

Természetes ökoszisztémák éghajlati sérülékenységének elemzése

Kutatási jelentés

Szerzők:

Somodi Imelda — Bede-Fazekas Ákos
– Lepesi Nikolett — Czúcz Bálint



2016. április 25.

TARTALOMJEGYZÉK

ÁBRAJEGYZÉK.....	3
TÁBLÁZATJEGYZÉK	4
1 BEVEZETÉS	5
1.1 A CIVAS KERETRENDSZER	5
1.2 TUDOMÁNYOS HÁTTÉR	6
1.3 CÉLKITŰZÉSEK	7
2 MÓDSZEREK ÉS MEGKÖZELÍTÉSEK	9
2.1 BIOKLIMATIKUS MODELLEZÉS	9
2.2 TÁJÖKOLÓGIAI ELEMZÉS	16
2.3 KLÍMAÉRZÉKENY ÉLŐHELYTÍPUSOK MEGHATÁROZÁSA.....	18
2.4 SÉRÜLÉKENYSÉGELEMZÉS	19
3 EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK	20
3.1 INTERPOLÁLT KLÍMAFELÜLETEK.....	20
3.2 KLÍMAÉRZÉKENY ÉLŐHELYTÍPUSOK	22
3.3 VÁRHATÓ HATÁS.....	26
3.4 ALKALMAZKODÓKÉPESSÉG.....	31
3.5 SÉRÜLÉKENYSÉG	34
4 ÖSSZEFOGLALÓ KÖVETKEZTETÉSEK	37
HIVATKOZÁSOK.....	41

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra. A CIVAS keretrendszer (CLAVIER projekt 2006–2009)
2. ábra. Magyarország Élőhelyeinek Térképi Adatbázisa (MÉTA) által használt hatszögáló. Vetület: World Geodetic System 1984 (WGS 84), az ábra ArcGIS 10.1. programban készült
3. ábra. A ROC görbe lefutása két demonstratív és egy reális esetben: „tökéletes” — a becült valószínűségek tökéletesen illeszkednek a megfigyeltre, „random” — random előállított becslés esetén tapasztalt összefüggés, „reális” — egy lehetséges, a gyakorlatban előforduló becslés ROC görbéje. TPF=helyes predikált jelenlétek aránya, FPF=hibásan becslés jelenlétek aránya (lásd 4. táblázat)
4. ábra. A természeti tőke index grafikus szemléltetése
5. ábra. A CarpatClim adatok és a regresszió krigeléssel készült interpoláció összehasonlítása. Az 1977-2006-os időszak januári átlaghőmérséklete. A használt vetület: World Geodetic System 1984 (WGS 84), az ábra a Quantum GIS 2.10 programmal készült
6. ábra. A CarpatClim adatok és a regresszió krigeléssel készült interpoláció összehasonlítása. Az 1977-2006-os időszak májusi átlaghőmérséklete. A használt vetület: World Geodetic System 1984 (WGS 84), az ábra a Quantum GIS 2.10 programmal készült
7. ábra. A CarpatClim adatok és a regresszió krigeléssel készült interpoláció összehasonlítása. Az 1977-2006-os időszak januári átlagos csapadékösszege. A használt vetület: World Geodetic System 1984 (WGS 84), az ábra a Quantum GIS 2.10 programmal készült
8. ábra. A CarpatClim adatok és a regresszió krigeléssel készült interpoláció összehasonlítása. Az 1977-2006-os időszak májusi átlagos csapadékösszege. A használt vetület: World Geodetic System 1984 (WGS 84), az ábra a Quantum GIS 2.10 programmal készült
9. ábra. A klímaváltozás várható hatása (PI) a meglévő bükkös (K5_K7a) NATÉR négyzetekre vonatkoztatva. A részábrák címei a jövőbeli időszakokra valamint a használt klímamodellre vonatkoznak. A PI a zöldtől a piros felé egyre kedvezőtlenebb
10. ábra. A klímaváltozás várható hatása (PI) a jelenlévő padkás szikesek, szikes tavak iszap- és vakszik növényzetere (F5)– NATÉR négyzetekre vonatkoztatva. A részábrák címei a jövőbeli időszakokra valamint a használt klímamodellre vonatkoznak. A PI a zöldtől a piros felé egyre kedvezőtlenebb
11. ábra. A klímaváltozás várható hatása (PI) a meglévő bükkös (K5_K7a) településhatárra vonatkoztatva. A részábrák címei a jövőbeli időszakokra valamint a használt klímamodellre vonatkoznak. A PI a zöldtől a piros felé egyre kedvezőtlenebb
12. ábra. Alkalmazkodóképesség a bükkösök esetében- NATÉR rácsra vonatkoztatva. AC 0-tól 4-ig (pirostól a zöldig) növekszik
13. ábra. Alkalmazkodóképesség a cseres-tölgyesek esetében- NATÉR rácsra vonatkoztatva. AC 0-tól 4-ig (pirostól a zöldig) növekszik
14. ábra. Alkalmazkodóképesség a löszgyepek, kötött talajú sztyeprétek (H5a) esetében-NATÉR rácsra vonatkoztatva. AC 0-tól 4-ig (pirostól a zöldig) növekszik
15. ábra. Alkalmazkodóképesség a bükkösök esetében- településsorra vonatkoztatva. AC 0-tól 4-ig (pirostól a zöldig) növekszik
16. ábra. Természetes élőhelyek sérülékenysége a leginkább klímaérzékeny 12 élőhely sérülékenysége alapján a NATÉR négyzetekre vonatkoztatva. A részábrák címei a jövőbeli időszakokra, valamint a használt klímamodellre vonatkoznak. Sérülékenység a zöld színtől a pirosig növekszik

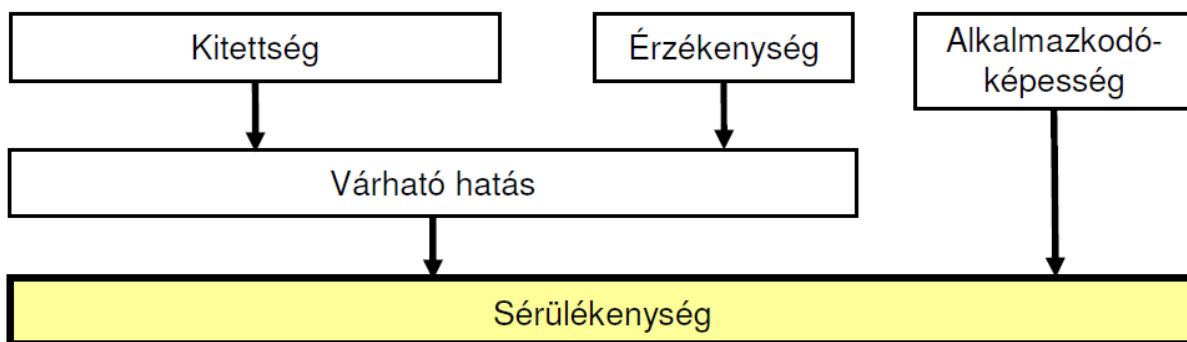
TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat. A CIVAS keretrendszer kulcsfogalmai és értelmezésük a természetes ökoszisztémák éghajlati sérülékenység- elemzésében
2. táblázat. A modellezett élőhelyek elnevezései és rövidítései
3. táblázat. Az elemzésben alkalmazott háttérváltozók
4. táblázat. A modell találati és hibázásai által kirajzolt kontingenciatábla $TPR = TP/(TP+FN)$; $FPR = FP/(FP+FN)$
5. táblázat. Modell teljesítmény/jóság mértéke a ROC görbe alatti terület (AUC) alapján (lásd. 2. ábra)
6. táblázat. A modellezett élőhelyek az éghajlattal kapcsolatos változók modellbeli fontosságának csökkenése szerint rendezve. Az éghajlattal kapcsolatos változók számát szintén feltüntettük. A későbbi elemzésekben szereplő élőhelyeket vastagon jelöltük
7. táblázat. A klímaérzékeny élőhelyek modelljeinek változószerkezete és a magyarázó változók relatív fontossága
8. táblázat. A klímaváltozás várható hatása a klímaérzékeny élőhelyekre. A táblázat összegzi a várható hatás térbeli mintázatát országos léptékben. Megadjuk, hogy a klíma modellek predikciói közötti eltéréseket (modellütközés), ill. jelezzük ha látványos változás volt a trendben a két időszak között (trendváltás)
9. táblázat. A klímaérzékeny élőhelyek (CSH) országos alkalmazkodóképességi (AC) mintázata. A tájökológiai elemzés során elkészült térképeken látható térbeli mintázatok összegzése

1 BEVEZETÉS

1.1 A CIVAS KERETRENDSZER

A klímaváltozás esetén várható sérülékenységet jellemzően a CIVAS keretrendszer (Climate Impact and Vulnerability Assessment Scheme) segítségével tárgyalják és becslik az IPCC ajánlásainak megfelelően (Intergovernmental Panel on Climate Change, PARRY és CARTER 1998, CARTER és mtsai. 2007, IPCC 2007, CLAVIER projekt 2006–2009). A keretrendszer értelmében az éghajlati sérülékenység a vizsgált rendszer káros éghajlati hatásokkal szembeni érzékenységének, sebezhetőségének, illetve az alkalmazkodás hiányának a mértékét fejezi ki, amely egyaránt függ a rendszert érő éghajlati változások jellegétől és mértékétől, a rendszer érzékenységétől, illetve alkalmazkodóképességétől. A vizsgált rendszer sérülékenységének mértékét (vulnerability, V) a klímaváltozás várható hatása (potential impact; PI) és a rendszer geofizikai, biológiai és szocio-ökonómiai változásokhoz való alkalmazkodóképességének (adaptive capacity; AC) eredője adja. A PI-t a klímaváltozás várható mértéke (kitettség, exposure) és a rendszer érzékenysége (sensitivity) határozza meg. Ezt a keretrendszert, bármely a klímaváltozásnak kitett rendszerre lehet alkalmazni, mely esetünkben a természetes és természetközeli ökoszisztémák (élőhelyek). Mivel ezek önszerveződő rendszerek, fizikai és biológiai tulajdonságaik határozzák meg klímaérzékenységüket és alkalmazkodóképességüket, amely függőségek modellek segítségével leírhatók (Czúcz és mtsai. 2011).



1. ábra. A CIVAS keretrendszer (forrás: Czúcz 2011)

1. táblázat. A CIVAS keretrendszer kulcsfogalmai és értelmezésük a természetes ökoszisztémák éghajlati sérülékenység-elemzésében

Fogalom	IPCC definíció	A definíció alkalmazása az élőhelyek sérülékenység-elemzésében
Kitettség (Exposure), E	„A rendszer klíma változatosságával szembeni kitettségének természete és foka” (IPCC 2001)	A természetes élőhelyek klímaváltozásnak való kitettsége a bioklimatikus változók változásának becsült mértéke az adott helyszínen és időszakban. (többdimenziós, függ a helytől és az időszaktól)
Érzékenység (Sensitivity), S	„Az érzékenység a rendszerre a klímaváltozás vagy a klíma változatossága által gyakorolt hatás mértéke, legyen az kedvező vagy kedvezőtlen. A hatás lehet közvetlen (...) vagy közvetett (...)” (IPCC 2007)	Adott élőhely klímaérzékenységét a bioklimatikus változókhoz tartozó többdimenziós válaszfelülettel definiáljuk (feltételezve, hogy az egyéb abiotikus tényezők változatlanok maradnak). (többdimenziós, függ az élőhelytípustól)
Várható hatás (Potential impact), PI	„A klímaváltozás becsült változása esetén előálló minden hatás, az alkalmazkodás figyelembe vétele nélkül.” (IPCC 2007)	A várható hatás adott élőhely jelenléti valószínűségének különbsége a referencia- és a jövőbeli időszak között ott, ahol az adott élőhely előfordul, feltéve a rendelkezésre álló klímaváltozási forgatókönyveket. (egydimenziós, függ az élőhelytípustól, a helyszíntől és a vizsgált jövőbeli időszaktól)
Alkalmazkodóképesség (Adaptive capacity), AC	„Adott rendszer képessége arra, hogy ellensúlyozza a klímaváltozás okozta károkat, előnyökre tegyen szert a klíma változásának köszönhetően, vagy hogy ellensúlyozza annak következményeit.” (IPCC 2007)	Esetünkben az alkalmazkodóképességet meghatározza a hely és a táji közeg képessége arra, hogy segítse sikeres alkalmazkodási folyamatok végbemenetelét az adott élőhelyen. (ellenállóképesség helyben, menedék-elvű alkalmazkodás, vándorlás-elvű alkalmazkodás)
Sérülékenység (Vulnerability) V	„Egy rendszer káros éghajlati hatásokkal szembeni érzékenységének, sebezhetőségének, illetve az alkalmazkodás hiányának a mértékét fejezi ki, amely egyaránt függ a rendszert érő éghajlati változások jellegétől és mértékétől, a rendszer érzékenységétől, illetve alkalmazkodóképességétől.” (IPCC 2007)	A sérülékenységelemzés során a várható hatás és alkalmazkodóképesség-elemzések eredményeit szintetizáljuk.

1.2 TUDOMÁNYOS HÁTTÉR

A környezeti viszonyokra alapozott vegetáció-modellzés hosszú múltra tekint vissza (FRANKLIN 1995). Ezen modellezések során a fő célok egyike volt, hogy magyarázattal szolgáljanak arra vonatkozóan, hogy az egyes társulások miért pont ott fordulnak elő ahol találhatóak (pl. MILLER és FRANKLIN 2002, SOMODI és mtsai. 2010). A predikciós modellek a vizsgált rendszer vagy jelenség becsült mintázatát és annak környezeti meghatározottságát a jelenlegi eseményekből, illetve előfordulási adatokból, az erre épített statisztikai modellek felhasználásával vezetik le. Az összefüggések alapján inter-, ill. extrapoláció végezhető. Esetünkben ez az egyes természetes vegetációtípusok igényeinek

formalizálását jelenti, amelyek jelen kutatásban összevonva, mint természetes élőhelyek szerepelnek és a szárazföldi ökoszisztémák egy jellegzetes funkcionális beosztását jelenítik meg. A természetes élőhelytípusokra alkalmazott predikciós elterjedési modelleket használtuk fel az éghajlati sérülékenység (az egyes élőhelytípusok különböző éghajlati változóktól való függésének mértéke alapján) és várható hatás (a modellek éghajlati scenáriókra való rávetítésével) meghatározásakor.

A vegetáció-modellezés szempontjából Magyarország igen kedvező helyzetben van, hiszen olyan, nemzetközi viszonylatban is egyedinek mondható vegetációtérképpel és adatbázissal rendelkezik, amely lehetővé teszi az egyes élőhelytípusok részletes predikciós terjedési modellezését. Magyarország Élőhelyeinek Térképi Adatbázisa (MÉTA) minden főbb élőhelytípust arányos borítási eloszlással tartalmaz, a teljes országot lefedő, 35 hektáros egységenként (MOLNÁR és mtsai. 2007, HORVÁTH és mtsai. 2008), ami a modellezéshez ideális alapot nyújt.

