

Bede-Fazekas Ákos¹

A KLÍMAVÁLTOZÁS HATÁSÁNAK MODELLEZÉSE NÖVÉNYFÖLDRAJZI EGYSÉGEKEN A MESTERSÉGES NEURONHÁLÓK SEGÍTSÉGÉVEL²

BEVEZETÉS

Napjaink magas horizontális felbontású és nagy megbízhatóságú regionális klímamodelljei olyan adatokat szolgáltatnak a Kárpát-medence 21. században várható klímájáról, melyekre a botanikának (Czúcz 2010), tájépítészetnek (Bede-Fazekas 2012a) és erdészettudomány (Mátyás et al. 2010, Führer et al. 2010, Czúcz et al. 2011) reagálnia kell. A várhatóan melegebb, nyáron csapadékszegényebb, a hidegebb félévben extrém csapadékokkal jobban terhelt jövőbeli klímánk (Bartholy et al. 2007, Bartholy és Pongrácz 2008) mind a természetes, mind a telepített növénytakaró összetételében változást fog kikényszeríteni. Habár a tájépítészet a klímavédelemben is hathatós szerepet játszhat, szükségszerű hangsúlyozni az alkalmazkodás megkerülhetetlenségét, melyre az intenzív fenntartási módszerek nem nyújtanak megoldást (Bede-Fazekas 2011). Az alkalmazkodás tájépítészeti eszköztárából kiemelkedik a kertépítészeti dísznövény-alkalmazási szortiment újragondolása, melyre több javaslat készült (Schmidt 2006, Szabó és Bede-Fazekas in press).

A különböző klímamodellek táblázatos adattömegéből térinformatikai szoftver segítségével térképes vizualizáció állítható elő, mely nem csak a szakemberek által értelmezhető, hanem széles körben is jól alkalmazható a klímaváltozás irányának és mértékének szemléltetésére (Czinkócky és Bede-Fazekas 2012). Elmondható ez különböző modellezési témákra, beleértve a hazánkban várhatóan megjelenő mediterrán növényfajok areáját, a hazánk területéről északra migráló növényfajok areáját, továbbá a hazánkba áthelyeződő vagy onnan elmozduló növényföldrajzi egységeket és a flóraválasztókat. A dolgozat összegzi e kutatási irány eddigi eredményeit különös hangsúlyt helyezve a modell finomításának lehetőségeire, beleértve a különböző mesterségesintelligencia-algoritmusok alkalmazásának lehetőségeit.

IRODALMI ÁTTEKINTÉS

A 21. századi Kárpát-medence növényzetét és a medencébe telepíthető növények körét vizsgáló klímamodellekre kevés példa akad. Ugyanakkor számos kutatás hozható összefüggésbe e modellezési iránnyal. A jövőben várható klímánkkal analóg jelenlegi klímával bíró területek kirajzolásában élenjáró Horváth (2008a) munkája. Hazánkkal földrajzilag analóg régiókat az elkövetkező 60 évre Dél-Romániában, Észak-Bulgáriában, Szerbiában, Észak-Görögországban találunk (Horváth 2008b), így megismerve e területek növényzetét és dísznövénykínálatát, képet alkothatunk hazánk jövőbeli növényzetéről és dísznövény-alkalmazási lehetőségeiről.

Erdészeti vonatkozásban leginkább a bükk (*Fagus sylvatica* L.) vonatkozásában készültek térképes modelleredmények (Führer 2008). A klímaváltozás természetes vegetációt, növényföldrajzot érintő hatását Kovács-Láng et al. (2008) és Czúcz (2010) vizsgálta.

A későbbiekben ismertetett modellezési módszer finomítására javasolt mesterséges neuronhálókat mint a mesterséges intelligencia módszereinek egyikét belvizes területek modellezésekor alkalmazta Van Leeween és Tobak (2008).

A nemzetközi irodalomban számos, a kutatásom során alkalmazott, illetve a tapasztalatok alapján javasolt módszerhez hasonló kutatást publikáltak. Ezek közül

¹ Bede-Fazekas Ákos: *Budapesti Corvinus Egyetem, Kert- és Szabadtértervezési Tanszék*

E-mail: bfakos@gmail.com

² A kutatást a TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0005 projekt támogatta. Az ENSEMBLES-adatokat az Európai Unió FP6-ENSEMBLES integrált projektje finanszírozta, melyet hálással köszönünk.

kiemelendő Arundel (2005) a kutatással számos párhuzamot mutató munkája. Arundel (2005) 5 észak-amerikai melegigényes fajra végezte el a limitáló tényezők számítását, a tényezők értékeléséhez szignifikancia-analízist alkalmazott; igaz, modellezést már nem végzett. Berry et al. (2002) 54 fajra és 15 társulásra végzett modellszámításokat mesterséges neuronhálók segítségével, kutatási területe Nagy-Britannia és Írország. Harrison et al. (2010) az oregoni vegetáció összetételének változását vizsgálta. Iverson et al. (2008) 134 észak-amerikai fafaj elterjedését modellezte regressziósfa-analízis felhasználásával. Hilbert és Ostendorf (2001) 15 ausztrál erdőtípus elterjedésére készített modellszámításokat mesterséges neuronhálók segítségével.

Stankowski és Parker (2010) kutatásában arra jut, hogy az elterjedési és környezeti adatoktól függetlenül nem található olyan eljárás, mely a modell teljesítményét minden fajra maximalizálná, vagyis a különböző fajok különböző modellezési megközelítést igényelnek. Guisan és Zimmermann (2000) nagyon jó áttekintést ad az ökológiai modellezésben használható módszerekről.

