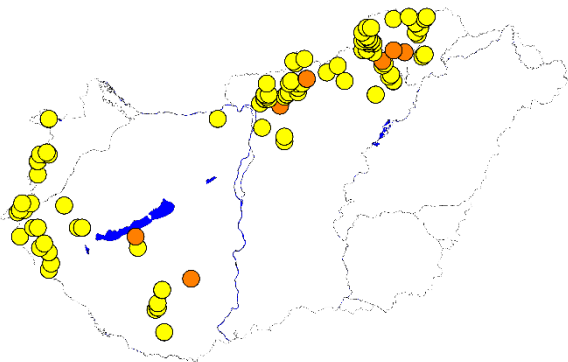
A fenti egyenletek segítségével kiszámoltam a jövőben várható fatermőképesség, valamint fatermési osztály változásának értékeit. Ehhez a 12 regionális klímamodellből számolt éghajlati adatokat használtam fel, melyeket a lineáris regresszióval kapott egyenletekbe helyettesítettem be (7. és 8. egyenletek). A fatermőképesség becült változását három jövőbeli időszakra (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100) készítettem el, amelyeket a 46. – 48. ábrán mutatok be, a fatermési osztály változására vonatkozó eredményeimet pedig a 7. – 9. mellékletekben közlöm.

Jelenlegi fatermőképesség (FNM1 adatok)

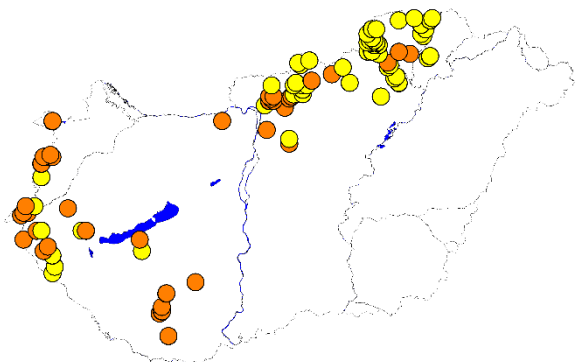


Fatermőképesség változás [%]

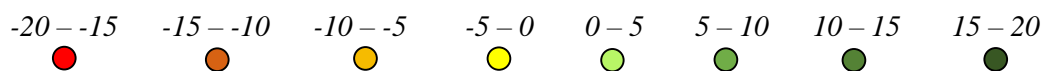
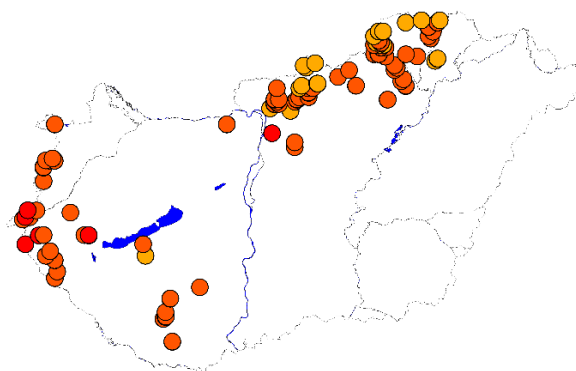
2011-2040



2041-2070

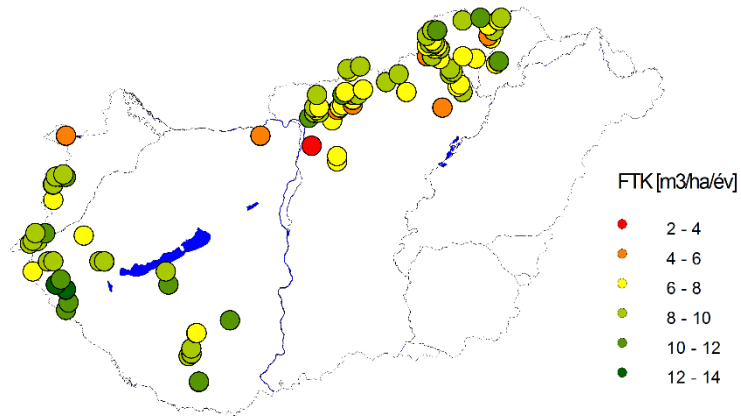


2071-2100



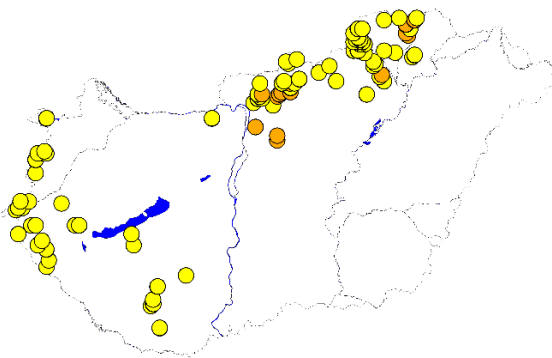
46. ábra: Jelenlegi, és becstelt jövőbeli fatermőképesség változás 12 regionális klímamodell szimuláció átlagából az éves átlaghőmérséklet, és a növekedési-, főnövekedési-, és kritikus időszak csapadékösszege alapján

Jelenlegi fatermőképesség (FNM1 adatok)

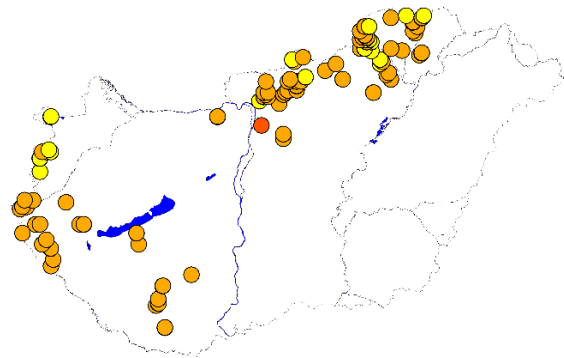


Fatermőképesség változás [%]

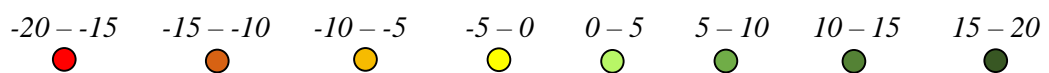
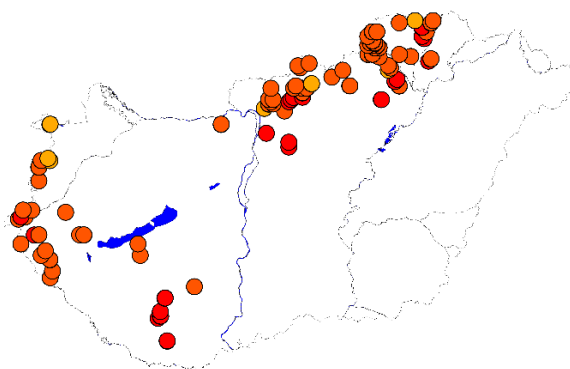
2011-2040



2041-2070

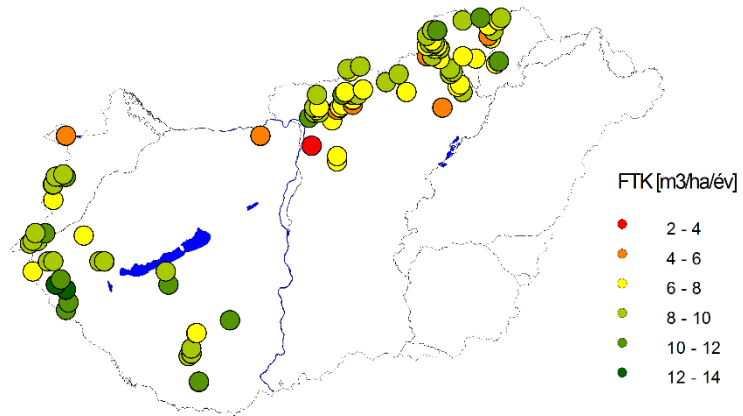


2071-2100



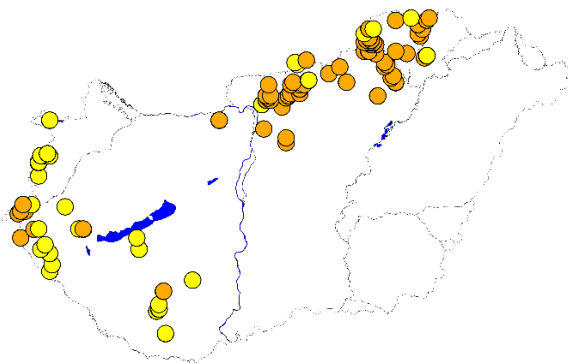
47. ábra: Jelenlegi, és becscült jövőbeli fatermőképesség változás 12 regionális klímamodell szimuláció átlagából az Ellenberg-index alapján

Jelenlegi fatermőképesség (FNM1 adatok)

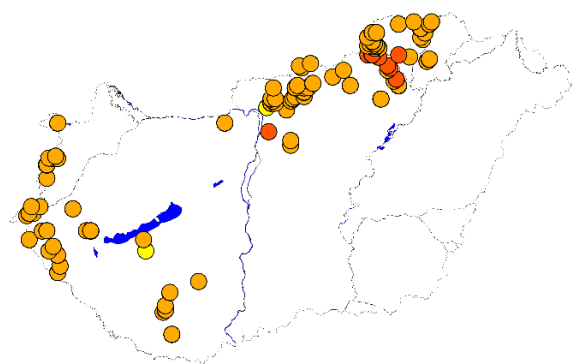


Fatermőképesség változás [%]

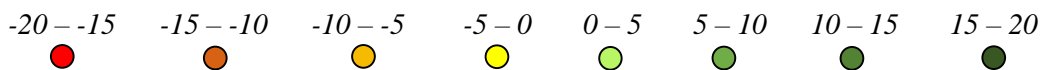
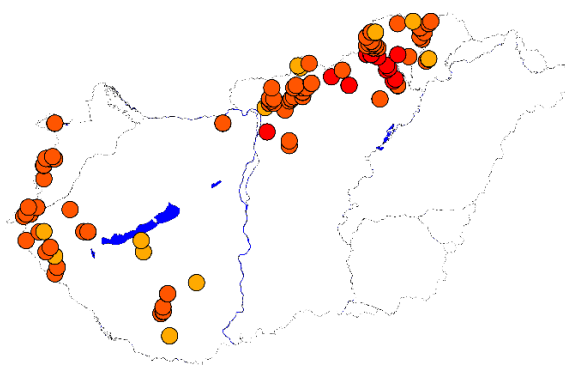
2011-2040



2041-2070



2071-2100



48. ábra: Jelenlegi, és becült jövőbeli fatermőképesség változás 12 regionális klímamodell szimuláció átlagából a Thornthwaite-féle szárazsági index alapján

6. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

6.1. Elterjedési modellek eredményeinek kiértékelése

A hazai kocsánytalan tölgy állományok elterjedéséhez az Erdészeti Adattár adatait, a Carpatclim múltbeli klíma adatbázist, valamint 12 regionális klímamodell eredményeit használtam fel. Összesen négy modellel vizsgáltam meg a potenciális (lehetséges) jelenlegi és jövőbeli elterjedést, amelyek a maximális valószínűség, bioclim, domain, és one-class SVM modellek voltak. A modellek közül a maximális valószínűség módszerével (MLC) készült eredményeket a Digiterra Map programban készítettem el, míg a többi három modell a ModEco szoftverben elérhető, amely speciálisan az elterjedési vizsgálatokhoz alkalmazott program. **Az MLC-vel készített eredményeim alkalmasnak bizonyultak jövőbeli elterjedés becslésére annak ellenére, hogy a Digiterra Map nem ilyen típusú vizsgálatokra készített program.** Véleményem szerint a Digiterra volt a leginkább felhasználóbarát, és könnyen használható, a bemenő rétegek számára pedig a legkevésbé érzékeny. Hátránya viszont, hogy a kapott modelleredmények elfogadására vagy éppen elvetésére vonatkozó statisztikai módszereket nem tartalmaz, továbbá többször előfordult, hogy túlterheltség miatt újraindult, vagy leállt a program.

A vizsgálatokba összesen 65 raszter réteget vontam be, amelynek együttes használata erősen leterhelte a programokat, megnövelte a futtatási időt és mivel az egyes modellek érzékenyen reagálnak a bemenő rétegek darabszámára, így a bizonytalanságok is erősen megnövekedtek. A bizonytalanságok és a dimenziószám csökkentése érdekében, ezért statisztikai vizsgálatokat végeztem arra vonatkozóan, hogy melyek az elterjedést legjobban meghatározó éghajlati paraméterek (szóródási diagram, gyakorisági hisztogram, Cohen-féle kappa együttható vagy kappa index). A vizsgálatok eredményét a 15. táblázatban foglaltam össze. Ezek alapján az elterjedésben az erdészeti szárazsági index (FAI) és a növekedési időszak csapadékösszege (P_{IV-X}) fontos tényezőnek számítanak, mivel három modellben is szerepelnek. **A leginkább meghatározó tényezők** viszont (amelyek mind a négy modell esetében fontosnak bizonyultak) **az Ellenberg-index (EQ), valamint a bükk tolerancia index (BTI).** Az EQ alapvetően a bükk (*Fagus sylvatica*) elterjedéséhez alkalmazott index (STANDOVÁR és KERÉKES 2003, JENSEN et al. 2004), és a BTI már a nevéből adódóan is a bükk éghajlati igényeihez kialakított index (BERKI et al., 2007). Az eredmény alapján tehát a bükk és a kocsánytalan tölgy éghajlati igénye jóllehet különböző, ugyanakkor hasonló hőmérséklet /csapadékmennyiség aránnyal írható le, ezáltal összehasonlíthatók.

15. táblázat: A kocsánytalan tölgy elterjedését leginkább meghatározó éghajlati tényezők az alkalmazott négy elterjedési modell statisztikai eredményei alapján. Piros félkövér jelöléssel, amelyek mind a négy modellben, fekete félkövér jelöléssel, amelyek három modellben meghatározóak voltak.

Maximális valószínűség	Bioclim	Domain	One-class SVM
T _{átlag}	FAI	P _{V-VIII}	BTI
P	BTI	P_{IV-X}	EQ
P_{IV-X}	P _{V-VIII}	EQ	FAI
EQ	EQ	BTI	TAI
BTI	P_{IV-X}	FAI	modEQ

Az eredményeimet összehasonlítottam RASZTOVITS (2011) munkájával, mivel szintén a ModEco szoftverben végezte el elterjedési vizsgálatait. RASZTOVITS (2011) doktori disszertációjában a hazai bükk potenciális jövőbeli elterjedését vizsgálta, összesen nyolc különböző modellel. Munkájában a statisztikai vizsgálatok alapján a fafaj elterjedését leginkább meghatározó éghajlati tényezők (1) a módosított Ellenberg-index, (2) a nyári hőmérséklet maximuma (3) és a késő nyári csapadékösszegek voltak. A módosított Ellenberg-index az én eredményimben egy modell esetében (one-class SVM) fordult elő, mint meghatározó tényező, RASZTOVITS (2011) munkájában viszont négy modellben is. Hasonlóság viszont, hogy a nyári időszak hőmérsékletei, így a júliusi hőmérséklet is meghatározó mind a bükk, mind a kocsánytalan tölgy számára, amelyre az EQ és a modEQ szárazsági indexek épülnek. Különbség, hogy míg a bükk esetében a vizsgálatok szerint a késő nyári (főként a szeptemberi) csapadékösszegek hatása mutatható ki, **a KTT esetében inkább a növekedési időszak, ezen belül is a fő növekedési időszak (májustól – augusztusig tartó) csapadékösszegei mutatattak jobb összefüggést.** A bükk elterjedésére használt 8 modell közül a mesterséges neurális hálók módszerét (BP-ANN) választotta a legalkalmasabbnak a szerző, azonban az én dolgozatomban erre a módszerre nem volt lehetőség. Az általam is alkalmazott bioclim, domain és one-class SVM modellek közül RASZTOVITS (2011) csak a one-class SVM modellel kapott értékelhető eredményt, mivel a másik két modell futtatásának eredményeként már a 2011-2040-es időszakra eltűnt a fafaj hazánk területéről. Ebből arra következtetett, hogy ezek alkalmatlanok jövőbeli elterjedés becslésére mivel túl robusztus modellekről van szó. Dolgozatomban **a domain modellel** kaptam hasonló eredményt, mivel a 21. század végére a becslés szerint akár el is tűnhet hazánk területéről a kocsánytalan tölgy. Ennek a modellnek az **eredményeit azért tartom alkalmatlannak, mivel a modell elfogadását vagy elvetését segítő pontossági érték, vagy AUC érték éppen hogy elérte a jó minőstést (AUC = 0,8).** Mivel a kiindulási, potenciális

jelenlegi elterjedés sem adott megbízható eredményt, a bizonytalanságok pedig tovább halmozódtak a modellben, így végeredményben nem kaptam értékelhető eredményt.

Összességében a maximális valószínűség, bioclim, one-class SVM modellek egyetértettek abban, hogy a klímaváltozás hatására a Nyugat-, és Dél-Dunántúli valamint az Északi-középhegységi erdészeti tájakon **a fafaj elterjedési határainak jelentős csökkenése valószínűsíthető**. Az MLC becslések alapján akár -48 – -56%-os elterjedési terület veszteség is bekövetkezhet, míg a bioclim és one-class SVM modellek eredményei szerint -45 – -59% közötti csökkenés valószínűsíthető a 21. század végére. Eredményeim kedvezőbb képet mutatnak összehasonlítva CZÚCZ és mtsai (2011, 2013) vizsgálataival, mivel az eredményeik szerint hazánkban akár 85%-os elterjedési terület csökkenés is bekövetkezhet a század végére. A saját ill. CZÚCZ és mtsai (2011, 2013) kutatási eredményei közötti különbség valószínű oka, hogy az elemzéseik során globális klímamodellt alkalmaztak, amely pontatlanabb képet ad durvább térbeli felbontása miatt.

Megvizsgáltam azokat a területeket, amelyek esetében a legnagyobb területvesztéséget prognosztizálták a modellek. Ezek alapján kiválszthatóvá váltak azok a különösen érzékeny, sérülékeny régiók, **ahol a fafaj számára a legerősebben lecsökkenhet az elterjedési terület**. Ezeket az erdészeti tájakat **veszélyeztetett területeknek** neveztem el, amelyek az eredményeim szerint a következők:

- Cserhát,
- Heves-Borsodi-dombság,
- Bükkalji-dombságok
- Cserhát-vidék,
- Kelet-Zselic, Nyugat-Zselic

Ezeken a területeken a fafajválasztásnál **figyelembe kell venni, hogy inkább a szárazságot jobban tűró fafajokat kell a jövőben előnyben részesíteni** (pl.: csertölgy *Quercus cerris*). MÓRICZ és mtsai. (2013) szerint is ezeken a területeken a kocsánytalan tölgy helyét a szárazságot jobban tűró fafajok foglalhatják el a jövőben.