A különböző modellezési technikákat illetően a háttérváltozók általi meghatározottság felderítésében a leghasznosabbnak a fa alapú modellek (regressziós fák), míg a predikciós térképezéshez (extra- és interpoláláshoz) az általánosított lineáris modellek (GLM) bizonyultak. Ugyanakkor a GLM-ek szigorú feltételeket állítanak az adatszerkezettel szemben. (MC CULLAGH és NELDER 1989). Az elmúlt időszak fejlesztései olyan új módszereket adtak az ökológusok kezébe, melyek az eddig egymástól független modellezési módszereket statisztikai értelemben integrálták, egy rendszerbe szervezték. Ilyen például a Random Forests-módszer (BREIMAN 2001) és a Gradient Boosting-modell (GBM, FRIEDMAN 2002, ELITH és mtsai. 2008). Míg a Random Forests-módszert gyakran kritikával illetik a változókiválasztási eljárása miatt (STROBL és mtsai. 2007), addig a GBM a sokszor kifogásolt (pl. LUKACS és mtsai. 2010) és a GLM-ek által használt változókiválasztási módszer, az Akaike Információs Kritérium (Akaike Information Criterion, AIC) helyett keresztvalidációt alkalmaz (ELITH és mtsai. 2008). Mindemellett a GBM modellezési módszer további előnye, hogy változatos választógörbék kialakulását teszi lehetővé, és ezáltal alkalmas a különböző adatforrások (pl. talajadottságok vagy éghajlati változók) rugalmas kezelésére.

1.3 CÉLKITŰZÉSEK

Jelen kutatás legfontosabb célkitűzése volt elkészíteni a részletes éghajlati sérülékenységi értékelést Magyarország legjelentősebb, illetve leginkább klímaérzékeny természetes és természetközeli élőhelyeire. Másodlagos célunk volt a CIVAS keretrendszer alkalmazásának bemutatása ágazati éghajlati hatástanulmányokban. E két kitűzött célt sikeresen elértük azáltal, hogy eredményesen megbecsültük a CIVAS keretrendszer (CLAVIER projekt 2006–2009) elemeit Magyarország leginkább klímaérzékeny élőhelyeire (climate sensitive natural habitats [CSH]).

Az értékelés első lépése a magyarországi élőhelyek klímaérzékenységének felderítése és a CSH-k kiválasztása volt. A klímaérzékenységet az éghajlatváltozással kapcsolatos abiotikus faktoroktól való függés mértékeként definiáltuk. A klímaérzékenység így, a természetes élőhelyek abiotikus igényeinek formalizálásán keresztül került meghatározásra. Ezáltal céljaink között szerepelt az is, hogy ezen formalizációra megfelelő statisztikai modellt alkossunk.

Mivel a CIVAS keretrendszer elemei csak klímaérzékeny rendszerekre értelmezettek, mindeneke-előtt a fokozottan klímaérzékeny élőhelyek kiválasztására került sor. Második lépésként meghatároz-

tuk ezen klímaérzékeny élőhelyek jelenlegi elterjedési területére a klímaváltozás várható hatását (potential impact, PI).

A kiválasztott CSH-k alkalmazkodóképességének számításához Czucz és mtsai. (2011) által kidolgozott elméleti modellt adaptáltuk. Ennek megfelelően három indikátorcsoportot számszerűsítettünk minden egyes élőhelytípusra és területre:

1. Az élőhely jelenlegi viszonyok közötti természetessége.
2. A területet övező táj diverzitása.
3. A CSH-k jelenlegi táji mintázata, mellyel az ökoszisztémák közötti migráció alapján tudjuk becsülni az adaptív kapacitást.

Végül bemutatunk egy kidolgozott példát a természetes ökoszisztémák PI és AC alapokon történő, táji szintű, összevont sérülékenységelemzésére.

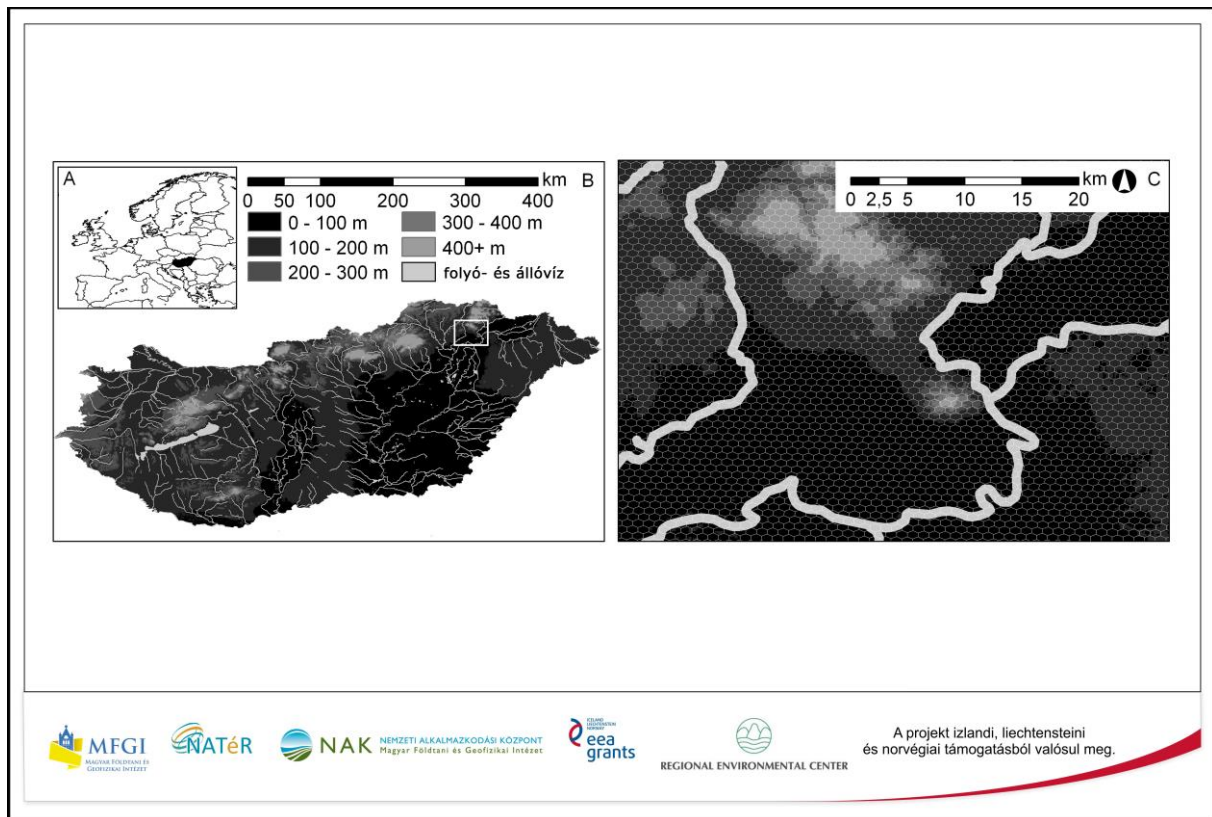
2 MÓDSZEREK ÉS MEGKÖZELÍTÉSEK

2.1 BIOKLIMATIKUS MODELLEZÉS

A bioklimatikus modellek az élőhelyek megfigyelt előfordulásai és az ott megfigyelt környezeti viszonyok között teremtenek kapcsolatot. Ennek alapján két fő adatcsoportot használtunk munkánkban: élőhelyi megfigyelések, illetve az abiotikus környezetet leíró adatok és térképek. A klíma-érzékenységet a klímaváltozók relatív fontosságával jellemeztük, amely a bioklimatikus modellekezés egyik eredménye.

Az élőhelyi megfigyelések Magyarország Élőhelyeiknek Térképi Adatbázisából (MÉTA; HORVÁTH és mtsai. 2008, MOLNÁR és mtsai. 2007, BÖLÖNI és mtsai. 2011) származnak. A MÉTA adatbázis terület alapú borítási adatokat tartalmaz a 86 legfontosabb vegetáció típusra, az egész országot lefedő 35 hektáros szabályos hatszögekenként (2. ábra). A MÉTA adatbázisban a vegetációt az Általános Nemzeti Élőhely-osztályozási Rendszer (ÁNÉR) alapján élőhelyi szinten osztályozták, azaz növénytársulásoknál durvább, de a formációnál finomabb felbontásban. Az adatbázisban a természetes és rontott, valamint klimax és átmeneti szukcessziós stádiumú élőhelyek egyaránt szerepelnek. Mivel végső célunk, hogy megbecsüljük az éghajlati sérülékenységet, olyan élőhelyeket választottunk, amelyek adott éghajlati viszonyok között stabilak, azaz a növényzet természetes fejlődésének végső állomásait képviselik, vagyis a tágabb értelemben vett klimax vegetációhoz sorolhatók (2. táblázat). Ezek egy részénél a térképezés óta eltelt tapasztalatok alapján kiderült, hogy elkülönítésük nem volt stabil, függött a térképező személyétől (tapasztalatától, szakterületétől), ezért az ÁNÉR osztályozáshoz képest összevonásokra került sor. További információ az élőhelyekkel kapcsolatban: MOLNÁR és mtsai. (2007), illetve BÖLÖNI és mtsai. (2011); valamint a www.novenyeterkep.hu honlapon, mely további hasznos információkat tartalmaz az élőhelyekről és azok térképezéséről.

Modellezéshez az élőhelyek előfordulásainak jelenlét-hiány információit használtuk fel. Az olyan rendkívül ritka élőhelyeket, melyek előfordulása 100 alatt van Magyarországon (pl. tőzegtóhalápok) kizártuk a vizsgálatból. Ennek oka, hogy habár ezen társulások is a klimax stádiumot képviselik, számuk annyira alacsony az országban, hogy nincs elegendő információ a környezeti preferenciák megállapításához. Mivel a térképezés kiterjedt terepi felmérés alapján történt, az élőhelyek előfordulásának hiánya is megbízható információnak tekinthető. Azonban figyelembe kell venni, hogy egy élőhely hiányát nemcsak a számára nem megfelelő környezeti viszonyok (a vizsgálat egyik tárgya), hanem emberi beavatkozásból eredő élőhelypusztítás is okozhatja. Habár a bizonytalanság ezen forrását nem tudtuk teljes mértékben kiküszöbölni, megpróbáltuk csökkenteni azáltal, hogy kivettük azokat a térbeli egységeket a felépített adatbázisból, melyek egyáltalán nem tartalmaznak zavartalan vegetációt a MÉTA adatbázisa szerint. Ezekben a hatszögekben az ember teljes mértékben kipusztította a természetes vegetációt, ezért itt az élőhelyek előfordulásának hiánya egyértelműen nem az élőhely igényeire reflektál. A MÉTA adatbázis összesen 267 813 hatszöget tartalmaz, melyből 87 830 került megtartásra ezen szűrés követően.



2. ábra. Magyarország Élőhelyeinek Térképi Adatbázisa (MÉTA) által használt hatszögháló. Vetület: World Geodetic System 1984 (WGS 84), az ábra ArcGIS 10.1. programban készült

2. táblázat. A modellezett élőhelyek elnevezései és rövidítései

B1a	Nem tőzgeképző nádasok, gyékényesek és tavikákások
B1b	Úszólápok, tőzeges nádasok és télisásosok
B4	Lápi zombékosok, zombék-semlyék komplexek
B6	Zsíókás, kötő kákás és nádas szikes vizű mocsarak
F1a	Ürmőpuszták
F2	Szikes rétek
F4	Üde mézpázsitos szikfokok
F5	Padkás szikesek, szikes tavak iszap- és vakszik növényzete
G1	Nyílt homokpusztagyeppek
G2	Mészkedvelő nyílt sziklagyeppek
G3	Nyílt szilikátsziklagyeppek és törmeléklejtők
H1	Zárt sziklagyeppek
H2	Felnyíló, mészkedvelő lejtő- és törmelékgyeppek
H3a	Köves talajú lejtősztyeppek
H4	Erdősztyeprétek, félszáraz irtásrétek, száraz magaskórósok
H5a	Lőszgyeppek, kötött talajú sztyeprétek
H5b	Homoki sztyeprétek

2. táblázat folytatása: A modellezett élőhelyek elnevezései és rövidítései

J1a	Fűzlápok
J2	Láp- és mocsárerdők
J3_J4	Folyómenti bokorfüzesek és Fűz-nyár ártéri erdők
J5	Égerligetek
J6	Keményfás ártéri erdők
K1a_K2_K7b	Gyertyános-tölgyesek
K5_K7a	Bükkösök
L1_M1	Molyhos tölgyesek
L2a_L2b	Cseres-tölgyesek
L2x_M2	Hegylábi zárt erdőssztyep tölgyesek és Nyílt lösztölgyesek
L4a_L4b	Mészkerülő tölgyesek
L5	Alföldi zárt kocsányos tölgyesek
LY1	Szurdokerdők
LY2	Törmelék-lejtő erdők
LY3	Bükkös sziklaerdő
LY4	Tölgyes jellegű sziklaerdők és tetőerdők
M3	Nyílt sziki tölgyesek
M4	Nyílt homoki tölgyesek
M5	Homoki borókás-nyársaik
M6	Sztyeppcserjések
M7	Sziklai cserjések
N13	Mészkerülő lombelegyes fenyvesek

Az összes élőhelymodellt a NATÉR által biztosított CarpatClim-Hu adatbázis szolgáltatja éghajlati adatokon építettük fel (3. táblázat). Az adatbázis egész Magyarország területét magába foglalja, más szempontból megegyezik a CarpatClim adatbázissal (SZALAI és mtsai. 2013). Az éghajlati adatok térbeli felbontása kb. 10 km-es (0,1°), időbeli felbontása pedig egy nap. A vegetációmodellezéshez ilyen finom időbeli felbontás nem szükséges, ezért a napi hőmérsékleti és csapadékatokat a harminc-éves időszakra összevontuk, és a hőmérsékleti adatok esetén havi átlagokat, a csapadékatok esetén pedig havi összegeket állítottunk elő. Az összevonási időszak hozzá a klímamodellek által használt időablakok hosszához igazítottuk.

A havi éghajlati adatokat hibakorrigáltuk úgy, hogy a hibát a hőmérséklet esetén a modellezett és megfigyelt adatok különbsége, míg csapadék esetén az adatok hányadosa adta. Végül a jövőbeli éghajlati adatokat ezen hibákkal javítottuk (ún. delta change módszer). Az ökológiai modell által használandó referencia-időszakként a 2004 és 2006 között gyűjtött növényzeti adatokhoz leginkább illeszkedő 1977–2006-os időszakot jelöltük ki. Mivel az éghajlati adatok térbeli felbontása a vegetációmodellezés számára túlságosan durvának bizonyult, szükségesnek mutatkozott ezek leskálázása.

Ennek két fő módja ismert: a statisztikai és dinamikus leskalázás. Mivel az utóbbi igen erőforrás-igényes és jelentős mértékben támaszkodik szakértői döntésekre, ezért statisztikai leskalázás (térbeli interpoláció) alkalmazása mellett döntöttünk.