MODELLEZÉS MÓDSZERE

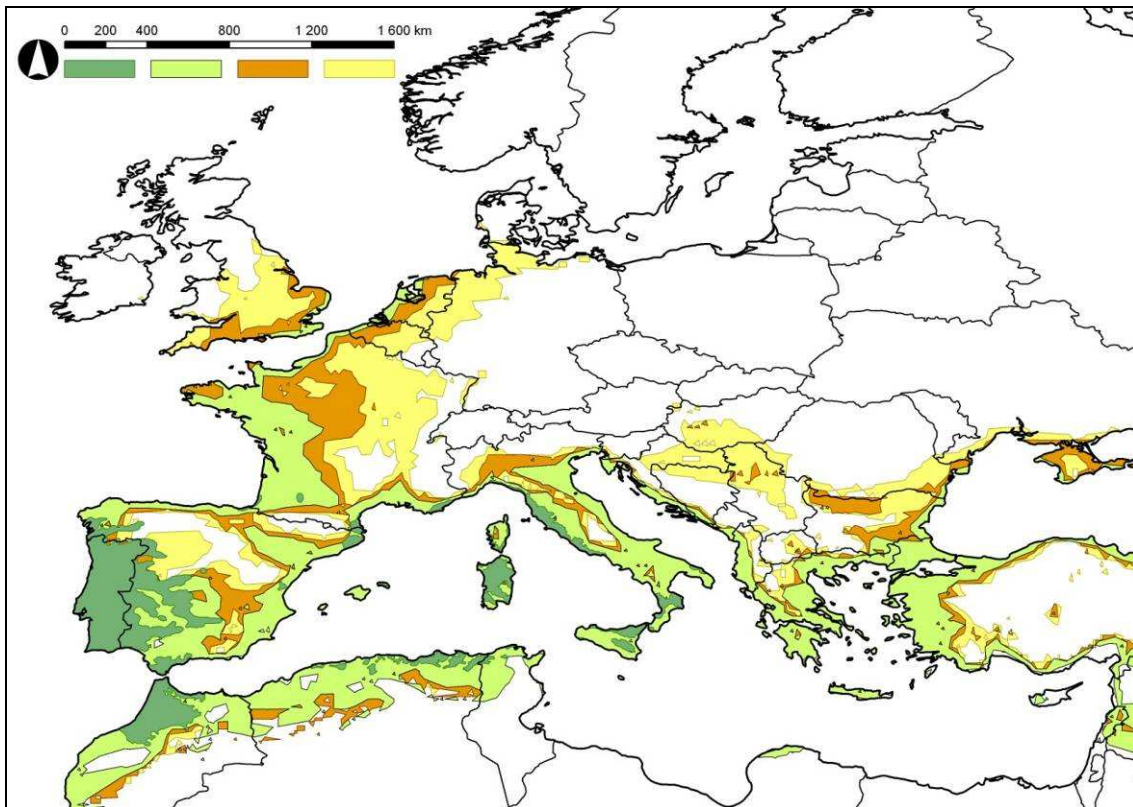
Növényföldrajzi egységek várható elmozdulásának modellezése visszavezethető az adott egységhez kötődő valós vagy fiktív faj elterjedési (illetve pontatlan módszer esetén inkább telepíthetőségi) területének modellezésére. A telepíthetőségi területek modellezésnek két kiindulási adata a növények elterjedési területe és a meglévő klímamodell adatsora a referencia-időszakra, valamint a jövőbeli periódusra. A modellezés három lényegi szakaszra bontható, melyek a következők: növény éghajlati igényeinek szűrése, validálás (modellezés a referencia-időszakra) és modellezés (modellezés a jövőbeli időszakra).

Az elterjedési terület és a referencia-időszak klímaadatsora alapján szűrhetőek éghajlati paraméterenként azok a szélsőértékek, melyek közötti tartományt a növény elviseli. Közvetve tehát az elterjedés és a referencia-időszak adatsora alapján a növény éghajlati igényeiről kaphatunk képet. A klímamodell szélsőértékei alapján közelíthető egy növény éghajlati igénye, a figyelembe veendő klímamodell kiválasztása azonban szubjektív, a nem megfelelő számban választott paraméterek pedig a modellezés kudarcát is okozhatják. A modellezés e szakaszának eredménye minden fajra egy nulladrendű logikai formula, vagyis a növény igénye képletszerűen leírásra kerül. Ez a matematikai megközelítés feltétlenül szükséges ahhoz, hogy a telepíthetőségi terület a modellezés következő szakaszaiban számítógéppel kirajzolható legyen.

A növény éghajlati igényeinek ismeretében kiszűrhetjük azokat a területeket, amelyek a referencia-időszak adatsora szerint a növény számára megfelelő klimatikus körülményeket biztosítanak. Ezen területek összessége a növény potenciális elterjedési területe, még pontosabban pedig a referencia-időszak szerinti telepíthetőségi területe. A telepíthetőségi terület referencia-időszakra történő modellezésének látszólag semmilyen haszna nincsen, szabadon elhagyható, az eredményeket nem befolyásolja. Ugyanakkor módszertani szempontból elengedhetetlennek tartottam a modellezés e középső szakaszát, mert ezáltal nyílik mód validálni/érvényesíteni az eredményeket. A múltbeli telepíthetőségi terület és az elterjedési terület egymással való összevetése ad támpontot a jövőbeli telepíthetőségi területek mint modelleredmények pontosságának felmérésére. Ha a múltbeli telepíthetőségi terület kiterjedése jóval meghaladja az elterjedési területét, akkor, függetlenül az elterjedés tagadhatatlan antropogén, edafikus és kompetíciós befolyásoltságától, a modelleredmények nem tekinthetők megbízhatónak. Vagyis a jó modelleredmények biztosítéka, ha a múltbeli telepíthetőségi terület közelíti az elterjedési területet.

