

# A KLÍMAVÁLTOZÁS NYOMÁN BEKÖVETKEZŐ FATERMÉS-VÁLTOZÁS BECSLÉSE A KOCSÁNYTALAN TÖLGY PÉLDÁJÁN

Illés Gábor

NAIK Erdészeti Tudományos Intézet

## Kivonat

A faállományok növekedésének vizsgálata az erdészeti kutatás egyik központi kérdése. A klímaváltozás várható hatásainak értékelésében is fontos ez a témakör. A klímaváltozás miatt az erdők növekedési feltételei is megváltoznak Közép-Európában és ezeket a változásokat általában kedvezőtlennek tekintjük. A növekvő gyakoriságú hőhullámok és aszályok limitálják a gazdaságilag fontos fajok növekedését. Ennek a kérdésnek a vizsgálatához a kocsánytalan tölgy növekedését értékeltük statisztikai alapokon a termőhelyi (bioklimatikus és talaj) paraméterekkel összefüggésben. A tanulmányban az Országos Erdőállomány Adattár 4594 fajfajórát dolgoztuk fel az elegyetlen, mag eredetű állományokra koncentrálván. A szükséges klimatikus adatokat a Climate EU adatbázis szolgáltatta. Az 1961-1990 közötti éveket tekintettük a klimatikus bázis időszaknak. A 2041-2070 közötti éveket tekintettük a megváltozott klímájú időszaknak az RCP 4.5 kibocsátási forgatókönyven alapuló klímamodellek előrejelzéseit használva. A nem klimatikus termőhelyi és talaj adatokat a legújabb magyarországi termőhelyi adatbázisokból vettük. Az R random forest csomagjával hoztunk létre predikciós modelleket a fatermési osztály becslésére a bázisidőszakra vonatkozóan a talajtani és bioklimatikus változók felhasználásával. A modell sorozat eredményeit adattári teszt területeken és az FNM pontokon teszteltük. A becslések pontossága relatív magas 62-83%-os értéket mutatott fatermési osztályonként 77%-os átlaggal. A modelleket a jövő időszakra nézve is lefuttattuk, hogy a fatermési osztály változásokat becsülni lehessen. Az eredmények azt mutatták, hogy a jó fatermési osztályú területek kiterjedése jelentősen lecsökken és várhatóan északi és nyugati irányba tolódik el a jövőben. Az Alpokalján, a Dél-Dunántúlon és a Dunántúli-Középhegységben a jó fatermési csoportba tartozó területek nagy valószínűséggel közepes, vagy gyenge fatermésű területekké válnak. Az Északi-Középhegységben nem változik jelentősen a fatermési osztályok előfordulási valószínűsége. Összességében a kocsánytalan tölgy fatermési potenciálja inkább kedvezőtlenebb irányba változik a következő évtizedekben.

*Kulcsszavak:* növedék, növedékbecslés, klímaváltozás, többváltozós statisztika.

## PREDICTING THE CLIMATE CHANGE INDUCED YIELD POTENTIAL CHANGES OF SESSILE OAK STANDS

### Abstract

Growth of forest stands is a central question in the field of forest research. Climate change impact assessment also assigns significance to this question. The growing conditions of forests are changing in Central Europe and the impacts of changes are generally considered to be disadvantageous. Increasing frequencies and duration of heat waves and droughts constrain the growing potential of industrially important species. For this reason a statistical evaluation of growth of sessile oak (*Quercus petraea*, Liebl) was conducted using site (bioclimate and soil) describing predictor variables. The study involved 4594 geo-referenced species records from the National Forestry Database. We focused on practically monoculture stands of seed origin. Climate variables were represented by the Climate EU database. The period of 1961-1990 was considered



as climatic baseline. The future, altered climate conditions were represented by the RCP 4.5 scenario based climate models for the period of 2041-2070. Soil and non-climate site data were added from the most recent spatial soil database of Hungary. The statistical random forest package of R was used to build classifiers for yield class predictions based on soil and bioclimatic variables for the reference period. The results of the model series were tested on test sites taken from the permanent yield monitoring plots and forestry database. It was found that predictions reached a relatively high 62-83% correct classification rates by yield classes performing on 77% as an average. Models were run using future climate datasets for the period of 2041-2070 in order to assess changes in future yield classes of forests. Results showed that the extent of the area of best yield classes will decrease, and the most suitable areas show a slight shift to west and to north. In the Pre-Alps region, in the South-Transdanubian region, and in the Transdanubian Mountainous region the well growing sessile oak areas will probably turn into medium or even poorly growing ones. In the same time in the Northern Mountainous region models did not predict significant changes in yield potentials. Overall growing conditions of sessile oak seem to be slightly worsening in the next decades.

*Keywords:* forest growth, yield assessment, climate change, multivariate statistics.

## BEVEZETÉS

### Növekedés és klímaváltozás

Számos tanulmány foglalkozott már a legfontosabb fajok klímaváltozásra adott növekedési és mortalitási válaszreakciójával klímaváltozási scenárió és földrajzi fekvés vonatkozásában. Lucfenyő esetében a lengyel Tátrában, 800-1500 m-es magasságban direkt kapcsolatot mutattak ki az évenkénti növekedési dinamika és a hőmérsékletváltozás között (Savva et al. 2006) felfedve egy pozitív növekedés visszacsatolást az emelkedő kora tavaszi és nyári hőmérsékletekkel. Alacsonyabb térszinteken, ahol a fajok növekedését nem a hőmérsékleti minimumok korlátozzák, némileg más a helyzet.