6.2. Produkcióváltozás becslési eredményeinek kiértékelése

A kocsánytalan tölgy állományok produkció vizsgálatához az FNM1 adatokra épülő fatermőképességet (FTK) [$\text{m}^3/\text{ha}/\text{év}$] választottam, amely átlagmagasság alapján adja meg a hektáronkénti növedéket az 5. egyenlet segítségével. **Az összes FNM1 mintapont vizsgálata nem vezetett eredményre, ebben az esetben nem kaptam értékelhető**

összefüggést a termőhelyi tényezők és az FTK adatok között, ezért a továbbiakban csak a zonális termőhellyel rendelkező mintapontokat elemeztem. Ezek a mintapontok sík, ill. közel sík fekvéssel, valamint mély, ill. közép mély termőréteg vastagsággal rendelkeznek. Az így kapott mintapontok többletvízhatástól független hidrológiai kategóriába estek. Tehát az **eredményeim összesen 139 mintapontra vonatkoznak**, amely a teljes FNMI adatbázis kb. ¼-ét jelentik. Azok a KTT állományok, amelyek az adatbázisban nem sík vagy közel sík fekvésűek voltak, valamint sekély termőrétegen helyezkedtek el azok nem szerepelnek az eredményeim között. Ezekben az esetekben a domborzati mikroklíma hatása a leginkább befolyásoló tényező, amelyet sem a Carpatclim éghajlati adatbázisban (10 km x 10 km), sem pedig a 12 regionális klímamodell (25 km x 25 km) eredményeiben nem tudtam megjeleníteni, a térbeli felbontás korlátai miatt.

A kiszámított FTK értékeket összehasonlítottam a Carpatclim éghajlati adatokkal és termőhely többi tényezőjével (pl.: genetikai talajtípus, termőréteg vastagság). Mivel dolgozatomban csak az éghajlati adatok hatását vizsgálom a produkcióra, így egy tényezőben kellett összesítenem a termőhely többi tényezőjének együttes hatását. Erre a célra PATOCSKAI (2012) nyomán bevezettem az ún. osztótényezőket, amelyek a termőhely „jóságának” hatását írják le. Az elvégzett statisztikai vizsgálatok alapján (főkomponens- és faktor analízis, korreláció analízis) kiválasztottam a leginkább meghatározó éghajlati tényezőket, és a 12 regionális klímamodell eredménye alapján elkészítettem a becsült jövőbeli fatermőképesség változásának térképeit.

A főkomponens- és faktor analízis eredményei alapján három faktort különíttem el, amelyek megmagyarázzák az adatok varianciájának mintegy 90%-át. Ezek a faktorok az (1) átlaghőmérséklet faktor, (2) hozammutató faktor, és (3) növekedési időszak csapadékösszegei faktor. Mivel a fő kérdés, hogy a hozammutató faktorra (vagyis a fatermőképességre és a vele összefüggő fatermési osztályokra) milyen hatással vannak a különböző éghajlati paraméterek, így 2 dimenzióban ábrázoltam az egyes faktorosúlyokat (lásd korábban 5.2.2 fejezet, 43. ábra). Ennek eredményeként megállapítottam, hogy **a hozamra enyhe pozitív hatással van az éves átlaghőmérséklet, erős pozitív hatással van a fő növekedési-, növekedési-, és kritikus időszak csapadékösszege, valamint negatív hatása van a kritikus időszak hőmérsékletének**. Ez hasonlóságot mutat a korábban kapott eredményeimmel, amikor az elterjedést meghatározó éghajlati paramétereket vizsgáltam. Az elterjedésre ugyanis az átlaghőmérséklet, valamint a kritikus időszak hőmérsékletére épülő Ellenberg-index (EQ) valamint a növekedési időszak csapadékösszegeire épülő bükk tolerancia index (BTI) mutatott szoros összefüggést.

A korreláció analízis eredménye szerint **az EQ szignifikáns negatív, a Thorthwaite-féle szárazsági index (TAI) szignifikáns pozitív korrelációban áll az FTK értékekkel.** A BTI esetében alacsony volt a korrelációs koeficiens értéke, tehát ez az index csak az elterjedésben mutatott szoros kapcsolatot. **Összességében megállapítható hogy az EQ mind az elterjedésben, mind a produkcióban kiemelt jelentőségű környezeti paraméter,** amely alkalmas a fatermőképesség és a fatermési osztályok változásának jövőbeli becslésére.

Ezeket az eredményeket összehasonlítottam ILLÉS és mtsai. (2014) vizsgálataival, melyben szintén a fatermőképességre ható legfontosabb termőhelyi tényezőket elemezték. Összesen négy hazai fafajra (bükk, kocsánytalan tölgy, cser, erdei fenyő) készítettek becsléseket a jövőbeli fatermőképesség és fatermési osztály változására Zala megye területére. Munkájukban a regressziós vizsgálatok eredményeként a kor, a termőréteg vastagság és az erdészeti szárazsági index (FAI) bizonyultak a legmeghatározóbb tényezőknél. A FAI indexen kívül azonban más éghajlati paramétert nem is vizsgáltak meg, amelynek az oka az volt, hogy ez az index a Magyarországon alkalmazott erdészeti klímaosztályok lehatárolására és jellemzésére lett kifejlesztve (FÜHRER, 2010). Saját eredményeiben **a FAI és az FTK kapcsolatát kifejező korrelációs koeficiens értéke alacsonynak bizonyult,** így nem alkalmaztam jövőbeli becslésekhez. Az, hogy a FAI indexet nem tudtam használni **azonban nem azt jelenti, hogy alkalmatlan lenne a produkció változásának vizsgálatára** (hiszen éppen erre a célra készítették), pusztán az általam vizsgált adatokra (FNM1 zonális termőhelyű pontjaira) nem adott magas korrelációt. Saját valamint ILLÉS és mtsai. (2014) eredményeiben viszont hasonló, hogy jelentős hatása van a termőréteg vastagságnak a fatermőképességre.

A statisztikai vizsgálatok segítségével kiválasztott klíma paraméterek alapján **regressziós egyenes illesztéssel kiszámítottam a 2011-2040, 2041-2070 és 2071-2100 időszakokra vonatkozó jövőbeli fatermőképesség becsült változásait.** Összesen három becslési eljárást alkalmaztam amelyek (1) az éves átlaghőmérséklet, a növekedési-, főnövekedési-, és kritikus időszak csapadékösszege, (2) az Ellenberg-index, és (3) a Thorthwaite-féle szárazsági index alapján készültek el. **Mind a három esetben jelentős fatermőképesség csökkenés valószínűsíthető a 21. század végére, és ezzel párhuzamosan jelentős fatermési osztály (FTO) romlás is.** Az eredmények azt mutatják, hogy a Nyugat-Dunántúl, Dél-Dunántúli valamint az Északi-középhegység erdészeti tájakon lévő FNM1 mintapontokon (ezen belül is a Cserhát-vidék, Cserehát, és a Heves-Borsodi-dombság mintapontjain) várható szignifikáns fatermőképesség csökkenés (-20 – -15%).

Ennek oka, hogy ezek a területek a klímaváltozás hatásai által fokozottan érintett, sérülékeny régiók közé tartoznak. A fatermési osztályok várható változását tekintve (7. – 9. mellékletek) mind a három becslési eljárás szerint legalább egy osztály romlás következhet be a helyszínek több mint 70%-án. Ez az eredmény megegyezik ILLÉS és FONYÓ (2016) munkájával, amelyben a RegCM és az ALADIN klímamodellek eredményit használták fel 8 fafaj, köztük a kocsánytalan tölgy fatermőképességének és fatermési osztályának változására. Az eredményeik alapján jelentősen visszaeshet a kocsánytalan tölgyesek fatermőképessége a domb és hegyvidékek esetében. Az FTK értékek csökkenésével a fatermési osztályokban is minimum egy osztály romlás következhet be a 21. század végére. Az FTO változásának elemzésénél arra az eredményre jutottak, hogy a VI. fatermési osztályba kerülő faállományok mennyisége jelentősen megnövekedhet, amely egyezik a dolgozatom eredményeivel is (7. – 9. mellékletek, ill. lásd később 8. fejezet 50. ábra).

7. ÖSSZEHASONLÍTÁS TEREPI MÉRÉSEKKEL

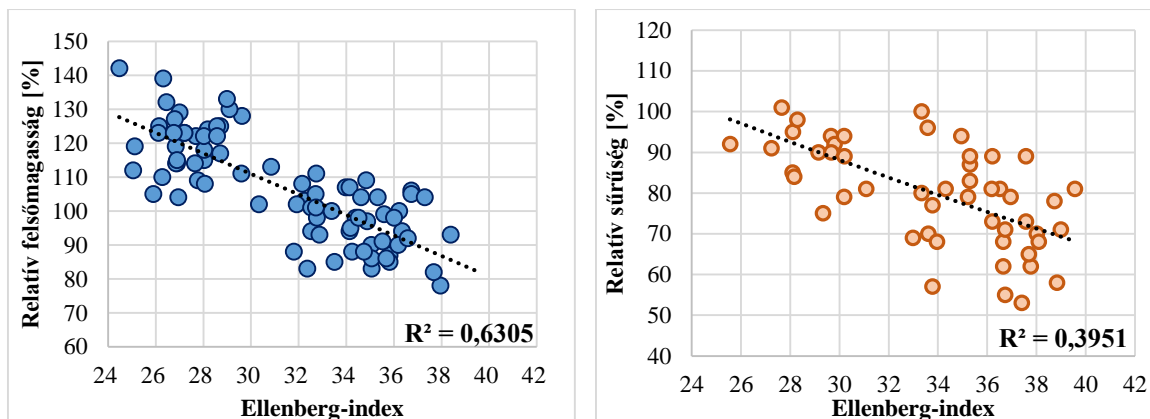
A Faállományok Növekedésének Mérése (FNM) adatokból származó eredményeket összehasonlítottam terepi mérések eredményeivel is. A mérési helyszínek a Vasi-hegyháttól a Nagyalföld pereméig húzódó száraz-nedves klímagradiens mentén lettek kiválasztva a Soproni Egyetem, Környezet-és Földtudományi Intézetének munkatársai által. Minden évben azonos módszerekkel és mérési eszközökkel kerülnek felmérésre a helyszíneken lévő kocsánytalan tölgy állományok egészségi állapota, állomány sűrűsége, átlag-, és felsőmagassága, valamint átlag átmérője. Ebbe a mérési sorozatba kapcsolódtam bele, így az eredmények 2015-2017 adatait tartalmazzák összesen 83 helyszínen.

A felmérésekből származó adatokból kiszámított relatív felsőmagasság és sűrűség értékeivel és a Carpatclim referencia időszak (1981-2010) éghajlati adataival korreláció analízist végeztem (16. táblázat). A korreláció analízis eredménye alapján mind a felsőmagassági mind az állomány sűrűségi adatokkal szignifikáns pozitív kapcsolat mutatható ki az éves csapadékösszeggel (P), és a növekedési időszak csapadékösszegével (P_{IV-X}). Ebből adódóan az ezekre az éghajlati paraméterekre alapuló szárazsági indexek adták a legmagasabb korrelációs koefficiens értékeket is, amelyek az Ellenberg-index (EQ), módosított Ellenberg-index (modEQ), erdészeti szárazsági index (FAI) és a bükk tolerancia index (BTI).

16. táblázat: Az éghajlati tényezők és a relatív felsőmagasság, valamint relatív sűrűség korreláció analízise. Piros színnel kiemelve a $p < 0,05$ szinten szignifikáns értékeket.

Éghajlati tényezők	Relatív felsőmagasság [%]	Relatív sűrűség [%]
	Korrelációs koefficiens értéke (r)	
T _{átlag}	-0,127	-0,071
T _{XI-III}	0,263	0,242
T _{IV-X}	-0,382	-0,279
T _{V-VIII}	-0,422	-0,303
T _{VII}	-0,443	-0,318
P	0,824	0,650
P _{XI-III}	0,602	0,333
P _{IV-X}	0,781	0,672
P _{V-VIII}	0,698	0,636
P _{VII}	0,538	0,479
EQ	-0,801	-0,630
modEQ	-0,768	-0,658
TAI	0,670	0,533
H	0,672	0,535
FAI	-0,735	-0,640
BTI	0,682	0,595

A legmagasabb korrelációt adó EQ és a relatív felsőmagasság közötti kapcsolatot a 49. ábrán jelenítettem meg. Nem meglepő, hogy a humid tájaktól a Nagyalföld felé haladva csökken a relatív felsőmagasság, vagyis a magasság csökkenése jól követi a csapadékelátottság csökkenését (49. ábra).



49. ábra: A vizsgált állományok relatív felső magassága (balra) és relatív sűrűsége (jobbra) az Ellenberg-index függvényében

Az ország leghumidabb tájain (Vasi-hegyháton és Hetésben) mért kocsánytalan tölgy állományok felsőmagassága a referenciához (BÉKY (1981) III. FTO fatermési táblájához) hasonlítva átlagosan 115%. Göcsejben és a Zselicben 130 %, Észak-, és Kelet-Zalában 115%, a Dunántúl- és az Északi-középhegység mezofil dombvidékein (Sokoró, Heves-Borsodi-dombság, Cserhát és Cserehát) 110 és 90% közöttinek adódott. Ezek alapján tehát Göcsejben és a Zselicben a legintenzívebb a magassági növekedés, mert e tájakon a jelentős csapadékmennyiség mellett a talajok kedvezőbb tápanyag (és levegő) ellátottsága is társul. A mezofil dombvidékek szárazabb részein a relatív felsőmagasság 90% -ig csökken. Az e tájaknál is szárazabb alföldperemi dombokon és síkokon azonban a klíma további szárazodásával már nem csökkent tovább a felsőmagasság, sőt bizonyos esetekben még növekedés is előfordult. Ennek oka valószínűleg a talaj magas humusztartalma, és a jó tápanyagellátottság, mivel ezeken a tájakon (Monori-hát, Cserhátalja, Bükkalja, Észak-alföldi löszös sík, Dél-Cserehát) csernozjom barna erdőtalaj a jellemző.

A kapott összefüggés a relatív felsőmagasság és az Ellenberg-index között előrevetíti, hogy a klíma szárazabbá válásával (ahogy azt a 4.2 fejezetben is írtam) hogyan alakulhat a jövőben a magassági növekedés hazánkban. Mivel a 21. század vérére akár 7 - 8 °C/mm-rel is megnövekedhet az Ellenberg-index értéke, ez akár 20%-os magassági növekedés visszaesést is jelenthet.

Mivel a fák magassági növekedését az állomány relatív sűrűsége is befolyásolhatja, így megvizsgáltam ennek a tényezőnek az összefüggéseit is a klíma paraméterekkel (49.

ábra jobbra). Az állományok relatív sűrűsége széles spektrumú, mivel 52%-tól 100%-ig változott, viszont jól látható, hogy e tényező és az Ellenberg-index között is szoros negatív összefüggés van. A klíma szárazodásával tehát ritkul az állomány, így ezeken a helyszíneken nagyobb növőtér áll rendelkezésre a túlélt fák növekedéséhez. Azonban ez a növekedés kevésbé magassági (ez látható a csökkenő relatív felsőmagasságból is) hanem inkább az átmérő növekedésében valósul meg. Ez egyezik BERKI és mtsai. (2016) munkájával is.

Mivel a korábban bemutatott FNM1 adatok esetében (5.2. fejezet) a fatermőképességet (FTK) használtam, mint a produkciót jellemző mérőszámot, így a terepi mérések alkalmával megmért átlagmagassági adatokból is kiszámoltam az FTK értékeket. Ezeket az előzőekhez hasonlóan a Carpatclim 1981-2010-es referencia időszak éghajlati átlagaihoz hasonlítottam. Mivel az FNM1 esetében a legmagasabb korrelációt adó értékek a szárazsági indexek esetében fordultak elő, így a 17. táblázatban ezeket tüntettem fel.

17. táblázat: Terepi helyszíneken felmért átlagmagasság és kor alapján kiszámított fatermőképesség korreláció analízise az éghajlati szárazsági indexekkel. Piros színnel a $p < 0,05$ szinten szignifikáns értékek.

Éghajlati index neve	Pearson-féle korrelációs együttható (r)	r^2	Szignifikancia (p)
EQ	-0,671	0,450	0,000
modEQ	-0,634	0,402	0,000
TAI	0,548	0,300	0,000
H	0,549	0,301	0,000
FAI	-0,593	0,351	0,000
BTI	0,554	0,307	0,000

A kiválasztott zonális termőhelyű kocsánytalan tölgy állományok fatermőképessége szoros összefüggést mutatnak a makroklímával. A leginkább meghatározó EQ és az FTK korrelációja $r^2 = 0,45$ -nek adódott, ami magasabb, mint az FNM1-nél kapott $r^2 = 0,23$. Ennek valószínűleg az az oka, hogy a klíma szempontjából célirányosan (száraz-nedves klímagradiens mentén) kiválasztott helyszínek a makroklíma hatását jobban ki tudják mutatni, mint az elméleti rácshálón kialakított (FNM1) mintapontok. Ezen kívül a helyszíni méréseket mindig ugyanazok a személyek végezték, ami az országos lefedettségű FNM1 hálózathoz nem teljesül.

Összességében tehát a terepen mért adatokból származó relatív felsőmagasság [%], relatív állomány sűrűség [%] és fatermőképesség [$m^3/ha/év$] szignifikáns szoros összefüggést mutatnak az éghajlati paraméterekkel, és magasabb korrelációs koefficiens értékeket adtak, mint a korábban bemutatott (5.2.3 fejezet) FNM1 adatok.

8. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS TOVÁBBI TERVEK

A regionális klímamodell szimulációk eredményei szerint az átlaghőmérsékletek emelkedése mellett a csapadék tér- és időbeli változása várható. Míg a hőmérsékletek esetében az általam felhasznált 12 regionális klímamodell szignifikáns növekedést prognosztizál minden időszakban (nyugalmi-, növekedési-, fő növekedési-, kritikus), addig a csapadékösszegek esetében a fő növekedési időszakban, ezen belül is a kritikus időszakban erőteljes csökkenés (-35,3%) valószínűsíthető. Mivel a gyakorisági és szóródási hisztogramok megerősítették azt, hogy a kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea*) számára az éves átlaghőmérséklet és növekedési időszak csapadékösszege, valamint az Ellenberg-index és a bükk tolerancia index az elterjedés szempontjából a legfontosabb tényezők közé tartoznak, ezért ezek változása alapvetően meghatározza a vizsgált fafaj jövőbeli természetességi határait. Ezáltal **a klímaváltozás negatív következményeként egyre szűkebb terület felelhet meg e fafaj számára a 21. század végére hazánk területén.** Az adott fafaj elterjedésére vonatkozó elemzéseim szerint három modell esetében (maximális valószínűség, bioclim, one-class SVM) a Nyugat-, és Dél-Dunántúli valamint az Északi-középhegységi erdészeti tájakon jelentős terület csökkenés várható. Egy modell eredményeit (domain) alkalmatlannak tartom további elemzésekre, mivel a pontossági értéke (AUC) a legalacsonyabbnak adódott.

Az elterjedési modellek használata alkalmas eszköznek bizonyult a fafaj számára klimatikus szempontból jövőben is megfelelő területek beazonosítására, és a veszélyeztetett területek meghatározására. **Veszélyeztetett területek azok, amelyek esetében a legintenzívebb területvesztések következhetnek be** a modellbecslések alapján. Eredményeim szerint a következő területek tartoznak ezek közé:

- Cserhát,
- Heves-Borsodi-dombság,
- Bükkalji-dombságok
- Cserhát-vidék,
- Kelet-Zselic, Nyugat-Zselic.