A statisztikai leskalázás számos különféle módszerrel végezhető, többek között egyszerű statisztikai módszerekkel (pl. általánosított lineáris modellel [GLM]), determinisztikus interpolációkkal (pl. Thin Plate Spline [TPS], Inverse Distance Weighting [IDW], legközelebbi szomszéd módszere [NN], Voronoi-cellák, Thiesen-sokszögek), geostatistikai módszerekkel (krigelés), egyszerű vagy összetettebb fa alapú osztályozási/regressziós módszerekkel (pl. Random Forest-modell [RF], Gradient Boosting-modell [GBM]) vagy néhány mesterségesintelligencia-algoritmussal (pl. mesterséges neuronhálók [ANN]). A használható módszerek részletes felsorolása és összevetése megtalálható HARTKAMP és mtsai. 1999, SLUITER 2008, valamint LI és HEAP 2014 munkáiban. A legtöbb olyan esetben, amikor ökológiai modell számára finom felbontású kalibrációs vagy kiértékelési adatbázist kell építeni, egyszerű interpolációs módszert (pl. Inverse Distance Weighting [IDW]) szokás alkalmazni. Az egyszerű technikák azonban nem használnak segédváltozókat, nem számítanak bizonytalanságot stb. Egy adott változó (esetünkben az éghajlati felület) leskalázása során elérhető pontosság segédváltozó(k) alkalmazásával növelhető (KNOTTERS és mtsai. 1995).

Kutatásunk során regresszió krigelést alkalmaztunk lineáris modell felhasználásával. A krigelést (KRIGE 1966) hosszútávú csapadék- és hőmérsékleti adatsorok interpolációjához széles körben használják (pl. TABIOS és SALAS 1985, HEVESI és mtsai. 1992, HOLDAWAY 1996, DRYAS és USTRNUL 2007). A regresszió krigelés a meteorológiában szintén gyakorta alkalmazott módszer (GOOVAERTS 1999, 2000, TVEITO és mtsai. 2006, WU és LI 2013).

A térbeli interpolációs módszerek egymástól matematikai előfeltételeikben, helyi vagy globális megközelítésükben, valamint determinisztikus vagy sztochasztikus természetükben különböznek (LAM 1983, LUO és mtsai. 2008). A determinisztikus technikákkal ellentétben a krigelés a felület kiszámításának problematikájára olyan megoldást kínál, amely a térbeli korrelációt figyelembe veszi (LUO és mtsai. 2008). A krigelés egzakt, nem konvex, lineáris, sztochasztikus és helyi (esetenként a globális trendet figyelembe vevő) interpolációs módszer, amely törésmentes (folytonos) felszínt ad (HARTKAMP és mtsai. 1999, LI és HEAP 2014). Bár a krigelés néhány típusa egyváltozós módszer, a regresszió krigelés, mivel segédváltozó(ka)t használ, többváltozós (LI és HEAP 2014). A krigelés sztochaszticitása az IDW módszerhez hasonlóan abban nyilvánul meg, hogy az ismeretlen pontokra interpolált értéket az ismert pontok súlyozott lineáris kombinációjaként állítja elő (COLLINS 1995, LUO és mtsai. 2008).

A többi krigelési technikával — főként a szokásos krigeléssel (ordinary kriging, OK) — összevetve a regresszió krigelésnek felfedezhetjük előnyeit (pl. a segédváltozó és a célváltozó közötti ismert és fizikailag magyarázható összefüggést fel tudja használni) és hátrányait (pl. a hibataggal szemben feltételezéssel él) is (KNOTTERS és mtsai. 1995). A regresszió krigelés — mely ismert még residual kriging, detrended kriging és kriging with external drift (KED) neveken is — során a háttértrendet regresszióval (esetünkben lineáris regresszióval) vagy trendszűrővel számítjuk (HOLDAWAY 1996). Habár a regresszió krigelés és a kriging with external drift (KED) matematikai értelemben megegyezik, a kettő közti legfőbb különbség az, hogy míg az utóbbi a segédváltozókat közvetlenül a krigelési súlyok számításához használja fel, addig az előbbi egyszerű krigelést (simple kriging, SK) végez a korábban számított regresszió maradéktagjain (HENGL és mtsai. 2007, LI és HEAP 2014).

A kutatásban három segédváltozót alkalmaztunk. Mind az 5×48 havi éghajlati adatsor (a havi csapadék, minimum, maximum és középhőmérsékletek harmincéves időszakokra képzett átlagai) lineáris regressziójához a tengerszint feletti magasságot, a földrajzi szélességet, valamint a földrajzi hosszúságot használtuk fel. Kiszámítottuk az egyes független változók és az egész modell szignifikanciáját és a determinációs együtthatót. A tapasztalati félvariogram alapján kezdeti félvariogram-modellt építettünk rögzített küszöbszinttel, röghatással és hatástávolsággal. Míg a röghatás kezdeti értékét nullának vettük, addig a részleges (és így a teljes) küszöbszintet a tapasztalati félvariogram átlagos félvarianciájaként rögzítettük, a hatástávolság pedig a kutatási ablaknak (a kutatás földrajzi kiterjedésének) az egynolcada lett. Ezután exponenciális félvariogram-modellt illesztettünk rugalmas küszöbszinttel, röghatással és hatástávolsággal.

A finom térbeli felbontású éghajlati felületek előállítását követően évszaki átlagos hőmérsékleteket és évszakai csapadékösszegeket, valamint 19 bioklimatikus változót számítottunk, utóbbit a WORLDCLIM-projekt javaslati alapján (HIJMANS és mtsai. 2005). A talajtani adatok a Digitális, Optimalizált Tágabb Értelemben Vett Talaj térképek és Információk Magyarországon (DOSoReMI) adatbázisából származnak (PÁSZTOR és mtsai. 2015). A víztestektől vett távolság számításánál hatszögközpontokkal dolgoztunk. Néhány talajleíró adat logikai (kétállapotú kategorikus) változóként került kódolásra (Svac, Sac, Sne, Sal, Sval — lásd a 3. táblázatot a rövidítések magyarázatáért), míg az összes többi változó folytonosnak adódott. A terepfelszín változatosságának megmagyarázására számos, domborzatot leíró változót kiszámítottunk. Így összességében 26 talajtani, 9 vízrajzi, 6 domborzati és 27 éghajlati paramétert állítottunk elő kezdeti prediktorhalmazként.

A modellek által használt, magyarázó változókat tartalmazó változóhalmazt a fent soroltakból jelöltük ki. A kiválasztás az egyes változók hatása és a korrelációs szerkezet elemzése segítségével történt, amikor a páronkénti korreláció abszolútértékét 0,8-nál maximalizáltuk, míg a változóhalmazt jellemző „Condition Number”-t 30-ban (CN; DORMANN és mtsai. 2013), a Variance Inflation Factort (VIF) pedig 50-ben maximalizáltuk. Míg egyes szerzők (BELSLEY 1991, HAIR és mtsai. 1995) a VIF-et 10-ben javasolják maximalizálni, az újabb irodalomban kevésbé éles határt javasolnak, különösen, ha a CN 30 alatti (O'BRIEN 2007, CHENNAMANENI és mtsai. 2016). A páronkénti korrelációt Pearson-féle korrelációval számszerűsítettük. A kiválasztási eljárás után maradt változókat a 3. táblázatban ismertetjük részletesebben.

3.táblázat. Az elemzésben alkalmazott háttérváltozók

Háttérváltozó rövidítése	Háttérváltozó leírása	Forrás/számítás
<i>Bioklimatikus változók (30 éves átlagok)</i>		
BIO3	Izotermalitás (átlagos napi hőingás és éves hőingás hányadosa)	CarpatClim és NATÉR
BIO4	Hőmérsékleti szezonális (szórás)	
BIO5	Legmelegebb hónap maximum-hőmérséklete	
BIO6	Leghidegebb hónap minimum-hőmérséklete	
BIO15	A csapadékeloszlás szezonális (relatív szórása)	
BIO18	Legmelegebb negyedév csapadékösszege	
BIO19	Leghidegebb negyedév csapadékösszege	
<i>Talajjellemzők</i>		
Svac	Erősen savanyú (pH < 5,6) talaj előfordulása a MÉTA-hatszögön belül	DOSoReMI
Sac	Savanyú (5,6 < pH < 6,6) talaj előfordulása a MÉTA-hatszögön belül	
Sne	Semleges (6,6 < pH < 7,6) talaj előfordulása a MÉTA-hatszögön belül	
Sal	Lúgos (7,6 < pH < 8,6) talaj előfordulása a MÉTA-hatszögön belül	
Sval	Erősen lúgos (pH > 8,6) talaj előfordulása a MÉTA-hatszögön belül	
Ssa	A felső (0-30 cm) talajréteg homokfrakció-arányának MÉTA-hatszögön belüli átlaga	
Scl	A felső (0-30 cm) talajréteg agyagfrakció-arányának MÉTA-hatszögön belüli átlaga	
Soc	A talaj szervesanyag-tartalmának MÉTA-hatszögön belüli átlaga	
Sda	A talajvíztűrkör mélységének MÉTA-hatszögön belüli átlaga	
Srn	A gyökerezési mélység MÉTA-hatszögön belüli minimuma	
Srx	A gyökerezési mélység MÉTA-hatszögön belüli maximuma	
<i>Vízrajz</i>		
Dla	Állóvizektől (tavaktól) mért (legkisebb) távolság	Digitizált vektoros rétegek
Dri	Folyóktól mért (legkisebb) távolság	
Dst	Patakotól mért (legkisebb) távolság	
Dca	Csatornáktól mért (legkisebb) távolság	
Dnw	Természetes vizektől (folyóktól, patakotól és tavaktól) mért (legkisebb) távolság	
Dwa	Víztestektől (tavaktól, folyóktól, patakotól és csatornáktól) mért (legkisebb) távolság	
<i>Domborzati viszonyok</i>		
TPI	A domborzati helyzet (Topographic Position Index, TPI) MÉTA-hatszögön belüli szórása	Digitális Domborzat Modell a NATÉR-ből

Az R statisztikai programkörnyezet (R Development Core Team 2013) „gbm” nevű függvénycsomagjának (RIDGEWAY 2015) segítségével az összes élőhely jelenlét-/hiányadatát (élőhelyenként külön-külön) a magyarázó változókhoz kötöttük Gradient Boosting-modell (GBM) segítségével. Azért esett a választásunk a GBM módszerére, mert rugalmasan képes válaszgörbét adni, a magyarázó változók kiválasztásakor a sokszor kifogásolt Akaike Információs Kritérium (Akaike Information Criterion, AIC) helyett keresztvalidációt alkalmaz, és bizonyíthatóan számos ökológiai vonatkozású modellezési feladatnál megbízhatóan szerepel (BÜHLMANN és HOTHORN 2007, ELITH és mtsai. 2006).

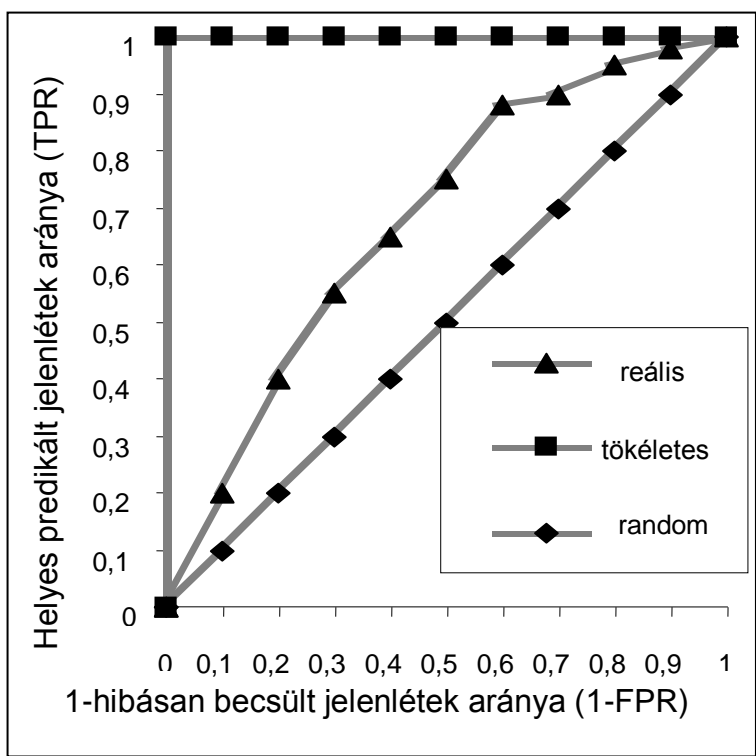
A számítások során ELITH és mtsai. (2008) által javasolt vizsgálati lépések szerint haladtunk, és — némi változtatásokkal — az általuk biztosított kódsort futtattuk. Elsőként, mivel a nagy adatmennyiség ezt lehetővé tette számunkra, minden élőhely esetén a jelenlét-/hiányadatokat véletlenszerű módon szétszortottuk tanító és kiértékelő adatbázisra, és a modellek építéséhez (tanításához) csupán az előbbit használtuk fel. A kettéosztás során a jelenlétek és hiányok arányát fixen tartottuk, így az egyforma az eredet, a tanító és a kiértékelő adatbázisban egyaránt. A fenti cikkben javasoltaktól előzetes tapasztalatainknak megfelelően két modellezési paraméter beállításában eltértünk: a fák összetettségét (tree complexity) 3, a visszatevés arányát (bag fraction) pedig 0,5-nél rögzítettük. Mivel a tanulási sebesség (learning rate; a GBM harmadik, állítható indítási paramétere) függ a vizsgálandó élőhely előfordulásától, ezért minden élőhelyre a jelenlét és hiány arányának függvényében választotta ki a modellünk a tanulási sebességet előre rögzített értékek közül a 0,008 és 0,1 közötti intervallumból, mely tartományt ELITH és mtsai. (2008) kutatásuk alapján javasolták. Az így kijelölt tanulási sebesség biztosítja, hogy a modell által előállított fák száma 1000 és 10 000 közé kerüljön (az összes modell átlagos faszáma 4800 lett), követve ELITH és mtsai. (2008) iránymutatását miszerint a modellek legalább 1000 fát tartalmazzanak. Amennyiben egy modellünk túl sok, vagy éppen túl kevés fát tartalmazott, módosítottuk a tanulási sebességet, és az újonnan beállított sebességgel a modellt újraépítettük.

Végrehajtottuk a modellek egyszerűsítését is, vagyis a GLM által alkalmazott elhagyásos változókiválasztáshoz (backward selection) hasonló módszerrel a kevésbé fontos változókat eldobtuk a modellből. A részleteket illetően megintcsak ELITH és mtsai. (2008) útmutatása szerint jártunk el. A modellek jóságát egy széles körben alkalmazott metrikával, a Receiver Operating Characteristic-görbe (ROC-görbe) alatti terület nagyságával (AUC, SWETS 1988) számszerűsítettük. A ROC-görbe a kontingenciatáblán (a megfigyelt és modellezett jelenlét- és hiányadatok 2x2-es táblázatán) alapul, hiszen a predikált előfordulási valószínűség összes lehetséges vágópontja esetén előállított számos kontingenciatábla alapján rajzolható ki (4. táblázat, 3. ábra). A modell annál jobb, minél magasabban fut a görbe a valós pozitív arány (True Positive Rate, TP/TP+FP), valamint az téves pozitív arány (False Positive Rate, FP/(FP+FN)) egytől való eltérése, mint tengelyek által kifizített koordinátarendszerben. Ezért a nagyobb görbe alatti terület (nagyobb AUC-érték) jobb predikciót jelent, és így megbízhatóbb modellt sejtet a háttérben.

Az élőhelyek klímaérzékenységének megállapításához a GBM által számított változófontosságot kétféle módon vettük figyelembe: egyrészt közvetlenül, másrészt az éghajlati változók relatív fontosságát számszerűsítve.