A növény éghajlati igényeinek ismeretében nem csupán a referencia-időszakban kereshetünk a növény életfeltételeinek megfelelő területeket, hanem a jövőbeli időszakokban

is. E harmadik szakasz a szűken értelmezett modellezés, ekkor rajzolom ki a jövőbeli telepíthetőségi területet (1. ábra).



1. ábra: A *Quercus suber* elterjedési területe (sötétzöld), valamint modellezett telepíthetőségi területe a referencia-időszakban (világoszöld), a 2011-2040 közötti időszakban (citromsárga) és a 2041-2070 közötti időszakban (narancssárga)

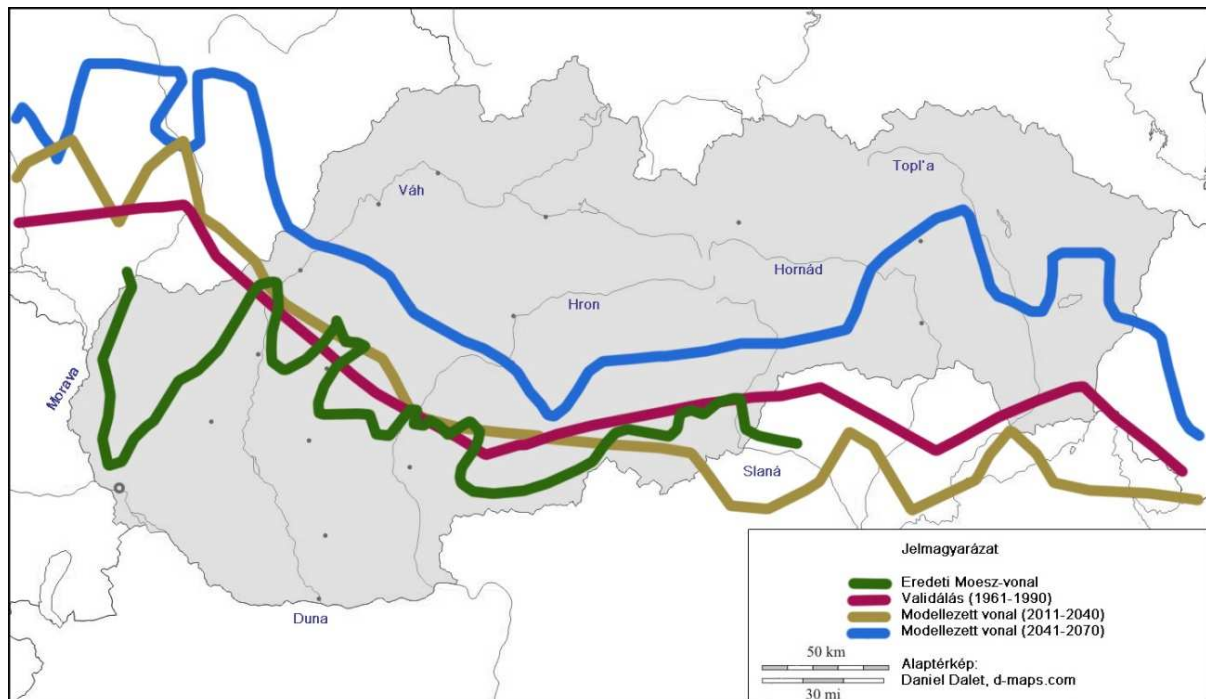
A következőkben röviden ismertetem a Moesz-vonalra készült modellezés módszerét, mely jó példája a növényfajok elterjedési területére épülő, növényföldrajzi egységre futtatott modellezésére. Moesz (1911) felismerte, hogy 12 növényfaj elterjedési területének északi határa nagyrészt egybeesik, továbbá az így kirajzolódó flóraválasztó vonal a szőlőtermesztés északi határvonalára is egyben. E vonalat – mely akkor hazánk területére esett, ma Szlovákiában található – később róla nevezték el. A Moesz-vonal nemzetközi irodalomban alig fordul elő, hiszen lokális jelentőséggel bír csak. Fontos hangsúlyozni azonban, hogy kelet és nyugat felé tovább követve a szőlőtermesztés északi határvonalát megkapjuk a Moesz-vonal meghosszabbítását, mely a hozzá kötődő fajok némelyike (pl. epergyöngyike (*Muscari botryoides*), (Somlyay 2003)) elterjedésének északi határát a továbbiakban is kirajcolja. Ezáltal az egész európai kontinens számára nagy jelentőséggel bírhat a meghosszabbított Moesz-vonal (és annak modellezése), mert az nem csak a kárpát-medencei flórát és a medencébe telepíthető dísznövényeket jellemzi.

A Moesz-vonal várható eltolódását többféleképpen is lehet modellezni, kutatásom során három lehetőséget vizsgáltam (vonalmodellezés, elterjedésmodelezés és izotermamodellezés). Mindhárom módszert az ENSEMBLES RT3 projekt REMO klímamodellje alapján végeztem, mely 25 kilométeres horizontális felbontásban (170 x 190 pont) lefedi Európát. A felhasznált referenciaidőszak 1961-1990 közötti, a modellezett időszakok pedig az IPCC SRES A1B scenárió alapján 2011-2040 és 2041-2070 közöttiek. A modellezést ESRI ArcGIS térinformatikai programmal Spatial Analysts modulja segítségével végeztem.