Ennek súlyos ökológiai és ökonómiai vonatkozása is lesznek, hiszen amellett hogy a harmadik legnagyobb területtel rendelkező fafajunkról van szó (ERDŐLELTÁR 2010-2014), fontos ipari nyersanyag is.

Ezekon a területeken a fafajválasztásnál figyelembe kell venni, hogy inkább a szárazságot jobban tűrő fafajokat kell a jövőben előnyben részesíteni, mivel itt a vizsgált

fafaj számára nem lesznek megfelelőek az éghajlati adottságok. Az erdészeti gyakorlat szempontjából különösen fontos a megfelelő fafajválasztás, hiszen az elsődleges cél a változó éghajlati körülmények mellett is életképes, valamint gazdaságos erdők létrehozása. Ezt természetesen a jelenlegi természetvédelmi előírásoknak, és erdőgazdálkodási stratégiáknak eleget téve lehet megtenni. Javasolom tehát a csertölgy *Quercus cerris*, kislevelű hárs *Tilia cordata*, korai juhar *Acer pseudoplatanus* telepítését, ill. elegyítését (mivel ezek szárazságot jobban tűrő fafajok), azokon a területeken, ahol nem lesz rentábilis a kocsánytalan tölgy termesztése.

A fatermőképesség (FTK) változásának vizsgálata megerősíti, hogy a veszélyeztetett, érzékeny területek közé tartoznak az utóbbi erdészeti tájak: Nyugat-Dunántúl, Dél-Dunántúl valamint az Északi-középhegység (ezen belül is a Cserhát-vidék, Cserhát, Heves-Borsodi-dombság, Bükkalji-dombságok). **A főkomponens és faktor analízisek szintén az átlaghőmérsékletet, valamint a növekedési időszakok** (ezen belül is a növekedési-, fő növekedési-, és a kritikus időszakok) **csapadékösszegeit határozták meg, mint legfontosabb fatermőképességet befolyásoló éghajlati tényezők.** A korrelációanalízis alapján ezeken kívül még az Ellenberg-index és a Thornthwaite-féle szárazsági index is meghatározó tényezőnek mutatkozott. Ezen paraméterek felhasználásával három becslési eljárással kiszámított jövőbeli fatermőképesség változás szignifikáns csökkenése valószínűsíthető (-20 – -15%) a 21. század végére. **Nagyon valószínű, hogy a fatermőképesség csökkenésének függvényében a fatermési osztályok (FTO) is a gyengébb termőhelyi kategóriák irányába mozdulhatnak el.** A modellek átlaga alapján a 139 vizsgált zonális termőhellyel rendelkező mintapont több mint 70%-án várható legalább egy fatermési osztály romlás.

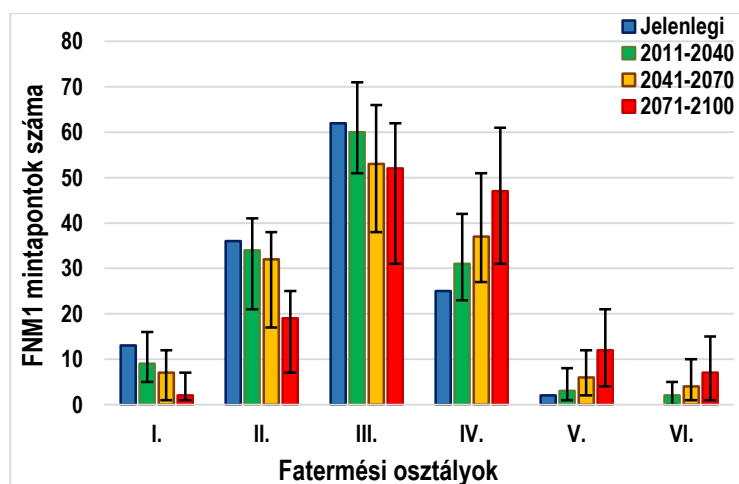
A 18. táblázat összefoglalja a négy erdészeti tájon, valamint az öt veszélyeztetett erdészeti kistájon a fatermőképesség (FTK) várható változásait. Mivel a jelenlegi FTK értékek (a táblázatban valós jelen), és a becslési eljárások alapján számolt FTK értékek (a táblázatban sz. jelen) közötti különbségek 0,2 - 3,3% között alakultak (a táblázatban v.j/sz.j) így szükséges volt a jövőbeli becslések korrekciója is. Ezt a korrekciót a valós és a számított jelen különbségével készítettem el (a táblázatban korrigált %). Ezek az értékek azt fejezik ki, hogy hány %-a lesz várhatóan az adott terület fatermőképessége a jelenlegihez viszonyítva.

18. táblázat: A fatermőképesség jelenlegi értéke (valós jelen), a három becslési eljárás során kiszámított jelenlegi értéke (sz. jelen) és a becsült jövőbeli fatermőképesség (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100) az erdészeti nagytájakon (fent) valamint a veszélyeztetett erdészeti kistájakon (lent)

Erdészeti tájak	FTK [m ³ /ha/év]		%	2011-2040			2041-2070			2071-2100		
	valós jelen	sz. jelen	v.j/ sz.j	FTK [m ³ /ha/év]	%	korrigált %	FTK [m ³ /ha/év]	%	korrigált %	FTK [m ³ /ha/év]	%	korrigált %
Északi-középhegység	7,7	7,7	100,6	7,3	95,3	95,9	7,1	91,6	92,2	6,5	84,0	84,5
Dunántúli-középhegység	6,9	6,7	103,3	6,3	94,5	97,6	5,9	88,9	91,8	5,4	80,6	83,2
Nyugat-Dunántúl	9,3	9,3	100,4	9,0	97,2	97,6	8,6	92,5	92,9	7,9	85,9	86,3
Dél-Dunántúl	9,3	9,3	100,2	9,0	97,2	97,5	8,6	92,3	92,5	8,0	86,3	86,5

Veszélyeztetett erdészeti kistájak	FTK [m ³ /ha/év]		%	2011-2040			2041-2070			2071-2100		
	valós jelen	sz. jelen	v.j/ sz.j	FTK [m ³ /ha/év]	%	korrigált %	FTK [m ³ /ha/év]	%	korrigált %	FTK [m ³ /ha/év]	%	korrigált %
Cserhát	7,3	7,2	101,3	6,7	93,7	95,0	6,4	89,5	90,7	5,8	80,5	81,5
Heves-Borsodi-dombság	7,4	7,2	101,2	6,8	93,7	94,8	6,4	88,9	89,9	5,8	80,5	81,5
Bükkalji-dombságok	6,9	6,7	102,8	6,3	93,5	96,2	6,0	89,3	91,8	5,5	80,8	83,1
Cserhát-vidék	7,8	7,7	100,6	7,4	95,5	96,2	7,0	90,5	91,0	6,4	82,3	82,9
Kelet-Zselic, Nyugat-Zselic	9,0	8,9	100,4	8,7	97,0	97,4	8,1	90,5	90,9	7,5	83,3	83,6

Ezek alapján a kocsánytalan tölgy fatermőképessége a négy erdészeti tájon jelenlegi értékének 83 – 86%-ára, a veszélyeztetett területeken pedig 81,5 – 85%-ára eshet vissza a 21. század végére. Értelemszerűen a fatermés gyengülésével a fatermési osztályok is gyengébb kategóriákba kerülhetnek. A jelenlegi, és becstelt jövőbeli fatermési osztály változást a vizsgált FNM1 mintapontokon az 50. ábra mutatja.



50. ábra: Jelenlegi és becstelt jövőbeli fatermési osztály változás, a bizonytalanságok feltüntetésével (hibasávok) a vizsgált zonális termőhelyű FNM1 mintapontokon

Megjegyzendő, hogy az FNM1 adatok alapján jelenleg a VI. fatermési osztályba egyik mintapont sem tartozott, ez azonban megváltozhat már a közeli 2011-2040-es időszakban is.

Az erdészeti gyakorlat számára különösen fontos az éghajlat változásához való alkalmazkodás, hiszen feladata a változó termőhelyi adottságokhoz megfelelő fafajok választása. Mind a potenciális elterjedési, mind a fatermőképesség változásának vizsgálata alátámasztja, hogy a kocsánytalan tölgy számára a jövőben csökkenhetnek a klimatikusan optimális területek, így fokozatos visszahúzódása és növedékének csökkenése valószínűsíthető. Amennyiben nem történik változás az erdőgazdálkodási stratégiákban (pl.: fafajválasztásban) úgy akár árbevétel kiesés is bekövetkezik. A klímaváltozás hatásaihoz való alkalmazkodásban a szárazságot jobban tűrő fafajok (*Quercus cerris*, *Tilia cordata*, *Acer pseudoplatanus*) telepítése, ill. elegyítése egy alkalmas módszer lehet.

Az erdészeti adattár tartalmazza minden egyes erdőrészlet célállományait, így a veszélyeztetett területeken fontos megvizsgálni, hogy az erdőfelújítás célállományai között szerepelnek-e a fent említett fafajok. A jelenleg futó „Agrárklíma2” (VKSZ_2012-1-2012-0034) projektnek többek között ez a vizsgálat is a célja, így jelen dolgozatban nem térek ki részletesen a célállományok vizsgálatára. Megjegyzendő viszont, hogy a projekt során elkészült ún. döntéstámogató rendszer (DTR) teszt verziójában már elérhető országos

szinten minden erdőrésztetre a javasolt célállományok listája (<http://agrarklima2.nyme.hu/dtr>). Így azokon a területeken ahol az adattári adatok között nem szerepeltek célállományként a jövőbeli klíma szárazodásához jobban alkalmazkodó fajok, ott a DTR tartalmazza a szükséges módosításokat.

További tervek:

Terveim közé tartozik, hogy más klímaadatbázisok felhasználásával is elkészítsem elemzéseimet, mivel jelenleg „csak” az 1961-2010-es időszakot tudtam figyelembe venni. Érdekes lehet azonban a 2010-es év utáni időjárási extrémek vizsgálata is, mivel ezt követően 2011, 2012 és 2013 is igen száraz évek voltak. Az éghajlati adatok további vizsgálatával, sokkal jobban kirajzolódnának a csapadék extrémek változásai. Tervezem továbbá olyan elterjedési modellek alkalmazását is, amelyeket jelen dolgozatban nem tudtam alkalmazni (a bemenő adattári adatok megjelenési pont térkép típusa miatt). Amennyiben a bemenő adatok nem pont, hanem rácshálózati megjelenéssel rendelkeznek, úgy további modellek is alkalmazhatóak pl.: a neurális hálók (BP-ANN), maximális entrópia, vagy döntési fa modell. Hazai is nemzetközi szakirodalom alapján ezek módszerek megbízhatók az elterjedési vizsgálatokra (CZÚCZ et al., 2013; MÓRICZ et al., 2013; RASZTOVITS et al., 2012).

A terepi méréseket is folytatom, mivel az eredmények alapján, a célirányosan (száraz-nedves klímagradiens mentén) kiválasztott helyszínek a makroklíma hatását jobban ki tudják mutatni, mint az elméleti rácshálón kialakított FNM mintapontok.

9. ÖSSZEFOGLALÁS

Doktori disszertációmban hazánk kiemelten fontos fafajára, a kocsánytalan tölgyre (*Quercus petraea*) készítettem el a 21. század végére várható potenciális elterjedésének, valamint fatermőképesség változásának becslését. Az éghajlat változásával a vizsgált fafaj elterjedésében, növedékében és vitalitásában is változásokra számíthatunk, amelynek oka elsősorban az éghajlati szélsőségek gyakoribbá válása, ezen belül is a hosszantartó csapadékhiány.

Munkámhoz az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSz) által létrehozott Carpatclim éghajlati adatbázist, valamint annak területi kiegészítését használtam fel a 17° szélességtől nyugatra. Ezek az adatok raszter típusú havi felbontású csapadékösszeg és hőmérséklet fedvények, amelyek 1961-2010 között érhetőek el $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ térbeli felbontásban. A jövőbeli klíma változásának elemzéséhez 12 regionális klímamodell szimuláció eredményét használtam fel, amelyek az ENSEMBLES EU FP6 projekt keretein belül készültek. A modell szimulációk 2100-ig tartalmazznak havi átlaghőmérséklet, maximum-és minimum hőmérséklet, valamint csapadékösszeg adatsorokat a $0,22^\circ \times 0,22^\circ$ rácsfelbontásra. Mind a múltbeli, mind a jövőbeli klímaadatokat Digiterra Map programban vizsgáltam meg harminc éves éghajlati átlagonként, a fafajok fő vízfelhasználási időszakainak figyelembe vételével (éves-, nyugalmi-, növekedési-, fő növekedési-, és kritikus időszakok).

Az éghajlati adatok alapján az éves átlaghőmérséklet emelkedése Magyarország egész területére jellemző volt az elmúlt évtizedekben. Az 1981-2010-es periódusra $0,6^\circ\text{C}$ -kal emelkedett az éves átlag az 1961-1990-es időszakhoz képest. A legintenzívebb emelkedés a fő növekedési ($+0,9^\circ\text{C}$) és a kritikus időszakban ($+1,1^\circ\text{C}$) következett be. E két időszakban a csapadékösszeg 10 – -16%-kal csökkent a déli-délnyugati országrészben, ahol hazánk legjobb kocsánytalan tölgy állományai találhatóak. Az éghajlati indexek (aszály indexek) megerősítik, hogy hazánk területének klímája szárazabbá vált, és a regionális klímamodellek eredményei szerint nagyon valószínű, hogy a csapadék csökkenése, és a nyári száraz időszakok gyakoriságának növekedése a jövőben is folytatódni fog.

A múltbeli, és jövőbeli klíma eredmények felhasználásával, valamint az Országos Erdőállomány Adattár 35 708 kocsánytalan tölgyes erdőrészelete alapján, elkészítettem a jelenlegi, és becsült jövőbeli potenciális tölgyelterjedés változásának térképeit. A térképekhez négy elterjedési modellt alkalmaztam (maximális valószínűségi osztályozó, bioclim, domain, one-class SVM), melyek közül egy a szerint (domain) a század végére a kocsánytalan tölgy akár el is tűnhet hazánk területéről. Ennek az oka az volt, hogy a

modellben már a potenciális jelenlgi elterjedés és a valós elterjedés között is jelentős különbségek adódtak. Mivel a kezdeti elterjedési térkép is már sok bizonytalansággal terhelt volt és a bizonytalanságok a modellfutattás közben pedig tovább halmozódtak, így az eredményeit alkalmatlannak találtam. A továbbiakban tehát három modell eredményeit használtam fel, mely alapján a kocsánytalan tölgy elterjedését leginkább meghatározó éghajlati indexek: Ellenberg-index (EQ), bükk tolerancia index (BTI), erdészeti szárazsági index (FAI). Mivel ezen indexek mindegyike esetében a felhasznált 12 regionális klímamodell eredménye szerint valószínűleg megnő a száraz időszakok gyakoriságának hossza és intenzitása, így a vizsgált fafaj számára jelentősen lecsökkenhetnek a klimatikusan megfelelő elterjedési területek. A becslési eredmények szerint az MLC modell esetében akár -48 – -56%-os elterjedési terület veszteség is bekövetkezhet, míg a bioclim és one-class SVM modellek szerint -45 – -59% közötti csökkenés valószínűsíthető a 21. század végére. Az elterjedési térképek becsült változásai alapján meghatároztam a klímaváltozás által különösen érintett, veszélyeztetett területeket amelyek a: Cserehát, Heves-Borsodi-dombság, Bükkalji-dombságok, Cserhát-vidék, Kelet-Zselic, Nyugat-Zselic.

A produkció vizsgálatokhoz a Faállományok Növekedésének Megfigyelése (FNM1) monitoring program zonális termőhellyel rendelkező kocsánytalan tölgy mintapontjainak adatsorait használtam fel 1993-2007 között. Kiszámoltam a mintafák átlagmagassága és a kora alapján a mintapontok fatermőképességét (FTK), amelyet összehasonlítottam a termőhelyi tényezőkkel. A termőhely különböző tényezői (klíma kategória, genetikai talajtípus, termőréteg mélység, fizikai féleség) fatermőképességre gyakorolt hatása alapján a genetikai talajtípust, valamint a termőréteg mélységét találtam a legfontosabb tényezőknél. A statisztikai vizsgálatok során (főkomponens-, és faktor analízis, korreláció számítás) kapott eredmények alapján a fenti tényezőkön kívül, az éves átlaghőmérséklet, a növekedési-, fő növekedési-, és kritikus időszakok csapadékösszegei, valamint az Ellenberg-index és a Thornthwaite-féle szárazsági index határozta meg leginkább a fatermőképességet a vizsgált FNM1 mintapontokon.

A legfontosabb termőhelyi tényezőket felhasználva becslést készítettem a jövőben várható fatermőképesség, és fatermési osztály változására a 21. század végéig. Ezek eredményei szerint szignifikáns fatermőképesség csökkenést várható a 2071-2100-as időszakra vonatkozóan (-20 – -15%), amely jelentős fatermési osztály romlással is járhat.

Eredményeim hasonlóságot mutatnak ILLYÉS és FONYÓ (2016) eredményivel, azonban az általam alkalmazott FNM1 zonális termőhelyű mintapontok esetében az erdészeti szárazsági index (FAI) nem mutatott szoros összefüggést a fatermőképességgel.

Összehasonlítottam az FNM1 adatbázisból származó eredményeket terepi mérési eredményekkel is, amelyek szintén zonális termőhellyel rendelkező helyszínek voltak. Az eredmények alapján, a helyszíneken felmért állomány sűrűség és magasság adatokból származó relatív felsőmagasság [%] és relatív állomány sűrűség [%] jobb összefüggést mutat az éghajlati paraméterekkel, mint az országos FNM1 mérőhálózat. A mérőhálózat összes kocsánytalan tölgy mintapontjának (összesen 539 mintapont) összevetése a makroklimatikus jellemzőkkel nem vezetett értékelhető eredményre. A leválogatott 139 pont esetén már az összefüggés az FTK és az EQ között szignifikáns összefüggés mutatott ($r^2 = 0,23$), de a legszorosabb összefüggés a zonális klímagradiens mentén elhelyezkedő helyszínek esetében jött ki ($r^2 = 0,45$).

Mivel eredményeim alátámasztják, hogy a kocsánytalan tölgy számára a jövőben csökkenhetnek a klimatikusan optimális területek száma, és fokozatos visszahúzódása valamint növedékének csökkenése valószínűsíthető, így fontosnak tartom, hogy az erdőfelújítás célállományai között szerepeljenek a klímaváltozás hatásaira kevésbé érzékeny fajok. A javasolt célállományok elérhetőek az „*Agárklíma2*” c. projekt döntéstámogató rendszerében (<http://agrarklima2.nyme.hu/dtr>) így véleményem szerint az agrár-szféra gazdasági szereplőinek minél hamarabb figyelembe kellene venniük ezeket a javaslatokat.