4. táblázat. A modell által helyesen és tévesen becsült előfordulásokat bemutatókontingenciatábla. $TPR = TP/(TP+FN)$; $FPR = FP/(FP+FN)$

		Predikció	
		1	0
Megfigyelés	1	Eltalált jelenlét becslés-TP	Hibás jelenlét becslés-FP
	0	Hibás hiány becslés-FN	Eltalált hiány becslés-TN



3. ábra. A ROC görbe lefutása két demonstratív és egy reális esetben: „tökéletes” — a becsült valószínűségek tökéletesen illeszkednek a megfigyeltre, „random” — random előállított becslés esetén tapasztalt összefüggés, „reális” — egy lehetséges, a gyakorlatban előforduló becslés ROC görbéje.
 TPF=helyes predikált jelenlétek aránya,
 FPF=hibásan becsült jelenlétek aránya (lásd 4. táblázat)

2.2 TÁJÖKOLÓGIAI ELEMZÉS

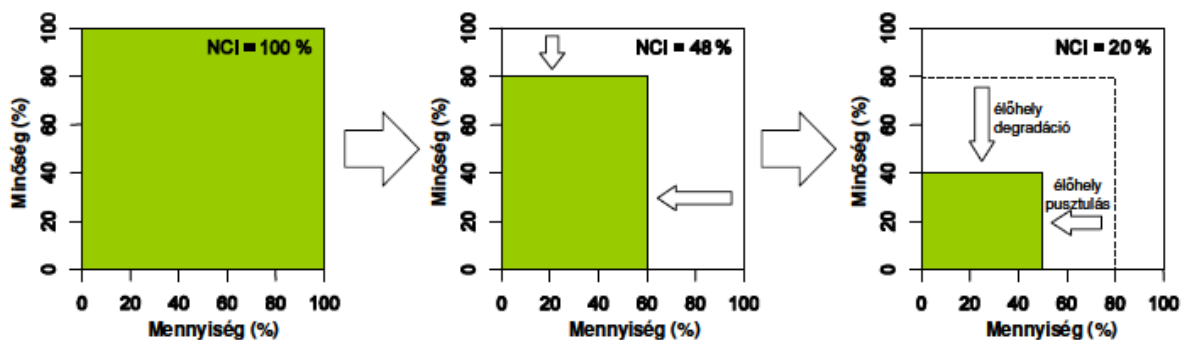
Az élőhelyek klímaváltozáshoz való alkalmazkodóképességét (AC) a környező táj szerkezete és az élőhely előfordulási mintázata alapján, tájökölógiai elemzéssel lehet megállapítani. Az IPCC meghatározása szerint, az adaptáció a „klímaváltozáshoz való alkalmazkodás képessége (beleértve a klímavarisánsokat és extremitásokat), mellyel az adott rendszer képes a várható káros hatásokat

mérsékelni, a lehetőségekből előnyt kovácsolni, vagy a következményekkel megbirkózni” (IPCC 2007, Glossary). Az ökoszisztémák esetében az adaptáció túlnyomórészt nem evolúciós változások, hanem a klímaváltozás által kiváltott ökológiai változások összessége. Következésképpen az adaptáció nem csak a genetikai evolúciós adaptációt foglalja magába, hanem minden rendszerszintű alkalmazkodási folyamatot, úgymint a helybenmaradáshoz szükséges ellenálló képesség, refúgium alapú alkalmazkodást és a migráció alapú alkalmazkodást (Czúcz és mtsai. 2011).

Mivel a nagyszámú élőhely összes előforduló fajáról igényelne adatot, mely nem áll rendelkezésre, illetve ezek integrálása nagyfokú elméleti komplexitást eredményezne az élőhelyek genetikai alkalmazkodóképességét nem vizsgáltuk. Mindazonáltal az alkalmazkodás három másik mechanizmusát számításba vettük.

A helybenmaradáshoz szükséges ellenálló képesség legjobban a táj természetességi mutatóiból becsülhető (COOK 2002, Czúcz és mtsai. 2012), amelyek közül a természeti tőke indexet (Natural Capacity Index, NCI) választottuk. A természeti tőke index az ökoszisztéma mennyiségi és minőségi tényezőiből fejezhető ki (4. ábra)

$$NCI = \text{ökoszisztéma minőség} \times \text{ökoszisztéma mennyiség} = q.a$$



4. ábra. A természeti tőke index grafikus szemléltetése

A menedék-elvű alkalmazkodás annál sikeresebb, minél heterogénebb a táj jelen állapotában, ezért ezt a tényezőt diverzitási indikátorokkal számszerűsítettük (Czúcz és mtsai. 2011). Ehhez a legelterjedtebb módszert, a Shannon-féle diverzitást alkalmaztuk. Inputként az élőhelyek gyakorisága szolgált egy-egy NATÉR négyzeten belül, így ennek eredményképp meg tudtuk becsülni a négyzet élőhelydiverzitását.

A vándorlás-elvű alkalmazkodást a táj összekötöttsége határozza meg, melynek számszerűsítéséhez az azonos élőhelyfoltok közelségén alapuló indexet használtunk (Czúcz és mtsai. 2011). Az összekötöttség számszerűsítésére számos lehetőség adódik, melyek két fő csoportba sorolhatók aszerint, hogy a táj szerkezetét, vagy éppen a táj funkcionális elemeit próbálják megőrizni. Az előbbi típusra jó példák a folyosók jelenlétét, vagy éppen a távolságokat figyelembe vevő metrikák, vagy esetleg az áthárthatóságot gráfelméleti megközelítéssel elemző módszerek. Ismertek továbbá a tájban megjelenő élőhelyek számán alapuló mutatók, melyekből képezhetünk átjárhatóságot számszerűsítő metrikát. A funkcionalitásra reagáló összekötöttségi mutatók gyakran a terjedés valószínűségén és az élőhelymátrix átteresztőképességén alapulnak (KINDLMANN és BUREL 2008).

Mivel kutatásunk egy-egy élő szervezet helyett élőhelyek egészével foglalkozott, így a funkcionális jellegű összekötöttségi mérőszámok alkalmazása nem tűnt célravezetőnek. Az egy élőhelyen élő számos faj funkcionális igényei (pl. az átteresztőképességet illetően) nagy valószínűséggel egymástól eltérnek. A szerkezetet megragadó összekötöttségi metrikák ugyanakkor jól alkalmazhatóak, hiszen az élőhelyre jellemző fajok terjedését — ha eltérő mértékben is, de — hasonlóképpen befolyásolja a hasonló foltok közelsége vagy a folyosók és egyéb tájalkotó elemek jelenléte. Mindezt a vándorlás-elvű alkalmazkodóképességet jelenlét-/hiányadatokara alkalmazott euklidészi távolságból képzett indikátorral (Czúcz és mtsai. 2011) élőhelyenként számszerűsítettük.

$$C_i = \sum_{j|D_{ij} < D_0} A_j e^{-\alpha D_{ij}}$$

ahol C_i az i . MÉTA-hatszögben mért, adott élőhelyre vonatkozó táji összekötöttség indikátora, vagy pontosabban: az i . MÉTA-hatszög hozzájárulása a táji összekötöttség egészéhez, mely magában foglalja a hatszög többihez képesti helyzetét (bennfoglaltság, különállás) a tájban mint hálózatban. A C_i értékét az adott hatszögtől megadott keresési sugarú körön belül található közeli, azonos élőhellyel jellemzett foltok exponenciális értékkel súlyozott gyakorisága adja. Így a képletben D_0 az előre meghatározott keresési sugár, míg D_{ij} a közeli folt és a vizsgált központ folt — D_0 -nál kisebb — távolsága. Az eredeti képletben A_j a folt kiterjedésével egyenértékű, de mivel esetünkben a vizsgálat tárgyát élőhelyek előfordulása jelentette, a paraméter értékét 1-nek tekintettük. α egy megfelelően megválasztott terjeszkedési (diszperziós) paraméter, melynek helyes — az adott fajnak vagy fajok csoportjának a terjeszkedési képességét figyelembe vevő — beállításával végezhető el az indikátor finomhangolása. A keresési sugárnak megfelelően nagynak kell lennie ahhoz, hogy a gyorsan csökkenő exponenciális súlyfüggvény nagy részét magában foglalja. Czúcz és mtsai. (2011) javaslata alapján α értékét $0,5 \text{ km}^{-1}$, míg D_0 értékét 1 km-ben határoztuk meg. Mindhárom indexet átskáláztuk egy 5 fokozatú (0–4) ordinális skálára. Az első kettőnél a legkisebb és legnagyobb érték között egyenletes átskálázást alkalmaztunk, míg a harmadik index átskálázásához Czúcz és mtsai. (2011) által szimulációval megállapított határokat használtuk fel. A három indikátor megfelelő térbeli egységre (NATÉR négyzet, ill. Település külterület határ) vonatkoztatott maximuma lett az AC mérőszáma.

2.3 KLÍMAÉRZÉKENY ÉLŐHELYTÍPUSOK MEGHATÁROZÁSA

Az éghajlatra érzékenyen reagáló élőhelytípusok kiválasztásához a bioklimatikus modellezés eredményeire támaszkodtunk. A GBM módszer képes a valóban ható magyarázó változókat meghatározni (automatikus változóselekción). A GBM által használt boosting technika lehetővé teszi, hogy a végső modellszerkezet azonos legyen függetlenül attól, hogy klasszifikációs és regressziós fákból vagy általánosított lineáris modellből indultunk ki. A boosting során ugyanakkor soha nem épül olyan összetett modell, mely az összes lehetséges magyarázó változót felhasználja, inkább csak rövid fákat (kis lineáris modelleket) képez. A modellezett entitás végső válaszgörbéje az említett nagyszámú részmodellből képződik. A GBM a változókiválasztás során e fába beépült magyarázó változók gyakoriságát iteratív folyamatban vizsgálja (keresztvalidáció). Az egyszerűsítési eljárás után

megmaradt magyarázó változók jelentőségét a GBM a változók felhasználtsági foka, vagyis az egyes részmodellekbe történt beépülésük gyakorisága, alapján számítja. Ennek segítségével módunk nyílik értékelni az egyes változók befolyását, vagyis hogy az élőhely számára mennyire jelentősek.

2.4 SÉRÜLÉKENYSÉGELEMZÉS

A sérülékenység megbecslésének első lépése a 12 klímaérzékeny élőhely elterjedési területén belül várt éghajlati hatás (várható hatás, PI) számszerűsítése. A PI-t adott élőhely jelenlegi és a jövőbeli előfordulási valószínűségének különbségével jellemeztük. Két eltérő klímamoddellel előállított adatok álltak rendelkezésre, ezért a PI-t is négy változatban tudtuk becsülni. A PI értékei esetünkben -1 és 1 közé esnek, az 1 -es jelenti a legsúlyosabb kedvezőtlen klímahatást, míg -1 esetén a klímaváltozás hatása kedvező az adott élőhelyre.

Azért választottuk ezt a számszerűsítést, hogy a nagy PI jelölje a kedvezőtlen várható hatást, és így illeszkedjen az intuitív értelmezéshez. A PI értékét először MÉTA-hatszögrácsra számítottuk, majd a becsléseket a NATÉR rácshálójára, valamint a településekre vontuk össze. A vizsgált földrajzi egységre (az adott NATÉR-négyzetre vagy az adott település közigazgatási területére) vonatkoztatott értéket az egységen belül található legmagasabb PI adta.

A sérülékenység (V) a PI és az AC függvénye, minél nagyobb a PI az élőhely annál sérülékenyebb, ám a PI-t csökkentheti az AC. A sérülékenységi elemzés során csupán a klímaváltozás hátrányos hatására irányítottuk figyelmünket, ezért csak a pozitív PI-t (nem kívánt klímahatást) vettük figyelembe. Így egy vizsgált élőhely sérülékenységét a pozitív (de csakis a pozitív) PI és az alkalmazkodóképesség hiányának ($5 - AC$) szorzataként számítottuk:

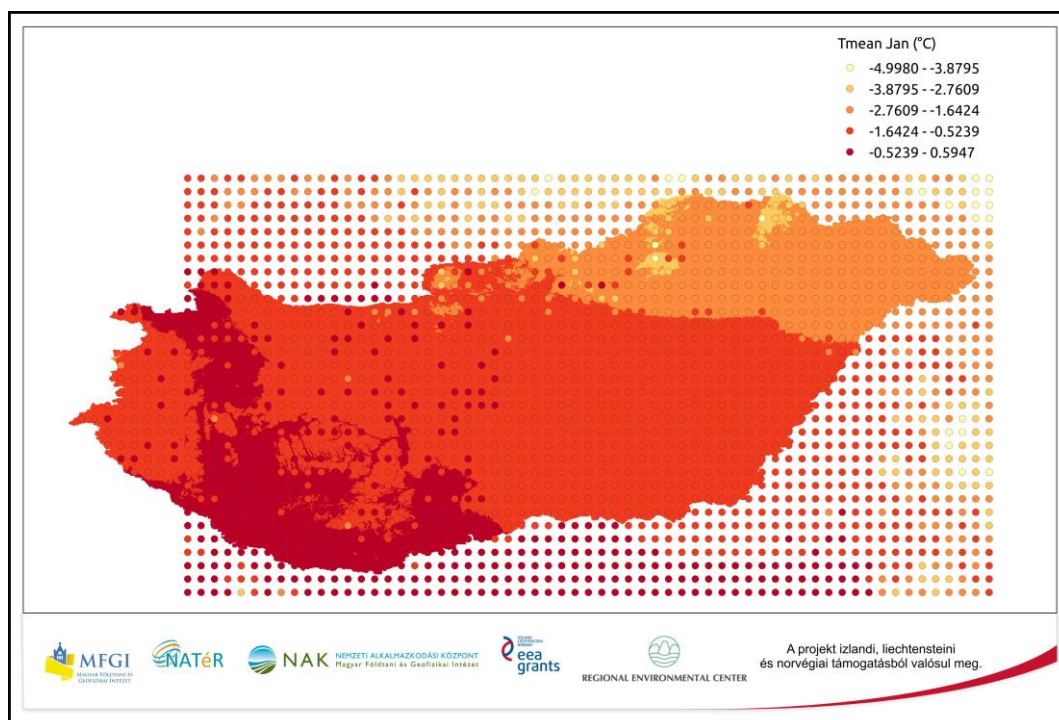
$$V = PI \times (5 - AC)$$

Így a magas AC-hez 1 tartozott, míg az alacsonyhoz 5 . Így biztosítottuk azt, hogy kis AC magasabb V -hez vezessen. A V NATÉR négyzet szinten került meghatározásra, úgy hogy a négyzetben előforduló legmagasabb sérülékenységet rendeltük az adott négyzethez. A V becslés 4 rétegben készült a jövőbeli időszakoknak és klímamodelleknek megfelelően.