A növekvő hőmérséklet és a növekvő CO<sub>2</sub> koncentráció okozhat magasabb növekedési potenciált, amíg elegendő víz áll rendelkezésre. Az elmúlt évtizedek erdészeti irodalmának feldolgozását közlő cikkükben (Boisvenue és Running 2006) kimutatták, hogy azoknak az ökoszisztémáknak a többségében, amelyek nem víz limitáltak, a növekedési erély emelkedő trendet mutat a klímaváltozással. Vízlimitált ökoszisztémák esetében – általában alacsonyabb térszinteken – a hőmérséklet emelkedés együtt jár a vegetációs időszaki csapadék csökkenésével, ami magasabb mortalitási rátákhoz és csökkenő növekedési trendhez vezet (McDowell és Allen 2015, Mátyás és Sun 2014). Ezért nagyon valószínű, hogy a mortalitás a fenntarthatóságot befolyásoló tényező lesz Közép- és Délkelet-Európa azon térségeiben, ahol a zárt erdők és a füves puszták határterületei találhatóak. A helyzetet potenciálisan ronthatja a sekély és igen sekély termőhelyek esete, ahol a mortalitás még változatlan csapadékviszonyok mellett is nőhet. Ezért a fajok növekedési és mortalitási válaszreakcióinak ismerete az alsó, ún.: szárazsági erdőhatáron (Mátyás et al. 2009) kulcsfontosságú erdőgazdálkodási kérdés Magyarországon, ahol az erdők zöme érintett a következményeket illetően.

Ebből a szempontból, a hazánkban is jelentős fajok közül a legtöbbet vizsgált faj a bükk volt. A legtöbb szerző egyetért abban, hogy Dél-Európában, pontosabban a bükk déli

elterjedési határán jelentős növekedés visszaesés, vagy akár kihálási jelenségek is várhatóak (Jump et al. 2006, Geßler et al. 2006). Ezzel egybevágó eredményre jutottak hazai szerzők is az aszályok mortalitásra gyakorolt hatásának vizsgálatával (Rasztovits et al. 2014). Azokban a bükk populációkban viszont, amelyek a faj elterjedési területének belsejében helyezkednek el, messzebb az elterjedési terület peremétől csak csekély mértékben lehet megfigyelni a klímaváltozásra adott válaszreakciókat (Hartl-Meier et al. 2014).

Látható talán ebből a rövidebb áttekintésből is, hogy a fafajok klímaváltozásra adott válaszreakciói fafaj és termőhely függőek és földrajzilag is eltérőek. Ezért olyan kérdésekre, hogy milyen lesz egyes fafajok válaszreakciója a klímaváltozásra nem lehet sematizált válaszokat adni.

A válaszreakciók becslésére használt módszerek között általában többváltozós statisztikai módszereket találunk, amelyeket erdőtervi, hamis idősoros, általában nagy tömegű kiindulási adatbázisra építenek. De e mellett olykor kisebb számú, de sokkal részletesebben ismert mintára (származási kísérletek) épülő elemzések is léteznek. Ausztriában 2800 erdőleltár hálózati mintaterület talaj- és fatermési adata, valamint regionális klímamodellek adatai alapján készítettek térben explicit várható hatás vizsgálatot. Az elemzés kimutatta, hogy már 1°C-os hőmérséklet emelkedés változatlan csapadékviszonyok mellett is jelentős változásokat hozhat az ausztriai erdőkben. Magasabb térszinteken a lombhullató fajok versenyképesebbé válnak a fenyőkkel szemben, míg alsóbb térszinteken a luc állományok nem lesznek fenntarthatóak gazdasági rendeltetésű állományként (Lexer et al. 2002).

Német szakemberek klímaváltozás függő, tér- és időbeli – hamis idősoros – fatermőképességi potenciál (site index) modelleket fejlesztettek (Nothdurft et al. 2012). A kapcsolatot a fatermőképesség és a klimatikus változók között krigeléssel teremtették meg. A modellt meglévő erdészeti monitoring pontokra illesztették. Az eredmények azt mutatták, hogy Baden-Württemberg hegyvidéki, középhegységi régióiban a tölgy állományoknak alacsonyabb térszinteken is növekedhet a fatermési potenciálja.

A kocsánytalan tölgy esetében, annak különböző európai származásainak túlélését és növekedését vizsgálva nem pusztán erdőtervi, hanem konkrét populációk mérési adatai alapján különböző klímascenáriók függvényében (Sáenz-Romero et al. 2017) azt találták, hogy a Közép-Európában az RCP 4.5 scenárió esetén a kocsánytalan tölgy csak kisebb mértékű növedék veszteséssel és mortalitás növekedéssel fog reagálni. Az RCP 8.5-ös scenárió esetében viszont a faj populációinak drámai hanyatlása várható.

Egy másik növekedés változással foglalkozó tanulmány szerint, mely az Alföldtől a Nyugati-Kárpátokig vizsgálta a fafajok növekedését és az erdők szénkörforgalmát a luc és a bükk a leginkább veszélyeztetett faj, míg a tölgyek növekedési erélye akár nőhet is a klímaváltozás eredményeként (Hlásny et al. 2011).

A fenti tanulmányok azt sugallják, hogy magasabb térszinteken, vagy az elterjedési terület középső részein a klímaváltozás növekedésre gyakorolt hatásai sokkal kevésbé kritikusak, mint a határhelyzetben lévő populációk esetében. Ugyanakkor, elsősorban a klímaváltozási scenáriók függvényében főként a kocsánytalan tölgy megítélése kettős: A kisebb

„amplitúdójú” (RCP 4.5) klímaváltozási scenáriókra épülő növekedés becslések hajlamosak a kedvezőbb irányú változások prognosztizálására, míg az erősebb – RCP 8.5 – alapú becslések egyértelműen negatív jövőképet festenek e fajfaj számára.