Az izotermamodellezés a három módszer közül a legkönnyebben megvalósítható. Lényege, hogy megkeressük azt a téli (vagy januári) minimumhőmérsékleti izotermát, amely a leginkább egybeesik a Moesz-vonallal, majd annak elmozdulását modellezzük. A módszer alkalmazásának veszélye, hogy semmi nem garantálja, hogy létezik ilyen izoterma minden flóraválasztó esetén. A Moesz-vonal olyan flóraválasztó, melynek meg tudunk feleltetni egy izotermát, így a módszer alkalmazásának a kutatásban nem volt akadálya. Mivel az izotermamodellezés egy (vagy néhány) éghajlati paramétert vesz figyelembe, igen kevésbé megbízható módszer, pontatlan, és nem feltétlenül ad értelmezhető eredményt. Előnye ugyanakkor, hogy nagyon gyors és nem teszi szükségessé elterjedési területek digitalizálását. A vonalmodellezés az előzőnél jóval összetettebb módszer. Alkalmazásához ki kell rajzolnunk egy nem létező elterjedési területet (a fiktív Moesz-növény elterjedési területét), melynek északi határvonala egybeesik a Moesz-vonallal, déli határvonala lényegtelen, hogy merre fut. A modellezést ezen az elterjedési területen futtatjuk. Viszonylag lassú módszer, ugyanakkor az előzőnél jóval pontosabb eredményt ad. A három vizsgált módszer közül a legösszetettebb és egyben a leglassabb az elterjedésmodellezés, mely a korábban felsorolt 13+5 növényfaj elterjedési/telepíthetőségi területét külön-külön modellezi, majd – mint egykor Moesz Gusztáv – a kirajzolt jövőbeli területek alapján újrarajzolja a Moesz-vonalat. A módszer ugyan nagyon részletes eredményt ad, viszont a végleges vonal megrajzolása meglehetősen szubjektív.

A röviden bemutatott három módszer részletes összevetését és a modellezési módszer lépéseinek ismertetését Bede-Fazekas (2012b) közli.

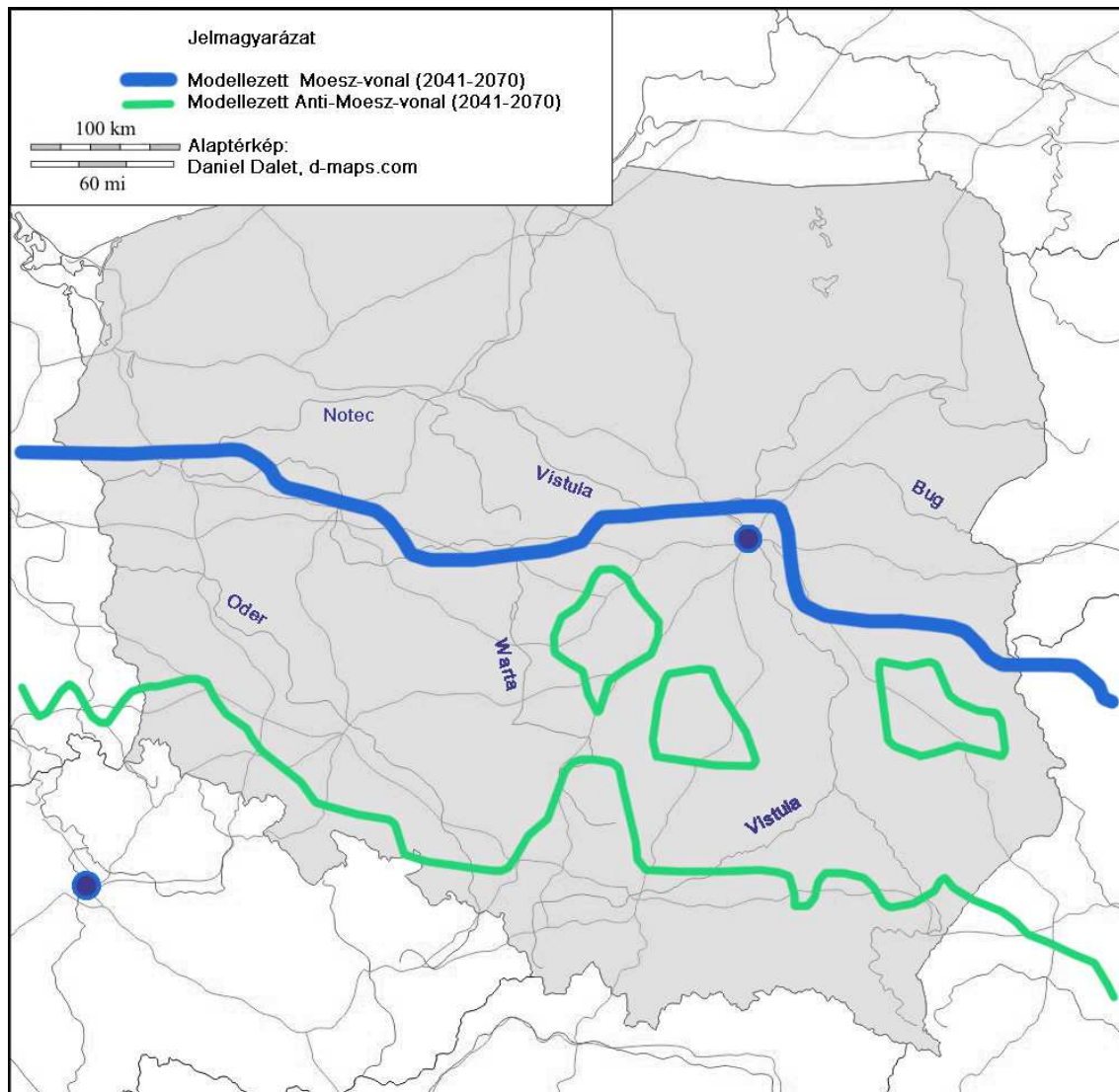
A MOESZ-VONAL VÁRHATÓ ELMOZDULÁSA A MODELLEREDMÉNYEK SZERINT



2. ábra: Szlovákiai kivágat a Moesz-vonal modellezési eredményéből a vonalmodellzés módszere szerint országhatáros és vízrajzi alaptérképen