Úgy gondolom, hogy a dolgozatom eredményei felhasználhatók az „*Agrárklíma2*” c. projekthez, amely a jövőbeli éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodás lehetőségeit és feladatait fogalmazza meg az agrár-szféra gazdasági szereplői és szakigazgatási szervezetei számára. A dolgozat eredményei felhasználhatók továbbá az erdészeti gyakorlat számára is, és akár klímahatás vizsgálatokhoz. Remélem, hogy a jövőbeli éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodás erdőgazdálkodási stratégiáinak megfogalmazásában is segítséget nyújthat.

10. TÉZISEK

- 1) A kocsánytalan tölgy hazai elterjedésének változására alkalmazott négy elterjedési modell (maximális valószínűségi osztályozó bioclim, domain, one-class SVM) alapján, a fafaj előfordulását az éghajlati indexek között elsősorban az (1) Ellenberg-index, a (2) bükk tolerancia index és az (3) erdészeti szárazsági index határozza meg. Az elterjedés éghajlati tényezők között az (1) átlaghőmérséklet, a (2) növekedési, és fő növekedési időszak csapadékösszege, valamint a (3) kritikus időszak átlaghőmérséklete emelhető ki.
- 2) Az elterjedési modellek között a domain modell alacsony megbízhatóság miatt nem alkalmazható a kocsánytalan tölgy jövőbeli elterjedésének becslésére. A Digiterra Map szoftver maximális valószínűségi osztályozó modelljének eredményei azonban megegyeztek a bioclim és a one-class SVM modellekkel, így alkalmas elterjedési vizsgálatokhoz.
- 3) A statisztikai vizsgálatok alapján az elterjedést leginkább az Ellenberg-, és bükk tolerancia indexek határozzák meg, amelyek esetében jól behatárolható a kocsánytalan tölgy tolerancia, és optimum közeli tartománya. Az Ellenberg-index esetében a tolerancia tartomány $20,0 - 41,5$ °C/mm közöttinek, az optimum közeli tartomány pedig $27,0 - 36,0$ °C/mm közöttinek adódott. A bükk tolerancia index esetében a tolerancia tartomány $10,5 - 26,0$ mm/°C közöttinek, az optimum pedig $13,5 - 18,0$ mm/°C közöttinek adódott.
- 4) Az elterjedési modellek becsült jövőbeli változásai alapján kiválasztottam azok a tájakat, amelyek esetében a legintenzívebb területek csökkenés valószínűsíthető. Ezek az ún. veszélyeztetett területek, amelyek közé tartoznak az alábbiak:
 - Cserhát
 - Heves-Borsodi-dombság
 - Bükkalji-dombságok
 - Cserhát-vidék
 - Kelet-Zselic, Nyugat-Zselic
- 5) A zonális termőhellyel rendelkező FNM1 mintapontok és a Carpatclim múltbeli klímaadatbázis 1981-2010-es éghajlati adataival végzett főkomponens-, és faktor analízis alapján a fatermőképességet leginkább meghatározó éghajlati tényezők közé tartozik az éves átlaghőmérséklet, valamint a növekedési-, fő növekedési-, és kritikus időszakok csapadékösszege. A korrelációanalízis során e tényezők mellett az Ellenberg-index és a Thornthwaite-féle szárazsági index szignifikáns összefüggést mutatott, így ezek az éghajlati paraméterek alkalmasak jövőbeli fatermőképesség becslésére.

- 6) Az FNM1 zonális termőhellyel rendelkező mintapontokon várhatóan jelentős fatermőképesség csökkenés következhet be, amely során négy erdészeti nagytájon (Északi-középhegység, Dunántúli-középhegység, Nyugat-Dunántúl, Dél-Dunántúl) jelenlegi értékének 83 – 86%-ára, a veszélyeztetett területeken pedig 81,5 – 85%-ára eshet vissza a 21. század végére. A fatermőképesség csökkenésének függvényében valószínű, hogy a fatermési osztályok is gyengébb termőhelyi kategóriák irányába mozdulnak el, amely a becslések szerint a mintapontok több mint 70%-án legalább egy fatermési osztály romlást jelent.

11. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretném megköszönni témavezetőimnek, Dr. Berki Imrének és Dr. Pongrácz Ritának segítségüket, biztató szavaikat és kitartó munkájukat, amely nélkül a dolgozat nem készülhetett volna el. Köszönöm minden kedves kollégámnak a hasznos tanácsokat és javításokat, különösen Dr. Veperdi Gábornak, Prof. Dr. Bidló Andrásnak, Prof. Dr. Mátyás Csabának, Dr. Gálos Borbálának, Dr. Horváth Adriennek, Dr. Horváth-Szováti Erikának, Dr. Rasztoivits Ervinnek, Dr. Móricz Norbertnek valamint korábbi témavezetőmnek Dr. Drüszler Áronnak is. Külön köszönet Dr. Czimber Kornélnak és Dr. Eredics Attilának a térinformatikai szoftverekben nyújtott rengeteg segítségért. Köszönöm opponenseimnek Dr. Bartholy Juditnak és Dr. Horváth Tamásnak a bírálatokat, tanácsokat, megjegyzéseket. Köszönöm Dr. Lakatos Lászlónak a házi védésem bírálatát és kedves szavait.

Mérhetetlenül hálás vagyok páromnak, Borsós Sándornak a biztatásért és a támogatásért, amikor arra a legnagyobb szükségem volt. Hálásan köszönöm barátaimnak, Válint Zsuzsannának és Kisvárdai Melindának a pozitív megerősítéseket és a tudományos vitákat, amelyek előre lendítették munkámat.

Külön köszönök édesanyámnak mindent, főként a lelki támogatást, édesapámnak a hosszú éves kemény munkáját, amellyel megteremtette, hogy a Soproni Egyetemen dolgozhatok. Köszönöm a családomnak, testvéreimnek, unokatestvéreimnek, rokonaimnak a bátorítást. Nem utolsó sorban köszönetet mondok nagymamámnak, aki céljaimban és tanulmányaimban erején felül mindig támogatott.

Munkám az „Agrárklíma1” (TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV) és „Agrárklíma2” (VKSZ_12-1-2013-0034) EU projektek, valamint az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-16-3-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.

12. TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat: Aszály és hőhullám okozta famortalitás Európában 1970-2010 között, piros színnel kiemelve a kocsánytalan tölgyeket is érintő eseteket (ALLEN et al., 2010 alapján).....	24
2. táblázat: A dolgozatban felhasznált 12 regionális klímamodell (VAN DER LINDEN és MITCHELL, 2009) ...	39
3. táblázat: A dolgozatban felhasznált éghajlati paraméterek és indexek	44
4. táblázat: Az FTK függvény paraméterei (RICHARDS, 1959; CHAPMAN, 1961; VEPERDI, 2014 által módosítva)	52
5. táblázat: Országos átlaghőmérséklet (T) [°C] és csapadékösszeg (P) [mm] változás 1961-2010 között élettani szakaszokra bontva	55
6. táblázat: Az éves átlaghőmérséklet és éves csapadékösszeg várható változásai 12 regionális klímamodell eredményei alapján a 21. század végéig.....	60
7. táblázat: Bioclim modell beválási statisztikái.....	72
8. táblázat: Domain modell beválási statisztikái.....	74
9. táblázat: One-class SVM modell beválási statisztikái	76
10. táblázat: Zonális termőhellyel rendelkező FNM1 mintapontok fatermőképességi értékeinek átlaga, maximuma, minimuma, szórása, ill. a kiszámított osztótényezők termőhelytípus-változatontként.....	80
11. táblázat: A főkomponens-analízis során kapott korrelációs mátrix sajátértékei, a magyarázott variancia hányad (%), valamint a teljes variancia (%). Vastag fekete vonallal elválasztva az 1-nél kisebb sajátértékkel rendelkező főkomponenst.	82
12. táblázat: Az egyes főkomponensekhez tartozó sajátvektorok, piros színnel kiemelve az abszolút értékben 0,7-nél magasabb értékű faktorsúlyok	82
13. táblázat: Az egyes faktorokhoz tartozó faktorsúlyok varimax rotáció esetén, piros színnel kiemelve az abszolút értékben 0,7-et meghaladó faktorsúlyokat	83
14. táblázat: Éghajlati indexek és fatermőképesség korreláció analízise, félkövérrel kiemelve a két legmagasabb r értéket adó éghajlati indexeket, piros színnel a $p < 0,05$ szinten szignifikáns értékek....	86
15. táblázat: A kocsánytalan tölgy elterjedését leginkább meghatározó éghajlati tényezők az alkalmazott négy elterjedési modell statisztikai eredményei alapján. Piros félkövér jelöléssel, amelyek mind a négy modellben, fekete félkövér jelöléssel, amelyek három modellben meghatározóak voltak.	92
16. táblázat: Az éghajlati tényezők és a relatív felsőmagasság, valamint relatív sűrűség korreláció analízise. Piros színnel kiemelve a $p < 0,05$ szinten szignifikáns értékeket.....	97
17. táblázat: Terepi helyszíneken felmért átlagmagasság és kor alapján kiszámított fatermőképesség korreláció analízise az éghajlati szárazsági indexekkel. Piros színnel a $p < 0,05$ szinten szignifikáns értékek.	99
18. táblázat: A fatermőképesség jelenlegi értéke (valós jelen), a három becslési eljárás során kiszámított jelenlegi értéke (sz. jelen) és a becsült jövőbeli fatermőképesség (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100) az erdészeti nagytájakon (fent) valamint a veszélyeztetett erdészeti kistájakon (lent)	102

13. ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: Globális felszíni (szárazföldi- és óceáni felszín) átlaghőmérséklet anomália az 1961-1990-es időszakhoz képest a HadCRUT4 éves adatsorai alapján. Fekete vonallal az adatokra illesztett simított görbe, szaggatott vonallal a 90%-os konfidencia intervallumok (IPCC, 2013).....	14
2. ábra: Nyári napok (balra) és fagyos napok (jobbra) számának változása Magyarországon, tíz éves mozgó átlaggal és becsült lineáris trendekkel 1901-2010 között (HREX, 2012)	16
3. ábra: Várható hőmérsékletváltozás (°C) térbeli eloszlása 2071-2100-ra (referencia periódus: 1961-1990). 11 modell szimuláció alapján készített kompozittérképek (BARTHOLY et al., 2009a)	18
4. ábra: Várható csapadékösszeg változás (%) térbeli eloszlása 2071-2100-ra (referencia periódus: 1961-1990). 11 modell szimuláció alapján készített kompozittérképek (BARTHOLY et al., 2009a)	18
5. ábra: A „régí” SRES és az „új” RCP forgatókönyvek összehasonlítása a 2100-ra feltételezett üvegházhatású gázok koncentrációja okozta energetikai kényszer változása alapján (IPCC, 2013).....	20
6. ábra: Modell bizonytalanságok számszerűsítése (HAWKINS és SUTTON, 2009 nyomán).....	21
7. ábra: Potenciális jelenlegi (1961-1990) és várható jövőbeli (2071-2100) vegetáció elterjedés Európában a HadCM3 globális éghajlati modell alapján a 21. század végére (HICKLER et al., 2012).....	26
8. ábra: Relatív magassági növekedés változás (%) a RECOGNITION projekt eredményei alapján (www.efi.int)	29
9. ábra: Az EVH és FNM hálópontjainak kijelölése (KOLOZS et al., 2009)	32
10. ábra: FNM mérőhálózat sematikus felvételi traktja egyedi felvételezésű módszerrel történő négy mintaponttal (KOLOZS et al., 2009 nyomán).....	32
11. ábra: FNM2 mérőhálózat sematikus felvételi traktja egyedi felvételezésű módszerrel történő négy mintaponttal, állandó sugarú körös felvétellel (KOLOZS et al., 2009 nyomán).....	33
12. ábra: A kocsánytalan tölgy európai elterjedése (DUCOUSSO és BORDÁCS, 2004).....	34
13. ábra: Különböző fafajok talaj savanyúsági (x tengely) és nedvességi (y tengely) igényei Közép-Európában. A vizsgált fafaj piros színnel kiemelve (ELLENBERG, 1996 nyomán)	35
14. ábra: Carpatlim adatbázis célterülete	38
15. ábra: A dolgozatban alkalmazott éghajlati adatbázis térbeli felbontása és célterülete (Magyarország teljes területére kiegészített Carpatlim).....	38
16. ábra: Felhasznált kocsánytalan tölgy erdőrészek (adattári adatok)	40
17. ábra: Szűrés után kiválasztott kocsánytalan tölgy FNM1 mintapontok	41
18. ábra: A terepi mérések helyszínei, jelölve a száraz-nedves klímagradienst.....	42
19. ábra: Faajok éven belüli vízfelhasználási szakaszai (FÜHRER, 1994; 2010).....	43
20. ábra: A modell eredmények kimenetelei és a „valós” megfigyelési értékek közötti kapcsolatok (FAWCETT, 2006 nyomán).....	49
21. ábra: Példa ROC – érzékenységi görbére (GUO és LIU, 2010).....	50
22. ábra: Példa „igaz pozitív arány” vs. „előrejelzési terület” görbére (GUO és LIU, 2010)	51
23. ábra: Országos éves átlaghőmérséklet és csapadékösszeg változás 1961-2010 között, szaggatott vonalakkal az 1981-2010-es referencia időszak átlagai, narancssárga oszlopokkal a több egymást követő száraz évek hossza	55
24. ábra: Hőmérséklet (balra) és csapadékösszeg (jobbra) alakulása az éven belüli eltérő növekedési időszakokban az 1981-2010-es és 1961-1990-es időszakok összehasonlítása alapján Magyarországon.....	57
25. ábra: Különböző szárazsági indexek alakulása az 1981-2010-es és 1961-1990-es időszakok összehasonlítása alapján Magyarországon.....	58
26. ábra: Mért (zöld vonal) és modellezett (szürke vonalak) éves átlaghőmérséklet eltérés [°C] az 1981-2010-es időszakhoz képest. Fekete vastag vonallal a 12 modell átlaga, szaggatott vonalakkal a modellek alsó és felső határoló görbéje (GÁLOS et al., 2013 nyomán).....	61

27. ábra: Mért (zöld vonal) és modellezett (szürke vonalak) éves csapadékösszeg eltérés [°C] az 1981-2010-es időszakhoz képest. Fekete vastag vonallal a 12 modell átlaga, szaggatott vonalakkal a modellek alsó és felső határoló görbéje (GALOS et al., 2013 nyomán).....	62
28. ábra: Hazai hőmérséklet és csapadékviszonyok becsült változása a XXI. század végéig fő élettani szakaszokra bontva 12 regionális klíma modell alapján. Kék körökkel a 2011-2040, narancssárga háromszögekkel a 2041-2071, zöld négyzetekkel a 2071-2100-as időszakok átlagai, vízszintes és függőleges hibaszalagokkal a modellekből származó bizonytalanságok láthatók.	63
29. ábra: Kritikus időszak átlaghőmérsékletének (fent), csapadékösszegének (közép), valamint az Ellenberg-index (lent) becsült várható változásai 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100 időszakokra Magyarországon. Referencia időszak: 1981-2010	64
30. ábra: Hazai kocsánytalan tölgy állományok előfordulásának szóródási diagramjai az Ellenberg-index (fent balra), a módosított Ellenberg-index (fent jobbra) és a bükk tolerancia index (lent) függvényében	67
31. ábra: Hazai kocsánytalan tölgy előfordulásának hisztogramja az Ellenberg-index függvényében.....	68
32. ábra: Hazai kocsánytalan tölgy előfordulásának hisztogramja a bükk tolerancia index függvényében.....	68
33. ábra: Kocsánytalan tölgy jelenlegi potenciális elterjedése és becsült jövőbeli változása 12 regionális klímamodell szimuláció átlaga alapján 3 időszakra (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100) a maximális valószínűségi osztályozás (MLC) módszerével. Az osztályozás alapja: Ellenberg-index	69
34. ábra: Kocsánytalan tölgy jelenlegi potenciális elterjedése és becsült jövőbeli változása 12 regionális klímamodell szimuláció átlaga alapján 3 időszakra (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100) a maximális valószínűségi osztályozás (MLC) módszerével. Osztályozás alapja: bükk tolerancia index	70
35. ábra: A 10 leginkább meghatározó éghajlati paraméter a kocsánytalan tölgy elterjedésére a bioclim modell alapján. Kék sáv jelöli a kappa értékeket, ha a modell számol az adott faktorról, sárga sáv, pedig ha elhanyagolja.	72
36. ábra: Kocsánytalan tölgy jelenlegi potenciális elterjedése és becsült jövőbeli változása 12 regionális klímamodell szimuláció átlaga alapján 3 időszakra (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100) a bioclim modellel. Referencia időszak: 1981-2010	73
37. ábra: A 10 leginkább meghatározó éghajlati paraméter a kocsánytalan tölgy elterjedésére a domain modell alapján. Kék sáv jelöli a kappa értékeket, ha a modell számol az adott faktorról, sárga sáv, pedig ha elhanyagolja.	74
38. ábra: Kocsánytalan tölgy jelenlegi potenciális elterjedése és becsült jövőbeli változása 12 regionális klímamodell szimuláció átlaga alapján 3 időszakra (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100) a domain modellel. Referencia időszak: 1981-2010	75
39. ábra: A 10 leginkább meghatározó éghajlati paraméter a kocsánytalan tölgy elterjedésére a one-class SVM modell alapján. Kék sáv jelöli a kappa értékeket, ha a modell számol az adott faktorról, sárga sáv, pedig ha elhanyagolja.	76
40. ábra: Kocsánytalan tölgy jelenlegi potenciális elterjedése és becsült jövőbeli változása 12 regionális klímamodell szimuláció átlaga alapján 3 időszakra (2011-2041; 2041-2070; 2071-2100) a one-class SVM modellel. Referencia időszak: 1981-2010	77
41. ábra: A zonális termőhellyel rendelkező FNM1 adatok kor-magasság diagramja, zöld szaggatott vonalakkal a fatermési osztályok középvonalai (BÉKY, 1981 alapján).....	78
42. ábra: A genetikai talajtípus (balra) és termőréteg vastagság (jobbra) hatása a fatermőképességre (FTK) a vizsgált zonális termőhelyű FNM1 mintapontokon.....	80
43. ábra: Az egyes faktorok súlyok ábrázolása, piros szaggatott vonal felett a hozammutató faktorra pozitív hatású paraméterekkel	84
44. ábra: A Chapman-Richard egyenlet alapján számított (y tengely) és becsült (x tengely) fatermőképességi értékek közötti eltérés	86
45. ábra: A Chapman-Richard egyenlet alapján számított (y tengely) és becsült (x tengely) fatermőképességi értékek közötti eltérés az Ellenberg-index (balra), és a Thornthwaite-féle szárazsági index (jobbra) alapján.....	87
46. ábra: Jelenlegi, és becsült jövőbeli fatermőképesség változás 12 regionális klímamodell szimuláció átlagából az éves átlaghőmérséklet, és a növekedési-, főnövekedési-, és kritikus időszak csapadékösszege alapján	88

47. ábra: Jelenlegi, és becsült jövőbeli fatermőképesség változás 12 regionális klímamodell szimuláció átlagából az Ellenberg-index alapján.....	89
48. ábra: Jelenlegi, és becsült jövőbeli fatermőképesség változás 12 regionális klímamodell szimuláció átlagából a Thornthwaite-féle szárazsági index alapján.....	90
49. ábra: A vizsgált állományok relatív felső magassága (balra) és relatív sűrűsége (jobbra) az Ellenberg-index függvényében	98
50. ábra: Jelenlegi és becsült jövőbeli fatermési osztály változás, a bizonytalanságok feltüntetésével (hibasávok) a vizsgált zonális termőhelyű FNM1 mintapontokon.....	103