### Korábbi saját vizsgálatok

Korábban már tettünk kísérletet a legfontosabb fajfajok fatermésváltozásának becslésére (Illés és Fonyó 2016). Akkor két regionális klímamodellt használtunk a projekciókhoz, az A1B kibocsátási scenárióra épülő ALADIN és a ReGCM modelleket. A fatermésváltozást erdőtervi adatokból, az 1961-1990 és az 1981-2010 jellemző fatermésértékeinek különbségként képeztük és additív módon vetítettük előre a jövő időszakokra nézve. A 2016-os vizsgálatban a klímátípust, a talajtípust, a termőréteg vastagságot és a textúra osztályt vettük figyelembe. A változásokat pedig a klímátípus váltás jelentette. Ez a meglehetősen egyszerű és nagyban sematizáló modellünk átlagosan egy-két fatermési osztálynyi romlást prognosztizált az ország nagy részén. Ezt a tér- és időbeli fatermésváltozás becslést fejlesztettük tovább a jelenlegi munkában, melyben frissítettük az alkalmazott klímamodelleket (az A1B helyett az újabb RCP scenáriókat alkalmazzuk), bővítettük a felhasznált adatok körét és felbontását (5 helyett 34 bemenő adatunk van, 10 és 1 km-es fedvények helyett, 1 km-es és 100 m-es fedvényeket használunk), fejlesztettük a módszereket (leíró statisztikák helyett többváltozós predikciós módszereket használunk).

### CÉLKITŰZÉS

Ebben a tanulmányban munkahipotézisként feltételezzük, hogy statisztikailag is kimutatható, szignifikáns kapcsolat van a megfelelően megválasztott termőhelyi paraméterek és a faállományok fatermési osztálya között, amely modellezhető. Klimatikus szempontból Magyarország az egyik leginkább veszélyeztetett európai ország a jövőben várható aszály és hőhullámok miatt. Ebből következően pedig kiemelt jelentőségű, hogy az erdészeti ágazatot ellássuk térbeli és időbeli projekciókkal az összes, gazdaságilag jelentős fajfaj (pl.: a kocsánytalan tölgy) növekedésére nézve. Ezért termőhelyi alapú, középtávú, empirikus növekedési modelleket hoztunk létre a növekedésváltozás becslésére.

### ANYAG ÉS MÓDSZER

A tanulmányban bizonyos alább részletezett feltételeknek megfelelően választott kocsánytalan tölgy állományok fajfajsortait használva, az állományok fatermési osztályainak (Béky 1981) termőhelyfüggő statisztikai modellezését végeztük el.

Az itt bemutatott megközelítés módszertani magja a következő: Azokat a mag eredetű kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea* Liebl.) állományokat vonjuk be az elemzésbe, amelyek

az uralkodó koronaszintet foglalják el, kvázi elegyetlenek, ami esetünkben a választott 75%-os, vagy magasabb elegyarány elérését jelenti. Koruknál fogva a klimatikus szempontból bázis időszaknak tekintett periódusban (1961-1990), vagy azt megelőzően jöttek létre (NÉBIH EI). A bázis időszak elnevezés arra utal, hogy ezt az időszakot gyakorlatilag a klímaváltozás hatásaitól mentesnek tekintjük. A feltételeknek megfelelő összes faállományt az erdőrészek súlyponti koordinátaival térinformatikai környezetben tároltuk. A bioklimatikus (a bázis és jövő időszakra nézve külön) és termőhelyi változókat – lásd később – ugyancsak térben explicit módon raszter állományokként ugyanabban a térinformatikai rendszerben tároltuk. Ez a modell környezet, ami a minta állományok növekedésére és környezeti feltétel-rendszerére egyaránt tartalmaz adatokat. A súlypontjukkal adott faállományokhoz mintavételezéssel hozzárendeltük a prediktorként használt változókat, így konkretizálva a térbeli kapcsolatokat. Az egyesített adatbázison random forest osztályozó algoritmust (Breiman 2001) tanítottunk R-programcsomagon belül, amely nem más, mint döntési fák erdeje. Az algoritmussal 500 döntési fából álló erdőt hoztunk létre, melyek mindegyike csak az adatok véletlenszerűen kiválasztott 2/3-án tanul és 1/3-n tesztl. A folyamat közben kitűnik, melyek a leghatékonyabb prediktor változók és torzítatlan becslést kapunk a modell hibájára nézve is. A modell létrehozása előtt optimalizáltuk a döntési fák egyes elágazásainál véletlenszerűen választandó prediktor változók számát.

A kész modell révén az ország teljes területéből azokra az erdőgazdasági tájakra és termőhelytípusokra készítettük el a pixel alapú becsléseket, amelyekben a kocsánytalan tölgynek kiemelkedő jelentősége van térfoglalásából adódóan: Alpokalja, Dél-Dunántúl, Dunántúli-Középhegység, Északi-Középhegység. Az eredményül kapott modellek becsléseiből az egyes fatermési osztályok térbeli előfordulási valószínűségét is megállapítottuk. A modelleket az eredmények független mintapontokon történt tesztelése után lefuttattuk a jövőre vonatkozó (2041-2070) klimatikus paraméterekkel is és a két időszak eredményeinek összehasonlítása révén nyílt lehetőség az időbeli változások becslésére.

A folyamat során építettünk Fournier és mtsai (2000) munkájában a térbeli modellek erdészeti alkalmazása tárgyban tett ajánlásaira.

### Erdőállomány adatok

A kocsánytalan tölgy állományok random forest algoritmust tanító adatai az Országos Erdőállomány Adattár 2006-os verziójából származtak.

Az akkori állapot szerint a kocsánytalan tölgy területaránya a faállománnyal borított területről 9,8%-ot tett ki (183 000 ha). Az élőfakészlete pedig 12,6% (45 millió m<sup>3</sup>) (NÉBIH EÁA 2006).

A fentebb leírt kiválasztási szempontoknak 3093 erdőrészlet felelt meg, 15,5 ezer ha faállománnyal borított területtel.