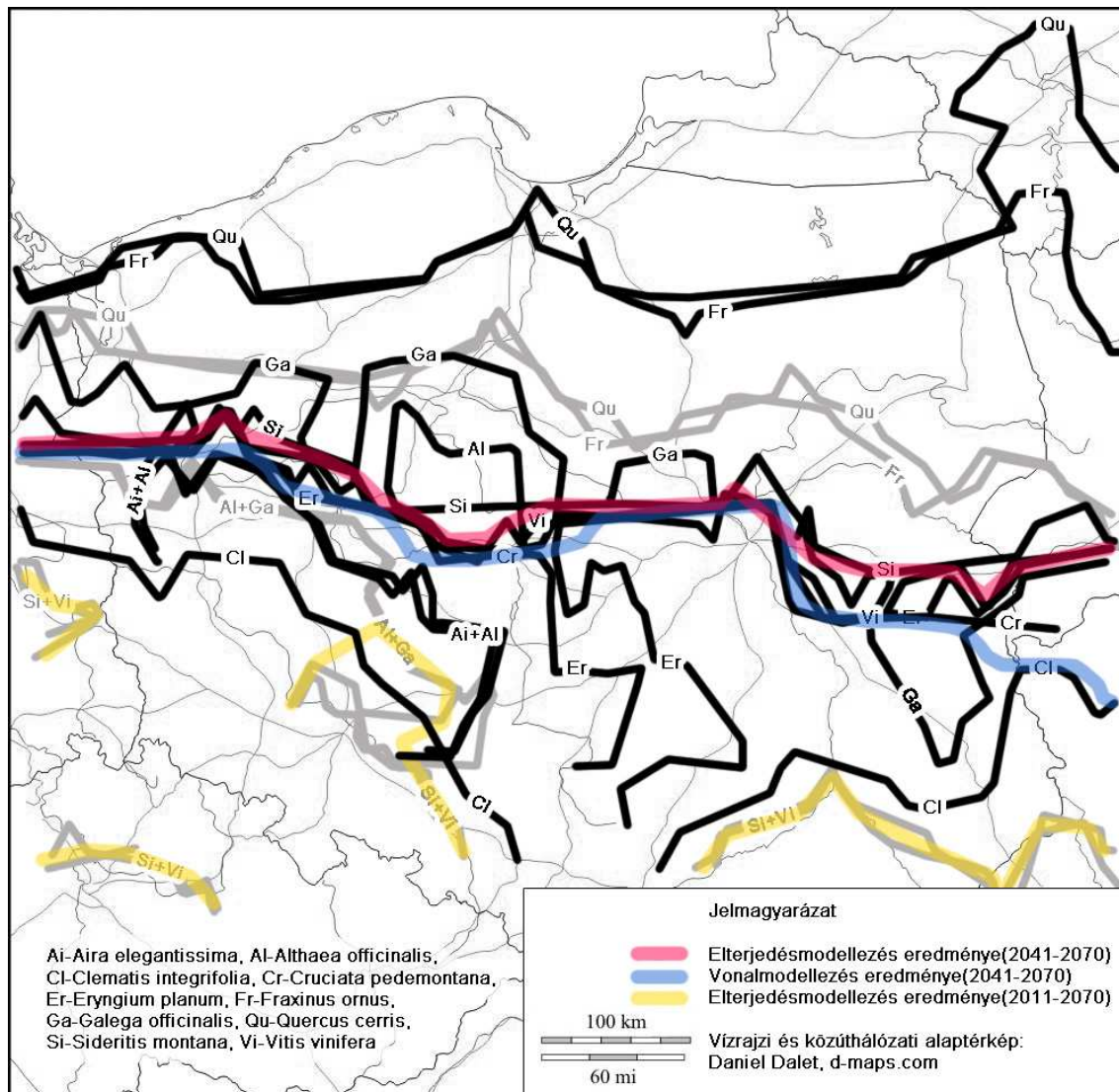
A vonalmodellzés eredménye szerint a referenciaidőszakra modellezett Moesz-vonal nagyjából követi az eredeti vonalat, a felhasznált klímamodell horizontális felbontása mellett ez a pontosság kimondottan jónak mondható. A 2011-2040 közötti időszak várható vonala a várakozásainkkal ellentétben nem mozdult el számottevően északra, sőt, Rimavská Sobota és

Tisovec vonalától keletre a referenciaidőszak modellezett vonalától délre fut, Rožňava-tól keletre pedig az eredeti vonalat sem képes már átlépni. Ennek oka további vizsgálatra szorul, feltételezhetően a vegetációs időszak csapadékösszegének alsó korlátja tolja a kérdéses szakaszon a vonalat a várhoz képest ennyire déli irányba. A 2041-2070 közötti időszakban viszont már a várakozásnak megfelelő eredmény adódott. A Moesz-vonal 3 helyen jelenik meg. Egyrészt a Kárpátokon magasabb régióba húzódik (2. ábra), másrészt viszont a Kárpátoktól északra, Lengyelországban is megjelenik (3. ábra). Értelemszerűen így kialakul az anti-Moesz-vonal, amely a lengyelországi optimális éghajlatú területeknek déli irányban, a Kárpátok felé szab határt.