3 EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

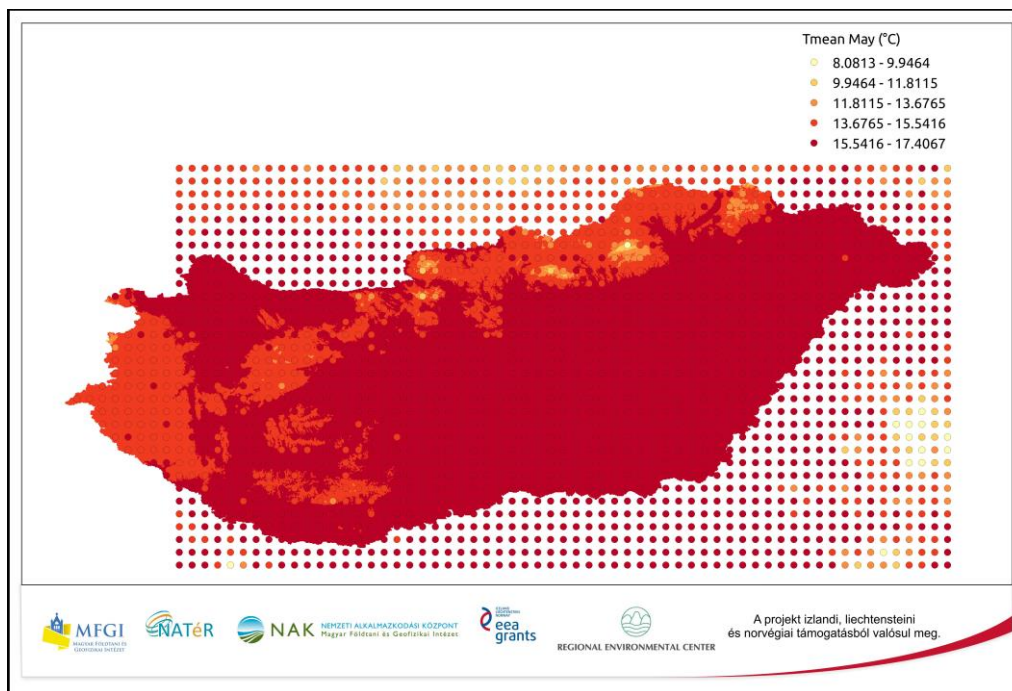
3.1 INTERPOLÁLT KLÍMAFELÜLETEK

Az elsőként előálló eredményeinket az interpolált klímafelületek adják (5–8. ábrák). Az eredeti megfigyelt klímaadatokhoz képest az interpolált felületek simítottabbak, ugyanakkor néhány kiugró pontot nem adnak jól vissza. Az ilyen kiugró értékek a hőmérséklet esetén gyakoribbak (5–6. ábrák), azon belül is főként télen (pl. 5. ábra). Mindettől függetlenül az interpoláció általánosságban sikeresnek mondható, és ezért az interpolált klímafelszínekre építettük később a modelljeinket.

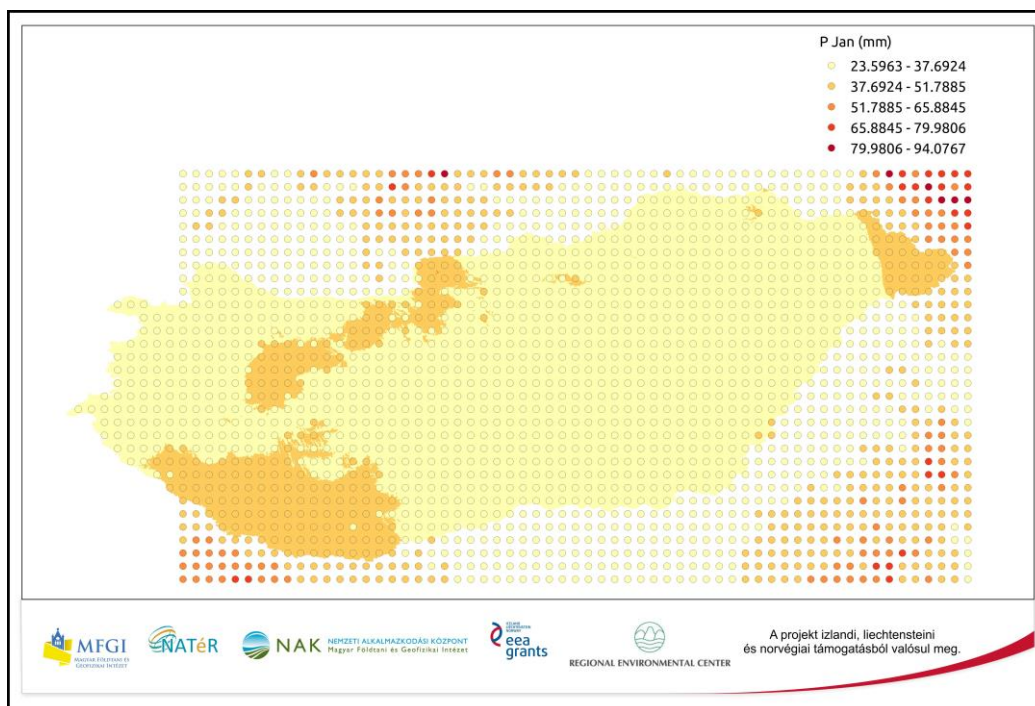


5. ábra. A CarpatClim adatok és a regresszió krigeléssel készült interpoláció összehasonlítása. Az 1977–2006-os időszak januári átlaghőmérséklete.

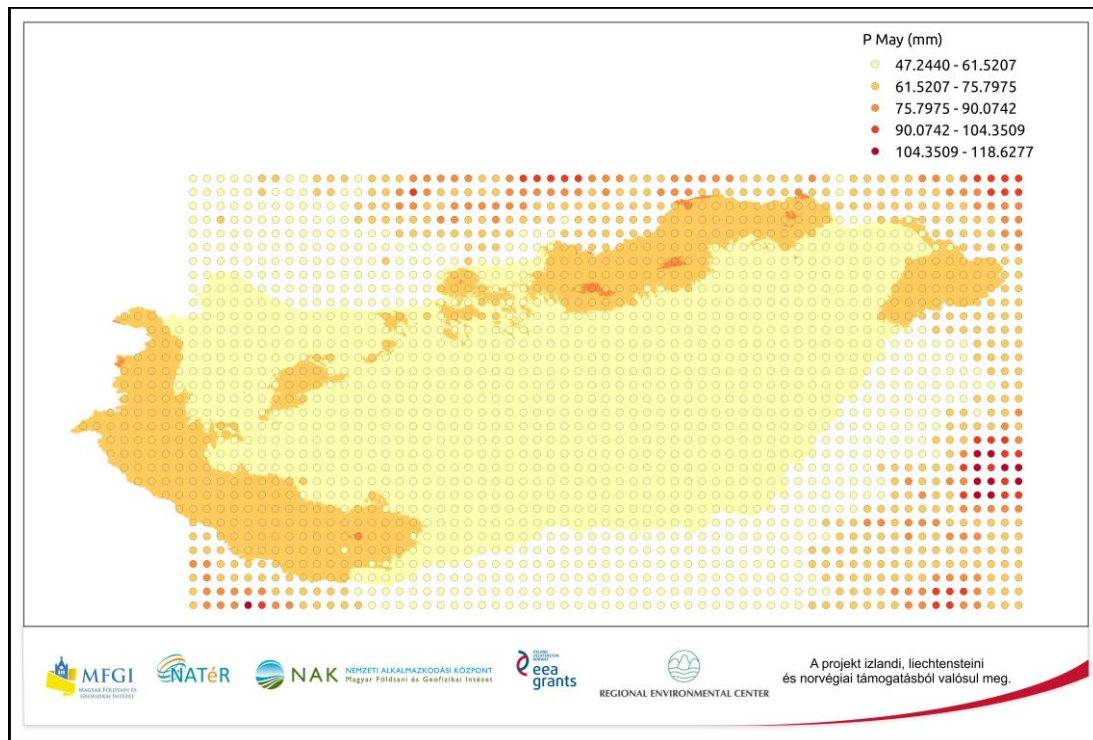
A használt vetület: World Geodetic System 1984 (WGS 84), az ábra a Quantum GIS 2.10 programmal készült



6. ábra. A CarpatClim-Hu adatok és a regresszió krigeléssel készült interpoláció összehasonlítása. Az 1977–2006-os időszak májusi átlaghőmérséklete. A használt vetület: World Geodetic System 1984 (WGS 84), az ábra a Quantum GIS 2.10 programmal készült



7. ábra. A CarpatClim-Hu adatok és a regresszió krigeléssel készült interpoláció összehasonlítása. Az 1977–2006-os időszak januári átlagos csapadékösszege. A használt vetület: World Geodetic System 1984 (WGS 84), az ábra a Quantum GIS 2.10 programmal készült



8. ábra. A CarpatClim-Hu adatok és a regresszió krigeléssel készült interpoláció összehasonlítása. Az 1977–2006-os időszak májusi átlagos csapadékösszege. A használt vetület: World Geodetic System 1984 (WGS 84), az ábra a Quantum GIS 2.10 programmal készült

3.2 KLÍMAÉRZÉKENY ÉLŐHELYTÍPUSOK

A modellek a hagyományos AUC mérték alapján a kiváló kategóriába sorolhatók (5. táblázat, lásd SWETS 1988). Csupán a lápi zombékosok, zombék-semlyék komplexek (B4; 0,83) és a sztyep-cserjések (M6; 0,89) esetén kaptunk 0,9-nél kisebb AUC-értéket. Az összes élőhelymodell átlagos AUC-je 0,95, mely magas érték így a modelleredményeket megbízhatónak tekinthetjük elemez-hessük.

A következő 12 élőhely bizonyult a leginkább klímérzékenynek: mészkerülő lombeleleges fenyesek (N13), törmelékletjtő-erdők (LY2), padkás szikesek, szikes tavak iszap- és vakszik növényzete (F5), bükkösök (K5_K7a), úszólápok, tőzeges nádasok és télisásosok (B1b), alföldi zárt kocsányos tölgyesek (L5), löszgyepek és kötött talajú sztyeprétek (H5a), hegylábi zárt erdőssztyep és lösztölgyesek (L2x_M2), cseres tölgyesek (L2a_L2b), erdőssztyeprétek (H4), fűzlápok (J1a), gyertyános tölgyesek (K1a_K2_K7b). Ezek mindegyikében a klímaváltozók relatív fontossága legalább 55% volt (100-ból). A további elemzéseket ezekkel az élőhelyekkel végeztük. A következőkben bemutatott ábrákat R statisztikai programkörnyezetből állítottuk elő az Egységes Országos Vetületi rendszerben (EOV; EPSG Spatial Reference System Identifier: 23700).

5. táblázat. Modell teljesítmény/jóság mértéke a ROC görbe alatti terület (AUC) alapján (lásd. 2. ábra)

Élőhelyek	AUC
B1a	0,908655
B1b	0,957458
B4	0,825739
B6	0,951257
F1a	0,975977
F2	0,976988
F4	0,961804
F5	0,954928
G1	0,978997
G2	0,97248
G3	0,955517
H1	0,933013
H2	0,977884
H3a	0,953303
H4	0,932601
H5a	0,930552
H5b	0,973943
J1a	0,918826
J2	0,920672
J5	0,948344
J6	0,964838
L5	0,978275
LY1	0,949829
LY2	0,953719
LY3	0,981422
LY4	0,972972
M3	0,956832
M4	0,942875
M5	0,979099
M6	0,888373
M7	0,946805
N13	0,993994
J3_J4	0,986159
K1a_K2_K7b	0,951151
K2_K7b	0,959395
K5_K7a	0,972385
L1_M1	0,962648
L2a_L2b	0,950084
L2x_M2	0,954412
L4a_L4b	0,953398

6. táblázat. A modellezett élőhelyek az éghajlattal kapcsolatos változók modellbeli fontosságának csökkenése szerint rendezve. Az éghajlattal kapcsolatos változók számát szintén feltüntettük. A későbbi elemzésekben szereplő élőhelyeket vastagon jelöltük

Habitat codes	No. of climate variables	Frequency of climate variables	Relative importance of climate variables
N13	2	1	1
LY2	2	0,67	0,75
F5	4	0,67	0,67
K5_K7a	7	0,44	0,62
B1b	6	0,6	0,61
L5	7	0,5	0,6
H5a	7	0,41	0,6
L2x_M2	7	0,47	0,6
L2a_L2b	7	0,44	0,59
H4	7	0,47	0,58
J1a	6	0,46	0,58
K1a_K2_K7b	7	0,47	0,55
J6	7	0,58	0,54
M7	1	0,5	0,53
LY4	6	0,5	0,53
F2	6	0,46	0,52
F1a	5	0,5	0,52
J5	7	0,5	0,52
B6	6	0,4	0,52
F4	5	0,5	0,52
J2	6	0,5	0,51
M6	4	0,44	0,5
B4	3	0,43	0,49
H2	6	0,4	0,47
LY3	4	0,5	0,46
K2_K7b	7	0,41	0,42
G2	3	0,38	0,42
L1_M1	7	0,47	0,41
L4a_L4b	5	0,38	0,39
H3a	5	0,42	0,39
G3	3	0,43	0,37
M5	3	0,38	0,34
B1a	6	0,33	0,31
H5b	6	0,43	0,31
J3_J4	7	0,5	0,3
LY1	2	0,4	0,29
G1	6	0,43	0,28
M3	1	0,14	0,17
H1	0	0	0
M4	0	0	0

A K5_K7a, L5, H5a, L2x_M2, L2a_L2b, H4 és K1a_K2_K7b élőhelyekre vonatkozó modellek mind a 7 éghajlati magyarázó változót felhasználták. Két modellre igaz, hogy csupán egy-egy éghajlati változóval tartalmaz kevesebbet: a B1b-nél az izotermalitás, míg a J1a-nál a leghidegebb negyedév csapadékösszege maradt ki. Az F5 élőhely számára négy éghajlati változó tűnt meghatározónak, míg az N13 és LY2 modelljei csupán két-két éghajlati magyarázó maradt meg. A LY2-re vonatkozó modell mindössze egyetlen további (nem klimatikus) változót ítélt jelentősnek (TPI), míg az N13 élőhely teljesen klímafüggőnek bizonyult. Az utóbbi két élőhely szempontjából meghatározó jelentőségű a leghidegebb negyedév csapadékösszege a modellek szerint. A további elemzésekben felhasznált élőhelyekre vonatkozó modellek kiválasztott magyarázó változóinak relatív fontosságát a 7. táblázatban mutatjuk be.