A modellek eredményeinek tesztelésére független mintaként az 1501 fiatalabb erdőrészet (1990 után keletkezettek), illetve az 50%-ot elérő, vagy meghaladó elegyarányban kocsánytalan tölgyet tartalmazó, első generációs (1993-97) FNM pontokat – 472 db – használtuk (NÉBIH EI).

### Klímaadatok

A klimatikus adatok a Climate EU adatbázisból származtak, amely klimatikus és bioklimatikus adatokat egyaránt biztosított a bázis-, és a jövő időszakokra nézve (Hamann et al. 2013). Bázis időszakként a már korábban említett 1961-1990 közötti évek klimatikus adatait használtuk. A jövő időszakot az RCP 4.5 kibocsátási scenárión alapuló klímamodellek (IPSL-CM5A-MR) EU-ra vonatkozó becslései adták a 2041-2070 közötti évekre nézve (Wang et al. 2016). Az alábbi bioklimatikus változók statisztikai úton leskálázott 1 km x 1 km-es modelljeit használtuk:

MWMT: legmelegebb hónap átlaghőmérséklete (°C),  
MCMT: leghidegebb hónap átlaghőmérséklete (°C),  
MSP: átlagos vegetációs csapadékösszeg május-szeptember (mm),  
SH:M: nyári hő-nedvesség index  $((MWMT)/(MSP/1000))$ ,  
DD<0: foknap érték 0°C alatt, fagyos napok,  
DD>5: foknap érték 5°C felett, vegetációs napok,  
DD<18: foknap érték 18°C alatt, hűvös napok,  
DD>18: foknap érték 18°C felett, meleg napok,  
CMD: klimatikus nedvesség deficit érték, ami a párolgási kényszer és a rendelkezésre álló csapadék közti különbséget jellemzi,  
FAI: erdészeti aszályosság index (Führer et al. 2011),  
TD: a legmelegebb és leghidegebb hónapok átlaghőmérsékleti különbsége,  
EMT: extrém minimum hőmérséklet,  
Évszakos minimum, átlag és maximum hőmérsékletek,  
Évszakos csapadékösszegek.

### Egyéb termőhelyi adatok

Az egyéb termőhelyi adatok forrása az MTA TAKI-val közösen létrehozott, országos termőhelyi adatbázis volt, melyről korábban az Erdészettudományi Közleményekben és nemzetközi publikációban adtunk számot (Illés et al. 2016, Pásztor et al. 2018). Ezek a térképi adatok a talajtípusról, termőréteg vastagságról, a fizikai féleségről és a hidrológiai kategóriáról adnak információt. Azért ezeket a térképi fedvényeket használtuk, mert egységesen lefedik az ország teljes területét, míg az adattári termőhelyi adatok kizárólag erdőterületekre vonatkozóan érhetők el.

A fentiek mellett a tengerszint feletti magasságot használtuk még prediktor változóként.

## EREDMÉNYEK ÉS MEGVITATÁSUK

Az eredménytérképek alapján tudjuk megbecsülni a regionális és időszaki változásokat az egyes fatermési osztályok előfordulási valószínűségében a kocsánytalan tölgy esetében. Le kell szögezni, hogy a statisztikai megközelítés önmagában nem alkalmas minden kérdés megválaszolására. A megközelítés előnye azonban, hogy sok adatra támaszkodva robosztus eredményekre képes.

### A legfontosabb hatótényezők, amik a fatermési osztály becslését meghatározták

A vizsgálatba vont prediktor változók közül a legfontosabb hat a következő volt:

- FAI,
- nyári csapadékösszeg,
- termőréteg vastagság,
- tengerszint feletti magasság,
- talajtípus,
- téli csapadékösszeg.

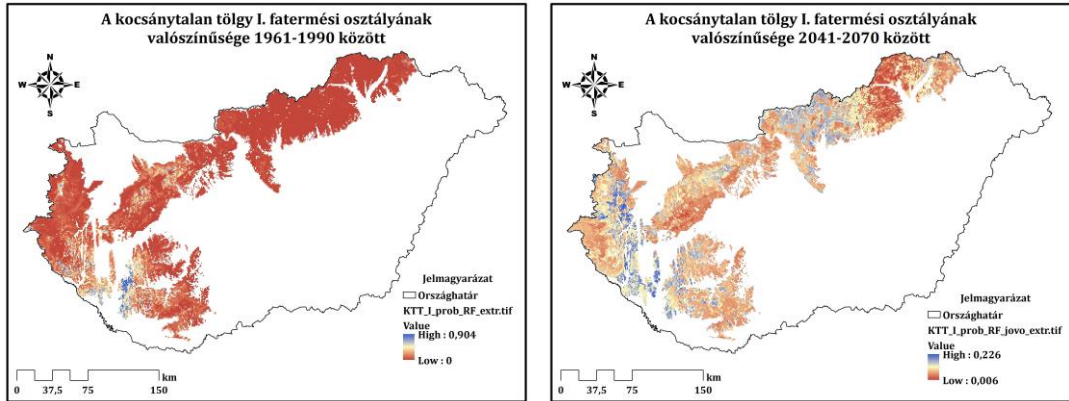
### Fatermési osztályok valószínűségi térképei a múlt és a jövő időszakokra