14. IRODALOMJEGYZÉK

- Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H., Gonzalez P., Fensham R., Zhangm Z., Castro J., Demidova N., Lim J.H., Allard G., Running S.W., Semerci S., Cobb N. (2010): A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259: 660–684.
- André K., Balogh M., Baranka Gy., Bozó L., Bölöni G., Grosz B., Gyöngyösi A.Z., Horányi A., Lagzi I.L., Leelőssy Á., Mészáros R., Mile M., Szépszó G., Szűcs M., Tasnádi P., Weidinger T. (2013): Alkalmazott számszerű előrejelzés, numerikus időjárás és csatolt modellek a gyakorlatban. E-könyv, elérhetőség: <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/AlkalmazottNumerikusPrognosztika/index.html> [utolsó letöltés: 2017. március 11.]
- Arguez A., Vose R.S. (2011): The Definition of the Standard WMO Climate Normal: The Key to Deriving Alternative Climate Normals. *Bulletin American Meteorological Society*, 92: 699–704. DOI: 10.1175/2010BAMS2955.1
- Ács F., Mihailovic D.T., Rajkovic B. (1991): A Coupled Soil Moisture and Surface Temperature Prediction Model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 30: 812–822.
- Bartholy J., Pongrácz R. (2005): Néhány extrém éghajlati paraméter globális és a Kárpát-medencére számított tendenciája a XX. században. *AGRO-21 Füzetek*, 40: 70-93.
- Bartholy J., Bozó L., Haszpra L. (2011): Klímaváltozás – 2011. Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére. Magyar Tudományos Akadémia és az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszéke, Budapest, 281 p.
- Bartholy J., Pongrácz R. (2007): Regional analysis of extreme temperature and precipitation indices for the Carpathian Basin from 1946 to 2001. *Global and Planetary Change*, 57: 83-95.
- Bartholy J., Pongrácz R., Gelybó Gy., Kern A. (2009a): What climate can we expect in Central/Eastern Europe by 2071-2100? In: *Bioclimatology and Natural Hazards*. Strelcova K., Mátyás Cs., Kleidon A., Lapin M., Matejka F., Blazenec M., Skvarenina J., Holec J. (eds.), pp. 3–14.
- Bartholy J., Pongrácz R., Pieczka I., Kardos P., Hunyady A. (2009b): Analysis of expected climate change in the Carpathian Basin using a dynamical climate model. *Lecture Notes in Computer Science*, 5434: 176–183.
- Berki I. (1993): Az Északi-középhegységi kocsánytalan tölgy-pusztulás néhány okának vizsgálata. Kandidátusi értekezés, Debrecen, p. 132.
- Berki I., Móricz N., Rasztovits E., Vig P. (2007): A bükk szárazság tolerancia határának meghatározása. In: Mátyás Cs., Vig P. (szerk.) *Erdő és Klíma V*. Sopron, pp. 213-228.
- Berki I., Rasztovits E., Móricz N. (2014): Erdőállományok egészségi állapotának értékelése – egy új megközelítés. *Erdészettudományi Közlemények* 4(2):149-155.
- Berki I., Rasztovits E., Móricz N., Kolozs L. (2016): The Role of Tree Mortality in Vitality Assessment of Sessile Oak Forests. *South-east European Forestry*, 7 (2): 91-97. doi: <https://doi.org/10.15177/see-for.16-14>.
- Béky A. (1981): Mag eredetű kocsánytalan tölgyesek fatermése. Bp. Erdészeti Kutatások, Vol.74: 309-320.
- Béky A. Márkus L., Szappanos A., Temesi G. (1987): A kocsánytalan tölgy. Bondor A. Keresztesi B. (szerk.) Akadémia Kiadó, Budapest, ISBN 963 05 4512 8
- Bidló A., Horváth A., Gálos B. (2014): Változó termőhely – változatlan erdők? In: Bidló A., Horváth A., Szűcs P. (szerk.): *Nyugat-magyarországi Egyetem, Erdőmérnöki Kar, IV. Kari Tudományos Konferencia*. NymE Erdőmérnöki Kar Sopron 407 p.
- Bigler C., Braker O.U., Bugmann H., Dobbertin M., Rigling A. (2006): Drought as an inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland. *Ecosystems* 9: 330–343.

- Bradshaw R.H.W., Holmqvist B.H., Cowling S.A., Sykes M.T. (2000): The effects of climate change on the distribution and management of *Picea abies* in southern Scandinavia. *Canadian Journal of Forest Research*, 30(12): 1992-1998
- Breda N., Huc R., Granier A., Dreyer E. (2006): Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science* 63: 625-644.
- Busby J.R. (1991): BIOCLIM – a bioclimate analysis and prediction system. In: Margules C.R., Austin M.P. (eds.) *Nature Conservation: Cost Effective Biological Surveys and Data Analysis*, Melbourne, pp. 64-68.
- Carpenter G., Gillison A.N., Winter J. (1993): Domain: a flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. *Biodiversity Conservation*, 2: 667-680.
- Carter T.R., Jones R.N., Lu X., Bhadwal S., Conde C., Mearns L.O., O'Neill B.C., Rounsevell M.D.A., Zurek M.B. (2007): New Assessment Methods and the Characterisation of Future Conditions. In: Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J., Hanson C.E. (eds.) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 133-171.
- Cech T., Tomiczek C. (1996): Zum Kiefernsterben in Niederösterreich. *Forstschutzaktuell* 17/18, 12-13.
- Chapman D.G. (1961): Statistical problems in population dynamics. In: Neyman, J., (ed.) *Proceedings of the fourth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*. Vol. 4. Berkeley, CA: University of California Press, pp. 153-186.
- Chuprov N.P. (2007): The problem of dying spruce stands in forests of the Russian European North. In: *Dying Spruce Forests of Arkhangelsk Region, Problems and Means of their Solution*, Department of Forest Complex of Arkhangelsk Region, Arkhangelsk, Russian Federation, pp. 66-71.
- COST FP0703 action (2009): ECHOES: Expected Climate Change and Options for European Silviculture - Country report Hungary. Coordinated by Mátyás Cs., Contributors: Berki I., Borovics A., Csóka Gy., Eredics A., Führer E., Gálos B., Jáger L., Lakatos F., Móczár N., Palócz-Andresen M., Rasztovíts E., Tóth J.A., Vig P. University of West Hungary, Faculty of Forestry, Institute of Environment and Earth Sciences, Sopron
- Cubasch U., Waszkewitz J., Hegerl G., Perlwitz J. (1995): Regional climate changes as simulated in time-slice experiments. *Climatic Change* 31: 273-304.
- Cure J. D., Acock B. (1986): Crop response to carbon dioxide doubling: literature survey. *Agricultural and Forest Meteorology*, (38): 127-145.
- Czajkowski T., Kuhling M., Bolte A. (2005): Einfluss der Sommertrockenheit im Jahre 2003 auf das Wachstum von Naturverjüngungen der Buche (*Fagus sylvatica* L.) im nordöstlichen Mitteleuropa, *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 176: 133-143.
- Czimer K. (2014): Döntéstámogatást segítő geoinformatikai rendszerek fejlesztése a klímaváltozás hatáselemzéséhez. In: Bidló A., Horváth A., Szűcs P. (szerk.) IV. Kari Tudományos Konferencia, Nyugat-magyarországi Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Sopron, ISBN: 978-963-359-033-1
- Czimer K., Gálos B. (2016): A new decision support system to analyse the impacts of climate change on the Hungarian forestry and agricultural sectors. *Scandinavian Journal of Forest Research*, <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2016.1212088>
- Czúcz B., Gálhidy L., Mátyás Cs. (2011): Present and forecasted xeric climatic limits of beech and sessile oak distribution at low altitudes in Central Europe. *Annals of Forest Science* 68(1): 99-108
- Czúcz Bálint, Gálhidy László, Mátyás Csaba (2013): A bükk és a kocsánytalan tölgy elterjedésének szárazsági határa. *Erdészettudományi Közlemények*, 3(1): 39-53.
- Csóka Gy., Koltay A., Hirka A., Janik G. (2009): Az aszályosság hatása kocsánytalan tölgyesek és bükkösök egészségi állapotára. „Klíma-21” Füzetek, 57: 64-73.
- Delatour C. (1983): Les dépérissements de chênes en Europe (Oak die-back in Europe). *Revue forestière française* 35 (4), 265-282.

- Déqué M., és Piedelievre J.P. (1995): High resolution climate simulation over Europe. *Climate Dynamics* 11: 321–339.
- Dobbertin M., Rigling A. (2006): Pine mistletoe (*Viscum album ssp. austriacum*) contributes to Scots pine (*Pinus sylvestris*) mortality in the Rhone valley of Switzerland. *Forest Pathology* 36: 309–322.
- Dobbertin M., Wermelinger B., Bigler C., Buergi M., Carron M., Forster B., Gimmi U., Rigling A. (2007): Linking increasing drought stress to Scots pine mortality and bark beetle infestations. *The Scientific World Journal* 7: 231–239.
- Drake J.M., Randin C., Guisan A. (2006): Modelling ecological niches with support vector machines. *Journal of Applied Ecology* 43(3): 424–432, DOI: 10.1111/j.1365-2664.2006.01141.x
- Ducousso A., Bordács S. (2004): EUFORGEN Technical Guidelines for genetic conservation and use for pedunculate and sessile oaks (*Quercus robur* and *Q. petraea*). International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy. p. 6
- EASAC policy report (2013): Trends in extreme weather events in Europe: implications for national and European Union adaptation strategies. European Academies Science Advisory Council, German National Academy of Sciences, Leopoldin. ISBN 978-3-8047-3239-1
- Eaton E., Caudullo G., Oliveira S., de Rigo D. (2016): *Quercus robur* and *Quercus petraea* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz J., de Rigo D., Caudullo G., Houston Durrant T., Mauri A. (eds.), European Atlas of Forest Tree Species. Publ. Off. EU, Luxembourg, Elérhető: www.forest.jrc.ec.europa.eu/media/atlas/Quercus_robur_petraea.pdf [utolsó letöltés: 2017. március 11.]
- EEA Technical Report (2006): European forest types Categories and types for sustainable forest management reporting and policy. European Environment Agency, technical report, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, Copenhagen, ISBN: 978-92-9167-926-3
- Elith J., Graham C.H., Anderson R.P., Dudik M., Ferrier S., Guisan A., Hijmans R.J., Huettmann F., Leathwick J., Lehmann A., Li J., Lohmann L.G., Loiselle B., Manion G., Moritz C., Nakamura M., Nakazawa Y., McC. Overton J., Peterson A.T., Phillips S., Richardson K., Scachetti-Pereira R., Schapire R., Soberon J., Williams S., Wisz M., Zimmerman N. (2006): Novel methods improve prediction of species distributions from occurrence data. *Ecography*, 29: 129–151.
- Ellenberg H. (1988): Vegetation ecology of central Europe. 4th edition. Cambridge University Press, New York, NY. pp. 731
- Engler R., Guisan A., Rechsteiner L. (2004): An improved approach for predicting the distribution of rare and endangered species from occurrence and pseudo-absence data. *Journal of Applied Ecology* 41: 263–274
- Erdőleltár 2010-2014: Országos Erdőleltár. NEBIH Erdészeti Igazgatóság, elérhető: <http://portal.nebih.gov.hu/erdoleltar> [utolsó letöltés: 2017. február 23.]
- EU White paper (2009): Adapting to climate change: Towards a European frame work for action. Commission of the European Communities, Brussels, 1.4.2009. Elérhető: https://ec.europa.eu/health/ph_threats/climate/docs/com_2009_147_en.pdf [utolsó letöltés: 2017. január 16.]
- Fawcett T. (2006): An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters* (27): 861–874.
- Forman G. (2003): An extensive empirical study of feature selection metrics for text classification. *Journal of Machine Learning Resources*, 3: 1289–1305.
- Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R., Fahey D.W., Haywood J., Lean J., Lowe D.C., Myhre G., Nganga J., Prinn R. Raga G., Schulz M., Van Dorland R. (2007): Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds.) *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, pp 129–234.
- Führer E. (1994): Csapadékmérések bükkös-, kocsánytalan tölgyes és lucfenyves ökoszisztémában. *Erdészeti Kutatások* 84: 11–35.
- Führer E. (2010): A fák növekedése és a klíma. "Klíma-21" Füzetek 61: 98–107.

- Führer E., Edelényi M., Horváth L., Jagodics A., Jereb L., Kern Z., Móring A., Szabados I., Pödör Z. (2015): Effect of weather conditions on annual and intra-annual basal area increments of a beech stand in the Sopron Mountains in Hungary. *Időjárás*, 120(2): 127-161.
- Führer E., Marosi Gy., Jagodics A., Juhász I. (2011): A klímaváltozás egy lehetséges hatása az erdőgazdálkodásban. *Erdészettudományi Közlemények*, 1(1): 17-28.
- Gálos B. (2016): Fafajok klimatikus tere és a meghatározó szélsőséges éghajlati események várható tendenciái. 42. Magyar Meteorológiai Tudományos Napok, A Vízgazdálkodás meteorológiai vonatkozásai, Budapest, 2016. november 24-25.
- Gálos B., Berki I., Bidló A., Drüsler Á., Eredics A., Illés G., Móricz N., Rasztovits E., Mátyás Cs., Czímber K. (2013): A Decision Support System for Climate Change Adaptation in Rainfed Sectors of Agriculture for Central Europe. *Geophysical Research Abstracts* 15: Paper EGU2013-292.
- Gálos B., Führer E., Czímber K., Gulyás K., Bidló A., Hänsler A., Jacob D., Mátyás Cs. (2015): Climatic threats determining future adaptive forest management – a case study of Zala County. *Időjárás, Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 119(4): 425–441.
- Gálos B., Mátyás Cs., Jacob D. (2012): Az erdőtelepítés szerepe a klímaváltozás hatásának mérséklésében. *Erdészettudományi Közlemények*, 2(1): 35-45.
- Gibbs J.N., Greig B.J.W. (1997): Biotic and abiotic factors affecting the dying back of pedunculate oak *Quercus robur* L. *Forestry*, 70(4): 399-406.
- Greig B.J.W. (1992): Occurrence of Decline and Dieback of Oak in Great Britain. *Arboriculture Research Note*, 105: 3.
- Guisan A., Lehmann A., Ferrier S., Austin M, Mc Overton J.C., Aspinall R., Hastie T. (2006): Making better biogeographical predictions of species' distributions. *Journal Applied Ecology* 43(3): 386-392, DOI: 10.1111/j.1365-2664.2006.01164.x
- Gulyás K., Berki I. (2016): Tee height growth indicating drought and nitrogen deposition. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 18, EGU2016-14017, European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 17-22. April
- Gulyás K., Berki I., Veperdi G. (2017): Projected changes in the future distribution and production of sessile oak forests near the xeric limit. *Geophysical Research Abstracts* Vol.19. EGU2017-6442-2
- Guo Q., Kelly M., Graham C. (2005): Support vector machines for predicting distribution of Sudden Oak Death in California. *Ecological Modeling*, 182: 75-90.
- Guo Q., Liu Y. (2010): ModECO: an integrated software package for ecological niche modeling. *Ecography* 33(4): 637-642, DOI: 10.1111/j.1600-0587.2010.06416.x
- Hampe A., Petit R.J. (2005): Conserving biodiversity under climate change: the rear edge matters. *Ecology Letters*, 8: 461–467.
- Hansen, J., Ruedy R., Sato M., Lo K. (2010): Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*, Vol. 48. Iss. RG4004, DOI: 10.1029/2010RG000345
- Hartmann G. (1996): Ursachenanalyse des „Eichensterbens“ in Deutschland - Versuch einer Synthese bisheriger Befunde. In: Wulf and Kehr (eds.): *Mitt. Biol. Bundesanst. Landw. Forstw. Berlin*, H 318: 125-151.
- Haszpra L. Barcza Z., Szilágyi I. (2010): Atmospheric trends and fluctuations – History and sites of atmospheric greenhouse gas monitoring in Hungary. In. *Atmospheric Greenhouse Gasses: The Hungarian Perspective* (ed.: Haszpra L.), pp. 9-27
- Hawkins E., Sutton R. (2009): The potential tonarrow uncertainty in regional climate predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society* (90): 1095-1107
- Haylock M.R., Hofstra N., Klein Tank A.M.G., Klok E.J., Jones P.D., New M. (2008): A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201

- Hickler T., Vohland K., Feehan J., Miller P.A., Smith B., Costa L., Giesecke T., Fronzek S., Carter T.R., Cramer W., Kühn I., Sykes M.T. (2012): Projecting the future distribution of European potential natural vegetation zones with a generalized, tree species-based dynamic vegetation model. *Global Ecology and Biogeography*, 21:50-63.
- Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.G., Jarvis A. (2005): Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- Hlásny T., Marek T. (2008). Selected insect pests as climate change driven disturbances in forest ecosystems. In: Strelcova, K., Mátyás, Cs., Kleidon, A., Lapin, M., Holec, J., Matejka, F. & Skvarenina, J. (ed). *Bioclimatology and natural hazards*. Springer, Berlin, Germany. pp. 165- 178.
- Hogg E. H., Brandt J. P., Michaelian M. (2008). Impacts of a regional drought on the productivity, dieback, and biomass of western Canadian aspen forests. *Canad. J. For. Res.* 38, 1373-1384.
- Horváth A., Mátyás Cs. (2014): Növekedéscsökkenés előrevetítése egy bükk származási kísérlet alapján. *Erdészettudományi Közlemények*, 4(2): 91-99.
- Horváth A., Mátyás Cs. (2016): The decline of vitality caused by increasing drought in a beech provenance trial predicted juvenile growth. *SEEFOR* 7(1): 21-28, DOI: 10.15177/seefor.16-06
- Horváth B., Lakatos F., Márkus L., Németh K., Szabó I., Varga Sz., Walterné I.V., Bondor A., Tóth J., Varga F. (2001): Erdővédelemtan. In: Varga F. (szerk.) *Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó*, Budapest, 2001. ISBN: 963-356-322-4
- Horváth T. (2012): Versengés vizsgálatok a Soproni-hegyvidék hosszúléjartú kísérleti területein. Doktori (PhD.) disszertáció, Nyugat-magyarországi Egyetem, Erdőmérnöki Kar, p. 188.
- Horváth-Szováti E., Vágvolgyi A. (2014): Az energetikai faültetvények hozamnak vizsgálata. *Erdészettudományi Közlemények* 4(1): 109-120.
- Horvát-Szováti E. (2013): A főkomponens-analízis és faktoranalízis alkalmazhatósága erdészeti és környezettudományi kutatásokban. In: Bidló A., Horváth A., Szűcs P. (szerk.) IV. Kari Tudományos Konferencia, Nyugat-magyarországi Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Sopron, ISBN: 978-963-359-033-1
- HREX (2012): Hungarian Report on Extreme Events. Éghajlati szélsőségek változásai Magyarországon: közelmúlt és jövő. In: Lakatos M., Szépszó G., Bihari Z., Krüzselyi I., Szabó P., Bartholy J., Pongrácz R., Pieczka I., Torma Cs. (eds.) Elérhető: www.met.hu/doc/IPCC_jelentes/HREX_jelentes-2012.pdf [utolsó letöltés: 2017. január 23.]
- Hufnagel L., Sipkay Cs. (2007): A klímaváltozás hatása ökológiai folyamatokra és életközösségekre. Kutatási jelentés a Budapesti Corvinus Egyetem TÁMOP 4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0005. számú programja keretében. A-Z Buda CopyCAT Kft. Nyomda, Budapest, p. 531, ISBN: 978-963-503-511-3
- Hutchinson G.E. (1958): Concluding Remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22:415- 422.
- Igmándy Z. (1987): Die Welkeepidemie von *Quercus petraea* (Matt.) Lieb. in Ungarn (1978 bis 1986). *Österreichische Forstzeitung*, 98: 48-50.
- Igmándy Z., Pagony H., Szontagh P., Varga F. (1984): Beszámoló a kocsánytalan tölgyeseinkben fellépett pusztulásról 1978-1983. *Az erdő* 33(8): 334-341.
- Illés G., Fonyó T. (2016): A klímaváltozás fatermésre gyakorolt várható hatásának becslése az AGRATÉR projektben. *Erdészettudományi Közlemények*, 6(1): 25-34.
- Illés G., Kollár T., Veperdi G., Führer E. (2014): A zalai faállományok magassági növekedésének és fatermésének kapcsolata a termőhelyi tényezőkkel. *Erdészeti Tudományi Közlemények*, 4(2): 77-89.
- Ilyés Cs., Turai E., Szűcs P. (2016): 110 éves hosszúságú hidrometeorológiai adatsorok ciklikus paramétereinek vizsgálata. *Hidrológiai Közlöny*, 96(1): 61-70.
- IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1535.