3. ábra: Lengyelországi kivágat a Moesz-vonal modellezési eredményéből a vonalmodellezés módszere szerint országhatáros és vízrajzi alaptérképen, a 2041-2070 közötti időszakra

Az elterjedésmodellezés a várakozásoknak megfelelően árnyaltabb képet adott a Moesz-vonal lehetséges eltolódásáról (4. ábra), és ahogy azt sejteni lehetett, a fajok elszakadtak egymástól. Némelyikük már 2011-2040 között megjelent a Kárpátoktól északra, mások csak 2041-2070 között lépték át a Kárpátokat.



4. ábra: Lengyelországi kivágot a Moesz-vonal modellezési eredményéből a vonalmodellezés és az elterjedésmodellezés módszere szerint országhatáros és vízrajzi alaptérképen. Fekete színnel 2041-2070-es időszak, szürkével pedig a 2011-2040-es időszak modelleredményeit ábrázolom.

Az izotermamodellezés a vártnál is gyengébb eredményt hozott. Az a januári minimum-hőmérsékleti izoterma ($-3,86\text{ }^{\circ}\text{C}$), mely a referenciaidőszakban nagyrészt egybeesett a Moesz-vonallal, már a referenciaidőszakban is megjelent a Kárpátoktól északra, mégpedig nem is a Kárpátok vonalával párhuzamosan, hanem arra merőlegesen. Ennek oka valószínűleg a közeli tengerek kiegyenlítő klímamódosító hatása. Ez azonban a kontinentális éghajlati hatásoknak sokkal jobban kitett Moesz-vonal szempontjából nem vehető figyelembe. Így, függetlenül attól, hogy csak egy vagy több téli hónap minimum-hőmérsékletét vizsgáljuk, az izotermamodellezés a Moesz-vonal eltolódásának vizsgálatára nem használható, vagy csak a Kárpátoktól délre eső területen.

KÖVETKEZTETÉSEK. A MODELL FINOMÍTÁSA MESTERSÉGESINTELLIGENCIA-ALGORITMUSOKKAL

Mint a kapott modelleredményekből látható, a bemutatott egyszerű módszerek, melyek mindegyike csak a klimatikus limitáló tényezőkkel operált, is jól szemléltetik a klímaváltozás várható hatását. További klímamutatók (pl. hőösszeg, fagyveszélyes időszak hossza)

bevonása, edafikus tulajdonságok (pl. mésztartalom, pH) figyelembe vétele és részletesebb bemenő adatok (pontosabb areatérképek, nagyobb felbontású klímamodellek) felhasználása természetesen a modellezés pontosságát nagymértékben növelni tudja, mégis fontos hangsúlyoznom, hogy az alkalmazott módszer fejlesztése adhat csak valóban lényeges minőségi javulást a modelleredmények megbízhatóságát illetően.

A modellezés során figyelembe vett, adott klímamodellre tartozó minimum- és maximumértékek közötti intervallum szűkíthető a klímamodellre kirajzolt hisztogram segítségével, figyelembe véve a minta átlagát és szórását. Ezáltal a vizsgált faj elterjedésének vagy a növényföldrajzi egységnek a területén előforduló, de az elterjedés szélére húzódó szélsőséges értékek elhagyásra kerülnek, és csak vizsgált területre nagyobb biztonsággal köthető klímaértékek vesznek részt a modellezésben.

További módszertani előrelépést jelenthet, ha a rendelkezésre álló véges sok éghajlati paraméter végtelen kombinációja közül nem szubjektív módon választunk, hanem a választást statisztikai módszerek vagy mesterségesintelligencia-algoritmusok segítik (vagy teljes mértékben elvégzik). Ibáñez et al. (2006) rámutat, hogy klimatikus burkológörbe meghatározásához többféle (az általam alkalmazottnál összetettebb és pontosabb) módszer alkalmazható, mint az egyszerű regresszió, a távolság-alapú módszerek, genetikai algoritmusok a szabályhalmaz szerinti előrejelzéshez és neurális hálók.

A szubjektivitás mérséklésére alkalmas egyik statisztikai módszer a logisztikus regresszió, mely kiadja, hogy a klímamodellparaméterek milyen lineáris kombinációja határozza meg az előfordulási valószínűséget. Másik javasolt módszer a klaszteranalízis, mely a klímamodellparaméterek vektorát egy sokdimenziós tér pontjaként értelmezi és olyan alacsonyabb dimenziót keres, melyben a az elterjedési terület különválik a környezetétől. Ezekon kívül alkalmazhatóak az osztályozási módszerek is.

A statisztikai módszereknél is nagyobb előrelépést adhatnak a különböző mesterségesintelligencia-algoritmusok. A növényfajok telepíthetőségi területének és a növényföldrajzi egység területének modellezésére a mesterséges intelligencia több módszere is alkalmazható, többek között ilyen a döntési fa, pontosabban a regressziósfa-analízis, az evolúciós vagy genetikai algoritmus és a mesterséges neuronháló. A három módszer közül véleményem szerint leginkább a mesterséges neuronháló alkalmazható. A mesterséges neuronhálók alkalmazásának gondolata hasonló jellegű modellezési feladatok során nem újszerű, viszont dísznövények telepíthetőségi/elterjedési területének modellezésére tudomásom szerint még nem alkalmazták a módszert. Sok a párhuzam ugyanakkor például Hilbert (1999) munkájával, aki erdőtípusok modellezésére alkalmazta a neuronhálókat.