Az 1-6. ábrák mutatják be a kocsánytalan tölgy fatermési osztályainak előfordulási valószínűség térképeit 500 döntési fából álló modell egyes fainak eredményei alapján. A térképeket fatermési osztályonként külön érdemes értelmezni. Egy adott fatermési osztályra nézve a valószínűség 0 és 1 közötti értékeket vehet fel. Az érték 1,0 abban az esetben, ha mind az 500 fa egyazon fatermési osztályt adja eredményül egy kérdéses térképi ponton. Egyhez közeli értékek ezért a döntési fák közti egyetértést tükrözik. Minél kisebb a valószínűség értéke annál kevesebb fa adja eredményül a kérdéses fatermési osztályt a modellben. Nulla esetén egyetlen fa sem adja eredményül a kérdéses osztályt. Amennyiben az egyes osztályok térképeinek maximum értéke alacsony, az azt jelenti, hogy csekély egyetértés van a döntési fák között. 0,3-as maximum érték például azt jelenti, hogy csak a fák 30%-a adja eredményül az adott osztályt. A térképpárok a bázis időszaki, 1961-1990 közötti és a jövőre vonatkozó 2041-2070 közötti időszakok valószínűség értékeit mutatják azokra az erdőgazdasági tájakra vonatkoztatva, amelyekben jelentős szerepet játszik a kocsánytalan tölgy és ezen belül is csak azokra a talajtípusokra, amelyeket a mintaterületek reprezentáltak.

A fatermési osztályok előfordulási valószínűsége alapján a legjobb növekedést nyújtó területek Nyugat- és Dél-Nyugat Magyarországon, a dombvidékek jól fejlett és mély talajain, valamint a Bakonyban találhatóak (1-2. ábra, baloldal).

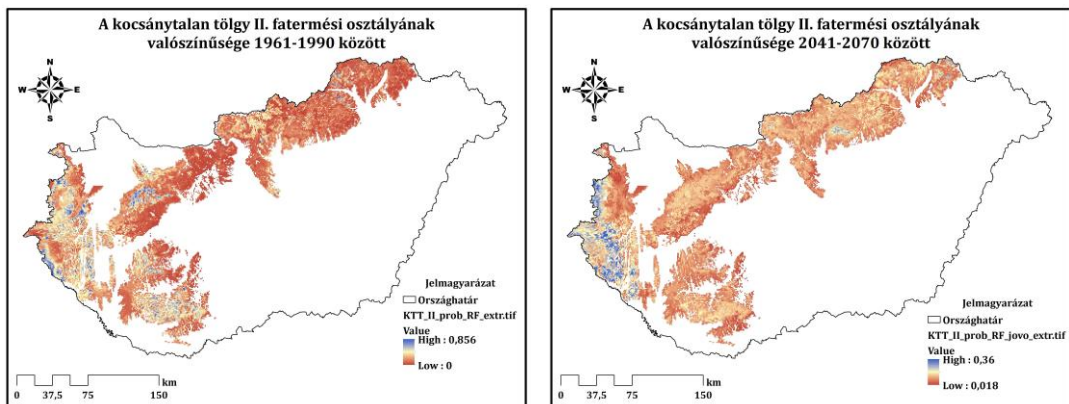
Közepes növekedésű területeket találunk zömmel az Északi-Középhegység dombvidéki területein, kisebb arányban a Dunántúli-Középhegység alacsonyabb térszintű, északias részein, valamint a Nyugat-Dunántúlon (3-4. ábra, baloldal).

Végül, a legmagasabb térszintek sekély talajain – főleg déli kitettségű oldalakon –, együtt a Közép-magyarországi dombvidéki területekkel található a leggyengébb növekedésű kocsánytalan tölgyesek (5-6. ábra, baloldal).



1. ábra: A kocsánytalan tölgy I. fatermési osztályának valószínűségi térképe 1961-1990 (bal) és 2041-2070 (jobb) időszakokban.

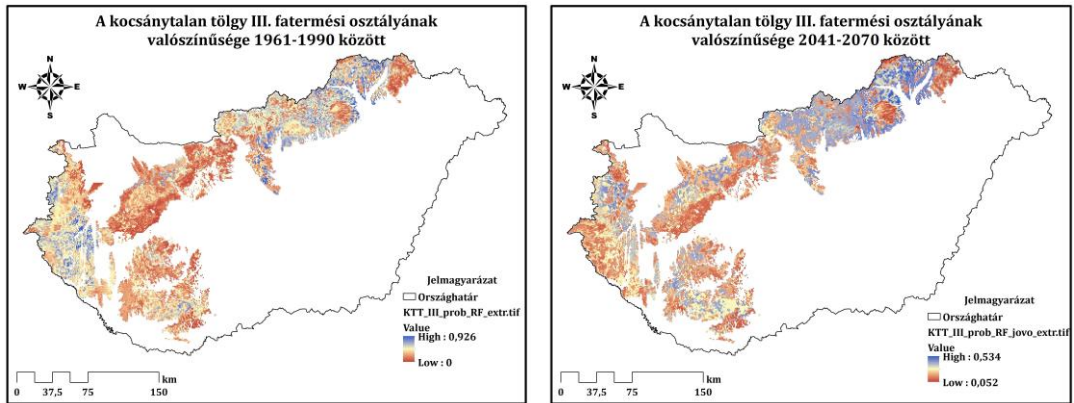
Figure 1: 1st yield class probability map of sessile oak for the period of 1961-1990 (left) and 2041-2070 (right).



2. ábra: A kocsánytalan tölgy II. fatermési osztályának valószínűségi térképe 1961-1990 (bal) és 2041-2070 (jobb) időszakokban.