- Jakucs P. (1984): A kocsánytalan tölgyek pusztulásának ökológiai magyarázata. *Az erdő* 33(8): 342-344.
- Járó Z. (1962): Fontosabb fafajaink elterjedése. *Az Erdő* 11(11): 7-22.
- Jensen, L. U., Lawesson J. E., Balslev H., Forchhammer M.C. (2004) Predicting the distribution of *Carpinus betulus* in Denmark with Ellenberg's Climate Quotient. *Nordic Journal of Botany* 23: 57-67 doi:10.1111/j.1756-1051.2003.tb00368.x
- Jones P. D., Lister D. H., Osborn T. J., Harpham C., Salmon M., Morice C. P. (2012): Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 117. Iss. D05, DOI: 10.1029/2011JD017139
- Joshi M., Hawkins E., Sutton R., Lowe J., Frame D. (2011): Projections of when temperature change will exceed 2°C above pre-industrial levels. *Nature Climate Change*, 1: 407–412.
- Jump A., Mátyás Cs., Penuelas J. (2009): The paradox of altitude for latitude comparisons in species range retractions (review). *Trends in Ecology and Evolution*, 24(12): 694–700. In.: Mátyás Cs., Berki I., Czúcz B., Gálos B., Móricz N., Rasztovíts E. (2010): Future of beech in Southeast Europe from the perspective of evolutionary ecology. *Acta Silvatica & Lignaria Hungarica*, 6: 91–110.
- Kailidis D.L., Markalas S. (1990): Dryness and the most destructive secondary bark beetle epidemic on fir in Greece. *Ecotopia* 8: 38–41.
- Kauhanen H., Wallenius T., Kuuluvainen T., Aakala T., Mikkola K. (2008): Extensive mortality of spruce forests in Arkhangelsk Region: satellite image analysis. In: Poster Presentation At: International Conference „Adaptation of Forests and Forest Management to Changing Climate with Emphasis on Forest Health: A Review of Science, Policies, and Practices”, Umea, Sweden, FAO/IUFRO, 25–28 August 2008.
- Kimball B., Idso S. B. (1983): Increasing atmospheric CO₂: Effects on crop yield, water use and climate. *Agricultural Water Management*, 7(1-3): 55-72.
- Kis A., Pongrácz R., Bartholy J. (2017): Multi-model analysis of regional dry and wet conditions for the Carpathian Region. *International Journal of Climatology*, 37(13): 4543-4560, DOI:10.1002/joc.5104
- Kolozs L., Stuller Z., Horváth L., Illés G., Koltay A., Manninger M., Sitkey J., Tobisch T. (2009): Erdővédelmi MÉRŐ-ÉS MEGFIGYELŐ RENDSZER (EMMRE) 1988-2008. Kiadja a Mezőgazdasági Szakigazgatási Hivatal Központ Erdészeti Igazgatósága, Budapest
- Koltay A., Csóka Gy., Hirka A., Janik G., Majsai E. (2011): Erdeink egészségi állapota 2011-ben. Jelentés a 16x16 km-es EVH hálózat alapján. Erdészeti Tudományos Intézet, Erdővédelmi Osztály EVH I. jelentés, Mátrafüred
- Kramer K., Degen B., Buschbom J., Hickler T., Thuiller W., Sykes M.T., de Winter W. (2010): Modelling exploration of the future European beech (*Fagus sylvatica* L.) under climate change-range abundance genetic diversity and adaptive response. *Forest Ecology and Management* 259: 2213-2222.
- Kramer P. J. (1981): Carbon dioxide concentration, photosynthesis and dry matter production. *Bio Science* 31: 29-33.
- Krotov N.S. (2007): On problems of spruce forest mortality in the Arkhangelsk Region. In: Dying Spruce Forests of Arkhangelsk Region. Problems and Means of their Solution, Department of Forest Complex of Arkhangelsk Region, Arkhangelsk, Russian Federation, pp. 6–11.
- Lacis A.A., Schmidt G.A., Rind D., Ruedy R.A. (2010): Atmospheric CO₂: Principal Control Knob Governing Earth's Temperature. *Science*, 330: 356–359.
- Lakatos F., Molnár M. (2009): Mass Mortality of Beech (*Fagus sylvatica* L.) in South-West Hungary. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* Vol. 5: 75-82.
- Lakatos M. (2010): Hazai megfigyelt hőmérsékleti és csapadék tendenciák, szélsőségek alakulása a múlt század elejétől. 36. Meteorológiai Tudományos Napok, Változó éghajlat és következményei a Kárpát-medencében, Budapest, 2010. november 18-19. ISBN 978-963-9931-05-3
- Lakatos M., Szentimrey T., Bihari Z., Szalai S. (2013): Creation of a homogenized climate database for the Carpathian region by applying the MASH procedure and the preliminary analysis of the data, *Időjárás*, 117(1): 143-158.

- Landmann G., Dreyer E. (2006): Impacts of drought and heat on forest. Synthesis of available knowledge, with emphasis on the 2003 event in Europe. *Annals of Forest Science*, 3(6): 567–652.
- Larcher W. (1980): *Physiological Plant Ecology*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, ISBN: 978-3-540-43516-7, p. 514.
- Lawrimore J. H., Menne M. J., Gleason B. E., Williams C. N., Wuertz D. B., Vose R. S., Rennie J. (2011): An overview of the Global Historical Climatology Network monthly mean temperature data set, version 3. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D19), DOI: 10.1029/2011JD016187
- Lett B., Stark M., Horváth S. (2016): Amit a számok mutatnak az erdővagyongazdálkodásról – Naturáliák és ökonómia. Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Sopron ISBN: 978-963-334-284-8
- Linder M., Maroschek M., Netherer S., Kremer A., Barbati A., Garcia-Gonzalo J., Seidl R., Delzon S., Corona P., Kolstrom M., Lexer M.J., Marchetti M. (2010): Climate change impacts adaptive capacity and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259: 698-709.
- Lloret F., Siscart D. (1995): Los efector demograficos de la sequia en poblaciones de encina. *Cuadernos de la Sociedad Espanola de Ciencias Forestales* 2: 77–81.
- Lloret F., Siscart D., Dalmases C. (2004): Canopy recovery after drought dieback in holm-oak Mediterranean forests of Catalonia (NE Spain). *Global Change Biology* 10: 2092–2099.
- Long S.P. (1991): Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO₂ concentrations: Has its importance been underestimated? *Plant, Cell and Environment* 14: 729–739.
- Louto M., Pöyry J., Heikkinen R.K., Saarinen K. (2005): Uncertainty of bioclimate envelope models based on the geographical distribution of species. *Global Ecology and Biogeography*, 14: 575–584, DOI: 10.1111/j.1466-822x.2005.00186.x
- Lukács O. (2006): *Matematikai statisztika*. Műszaki Könyvkiadó Kft., Budapest, ISBN: 963 16 3036 6
- Markalas S. (1992): Site and stand factors related to mortality-rate in a fir forest after a combined incidence of drought and insect attack. *Forest Ecology and Management*, 47: 367–374.
- Martinez-Vilalta J., Piñol J. (2002): Drought-induced mortality and hydraulic architecture in pine populations of the NE Iberian Peninsula. *Forest Ecology and Management*, 161: 247–256.
- Márkus L. (1987): Kocsánytalan tölgyekre vonatkozó ökonómiai vizsgálatok. In.: Béky A., Keresztesi B. (szerk.) *A kocsánytalan tölgy*, Akadémia Kiadó, Budapest, ISBN: 963 05 45 128
- Mátyás Cs. (2010): Forecasts needed for retreating forests (opinion). *Nature*, 464: 1271
- Mátyás Cs., Borovics A., Lakatos F., Bidló A., Schiberna E., Neményi M. (2014): Agrárklíma: Az előrevetített klímaváltozás hatáselemzése és alkalmazkodási lehetőségei. In. Bidló A., Király A., Mátyás Cs. (eds.), *Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Sopron* ISBN 978-963-334-204-6
- Mátyás Cs., Czímber K. (2004): A zonális alsó erdőhatár klímaérzékenysége Magyarországon – előzetes eredmények. In. Mátyás Cs. Vig P. (szerk.): *Erdő és Klíma IV*. Sopron, pp. 35-44.
- Mátyás Cs., Fady B., Vendramin G.G. (2009a): Forests at the xeric limits: selective environment at the drought-stricken edge of species distribution and consequences – report from a researcher consultation. Recommendations of EVOLTREE research workshop in Sopron, May 11-14. 2009.
- Mátyás Cs., Führer E., Berki I., Csóka Gy., Drüsler Á., Lakatos F., Móricz N., Rasztovits E., Somogyi Z., Veperdi G., Víg P., Gálos B. (2010): Erdők a szárazsági határon. „Klíma-21” Füzetek, 61: 84-97.
- Mátyás Cs., Gálos B. (2010): Erdőgazdálkodás és klimatikus szélsőségek: problémák és feladatok. *Klíma21 füzetek*, 63: 25-32.
- Mátyás Cs., Vendramin G.G., Fady B. (2009b): Forests at the limit: evolutionary-genetic consequences of environmental changes at the receding (xeric) edge of distribution. *Annals of Forest Science*, 66: 800–803.

- Medlyn B.E., Badeck F.W., De Pury D.G.G., Barton C.V.M., Broadmeadow M., Ceulemans R., De Angelis P., Forstreuter M., Jach M.E., Kellomäki S., Laitat E., Marek M., Philippot S., Rey A., Strassmeyer J., Laitinen K., Liozon R., Portier B., Roberntz P., Wang K., Jstbid P.G. (2000): Effects of elevated CO₂ on photosynthesis in European forest species: metaanalysis of model parameters. *Plant, Cell & Environment* (22): 1475-1495
- Mészáros I., Fenyvesi A., Kanalas P., Szöllösi E., Oláh V., Ander I., Veres Sz., Láposi R., (2009): Középhegységi Zonális Erdők Fafajainak Ökofiziológiája különös tekintettel a klímaérzékenységre. *Magyar Biológiai Társaság Botanikai Szakosztályának Közleményei* 96(1-2): 15-17.
- Minerbi S. (1993): Wie gesund sind unsere Wälder? 10. Bericht über den Zustand der Wälder in Südtirol. *Agrar- und Forstbericht, Autonome Provinz Bozen, Assessorate für Land-und Forstwirtschaft*, pp 40.
- Mitchell T. D., Jones P. D. (2005): An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, (25): 693–712.
- Moss R.H., Edmonds J.A., Hibbard K.A., Manning M.R., Rose S.K., van Vuuren D.P., Carter T.R., Emore S., Kainuma M., Kram T., Meehl G.A., Mitchell J.F.B., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S.J., Stouffer R.J., Thomson A.M., Weyant J.P., Wilbanks T.J. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assesment. *Nature*, 463: 747-756.
- Móricz N., Rasztovits E., Gálos B., Berki I., Eredics A., Loibl W. (2013): Modelling the Potential Ditrubution of Tree Climate Zonal Tree Species for Present and Future Climate in Hungary. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 9: 85-96.
- Muller R.A., Rohde R., Jacobsen R.G., Wickham C. (2013): A new estimate of the average Earth surface land temperature spanning 1753 to 2011. *Geoinformatics & Geostatistics: An Overview*, Vol. 1. DOI: 10.4172/2327-4581.1000101
- Nageleisen L.M. (1994): Dépérissement actuel des chênes. *Revue Forestière Française* 46(5): 504–511.
- Nageleisen L.M., Hartmann G., Landmann G. (1991): Dépérissements d'essences feuillues en Europe Occidentale: cas particulier des chênes rouvre et pédonculé *Revue Forestière Française* n°8 hors série, 2: 301–306.
- Nagy D. (2008): Erdőtűzek megelőzési és oltástechnológiai lehetőségeinek vizsgálata. Doktori (PhD.) értekezés, Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskola, Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron, pp. 129.
- Nagy L. (2009): Éghajlati alkalmazkodóképesség és válaszreakció előrejelzése erdeifenyő (*Pinus sylvestris L.*) populációkon. Doktori (PhD.) értekezés, Nyugat-magyarországi Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskola, pp. 60.
- Nakicenovic N., Swart R. (eds.) (2000): Emissions Scenarios. A Special Report of IPCC Working Group III, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 599p.
- Navarro-Cerrillo R., Varo M.A., Lanjeri S., Hernández-Clemente R. (2007): Cartografía de defoliación en los pinares de pino silvestre (*Pinus sylvestris L.*) y pino salgareño (*Pinus nigra Arnold.*) en la Sierra de los Filabres. *Ecosistemas*. 2007/3. Elérhető: <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=495>. [utolsó letöltés: 2017. március 11.]
- NÉS (2008): Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia (2008-2025). ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezménye és a Kiotói Jegyzőkönyv végrehajtási keretrendszeréről szóló 2007. évi LX. tv. (V. 28.) 3. § rendelkezése alapján készült vezetői összefoglaló. pp. 114. Elérhető: <http://www.kvvm.hu/cim/documents/nes080214.pdf> [utolsó letöltés: 2017. január 22.]
- Oberhuber W. (2001): The role of climate in the mortality of Scots pine (*Pinus sylvestris L.*) exposed to soil dryness. *Dendrochronologia*, 19: 45–55.
- Patocskai Z. (2012): Az erdészeti és a mezőgazdasági földértékelési rendszer ökológiai alapjainak összehasonlítása, az egységesítés lehetséges módjai. Doktori értekezés, Nyugat-Magyarországi Egyetem, p. 274
- Peñuelas J., Lloret F., Montoya R. (2001): Severe drought effects on mediterranean woody flora in Spain. *Forest Science*, 47: 214–218.

- Peñuelas J., Ogaya R., Boada M., Jump A.S. (2007): Migration invasion and decline changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift European beech forest in Catalonia (NE Spain). *Ecography*, 30: 829-837.
- Petercord R. (2008): Zukünftige gefährdung der Rotbuche durch rinden- und holzbrütende Käfer in Baden-Württemberg. *Mitteilungen der Deutsche Gesellschaft für Allgemeine und Angewandte Entomologie*, 16: 247-250.
- Pretzsch H. (2009): *Forest dynamics, growth and yield: from measuring to model*. Pringer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-642-14861-3, p. 664.
- Pretzsch H., Biber P., Schütze G., Uhl E., Rötzer T. (2014): *Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870*. *Nature communications*, Macmillan Publishers Limited, DOI: 10.1038/ncomms5967
- Péczely Gy. (1998): *Éghajlattan*. Nemzeti Tankönyv Kiadó Rt. Budapest, ISBN 963 18 8924 6, p. 336.
- Raftoyannis Y., Spanos I., Radoglou K. (2008): The decline of Greek fir (*Abies cephalonica Loudon*): Relationships with root condition. *Plant Biosystems* 142: 386-390.
- Rasztovits E. (2011): *Modelling the future distribution of beech at low-elevation xeric limits - comparison of empirical and stochastic models*. Doctoral (PhD) dissertation, University of West Hungary, Sopron, pp. 171.
- Rasztovits E., Berki I., Mátyás Cs., Czimber K., Pötzelsberger E., Móricz N. (2014): The incorporation of extreme drought event improves model for beech presistence at its distribution limit. *Annal of Forest Science*, 71(2): 201-210. DOI10.1007/s13595-013-0346-0
- Rasztovits E., Móricz N., Berki I., Pötzelsberger E., Mátyás Cs. (2012): Evaluating the performance of stochastic distribution models for European beech at low-elevation xeric limits. *Időjárás*, 116(3): 173-194.
- Reinecke L.H. (1933): Perfecting a stand-density index for even-aged forest. *Journal of Agricultural Research* 46: 627-638.
- Richards F.J. (1959): A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany*, 10: 290-300.
- Richards J.A., Jia X. (1999): *Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction*, Third edition. Springer. Berlin. Germany, pp. 494. ISBN: 978-3-642-30061-5
- Rissler L.J., Hijmans R.J., Graham C.H., Moritz C., Wake D.B. (2006): Phylogeographic lineages and species comparisons in conservation analyses: A case study of california herpetofauna. *American Naturalist*, 167: 655-666.
- Rouault G., Candau J.N., Lieutier F., Nageleisen L.M., Martin J.C., Warzee N. (2006): Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Annals of Forest Science*, 63: 613-624.
- Russel S., Norvig P. (2003): *Artificial intelligence. A modern approach*. Published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2nd Edition. ISBN 0137903952
- Schlyter P., Stjernquist I., Barring L., Jönsson A.M., Nilsson C. (2006): Assessment of the impacts of climate change and weather extremes on boreal forests in northern Europe, focusing on Norway spruce. *Climate Research*, 31: 75-84.
- Selås V., Piovesan G., Adams J.M., Bernabei M. (2002): Climatic factors controlling reproduction and growth of Norway spruce in southern Norway. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(2): 217-225. DOI: 10.1139/x01-192
- Shtyrkhov (2008): *Forest health and protection in Russia*. In: Oral Presentation At: International Conference „Adaptation of Forests and Forest Management to Changing Climate with Emphasis on Forest Health: A Review of Science, Policies, and Practices”, Umea, Sweden, FAO/IUFRO, 25-28 August 2008.
- Siwecki R., Ufnalksi K. (1998): Review of oak stand decline with special reference to the role of drought in Poland. *European Journal of Forest Pathology*, 28: 99-112.