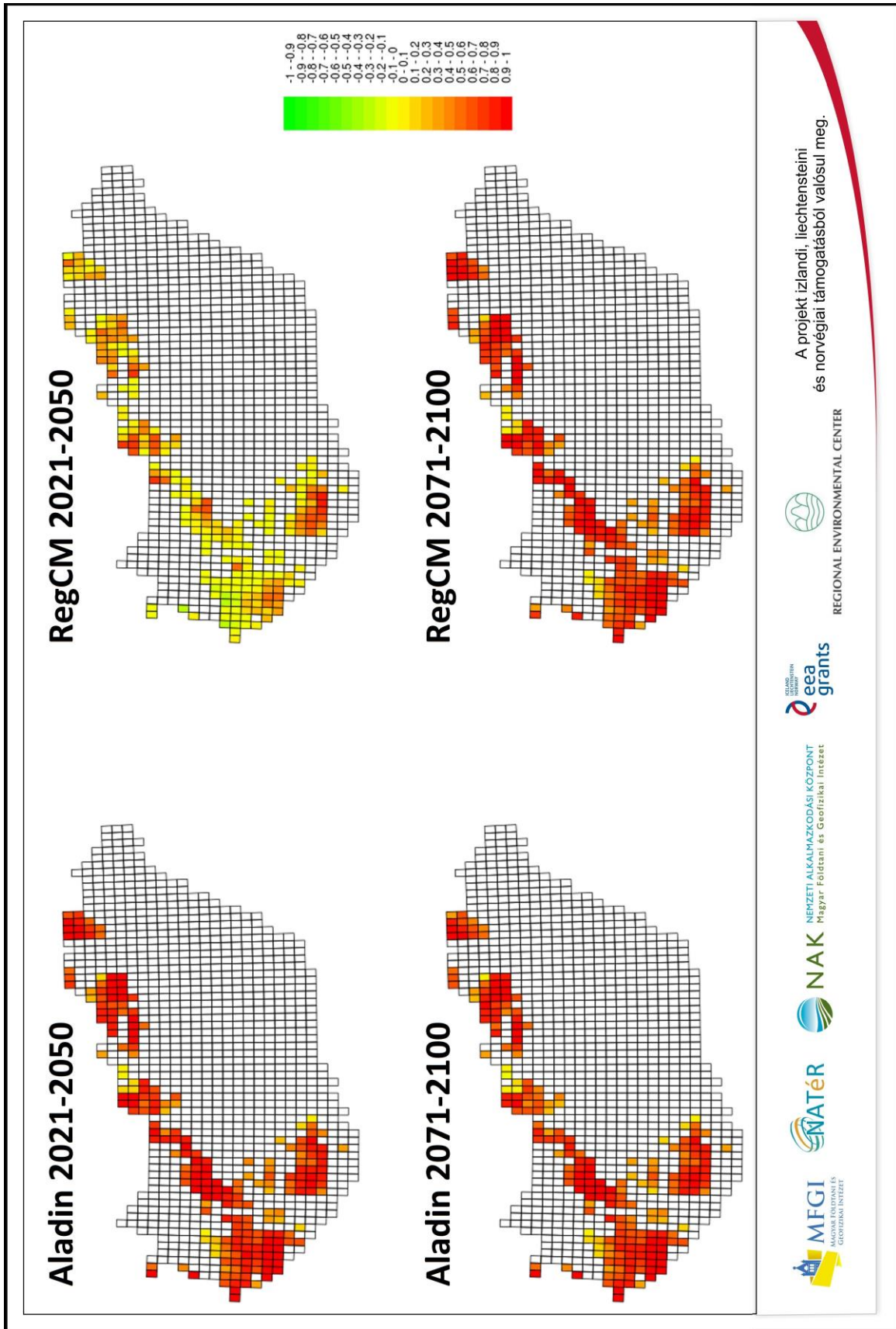
7. táblázat. A klímaérzékeny élőhelyek modelljeinek változószerkezete és a magyarázó változók relatív fontossága

Élőhelyek	N13	LY2	F5	K5_K7a	B1b	L5	H5a	L2x_M2	L2a_L2b	H4	J1a	K1a_K2_K7 b
Svac												
Sac												
Sne												
Sal												
Sval												
Scl				1,3	7,7	5,8	5,4		2	6,4	4,9	
Ssa				2		4,5	5		4,7	4	8,8	3,1
Soc				2,1	14,3		5,9	4,2	2,7		7,2	1,6
Srn			24,5	0,8		5,5	3,1	3,5	3,2	6	4,8	2,5
Srx				1,2		7,7	2,7	3,1	3,9	4,3	3,8	3,5
Sda				1,1		5,5	4,4	5,9	12	8,1		2,4
Dca				2,1	7,5		3,1	8,4	5	5		2,5
Dri			8,8	1,3			4,1				8,7	2,2
Dst							3					
Dla					9,1			3,1			4,1	
Dnw						2,9						
Dwa								5,7	2,6	3,4		
TPI		24,9		25,7		7,6	2,8	6,3	5,2	4,6		26,9
BIO3				2,3		13,2	3,9	8,5	3,9	6,5	8,8	2,9
BIO4			15,3	26,4	10,8	8,9	13	14,8	11,9	7,7	9,7	11,6
BIO5		53	18,5	26	7,1	3,8	22,8	6,3	21,2	6,3	7,3	9,4
BIO6			17,6	1,7	15,1	10,6	6,6	6,4	4,3	5,9	16,9	3,7
BIO15			15,3	2,2	9,1	10,3	4,3	7	5,3	13,7	7,7	4,4
BIO18	37,6			2	11,5	4,3	5,5	12,1	8,6	11,9	7,4	20,6
BIO19	62,4	22,1		2,1	7,7	9,4	4,4	4,6	3,4	6,2		2,7

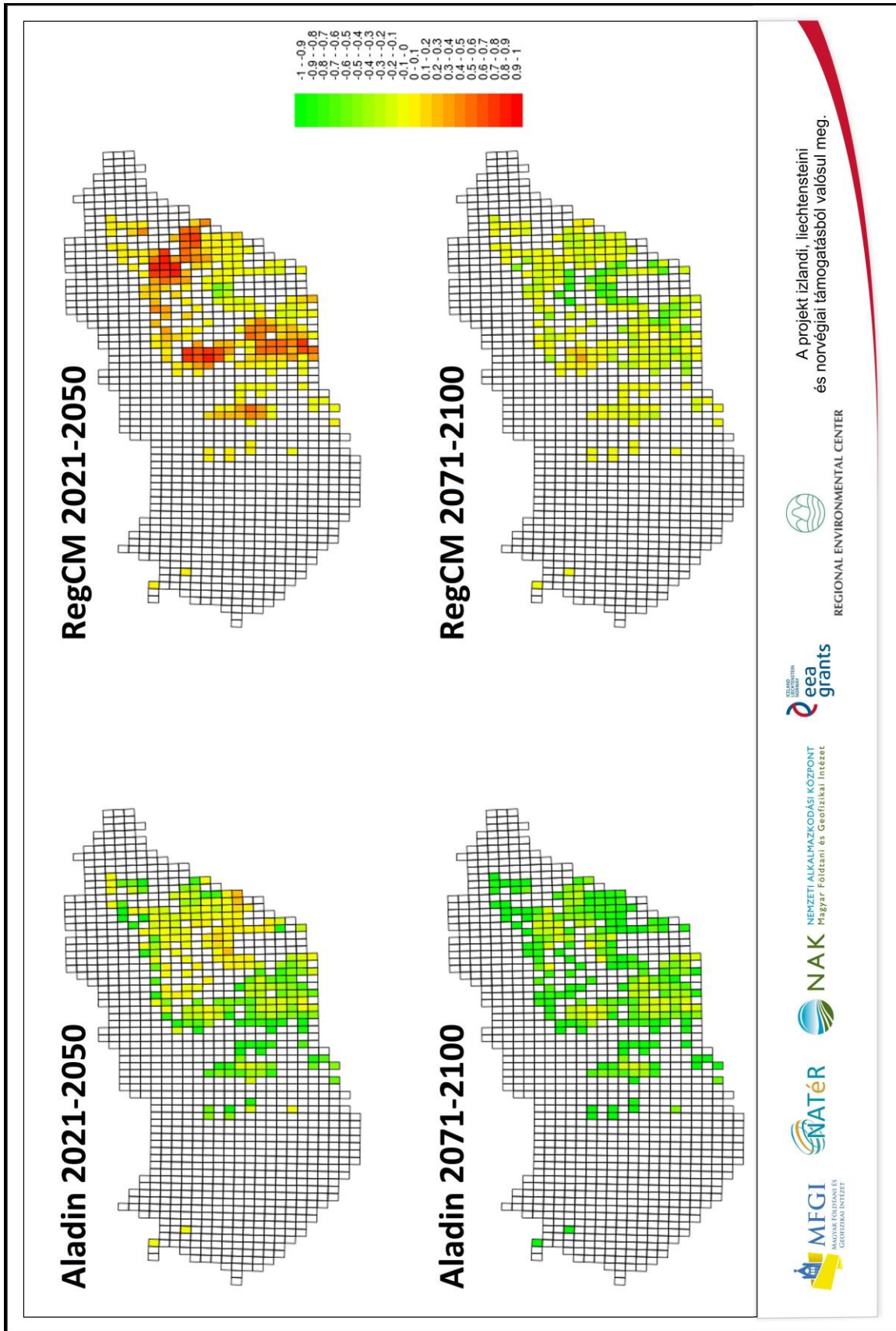
3.3 VÁRHATÓ HATÁS

A klímaváltozás hatása — előzetes várakozásainknak megfelelően — a CSH-k többségére nézve kedvezőtlen (8. táblázat), és különösen igaz ez az erdőkre (9. ábra). Az egyetlen kivétel az alföldi zárt tölgyes (L5), melyre vonatkozóan a különböző klímamodellek erősen eltérő eredményeket szolgáltatottak. Hasonlóan viselkedett az erdősztyeprétek, félszáraz irtásrétek, száraz magaskórósok (H4) élőhelyre készült modellünk, éppen ezért e két élőhelyre készített eredményeinket csak nagy odafigyeléssel szabad felhasználni. A vizsgálatba vont két vízhez kötődő élőhelyet valószínűleg — ha csak részben is, de — előnyösen fogja érinteni az éghajlatváltozás. Ez legnagyobb valószínűséggel a klímaváltozással járó magasabb téli csapadékösszeggel indokolható. A löszgyepek, kötött talajú sztyeprétek (H5a) szintén kedvezőbb helyzetbe kerülhetnek az éghajlat megváltozásával. A klímaváltozásra pozitívan reagáló élőhelyek legfeltűnőbb példája az egyik szikes élőhely (padkás szikesek, szikes tavak iszap- és vakszik növényzete, F5), mely leginkább azzal magyarázható, hogy az F5 az egyébként a száraz klímában gyakran kialakuló szikes talajokhoz alkalmazkodott (10. ábra).

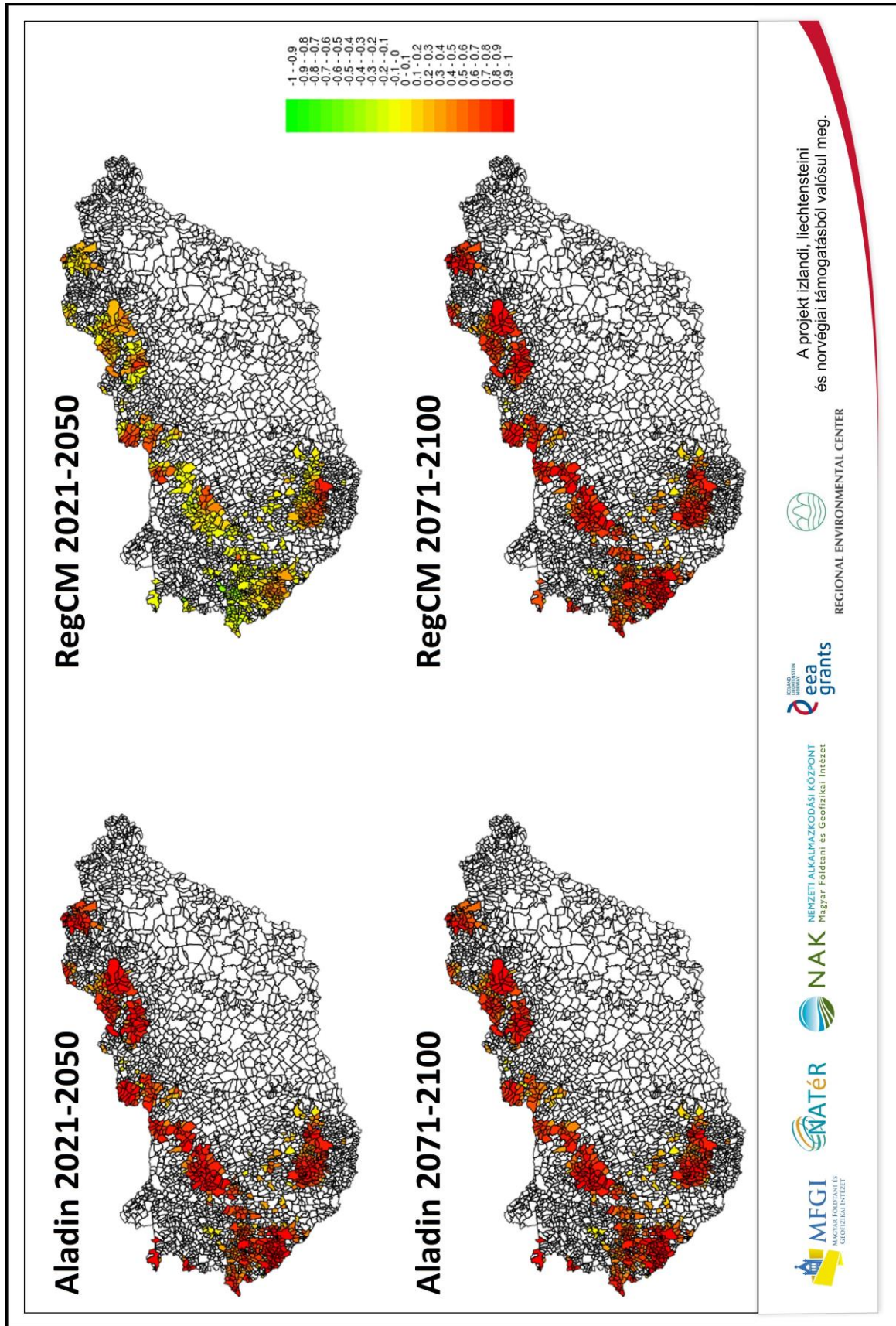
A PI elemzések eredményei NATÉR négyzet szinten bekerültek az online adatbázisba, valamint a településsoros eredmények (pl. 11. ábra) táblázatos formában részei a végső jelentésnek (1. melléklet).