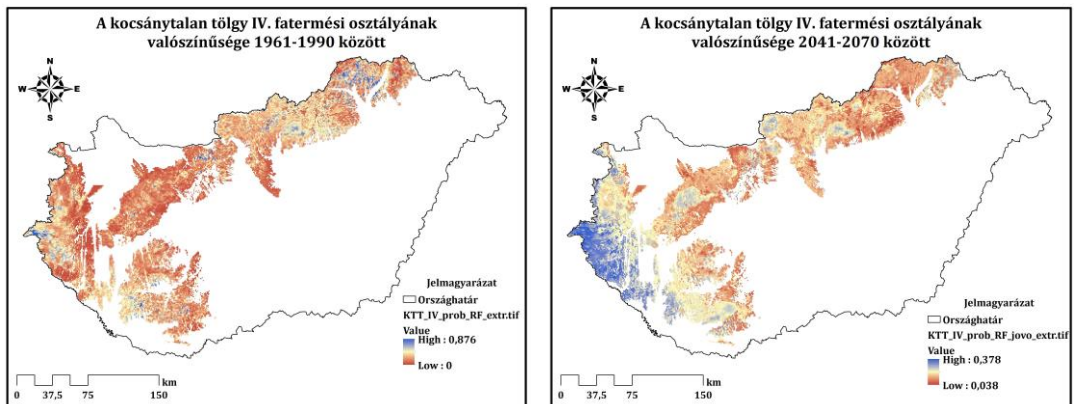
Figure 2: 2nd yield class probability map of sessile oak for the period of 1961-1990 (left) and 2041-2070 (right).





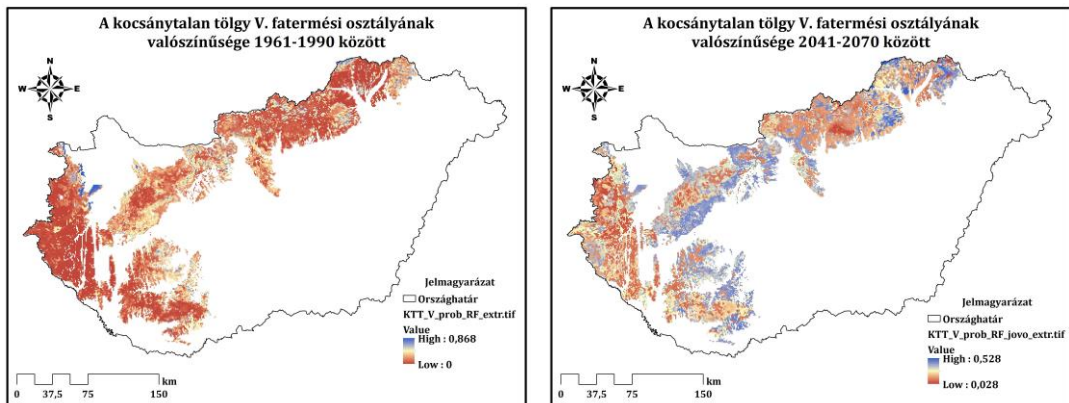
3. ábra: A kocsánytalan tölgy III. fatermési osztályának valószínűségi térképe 1961-1990 (bal) és 2041-2070 (jobb) időszakokban.

Figure 3: 3rd yield class probability map of sessile oak for the period of 1961-1990 (left) and 2041-2070 (right).



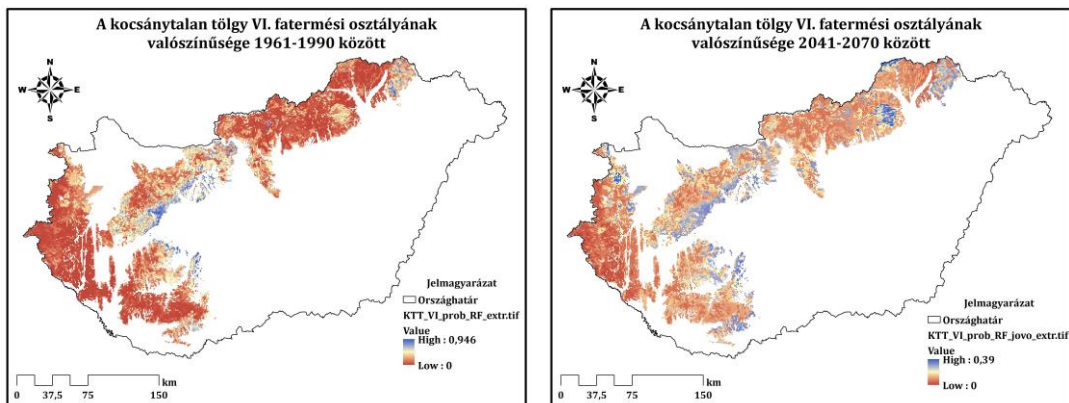
4. ábra: A kocsánytalan tölgy IV. fatermési osztályának valószínűségi térképe 1961-1990 (bal) és 2041-2070 (jobb) időszakokban.

Figure 4: 4th yield class probability map of sessile oak for the period of 1961-1990 (left) and 2041-2070 (right).



5. ábra: A kocsánytalan tölgy V. fatermési osztályának valószínűségi térképe 1961-1990 (bal) és 2041-2070 (jobb) időszakokban.

Figure 5: 5th yield class probability map of sessile oak for the period of 1961-1990 (left) and 2041-2070 (right).



6. ábra: A kocsánytalan tölgy VI. fatermési osztályának valószínűségi térképe 1961-1990 (bal) és 2041-2070 (jobb) időszakokban.

Figure 6: 6th yield class probability map of sessile oak for the period of 1961-1990 (left) and 2041-2070 (right).

A jövőre vonatkozó fatermési osztály valószínűségi térképek a bázis időszaktól eltérő térbeli mintázatot mutatnak.