A jól felparaméterezett evolúciós algoritmus (mely a klímamodellparamétereket allélokknak felelteti meg, és a természetes szelekcióhoz hasonló, véges hosszú folyamat) képes lehet egy adott növényre meghatározni, hogy mely rendelkezésre álló klimatikus paraméterek és azok milyen irányú korlátja/korlátai fejezik ki leginkább a növény éghajlati igényeit. Az eredmény tehát a kutatásomban is használt képletekhez hasonló. Nem mondható el ez a mesterséges neuronhálóról, hiszen annak csak egy speciális változata képes a kutatásomban alkalmazotthoz hasonló képletet visszaadni. A mesterséges neuronháló modellje egy axonokkal sűrűn ellátott idegsejthálózathoz hasonlítható leginkább, melyben az idegsejtek rétegeket alkotnak. Az algoritmus két részre bontható, melyből az első az ún. tanulási algoritmus. Ennek során a program saját belső szerkezetét kiépíti, kiegyensúlyozza olyan módon, hogy az az adott növény elterjedési területéhez a legjobban igazodjon. A tanulási algoritmus után a program Európa pontjairól képes megállapítani, hogy a modellezési időszakban (legyen az akár a referencia-időszak, akár a jövőbeli időszakok valamelyike) a növény mekkora valószínűséggel van/lesz jelen.

A neuronhálóval ellentétben az előzőekben felsorolt statisztikai és mesterségesintelligencia-módszerek egyikéről sem mondható el, hogy az algoritmus futása

után a kimeneti adat éppen a modellezési célnak megfelelő telepíthetőségiterület-térkép. Ugyanakkor mindezt másképpen is fogalmazhatjuk: a neuronháló az egyetlen módszer a felsoroltak között, amely nem képes szétbontani a növények éghajlati igényének szűrését a tényleges modellezéstől. Vagyis neuronhálóval nem tudjuk az éghajlati igényt matematikai módon megfogalmazni, mely, ha ezt csupán eddig megkerülhetetlen részlépésként kezeltük, nem mondható hátránynak

A tanulási algoritmus lényege, hogy a növény elterjedési területe és a referencia-időszakbeli klímadatsor alapján egy olyan összetett, többrétegű, de első rétegében a klímáparaméterekből kiinduló súlyozott struktúrát alakít ki, melyekhez a súlyokat a tanulás során megadott – földrajzi pontokhoz köthető – bemeneti értékek alapján csökkenti vagy növeli (tanulási szabály). A súlyozás a neurális kapcsolatokhoz (axonokhoz) köthető, mértékét a súlyfüggvény adja meg. A tanulási algoritmus egy hosszú, de véges ciklus, melynek során a súlyfüggvények értéke folyamatosan változik.

A neuronháló megfelelő parametrizálásával és felépítésével (a növények elterjedési területének modellezéséhez leginkább alkalmasnak az előre-csatolt többrétegű topológia, esetleg a backpropagation modell tűnik) az algoritmus képes lehet telepíthetőségi területek helyett elterjedési területeket modellezni, mely módszertani szempontból alapvető előrelépés lenne.

ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozat során célom volt összefoglalni a Kárpát-medencét elterjedésükkel jelenleg vagy a jövőben érintő növényfajok és növényföldrajzi egységek modellezésének módszerét és eredményeit nem titkolva szembeötlő hiányosságait is. Fontosnak tartom hangsúlyozni, hogy a valódi elterjedési területet kirajzoló módszer még fejlesztés alatt áll, ugyanakkor az ismertett módszer is már látványos eredményeket hozott. A bemutatott, Moesz-vonalra készült modell érdekes, az előzetes várakozásokkal nem mindenben egyező eredményei közül ökológiai szempontból kiemelt feladatom hangsúlyozni, hogy a vonalhoz köthető növényfajok számára az elkövetkező 30-60 évben az Északi-Kárpátok jelentős, gyakorlatilag áthidalhatatlan bariert fognak jelenteni. Összhangban Kovács-Láng et al. (2008) kutatási eredményeivel, aki hangsúlyozza, hogy az ökológiai folyamatok sebessége nincs szinkronban a jelen klimatikus változások sebességével, és a kelet-nyugati irányú tengerek és hegláncok természetes barriert jelenthetnek, ki kell mondanunk: emberi segítség nélkül a Moesz-vonalhoz kötődő fajok nem fognak tudni Lengyelországba eljutni, a Moesz-vonal csak mint vitruális klimatikus határ mozdulhat el. Egy hosszán tartó ökológiai vitában kutatásommal újabb súlyt kívánok elhelyezni a konzervációt mint végletekig követendő módszert elítélők mérlegén.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- ARUNDEL ST. 2005. Using spatial models to establish climatic limiters of plant species' distributions. *Ecological Modelling* 182 (2): 159-181
- BARTHOLY J, PONGRÁCZ R, GELYBÓ GY. 2007. A 21. század végén várható éghajlatváltozás Magyarországon. *Földrajzi Értesítő*, 56 (3-4): 147–168.
- BARTHOLY J, PONGRÁCZ R. 2008. Regionális éghajlatváltozás elemzése a Kárpát-medence térségére. In: HARNOS ZS, CSETE L. Klímaváltozás: környezet – kockázat – társadalom. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest
- BEDE-FAZEKAS Á. 2011. Impression of the global climate change on the ornamental plant usage in Hungary. *Acta Universitatis Sapientiae, Agriculture and Environment* 3 (1): 211-220.
- BEDE-FAZEKAS Á. 2012a. Melegigényes díszfák telepíthetőségi területének előrejelzése a 21. századra. Diplomamunka. Budapesti Corvinus Egyetem, Budapest