9. ábra. A klímaváltozás várható hatása (PI) a meglévő bükkös (K5_K7a) NATÉR négyzetekre vonatkoztatva. A részbrák címei a jövőbeli időszakokra valamint a használt klímamodellre vonatkoznak



10. ábra. A klímaváltozás várható hatása (PI) a jelenlévő padkás szikesek, szikes tavak iszap- és vakszik növényzetére (F5)– NATÉR négyzetekre vonatkoztatva. A részábrák címei a jövőbeli időszakokra valamint a használt klímamodellre vonatkoznak. A PI a zöldtől a piros felé egyre kedvezőtlenebb



11.ábra. A klímaváltozás várható hatása (PI) a meglévő bükkös (K5_K7a) településhatárra vonatkoztatva. A részabrák címei a jövőbeli időszakokra valamint a használt klímamodellre vonatkoznak. A PI a zöldtől a piros felé egyre kedvezőtlenebb

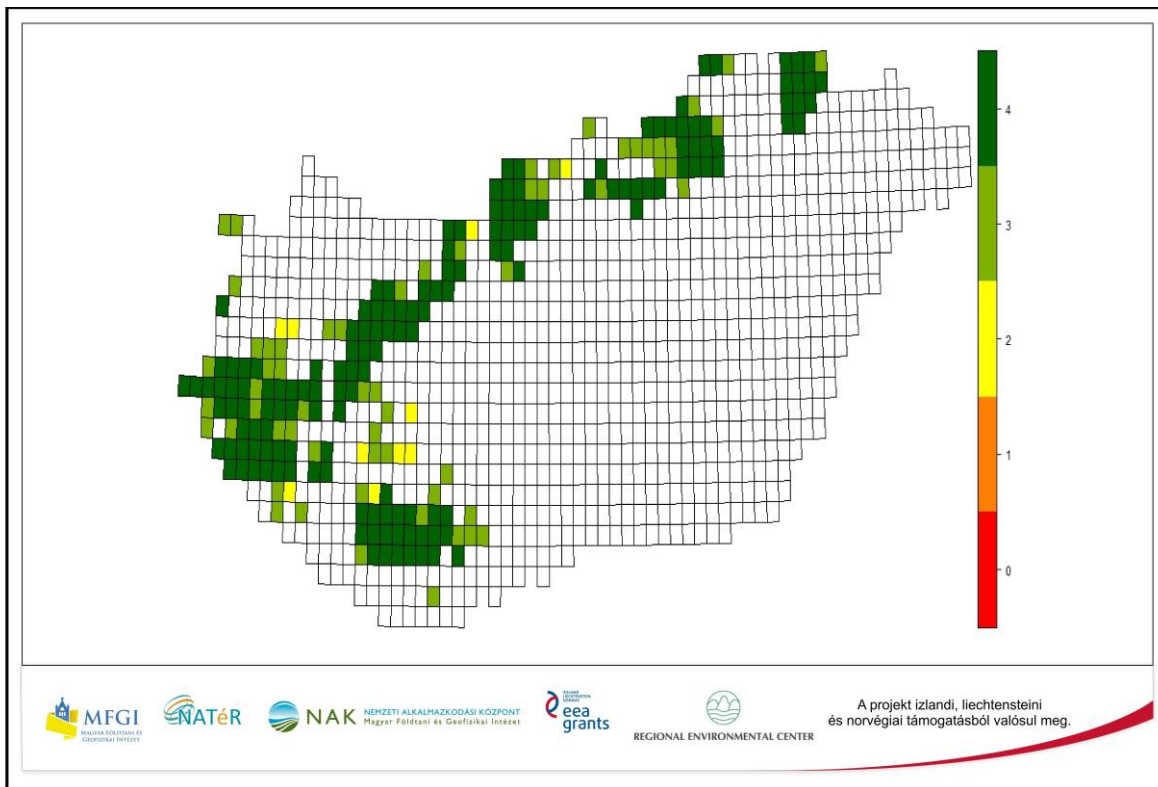
8. táblázat. A klímaváltozás várható hatása a klímaérzékeny élőhelyekre. A táblázat összegzi a várható hatás térbeli mintázatát országos léptékben. Megadjuk, hogy a klíma modellek predikciói közötti eltéréseket (modellütközés), ill. jelezzük ha látványos változás volt a trendben a két időszak között (trendváltás)

Időszak	2021–2050		2071–2100		Modellütközés	Trendváltás
	ALADIN-Climate	RegCM	ALADIN-Climate	RegCM		
N13	kedvezőtlen				nincs	nincs
LY2	kedvezőtlen				nincs	nincs
F5	kedvező vagy semleges	általában kedvező, néhol kedvezőtlen	kedvező vagy semleges		nincs	nincs
K5_K7a	kedvezőtlen				nincs	nincs
B1b	az ország szélén kedvezőtlen, középen kedvező		nyugaton kedvezőtlen, másutt kedvező		nincs	van
L5	keleten semleges vagy kedvező, nyugaton kedvezőtlen	kedvezőtlen	semleges, néhol kedvező	semleges vagy kedvezőtlen	van	nem egységes
H5a	változó, keleten kedvező	változó, keleten kedvezőtlen	kedvező vagy semleges		van	nem egységes
L2x_M2	kedvezőtlen				nincs	nincs
L2a_L2b	kedvezőtlen, délen semleges				nincs	nincs
H4	semleges vagy kedvezőtlen	kedvező	az ország középső részén kedvező, másutt semleges vagy kedvezőtlen	változó, keleten kedvezőtlen	van	van
J1a	keleten kedvezőtlen, az ország középső részén semleges vagy pozitív		kedvező vagy semleges		nincs	van
K1a_K2_K7b	kedvezőtlen				nincs	nincs

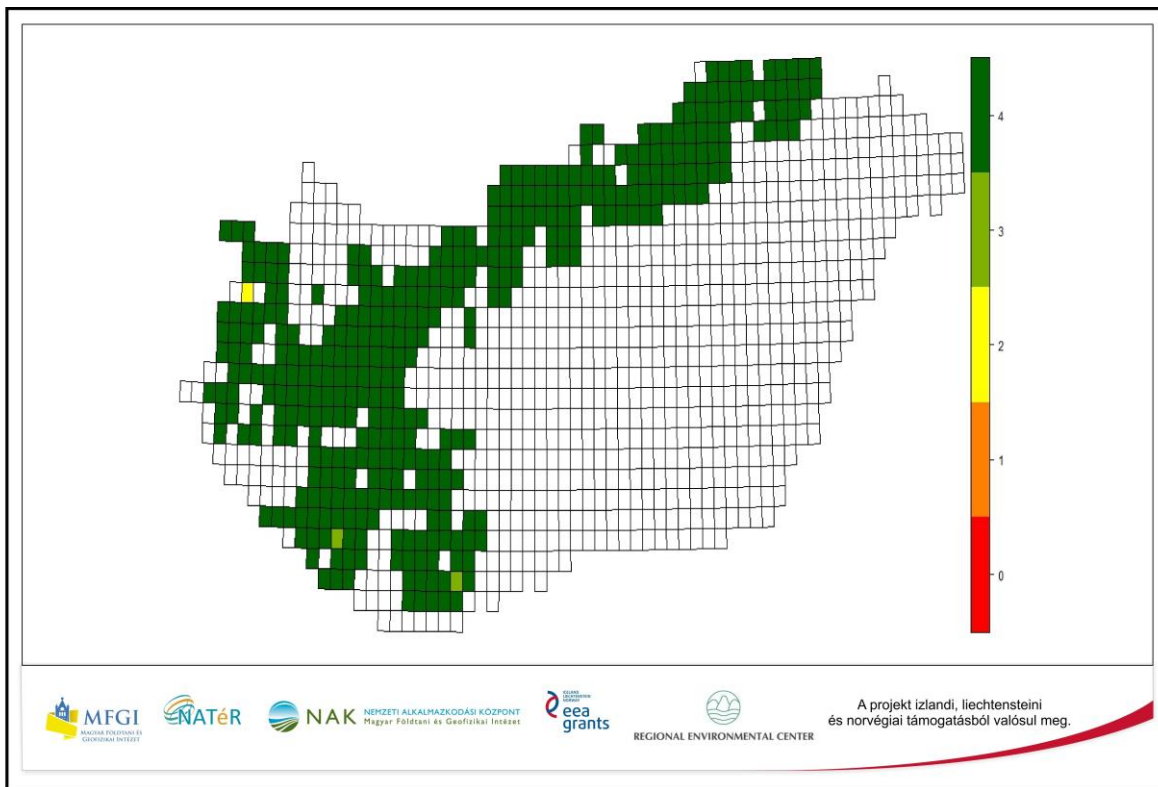
3.4 ALKALMAZKODÓKÉPESSÉG

A CHS-ek többsége klímazonális és elterjedt élőhely, így viszonylag magas AC-vel rendelkeznek, ami nagyban kompenzálhatja a PI-t. (9. táblázat). A legtöbb klímazonális élőhely, mint például a gyertyános-tölgyesek (K1a_K2_K7b) és a bükkösök (K5_K7a; Fig 12), illetve más olyan élőhelyek, amelyek nagyobb összefüggő állományokat alkotnak jelenleg is az állományfoltok közepén magas alkalmazkodóképességgel jellemezhetők. A közép felől a szélek felé csökken az alkalmazkodóképesség, majd a széleken drasztikusan lecsökken. A szintén klímazonális cseres-tölgyesek (L2a_L2b) azonban különlegesen abból a szempontból, hogy annyira elterjedtek, hogy a fent részletezett mintázat nem jellemző rájuk, hanem a teljes jelenlegi elterjedési területükön magas az alkalmazkodóképességük, ami így a legmagasabb a CSH-k között (13. ábra). Az úszólápok, tőzeges nádasok és télisásosok (B1b), alföldi zárt kocsányos tölgyesek (L5), löszgyepek, kötött talajú sztyeprétek (H5a), Erdőssztyeprétek, félszáraz irtásrétek, száraz magaskórósok (H4), törmelék-lejtő erdők (LY2) élőhelyek változó, de általában középestől magasig terjedő alkalmazkodóképességgel jellemezhetők. Ezekben belül például löszsteppek (H5a) AC-ja Délkelet-Magyarországon magas, míg délnyugaton alacsony (14. ábra). Szintén említésre érdemes, hogy a törmelék-lejtő erdők (LY2) alacsony AC-jű állományai a Balatontól északra és a Mecsekben csoportosulnak, ami előrevetíti ezen állományok nagyobb sérülékenységét is. A mi elemzésünkben a fűzlápok AC-je a legalacsonyabb, ami összhangban van az élőhely előfordulási jellemzőivel. A fűzlápok gyakran jelennek meg a tájban kisebb mélyedésekben, amelyeket vagy más vegetációtípusok vagy akár szántóföldek vesznek körül. Ebből következően sem az összekötöttsége, sem pedig a környező táj összetétele nem tesz lehetővé számottevő alkalmazkodást. Az alföldi zárt tölgyesek (L5) szintén alacsony AC-vel jellemezhetők, amely az élőhely fragmentáltságának következménye. A fűzláppal (J1a) ellentétben az alföldi tölgyesek természetes viszonyok között nem lennének fragmentáltak, de ahogy az alföldeken sok más élőhely is, a tölgyesek is jelentős részt áldoztatául estek az emberi tájtalakításnak.

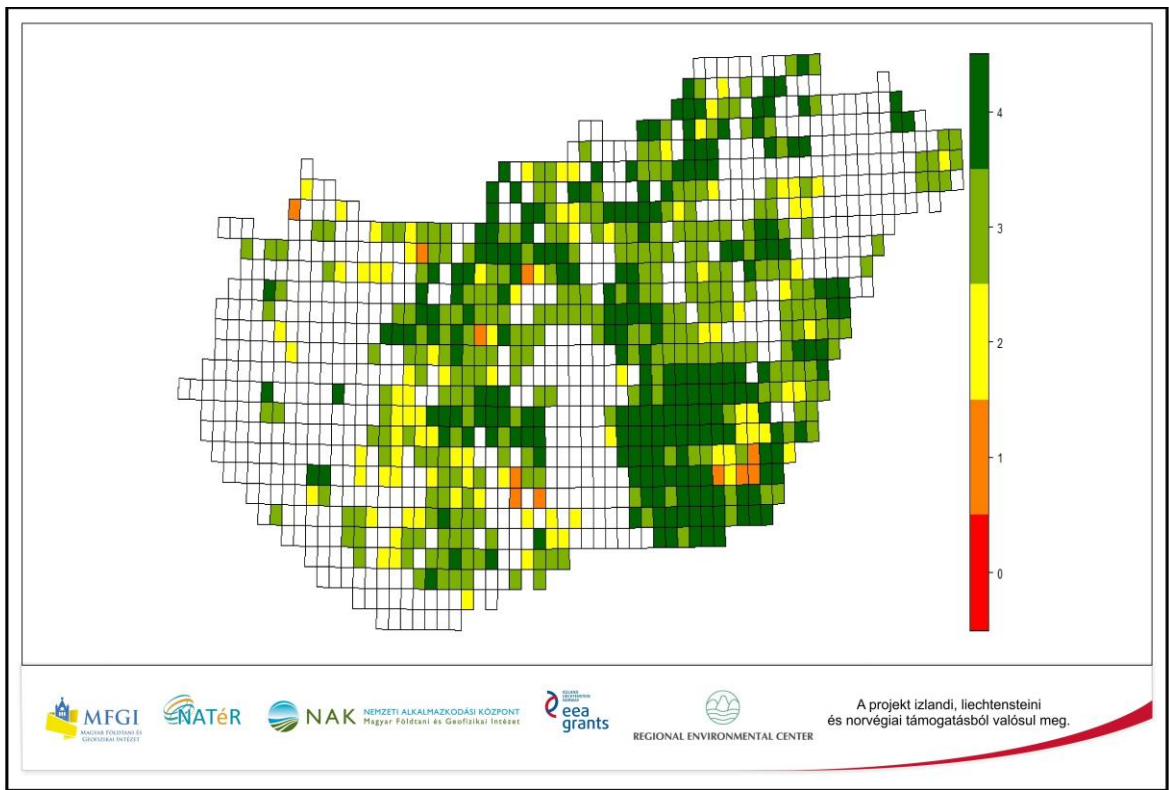
Az AC elemzések eredményei NATÉR négyzet szinten bekerültek az online adatbázisba, valamint a településsoros eredmények (pl. 15. ábra) táblázatos formában részei a végső jelentésnek (1. melléklet).



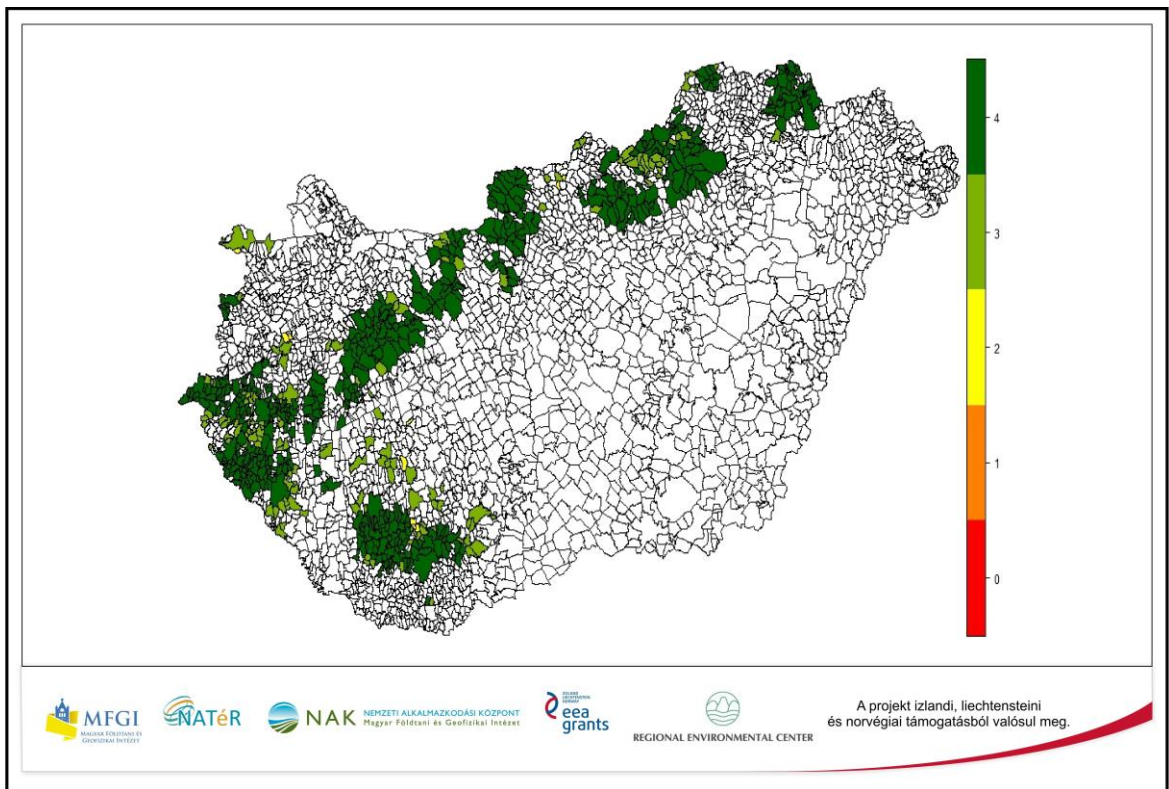
12. ábra. Alkalmazkodóképesség a bükkösök esetében- NATÉR rácsra vonatkoztatva. AC 0-tól 4-ig (pirostól a zöldig) növekszik