- Solberg S. (2004): Summer drought: a driver for crown condition and mortality of Norway spruce in Norway. *Forest Pathology*, 34: 93–107.
- Solyomos R. (2009): A klímaváltozás hatása az erdők fanövedékére. *Klíma21 füzetek, Klímaváltozás – Hatások – Válaszok*, 53: 43-48.
- Somogyi Z. (1998): Gyorsuló fanövekedési trendek Európában III. *Erdészeti Lapok CXXXIII. 3*: 65-66.
- Somogyi Z. (2007): A klíma, a klímaváltozás és a fanövekedés néhány összefüggéséről. In: (Mátyás Cs. – Vig P.) (eds.) *Erdő és klíma V. Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron* pp. 281-294.
- Somogyi Z. (2008): Recent trend of tree growth in relation to climate change in Hungary. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 4: 17-27.
- Spiecker H. (1999): Overview of recent growth trends in European forests. *Water air and soil pollution*, Kluwer Academic Publishers, 116: 33-46.
- Spiecker H., Köhl M., Mielikäinen K., Skovsgaard J.P. (1996): Growth trends in European forests. *European Forest Institute Research Report 5*. Springer-Verlag, p. 372.
- Spinoni, J., Szalai, S., Szentimrey, T., Lakatos, M., Bihari, Z., Nagy, A., Németh, Á., Kovács, T., Mihic, D., Dacic, M., Petrovic, P., Kržič, A., Hiebl, J., Auer, I., Milkovic, J., Štěpánek, P., Zahradníček, P., Kilar, P., Limanowka, D., Pyrc, R., Cheval, S., Birsan, M.-V., Dumitrescu, A., Deak, G., Matei, M., Antolovic, I., Nejedlík, P., Štastný, P., Kajaba, P., Bochníček, O., Galo, D., Mikulová, K., Nabyvanets, Y., Skrynyk, O., Krakovska, S., Gnatiuk, N., Tolasz, R., Antofie, T., Vogt, J. (2015): Climate of the Carpathian Region in the period 1961–2010: climatologies and trends of 10 variables. *International Journal of Climatology* 35: 1322–1341. DOI: 10.1002/joc.4059
- SREX (2011): Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. In: Field, C.B. Barros, V. Stocker, T.F. Dahe, Q. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA
- Standovár T., Kenderes K. (2003) A review on natural stand dynamics in beechwoods of East-Central Europe. *Applied Ecology and Environmental Research*, 1: 19-46.
- Swets J. (1988): Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240: 1285- 1293.
- Sykes M.T., Prentice I.C., Cramer W. (1996): A bioclimatic model for potential distributions of north European tree species under present and future climates. *Journal of Biogeography*, 23: 203–233.
- Szabados I. (2007): Időjárási fluktuáció hatása a produkcióra dendrokronológiai kutatások alapján. In: (Mátyás Cs. – Vig P.) (eds.) *Erdő és klíma V. Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron*, pp. 295-306.
- Szalai S., Mika J. (2007): A klímaváltozás és időjárási anomáliák előrejelzése az erdőtakaró szempontjából fontos tényezőkre. In Mátyás Cs., Vig P. (szerk.) *Erdő és klíma V. Sopron*, pp. 133-143.
- Szappanos A. (1989): A tölgyek dendrológiai ismertetése, elterjedése, termesztéstechnológiai tulajdonságai. In.: Béky A. (szerk.) *A tölgy termesztése és hasznosítása, Mezőgazdasági Kiadó, Budapest* ISBN: 963 232 664 4
- Szentimrey T. (2006): Development of MASH homogenization procedure for daily data. In M. Lakatos, T. Szentimrey, Z. Bihari S. Szalai (eds.), *Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases, Budapest, Hungary, 29 May – 2 June 2009*.
- Szentimrey T., Bihari Z. (2007): MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis). In: Tveito, E., Wegehenkel, M., Wel, F., Dobesch, H. (eds.) *COST Action 719 Final Report, The use of GIS in climatology and meteorology*, 54–56.
- Szépszó G., Horányi A. (2008): Transient simulation of the REMO regional climate model and its evaluation over Hungary. *Időjárás*, 112(3-4): 203-231.
- Szmorad F., Kelemen K., Kovács B., Standovár T. (2013): Többcélú erdőállapot-felmérések módszertanának kidolgozását megalapozó irodalmi áttekintés. *ELTE Biológiai Intézet, Növényrendszertani, Ökológiai és Elméleti Biológiai Tanszék. Elérhető: http://karpatierdeink.hu/files/docs/SH4_13_WP1_irodalmi_attekintes.pdf [utolsó letöltés: 2017. március 11.]*

- Szodfridt I. (1967): Kocsánytalantölgy. In.: Keresztesi B. (szerk.) A tölgyek. Akadémiai Kiadó, Budapest
- Szontágh P. (1985): Tölgy nagylepke károsításának populációdinamikája és másodlagos károsító rovarok okozta kárláncolatok. Erdészeti kutatások, 77: 305-314.
- Szontágh P. (1986): Fitofág rovarok populáció dinamikájának szerepe a tölgypusztulásban. Erdészeti kutatások, 78. 335-338.
- Szontágh P. (1987): Tölgyeseink rovar okozta problémái. Erdészeti kutatások, 79: 243-245.
- Thabeet A., Vennetier M., Gadbin-Henry C., Denelle N., Roux M., Caraglio Y., Vila B. (2009): Response of *Pinus sylvestris* L. to recent climate change in the French Mediterranean region. Trees, Structure and Functions, 23(4): 843–853.
- Theurillat J-P., Guisan A. (2001): Potential impact of climate change on vegetation in European Alps: a review. Climatic Change Vol. 50 Iss.1. Kluwer Academic Publisher, pp. 77-109.
- Thomas F.M., Blank R., Hartmann G. (2002): Abiotic and biotic factors and their interactions as causes of oak decline in Central Europe. Forest Pathology 32: 277–307.
- Thomas F.M., Hartmann G. (1996): Soil and tree water relations in mature oak stands of northern Germany differing in the degree of decline. Annals of Forest Science 53: 697-720
- Tsopelas P., Angelopoulos A., Economou A., Soulioti N. (2004): Mistletoe (*Viscum album*) in the fir forest of Mount Parnis, Greece. Forest Ecology and Management 202: 59–65.
- Tsvetkov V.F., Tsvetkov V.I. (2007): The problem of spruce forests mortality in the Arkhangelsk Region. In: Dying Spruce Forests of Arkhangelsk Region. Problems and Means of their Solution, Department of Forest Complex of Arkhangelsk Region, Arkhangelsk, Russian Federation, pp. 20–30.
- VAHAVA report (2010): Climate change and Hungary: Mitigating the hazard and preparing for the impacts. In: Faragó T., Láng I., Csete L. (eds.) "Changes-Impacts-Responses" (Változás-Hatás-Válaszadás) projekt jelentés, Budapest p. 124. Elérhető: http://www.preventionweb.net/files/18582_thevahavareport08dec2010.pdf [utolsó letöltés: 2017. február 14.]
- Vajna L. (1989): A kocsánytalan tölgy pusztulásának kórok-és járványtani kérdései. Az erdő 38(4): 169-175.
- van der Linden P., Mitchell J.F.B. (eds.) (2009): ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Fitz Roy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160pp.
- Vapnik V. (1995): The Nature of Statistical Learning Theory. Springer-Verlag. New York. USA. ISBN: 978-1-4757-3264-1
- Vennetier M, Cecillon L, Guénon R, Schaffhauser A, Vergnoux A, Boichard JL, Bottéro JY, Brun JJ, Carrara M, Cassagne N, Chandioix O, Clays-Josserand A. et al. (2008): Etude de l'impact d'incendies de forêt répétés sur la biodiversité et sur les sols: recherche d'indicateurs. Rapport final. Cemagref, Ministère de l'Agriculture et de la pêche, Union Européenne, Aix en Provence, 236 pp.
- Vennetier M., Vila B., Liang E.Y., Guibal F., Thabeet A., Gadbin-Henry C. (2007): Impact of climate change on pine forest productivity and on the shift of a bioclimatic limit in a Mediterranean area. Options Méditerranéennes, Série A, Bari, Italy, pp. 189–197.
- Veperdi G. (2008): Erdőbecsléstan. Oktatási segédanyag, Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron p. 109.
- Veperdi G. (2014): Termőhely változásának hatása a fatermesre. In. Bidló A., Király A., Mátyás Cs. (szerk.) Agrárklíma: Az előrevetített klímaváltozás hatáselemzése és az alkalmazkodás lehetőségei. Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Sopron, ISBN 978-963-334-204-6 pp.237.
- Vertui F., Tagliaferro F. (1998): Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) die-back by unknown causes in the Aosta Valley, Italy. Chemosphere 36: 1061–1065.
- Vig P. (2002): A klimatikus változások hatása egy középkorú bükkös vízháztartására. Doktori (PhD.) értekezés, Debreceni Egyetem, Debrecen p. 137

- Wermelinger B., Rigling A., Schneider M., Dobbertin M. (2008): Assessing the role of bark- and wood-boring insects in the decline of Scots pine (*Pinus sylvestris*) in the Swiss Rhone valley. *Ecological Entomology*, 33: 239–249.
- Wilby R.L., Wigley T.M.L., Conway D., Jones P.D., Hewitson B.C., Main J., Wilks D.S. (1998): Statistical downscaling of General Circulation Model Output: A Comparison of Methods. *Water Resources Research*, 34: 2995–3008.
- Wisz M.S., Hijmans R.J., Li J., Peterson A. T., Graham C. H., Guisan A. (2008): Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions*, 14: 763–773. DOI: 10.1111/j.1472-4642.2008.00482.x
- WMO (2007): The Role of Climatological Normals in a Changing Climate. WCDMP-No. 61, WMO-TD/No. 1377, World Meteorological Organization

Internetes források:

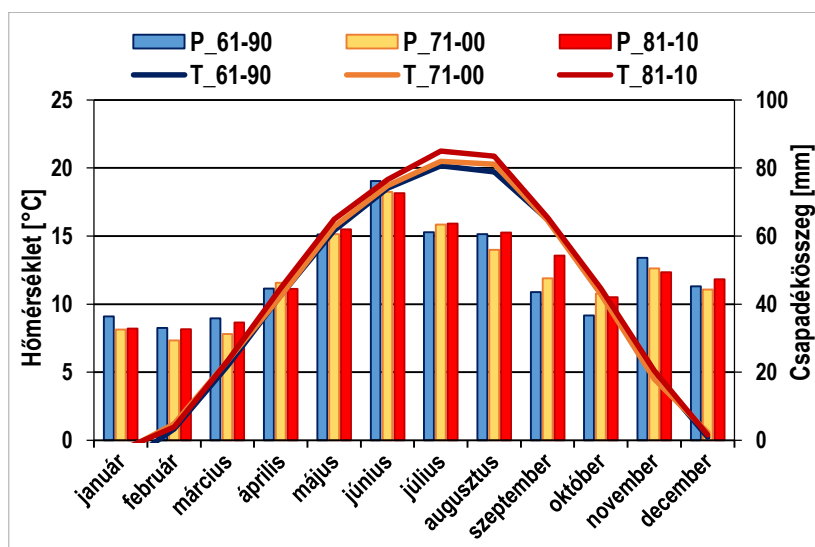
- <http://agrarklima2.nyme.hu/dtr> (utolsó letöltés: 2017. október 11.)
- <http://gis.ucmerced.edu/ModEco/> (utolsó letöltés: 2017. szeptember 2.)
- <http://portal.nebih.gov.hu/erdoleltar> (utolsó letöltés: 2017. február 23.)
- www.carpatclim-eu.org (utolsó letöltés: 2017. január 29.)
- www.co2.earth (utolsó letöltés: 2017. szeptember 10.)
- www.digiterra.hu (utolsó letöltés: 2017. szeptember 2.)
- www.efi.int (utolsó letöltés: 2017. március 3.)
- www.ensembles-eu.org (utolsó letöltés: 2017. február 14.)
- www.icp-forests.net (utolsó letöltés: 2017. március 3.)
- www.ipcc.ch (utolsó letöltés: 2017. január 7.)
- www.statsoft.com (utolsó letöltés: 2017. szeptember 2.)
- www.wmo.int (utolsó letöltés: 2017. január 7.)

15. MELLÉKLETEK

1. melléklet: Éghajlati szélsőségek mérőszámai (www.met.hu)

Rövidítés	Név	Definíció	Egység
SU	Nyári napok száma	$T_{\max} > 25 \text{ °C}$	nap
HEAT	Hőhullámok (1., 2. és 3. fokú)	$T_{\text{átlag}} \geq 25 \text{ °C}$ 1 napig / 3 napig vagy $\geq 27 \text{ °C}$ 1 napig / 3 napig	nap
TX30GE	Hőségnapok száma	$T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$	nap
TX35GE	Forró napok száma	$T_{\max} \geq 35 \text{ °C}$	nap
TN20GT	Trópusi éjszakák száma	$T_{\min} > 20 \text{ °C}$	nap
FD	Fagyos napok száma	$T_{\min} < 0 \text{ °C}$	nap
CFD	Egymást követő fagyos napok évi maximális száma	Azon napok száma, amikor $T_{\min} < 0 \text{ °C}$	nap
TX0LT	Téli napok száma	$T_{\max} < 0 \text{ °C}$	nap
TN-10LT	Zord napok száma	$T_{\min} < -10 \text{ °C}$	nap
CCD	Egymást követő száraz napok éves maximális száma	Azon napok, amikor $R_{\text{nap}} < 1 \text{ mm}$	nap
CWD	Egymást követő csapadékos napok évi maximális száma	Azon napok, amikor $R_{\text{nap}} \geq 1 \text{ mm}$	nap
RR0.1	0,1 mm csapadékot meghaladó napok száma	$R_{\text{nap}} \geq 0,1 \text{ mm}$	nap
RR1	1 mm csapadékot meghaladó napok száma	$R_{\text{nap}} \geq 1 \text{ mm}$	nap
RR5	5 mm csapadékot meghaladó napok száma	$R_{\text{nap}} \geq 5 \text{ mm}$	nap
RR10	Nagy csapadékú napok száma	$R_{\text{nap}} \geq 10 \text{ mm}$	nap
RR20	Extrém csapadékú napok száma	$R_{\text{nap}} \geq 20 \text{ mm}$	nap
RX1	Az év során mért legnagyobb 1-napi csapadék	Max (R_{nap}) egy évben	mm
RX5	Az év során mért legnagyobb 5-napos csapadék	Max (R_{nap} i, i+1, i+2, i+3, i+4)	mm
SDII	Napi csapadékintenzitási index	Teljes csapadékösszeg/csapadékos napok száma ($R_{\text{nap}} \geq 1 \text{ mm}$)	mm/nap
SPI	Standardizált Csapadék Index	Éves, vagy évszakos szinten: $(R - R_{\text{átlag}})/\text{szórás}$	számok
CEI	Extrém Éghajlati Index	Összetett: a szélsőségek által sújtott területet vizsgálja	

2. melléklet: Havi és évszakos éghajlati adatok (Carpatclim adatok; www.carpatclim.eu.org)



Havi átlaghőmérséklet és csapadékösszeg változás Magyarországon három 30 éves időszakban (1961-1990, 1971-2000, 1981-2010)

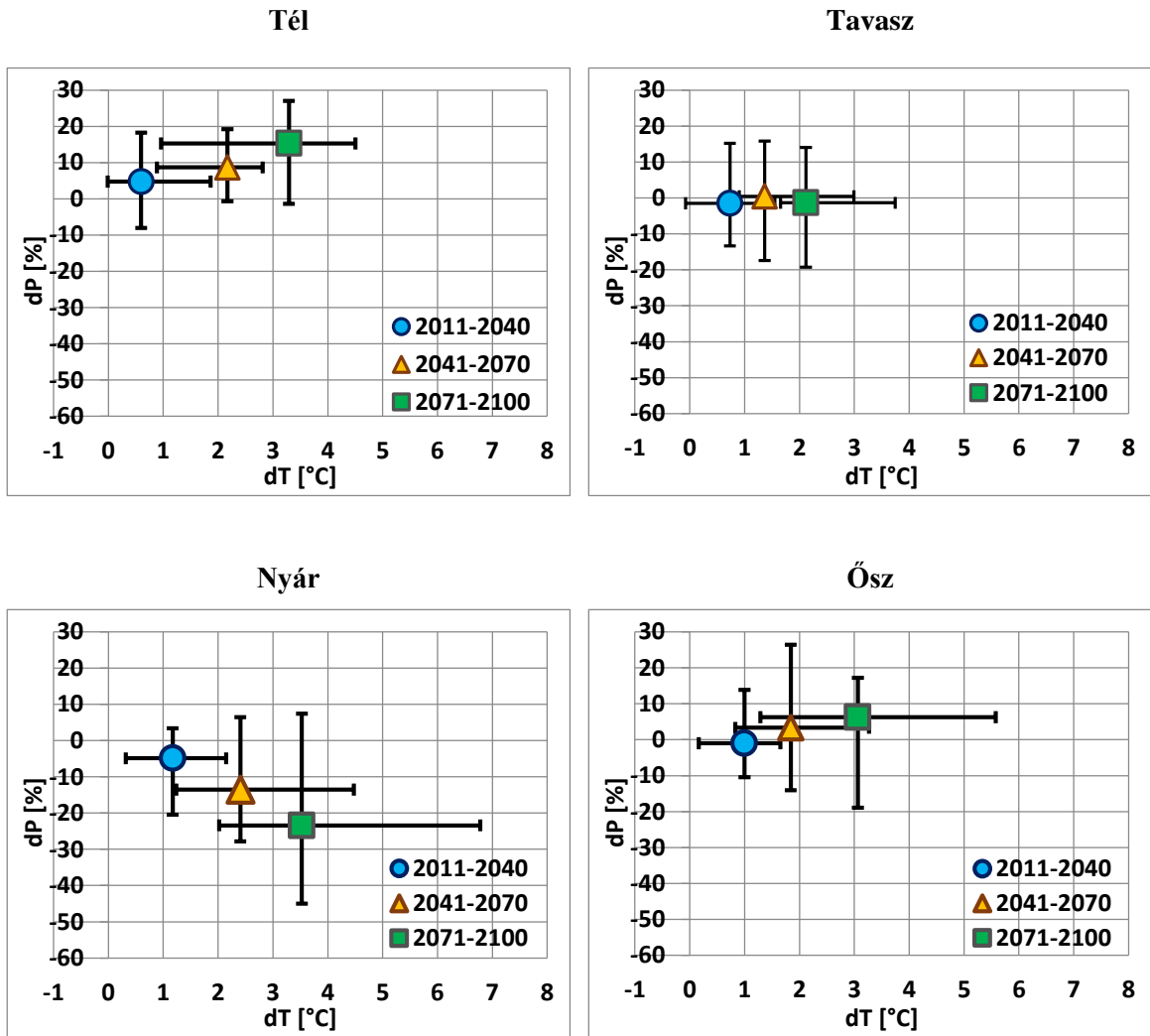
Évszakos átlaghőmérséklet [°C] és csapadékösszeg [mm] változás 1961-2010 között

	1961-1990		1971-2000		1981-2010	
	T [°C]	P [mm]	T [°C]	P [mm]	T [°C]	P [mm]
Tél	-0,3	114,6	0,2	106,1	0,2	112,8
Tavaszi	10,5	141,0	10,7	138,1	11,1	141,2
Nyár	19,5	201,8	19,8	193,4	20,4	197,3
Ősz	10,5	133,8	10,6	141,2	10,9	145,7

Évszakos átlaghőmérséklet [°C] és csapadékösszeg [%] változás összehasonlítva az 1981-2010 és 1961-1990 időszakokat

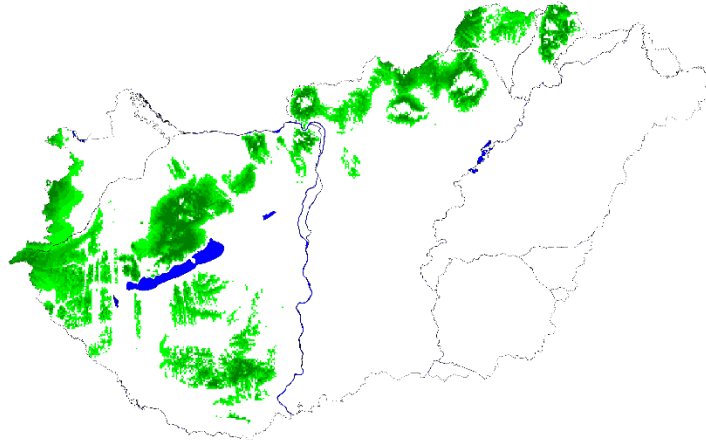
	1981-2010 vs. 1961-1990	
	dT [°C]	dP [%]
Tél	+0,5	-1,3
Tavaszi	+0,6	+0,1
Nyár	+0,9	-2,2
Ősz	+0,4	+8,9

3. melléklet: Becsült jövőbeli évszakos hőmérséklet és csapadékösszeg változás 12 regionális klímamodell szimuláció eredménye alapján

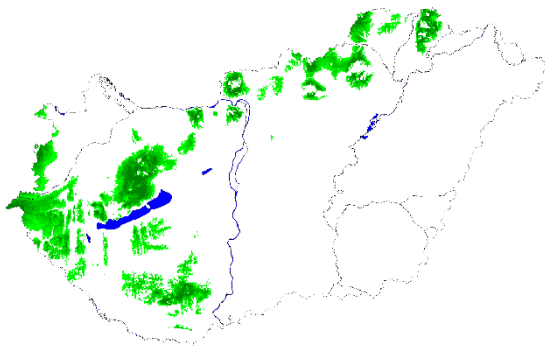


Hazai hőmérséklet és csapadékviszonyok becstelt változása a XXI. század végéig évszakos felbontásban 12 regionális klímamodell alapján. Kék körökkel a 2011-2040, narancssárga háromszögekkel a 2041-2071, zöld négyzetekkel a 2071-2100-as időszakok átlagai, vízszintes és függőleges hibasávokkal a modellekből származó bizonytalanságok láthatók.