- BEDE-FAZEKAS Á. 2012b. Methods of modeling the future shift of the so called Moesz-line. *Applied Ecology and Environmental Research* 10(2): 141-156.
- BERRY PM, DAWSON TP, HARRISON PA, PEARSON RG. 2002. Modelling potential impacts of climate change on the bioclimatic envelope of species in Britain and Ireland. *Global Ecology and Biogeography* 11(6): 453–462.
- CZINKÓCZKY A, BEDE-FAZEKAS Á. 2012. Visualization of the climate change with the shift of the so called Moesz-line. In: BUHMANN E, ERVIN S, PIETSCH M. Peer Reviewed Proceedings of Digital Landscape Architecture 2012 at Anhalt University of Applied Sciences. Herbert Wichmann Verlag, Berlin
- CZÚCZ B. 2010. Az éghajlatváltozás hazai természetközeli élőhelyekre gyakorolt hatásainak modellezése. Doktori értekezés, Budapesti Corvinus Egyetem, Budapest
- 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.
- FÜHRER E. 2008. Erdőgazdaság. In: HARNOS ZS, GAÁL M, HUFNAGEL L. Klímaváltozásról mindenkinek. Budapesti Corvinus Egyetem, Kertészettudományi Kar, Matematikai és Informatikai Tanszék, Budapest
- FÜHRER E, RASZTOVITS E, CSÓKA GY, LAKATOS F, BORDÁCS S, NAGY L, MÁTYÁS Cs. 2010. Current status of European beech (*Fagus sylvatica* L.) genetic resources in Hungary. *Communicationes Instituti Forestalis Bohemicae* 25(1): 152-163.
- GUISAN A, ZIMMERMANN NE. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135(2-3): 147-186.
- HARRISON S, DAMSCHEN EI, GRACE JB. 2010. Ecological contingency in the effects of climatic warming on forest herb communities. *Proc Natl Acad Sci USA* 107(45):19362-19367.
- HILBERT DW, VAN DEN MUYZENBERG J. 1999. Using an artificial neural network to characterize the relative suitability of environments for forest types in a complex tropical vegetation mosaic. *Diversity and Distributions* 5(6): 263-274.
- HILBERT DW, OSTENDORF B. 2001. The utility of artificial neural networks for modelling the distribution of vegetation in past, present and future climates. *Ecological Modelling* 146(1-3): 311-327.
- HORVÁTH L. 2008a. A földrajzi analógia alkalmazása klímaszcenáriók vizsgálatában. In: HARNOS ZS, CSETE L. Klímaváltozás: környezet – kockázat – társadalom. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest
- HORVÁTH L. 2008b. Földrajzi analógia alkalmazása klímaszcenáriók elemzésében és értékelésében. Doktori értekezés. Budapesti Corvinus Egyetem, Budapest
- IBÁÑEZ I, CLARK JS, DIETZE MC, FEELEY K, HERSH M, LADEAU S, MCBRIDE A, WELCH NE, WOLOSIN MS. 2006. Predicting Biodiversity Change: Outside the Climate Envelope, beyond the Species-Area Curve. *Ecology* 87(8): 1896-1906.
- IVERSON LR, PRASAD AM, MATTHEWS SN, PETERS M. 2008. Estimating potential habitat for 134 eastern US tree species under six climate scenarios. *Forest Ecology and Management* 254(3): 390-406.
- KOVÁCS-LÁNG E, KRÖEL-DULAY GY, CZÚCZ B. 2008. Az éghajlatváltozás hatásai a természetes élővilágra és teendők a megőrzés és kutatás területén. *Természetvédelmi Közlemények* 14(1): 5-39.
- MÁTYÁS Cs, BERKI I, CZÚCZ B, GÁLOS B, MÓRICZ N, RASZTOVITS E. 2010. Future of beech in Southeast Europe from the perspective of evolutionary ecology. *Acta Silv. Lign. Hung.*, 6(1): 91-110.
- MOESZ G. 1911. Adatok Bars vármegye flórájához. *Botanikai Közlemények* 10(5-6): 171-185

- SCHMIDT G. 2006. Klíma- és időjárás-változás és a fás szárú dísznövények In: CSETE L, NYÉKI J. Klímaváltozás és a magyarországi kertgazdaság. „AGRO-21” Kutatási Programiroda, Budapest
- SOMLYAY L. 2003. A *Muscari botryoides* (L.) Mill. hazai alakkörének rendszertani-chorológiai vizsgálata. Doktori értekezés. Debreceni Egyetem, Természettudományi Kar, Debrecen
- STANKOWSKI PA, PARKER WH. 2010. Species distribution modelling: Does one size fit all? A phytogeographic analysis of *Salix* in Ontario. *Ecological Modelling* 221(13-14): 1655-1664.
- SZABÓ K, BEDE-FAZEKAS Á. in press. A forgalomban lévő fásszárú dísznövénytaxonok szárazságtűrésének értékelése a klímaváltozás tükrében. *Kertgazdaság*
- VAN LEEUWEN B, TOBAK Z. 2008. GIS Solutions for Belvíz monitoring: A case study in Csongrád county, Hungary. XII. Symposium on Geomathematics, I. Croatian-Hungarian Geomathematical Conference, Mórahalom