A jövőre vonatkozó becslések esetében feltűnő, hogy a modell döntési fáinak között csökken az egyetértés, vagyis megnő a becslések bizonytalansága. Ettől függetlenül megállapítható, hogy a legjobb fatermési osztályok előfordulási valószínűségének maximális értékei egyértelmű nyugati, északi és növekvő tengerszint feletti magasság irányú eltolódást mutatnak (2-3. ábra, jobb oldal). Érdekes adalék, hogy az I. fatermési osztály előfordulási valószínűség

értékei általánosan növekedést mutatnak, de a valószínűségi értékek bőven az 50%-os érték alatt maradnak. A II. fatermési osztály esetében a magas valószínűségi értékek eltűnnek Délnyugat-Magyarországról és csak az Alpoknál valamint a Zempléni-hegységben, a Börzsönyben és a Mátrában maradnak magasabb (0,36) valószínűségi zónába eső területek. A III. fatermési osztály előfordulási valószínűsége nyugati irányban növekvő értékeket mutat, kiterjedve a Délnyugat-dunántúli régióra (4-5. ábra, jobb oldal). Ugyanakkor valószínűsége Észak-Magyarországon ugyancsak növekszik. A IV. fatermési osztály ugyancsak nyugati, délnyugati irányban mutat nagyobb valószínűségi értékeket. E két fatermési osztály esetében azonban érdemes figyelembe venni, hogy a legmagasabb valószínűségi értékek 0,4-0,5 körüliek, tehát a modellek e két osztály esetében is jobban szórtak eredményeikben. A kimondottan gyenge fatermési osztályok (V-VI) nagy valószínűségű területei növekszenek leginkább, és itt megfigyelhető egy déli, délnyugati irányú elmozdulás (5-6. ábra, jobb oldal). Az eredmények azt mutatják, hogy a kocsánytalan tölgy növekedési feltételei inkább gyengülnek a század közepére, ha az RCP 4.5 kibocsátási forgatókönyv szerinti klímamodellek válnak valóra.

Erdőgazdasági táj szinten a klímaváltozás kedvezőtlen hatásai súlyosan érinthetik majd a Dél-Dunántúlt (Somogy, Tolna és Baranya megyét), ahol a legjobb növekedésű területek közepes, vagy éppen gyenge kategóriába kerülhetnek át.

### A becslések pontosságáról

A modellek becsléseinek pontossági tesztelése megerősítette azt az előzetes feltevést, hogy az esetek többségében a módszer robosztus és kiegyensúlyozott eredményt szolgáltat. Az 1. táblázat foglalja össze a helyesen osztályozott esetek részarányát.

1. táblázat: A helyesen osztályozott FNM és adattári teszterületek százalékos aránya.

Table 1: Proportion of correctly classified FNM test sites.

Fafaj	Adattári teszt*	FNM pontok*
Kocsánytalan tölgy	71,6%	68,7%

\* A becsléseket akkor fogadtuk el, ha a becsült fatermési osztály értéke max. +/- 1 fatermési osztállyal tért el a valós értéktől.

A modellek egyes fatermési osztályokra vonatkozó legjobb találati eredményeit a 2. táblázatban foglaltuk össze. Az eredmények harmonizálnak a bevezetésben bemutatott azon korábbi munkák eredményeivel, melyek a kocsánytalan tölgy Közép-európai növekedésbeli válaszreakcióját helyezték fókuszba és a növekedési erély csökkenését prognosztizálták. Ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy a jövőre vonatkozó becslések nagymértékű szóródása még mindig elég magas ahhoz, hogy véglegesnek tekintsük ezeket az eredményeket. Ennek megfelelően a kocsánytalan tölgy állományok várhatóan fenntartják eddigi fatermési potenciáljukat az Alpoknál és az Északi-középhegység legészakibb és legmagasabb tájain. El-

lenben visszaesés várható a növekedésben elsősorban a Dél-dunántúli tájakon és a Dunántúli-Középhegységben. Mindez természetesen a feltételezett, RCP 4.5 szcenárió szerinti modellek megvalósulása esetén várható (Sáenz-Romero et al. 2017).

2. táblázat: A modellek fatermési osztályonként elért legjobb eredményei az FNM pontokon.  
Table 2: Best classification results of the 20 models by yield classes on FNM test sites.

Fatermési osztály	Találati % érték
I.	62,4%
II.	61,9%
III.	73,5%
IV.	80,5%
V.	82,5%
VI.	81,6%

## KONKLÚZIÓK

Az eredmények alátámasztják, hogy a fejlett statisztikai módszerek alkalmasak nagy elemszámú termőhelyi adatbázisok és erdészeti adatok felhasználásával a faállományok növekedés potenciáljának modellezésére. Kihhasználva a számítástechnikai kapacitásokat, több egyenlő valószínűségű mintával végzett modellezéssel, mint a sztochasztikus szimuláció esetében, a termőhely függő fatermési mintázat felderíthető és valószínűségi változóként értelmezhető. Ezek a modell sorok alkalmasak lehetnek a növekedési jellegzetességek tér- és időbeli vizsgálatára, ezért a modellépítést kiterjesztettük a többi gazdaságilag fontos fajra is. Az további vita tárgya lehet, hogy mennyire használhatók az efféle sztochasztikus modellek a jövőre vonatkozó becslések elkészítésében. Véleményünk szerint rövidtávú (10-20 év) és középtávú (30-50 év) előrementszések megtehetőek, amennyiben a prediktor változók értékészlete a modell alapját képező időszakban és a célidőszakban kellő mértékű átfedést mutat. Az, hogy ez esetben mi a kellő mérték, még további diszkussziót igényel. Egy megoldást jelenthet, ha a mozgó átlagok elven alapulva, aktuális tény adatokkal mindig újrakalibráljuk a modelleket, így mindig csak az aktuális, például 30 éves időszakokat kell előre metszeni.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munkát az Agrárklíma 2 projekt finanszírozta (VKSZ\_2012-1-2013-0034).