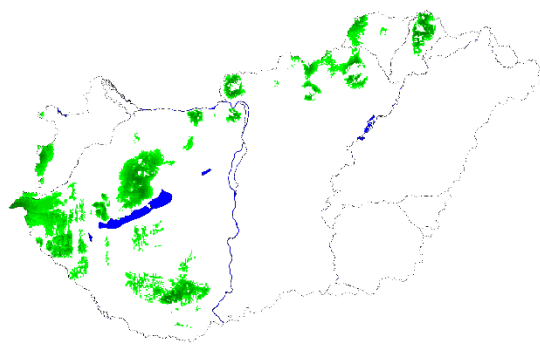
Jelenlegi potenciális elterjedés (1981-2010)



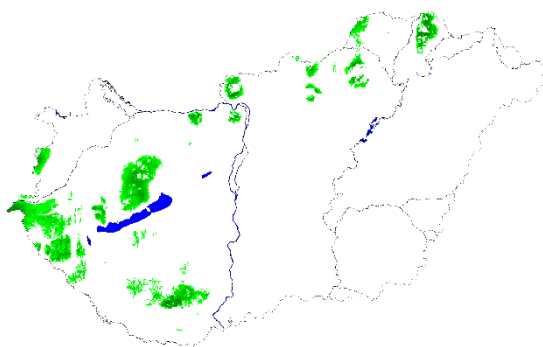
2011-2040 vs. 1981-2010



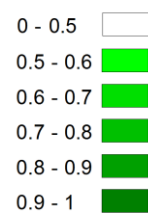
2041-2070 vs. 1981-2010



2071-2100 vs. 1981-2010

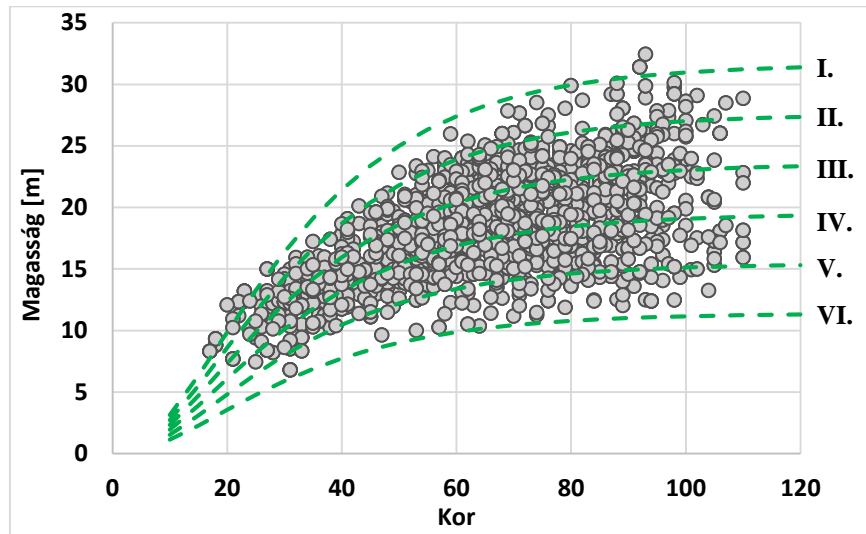


Maximális valószínűség



Kocsánytalan tölgy jelenlegi potenciális elterjedése és becsült jövőbeli változása 12 regionális klímamodell szimuláció átlaga alapján 3 időszakra (2011-2040; 2041-2070; 2071-2100) a maximális valószínűségi osztályozás módszerével. Osztályozás alapja: éves átlaghőmérséklet és növekedési időszak csapadékösszege (referencia időszak: 1981-2010)

5. melléklet: FNMI mintapontok kor-magasság diagramja



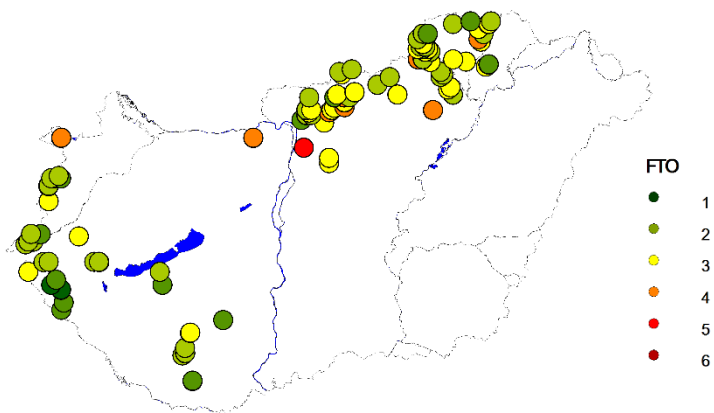
A kocsánytalan tölgyes FNMI adatok (584 mintapont) kor-magasság diagramja, szaggatott vonalakkal a fatermési osztályok (BÉKY, 1981)

6. melléklet: A főkomponens-, és faktor analízisek alkalmazhatóságát eldöntő korrelációs mátrix. Piros színnel az abszolút értékben nagyobb, mint 0,3-et meghaladó értékek

	FTK	FTO	T_{átlag}	T_{XI-III}	T_{IV-X}	T_{V-VIII}	T_{VII}	P	P_{XI-III}	P_{IV-X}	P_{V-VIII}	P_{VII}
FTK	1,000	-0,926	0,021	0,151	-0,076	-0,108	-0,117	0,565	0,457	0,504	0,387	0,215
FTO	-0,926	1,000	-0,006	-0,122	0,080	0,112	0,119	-0,487	-0,414	-0,423	-0,322	-0,167
T_{átlag}	0,021	-0,006	1,000	0,957	0,977	0,961	0,960	0,152	0,426	-0,045	-0,277	-0,419
T_{XI-III}	0,151	-0,122	0,957	1,000	0,873	0,841	0,840	0,389	0,607	0,173	-0,102	-0,366
T_{IV-X}	-0,076	0,080	0,977	0,873	1,000	0,997	0,996	-0,032	0,269	-0,204	-0,392	-0,435
T_{V-VIII}	-0,108	0,112	0,961	0,841	0,997	1,000	0,999	-0,085	0,210	-0,241	-0,416	-0,431
T_{VII}	-0,117	0,119	0,960	0,840	0,996	0,999	1,000	-0,100	0,204	-0,258	-0,430	-0,447
P	0,565	-0,487	0,152	0,389	-0,032	-0,085	-0,100	1,000	0,758	0,922	0,718	0,354
P_{XI-III}	0,457	-0,414	0,426	0,607	0,269	0,210	0,204	0,758	1,000	0,446	0,104	-0,277
P_{IV-X}	0,504	-0,423	-0,045	0,173	-0,204	-0,241	-0,258	0,922	0,446	1,000	0,924	0,651
P_{V-VIII}	0,387	-0,322	-0,277	-0,102	-0,392	-0,416	-0,430	0,718	0,104	0,924	1,000	0,851
P_{VII}	0,215	-0,167	-0,419	-0,366	-0,435	-0,431	-0,447	0,354	-0,277	0,651	0,851	1,000

7. melléklet: FNMI zonális mintapontok fatermési osztályainak becstült változása (éves átlaghőmérséklet, és a növekedési-, fő növekedési-, és kritikus időszak csapadékösszege alapján)

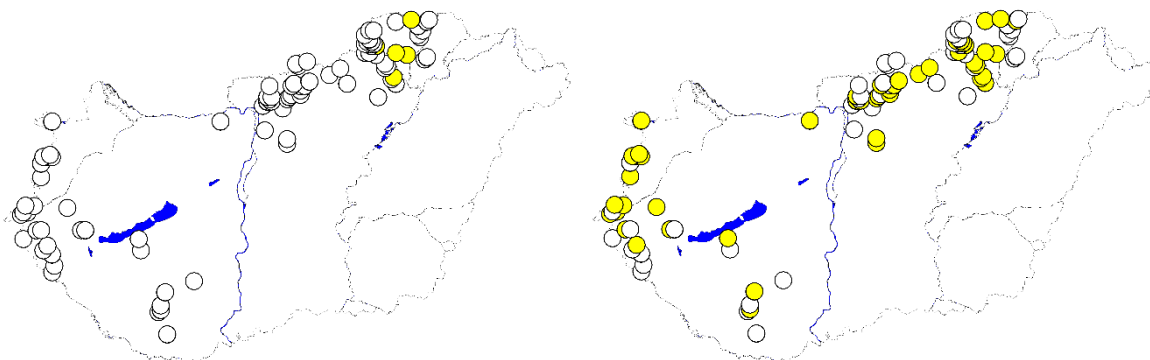
Jelenlegi fatermési osztályok (FNMI adatok)



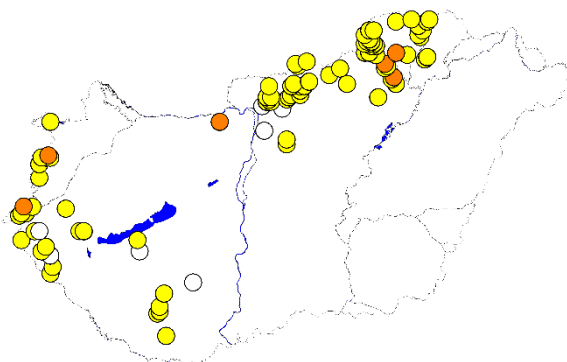
Fatermési osztály változás

2011-2040

2041-2070



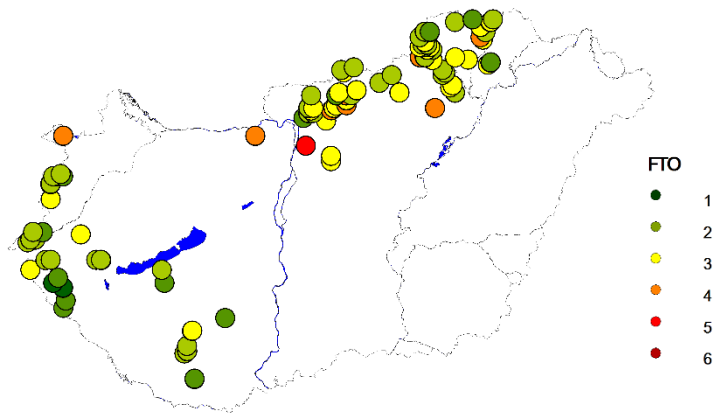
2071-2100



- két osztály - egy osztály nincs váltás

Jelenlegi, és becstült jövőbeli fatermési osztály változás 12 regionális klímamodell szimuláció átlagából az éves átlaghőmérséklet, és a növekedési-, fő növekedési-, és kritikus időszak csapadékösszege alapján

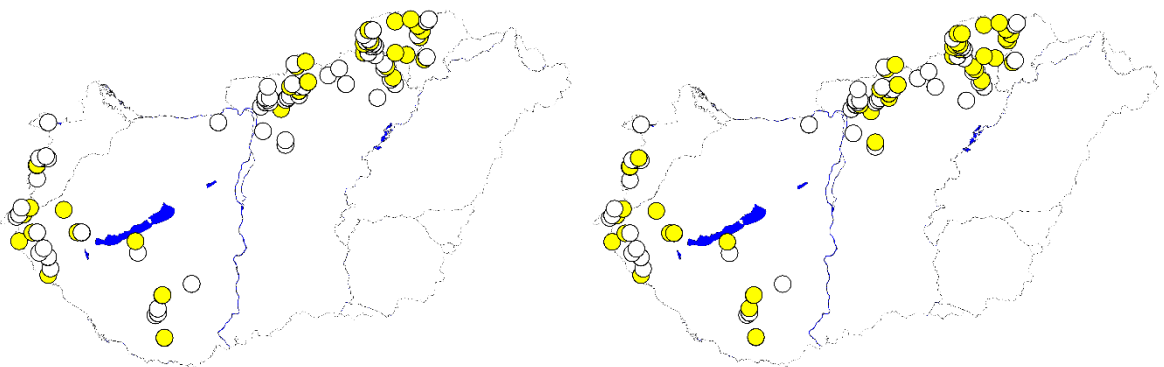
Jelenlegi fatermési osztályok (FNMI adatok)



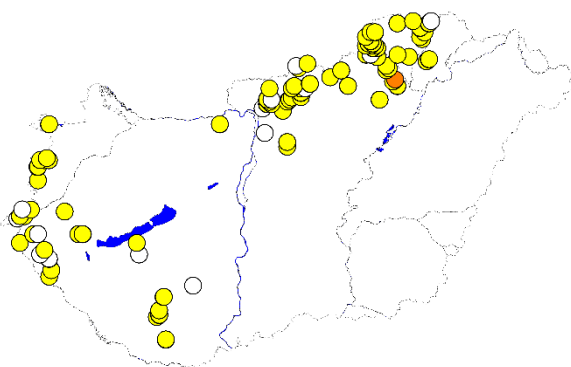
Fatermési osztály változás

2011-2040

2041-2070



2071-2100

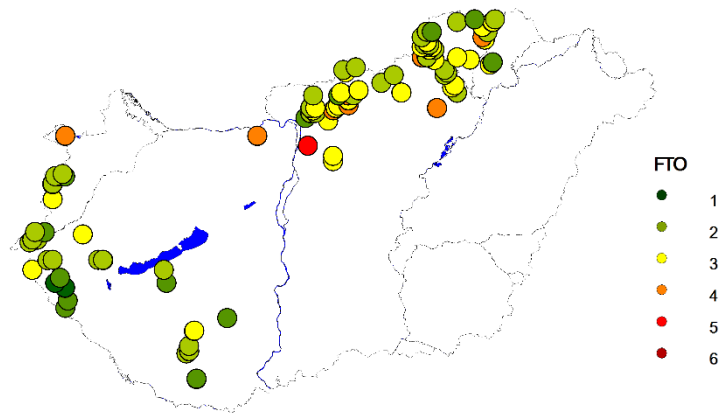


- két osztály - egy osztály nincs váltás
○ ○ ○

Jelenlegi és becült jövőbeli fatermési osztály változás 12 regionális klímamodell szimuláció átlagából az Ellenberg-index alapján

9. melléklet: FNM1 zonális mintapontok fatermési osztályainak becsült változása (Thorthwaite-féle szárazsági index alapján)

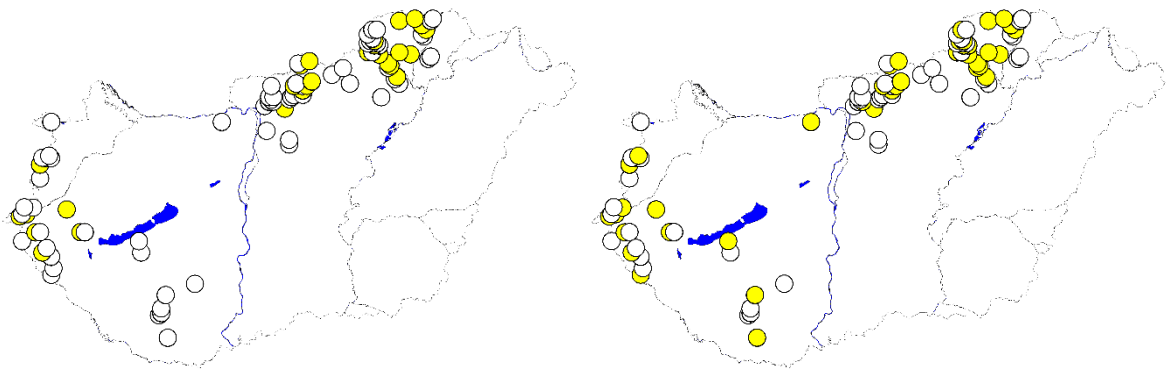
Jelenlegi fatermési osztályok (FNM1 adatok)



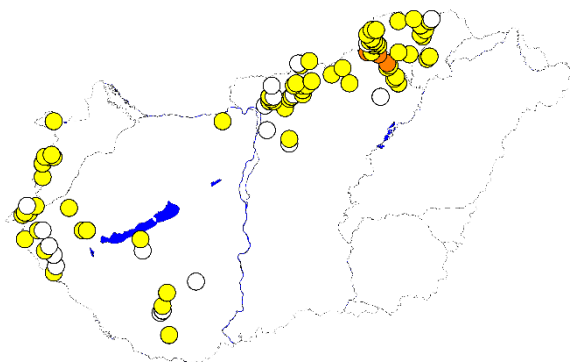
Fatermési osztály változás

2011-2040

2041-2070



2071-2100



- két osztály - egy osztály nincs váltás

Jelenlegi és becsült jövőbeli fatermési osztály változás 12 regionális klímamodell szimuláció átlagából a Thornthwaite-féle szárazsági index alapján