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- Béky A. 1981: Mag eredetű kocsánytalan-tölgyesek fatermése. Erdészeti Kutatások 74: 309-320.
- Boisvenue C. & Running S.W. 2006: Impacts of climate change on natural forest productivity - evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology* 12: 862–882. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2006.01134.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01134.x)
- Breiman L. 2001: Random forests. *Machine Learning* 45: 5–32. DOI: [10.1023/A:1010933404324](https://doi.org/10.1023/A:1010933404324)
- Fournier R.A., Guindon L., Bernier P.Y., Ung C.H. & Raulier F. 2000: Spatial implementation of models in forestry. *The Forestry Chronicle* 76: 929–940. DOI: [10.5558/tfc76929-6](https://doi.org/10.5558/tfc76929-6)
- Führer E., Horváth L., Jagodics A., Machon A. & Szabados I. 2011: Application of a new aridity index in Hungarian forestry practice. *Időjárás* 115: 205–216.
- Geßler A., Keitel C., Kreuzwieser J., Matussek R., Seiler W. & Rennenberg H. 2006: Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate. *Trees* 21: 1–11. DOI: [10.1007/s00468-006-0107-x](https://doi.org/10.1007/s00468-006-0107-x)
- Hamann A., Wang T., Spittlehouse D.L. & Murdock T.Q. 2013: A comprehensive, high-resolution database of historical and projected climate surfaces for western North America. *Bulletin of the American Meteorological Society* 94: 1307–1309. DOI: [10.1175/BAMS-D-12-00145.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00145.1)
- Hartl-Meier C., Dittmar C., Zang C. & Rothe A. 2014: Mountain forest growth response to climate change in the Northern Limestone Alps. *Trees* 28: 819–829. DOI: [10.1007/s00468-014-0994-1](https://doi.org/10.1007/s00468-014-0994-1)
- Hlasny T., Barcza Z., Fabrika M., Balázs B., Churkina G., Pajtik J. et al. 2011: Climate change impacts on growth and carbon balance of forests in Central Europe. *Climate Research* 47: 219–236. DOI: [10.3354/cr01024](https://doi.org/10.3354/cr01024)
- Illés G. & Fonyó T. 2016: A klímaváltozás fatermésre gyakorolt várható hatásának becslése az AGRATÉR projektben. *Erdészettudományi Közlemények* 6(1): 25–34. DOI: [10.17164/EK.2016.003](https://doi.org/10.17164/EK.2016.003)
- Illés G., Fonyó T., Pásztor L., Bakacsi Zs., Laborczí A., Szatmári G. et al. 2016: Az Agrárklíma 2 projekt eredményei: Magyarország digitális talajtípus térképének előállítás. *Erdészettudományi Közlemények* 6(1): 17–24. DOI: [10.17164/EK.2016.002](https://doi.org/10.17164/EK.2016.002)
- Jump A.S., Hunt J.M. & Peñuelas J. 2006: Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology* 12(11): 2163–2174. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2006.01250.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01250.x)
- Lexer M.J., Hönninger K., Scheifinger H., Matulla Ch., Groll N., Kromp-Kolb H. et al. 2002: The sensitivity of Austrian forests to scenarios of climatic change: a large-scale risk assessment based on a modified gap model and forest inventory data. *Forest Ecology and Management* 162: 53–72. DOI: [10.1016/S0378-1127\(02\)00050-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00050-6)
- Mátyás Cs. & Sun G. 2014: Forests in a water limited world under climate change. *Environmental Research Letters* 9: 085001. DOI: [10.1088/1748-9326/9/8/085001](https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/8/085001)
- Mátyás Cs., Vendramin G.G. & Fady B. 2009: Forests at the limit: evolutionary — genetic consequences of environmental changes at the receding (xeric) edge of distribution. Report from a research workshop. *Annals of Forest Science* 66: 800. DOI: [10.1051/forest/2009081](https://doi.org/10.1051/forest/2009081)
- McDowell N.G. & Allen C.D. 2015: Darcy's law predicts widespread forest mortality under climate warming. *Nature Climate Change* 5: 669–672. DOI: [10.1038/nclimate2641](https://doi.org/10.1038/nclimate2641)
- Nothdurft A., Wolf T., Ringeler A., Böhner J., Saborowski J. 2012: Spatio-temporal prediction of site index based on forest inventories and climate change scenarios. *Forest Ecology and Management* 279: 97–111. DOI: [10.1016/j.foreco.2012.05.018](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.05.018)
- Pásztor L., Laborczí A., Bakacsi Zs., Szabó J., Illés G. 2018: Compilation of a national soil-type map for Hungary by sequential classification methods. *Geoderma* 311: 93–108. DOI: [10.1016/j.geoderma.2017.04.018](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.018)
- Rasztovits E., Berki I., Mátyás Cs., Czímber K., Pöztelsberger E., Móríc N. 2014: The incorporation of extreme drought events improves models for beech persistence at its distribution limit. *Annals of Forest Science* 71(2): 201-210. DOI: [10.1007/s13595-013-0346-0](https://doi.org/10.1007/s13595-013-0346-0)



- Sáenz-Romero C., Lamy J-B., Ducousso A., Musch B., Ehrenmann F., Delzon S. et al. 2017: Adaptive and plastic responses of *Quercus petraea* populations to climate across Europe. *Global Change Biology* 23(7): 2831–2847. DOI: [10.1111/gcb.13576](https://doi.org/10.1111/gcb.13576)
- Savva Y., Oleksyn J., Reich P.B., Tjoelker M.G., Vaganov E.A., Modrzynski J. 2006: Interannual growth response of Norway spruce to climate along an altitudinal gradient in the Tatra Mountains, Poland. *Trees* 20: 735–746. DOI: [10.1007/s00468-006-0088-9](https://doi.org/10.1007/s00468-006-0088-9)
- Wang T., Hamann A., Spittlehouse D. & Carroll C. 2016: Locally Downscaled and Spatially Customizable Climate Data for Historical and Future Periods for North America. *PLoS One* 11: e0156720. DOI: [10.1371/journal.pone.0156720](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156720)

*Érkezett: 2018. május 6.*

*Közlésre elfogadva: 2018. május 29.*