13. ábra. Alkalmazkodóképesség a cseres-tölgyesek esetében- NATÉR rácsra vonatkoztatva. AC 0-tól 4-ig (pirostól a zöldig) növekszik



14. ábra. Alkalmazkodóképesség a lőszgyepek, kötött talajú sztyeprétek (H5a) esetében-NATÉR rácsra vonatkoztatva. AC 0-tól 4-ig (pirostól a zöldig) növekszik



15. ábra. Alkalmazkodóképesség a bükkösök esetében- településsorra vonatkoztatva. AC 0-tól 4-ig (pirostól a zöldig) növekszik

9. táblázat. A klímaérzékeny élőhelyek (CSH) országos alkalmazkodóképességi (AC) mintázata. A tájökölógiai elemzés során elkészült térképeken látható térbeli mintázatok összegrzése

Élőhely kódok	Alkalmazkodóképesség
N13	Az állományfoltok közepén magas, a széleken alacsony
LY2	Közepes a Balatontól északra és a Mecsekben, máshol magas
F5	Közepestől magas AC-ig fordul elő
K5_K7a	Az állományfoltok közepén magas, a széleken alacsony
B1b	Közepestől magas AC-ig fordul elő
L5	Alacsonytól közepes AC-ig fordul elő
H5a	Magas délkeleten, alacsony délnyugaton
L2x_M2	Egyforma nagyságrendben fordulnak elő alacsony és magas AC-jű helyek — az Északi Középhegység lábánál magas
L2a_L2b	Magas
H4	Közepestől magas AC-ig fordul elő
J1a	Közepes
K1a_K2_K7b	Az állományfoltok közepén magas, a széleken alacsony

3.5 SÉRÜLÉKENYSÉG

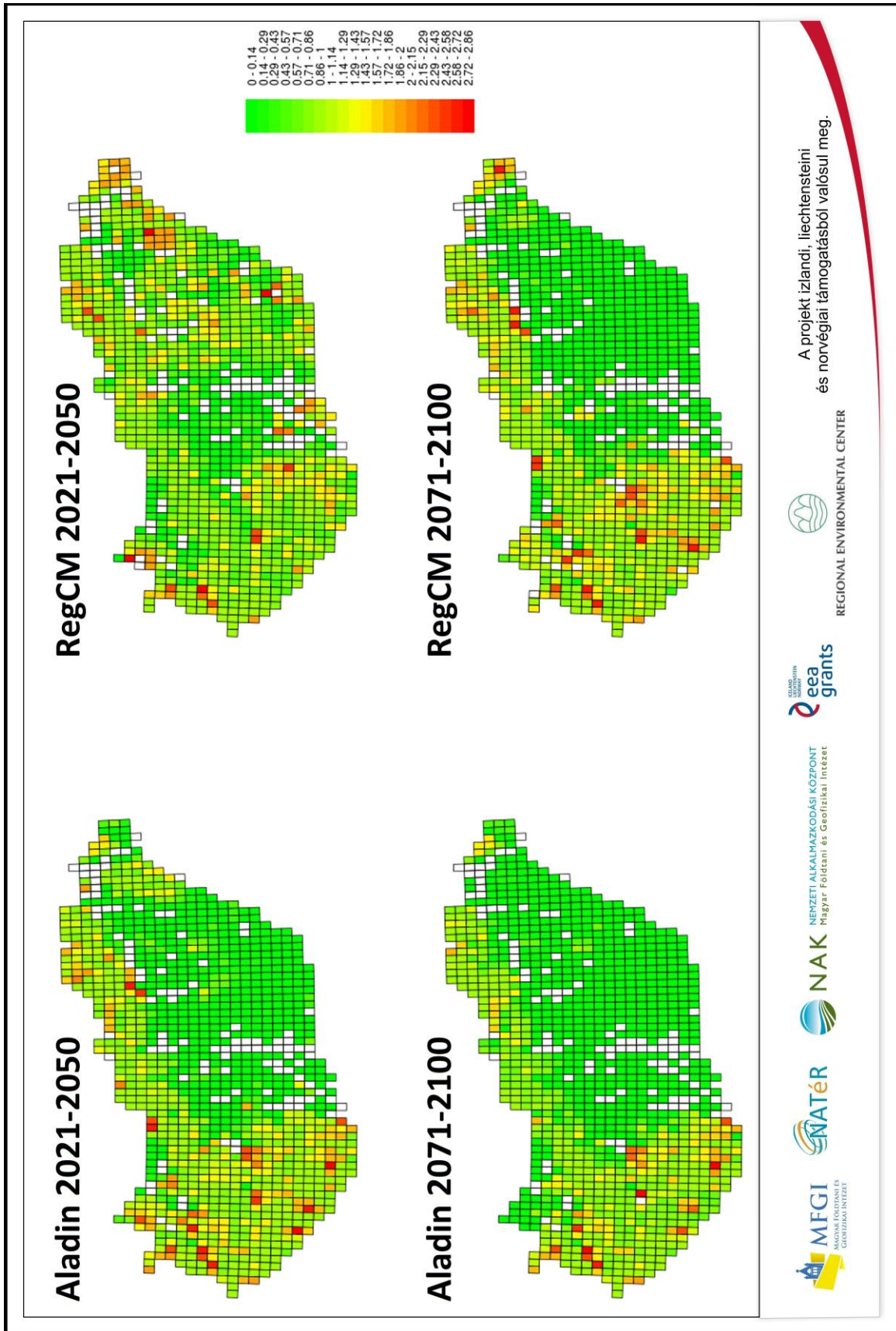
A CIVAS keretrendszer központi eleme a sérülékenység számszerűsítése. A sérülékenység meghatározása alapvetően összetett indikátorok hamazán alapul, amelyek közvetítik a CIVAS keretrendszer elemei által hordozott információt. A sérülékenységelemzés célja, hogy betekintést adjon a lehetséges kimenetelekről a döntéshozók és jogszabály-alkalmazók, valamint a tágabb nagyközönség számára. Mivel az érvényes jogszabályok és döntéshozatali kérdések köre széles, ezért nincs egyetlen, mindent megválaszoló összegző formula vagy sérülékenységi indikátor. A sérülékenységi indikátor felépítése és az előálló sérülékenységi térkép nagyban függ a létrehozásakor hozott döntésektől. Ezek ideális esetben az adott kontextusnak megfelelőek, sőt a főbb érdekelteket bevonó részvételi folyamatban lettek meghatározva.

Általánosságban elmondható, hogy a sérülékenység akkor magas, ha a várható hatás (PI) magas és az alkalmazkodóképesség (AC) alacsony. A két mérőszám viszonya lehet szakértői döntés alapja is. Például a PI jellemzően magas a bükkösök esetén szinte mindenhol az országban. Ugyanakkor az állományfoltok közepén az AC is magas, így a hegységek közepén lévő bükkösök kevésbé lesznek sérülékenyek az éghajlatváltozással szemben, mint a széli helyzetben lévő.

Az az egyszerű sérülékenységi index, amit ebben a fejezetben értékelünk csak egy a lehetséges formalizált megoldások közül, megalkotásakor általános természetvédelmi tervezési kérdések kerültek a középpontba. Mivel a gazdag PI és AC becslések ezt elhetővé tették, először az egyes CSH-k sérülékenységét számoltuk ki, majd azok maximumát rendeltük a megfelelő térbeli egységhez. Ez a súlyozatlan becslés megfelelő általános döntéshozatali megfontolásokhoz, ugyanakkor bátorítjuk a felhasználókat arra, hogy egyedi PI és AC súlyozási, illetve összevonási stratégiákat dolgozzanak ki a fókuszban lévő problémát figyelembe véve.

A kidolgozott példa jól szemlélteti az éghajlati becslések eltérő klímamodellekből eredő bizonytalanságait is. Ugyanakkor ahol egyezéseket tapasztalunk, azok kijelölik a robusztus eredményeket.

Bár a RegCM alkalmazásával általában magasabb sérülékenységet kapunk, a természetes élőhelyek hosszú távú (2071–2100) sérülékenységi mintázata megegyezik a két klímamodell vonatkozásában (16. ábra). A természetes vegetáció erőteljesebben sérülékeny Nyugat-Magyarországon és a középhegységekben, valamint a Nyírség keleti részén. Ennek valószínű oka, hogy az erdővegetáció a leginkább sérülékeny a klímaváltozás szempontjából. A rövidtávú sérülékenységet illetően ugyanakkor a két klímamodell alapján végzett elemzés eredménye eltér. Az Aladin modell jóslataival számolva a hosszú távú sérülékenységhez hasonló mintázatot kapunk. A RegCM modellt alkalmazva kisebb sérülékenység mutatkozik rövid távon a Dunántúlon, viszont nagyobb a délnyugati országrészben. Az átfogó mintázaton kívül feltűnő a magasabb sérülékenység a Balatontól délre és az északnyugati országrészben. A Balatontól délre fekvő zárt erdők számára a környezet igényeik határán van, ezért ezek az állományok különösen sérülékenyek az éghajlatváltozás viszonylatában.



16. ábra. Természetes élőhelyek sérülékenysége a leginkább klímaérzékeny 12 élőhely sérülékenysége alapján a NATÉR négyzetekre vonatkoztatva. A részábrák címei a jövőbeli időszakokra valamint a használt klímamodellre vonatkoznak. Sérülékenység a zöldszíntől a pirosig növekszik

4 ÖSSZEFOGLALÓ KÖVETKEZTETÉSEK

A bemutatott elemzés demonstrálja, hogy a CIVAS keretrendszer hatékonyan hozzáigazítható a szektorális igényekhez és alkalmazható tudományáganként. Az itt bemutatott interpretációs megoldások (alkalmazkodóképesség elemei, összevonások alkalmazása stb.) iránymutatók lehetnek további hasonló vizsgálatokban. Ezen kívül a teljes elemzés részévé válhat egy nagy, több szektort felölelő CIVAS vizsgálatnak.

A létrehozott adatbázisok sokféle alkalmazás alapjául szolgálhatnak. Mivel a 12 klímaérzékeny élőhely (CSH) jelentős részt lefed a hazai klímazonális vegetációt, így az ezek alapján levont következtetések várhatóan reprezentatívak a klímaváltozásra adott reakciókra nézve hazánkban. A legtöbb esetben a várható hatás (PI) kedvezőtlen volt az erdőkre nézve, a gyepekre nézve többnyire legalább részben kedvező hatást becsültünk. Ez az eredmény egybecseng a várakozásokkal, hogy a nyíltabb élőhelyek felé tolódik el a vegetáció melegebb és szárazabb klíma esetén, lévén, hogy Magyarország az erdős és a sztyep biom határán fekszik. Ezzel összhangban az erdőkkel borított hegyvidékek természetes növényzete bizonyult sérülékenyebbnak az alföldekénél. Ez előrevetíti, hogy az erdők fenntartása Magyarországon nehézségekbe ütközhet és nyíltabb élőhelyek válhatnak fenntarthatóvá. Fontos megjegyezni, hogy az alföldekre becsült kisebb hatás a természetes tájalkotó elemekre vonatkozik (természetes, féltermészetes állományok). A szántóföldek és települések sérülékenységi mintázata nagyban eltérhet ettől.

Azok a becslések tekinthetők leginkább megbízhatóknak, amelyeknél mind a különböző klíma-modellek alapján kapott eredmények hasonlóak, mind pedig az időbeli trendek illeszkednek a két vizsgált periódusban. A leginkább egységes eredmények a klímazonális erdők és két gyeptípus esetén születtek. Azokat a becsléseket azonban, ahol klíma-modellek vagy időszakok szerint jelentős eltérés van fenntartásokkal kell kezelnünk. Mivel voltak olyan élőhelyek, ahol ez előfordult a jövőbeli kutatási irányok egyik legfontosabbika, hogy bővítsük a felhasznált klíma-modellek körét, illetve a vizsgált jövőbeli időszakokat ezáltal csökkentve, illetve jobban felmérve a bizonytalanság mértékét és természetét. Ugyanakkor meg kell jegyeznünk, hogy a bizonytalanság a klímaváltozási forgatókönyvek és így az azon alapuló hatásbecsléseknek is szükségszerűen része. Tudományos eredményeknél a bizonytalanság nem feltétlen a vizsgálat gyengeségét jelzi, inkább egy fontos figyelmeztető elem, hogy adott vizsgálati tárgy vagy alrendszer működése kevésbé jósolható. A bizonytalanságot számos tényező okozhatja: a bemeneti adatokban lévő variáció, a rendszer működéséről rendelkezésre álló ismeretek hiányosságai, de lehet a vizsgálat tárgyának leválaszthatatlan tulajdonsága, amelyet nem tudunk és nem is lenne helyes kiszűrni. A megalapozott döntésekhez tisztában kell lenni a bizonytalanságok forrásával és mértékével.

A fenti szempontoknak megfelelően a várható hatás(PI)- és alkalmazkodóképesség(AC)-becsléseinket részletesen elérhetővé tettük a NATÉR adatbázison keresztül. A klímaváltozás hatásait a predikciós vizsgálatokban jellemzően a meglévő előfordulásokra/állományokra értelmezzük, amelyhez mi is tartottuk magunkat. Így mind a várható hatást, mind az alkalmazkodóképességet a meglévő előfordulásokkal rendelkező térségi egységekre (NATÉR négyzet, ill. településhatár) számoltuk ki. A PI esetén az eredmények összehasonlíthatók és súlyozhatók élőhelyenként, klíma-modellekként és jövőbeli időszakonként. Ez lehetővé teszi, hogy a későbbi felhasználók szabadon kombinálhassák a

rétegeket: kiválasszák az őket érdeklő időszakokat, élőhelyeket. Az AC becslések szintén élőhelyenként elérhetők a NATÉR adatbázisban. Ezek sokféle tudományos elemzésben és alkalmazott vizsgálatban fel lehet majd használni.

A CIVAS keretrendszer fókuszában a döntéshozás áll, ezért létrehoztunk egy szintetikus indikátort amely a táji szintű sérülékenységet jellemzi a klímaváltozás kontextusában. Ez az indikátor a térbeli egységben tapasztalható legnagyobb sérülékenységet adja meg, úgy hogy leginkább sérülékeny élőhely sérülékenységen alapul. Ez a megközelítés arra alkalmas, hogy áttekintést adjon egy „van-e kockázat az adott helyen” típusú kérdés kapcsán. Tudományos vagy specifikusabb döntést megalapozó vizsgálathoz azt javasoljuk, hogy a rendelkezésre bocsátott térképi rétegekből (PI, AC) kiindulva a kérdéshez illeszkedő sérülékenységindekátort alkossanak. Ez hatékonyabb és pontosabb, mint bármilyen előre elkészített, jelen esetben maximumokon alapuló sérülékenység réteg. Nincs olyan, előre elkészített sérülékenységmutató, amely minden tudományos vagy alkalmazott vizsgálathoz megfelelő lenne. Kisebb térbeli egységre vonatkozó kérdéseknél hatékony lehet a PI és AC mintázat szemrevételezésén alapuló szakértői döntés. Országos léptékű vizsgálathoz javasoljuk formalizált, strukturált modell használatát (pl. többszemponútú döntéselemzés; multi-criteria decision analysis, MCDA) és az összes fontosabb érdekelt bevonását.

A természetes ökoszisztémák klímaérzékenysége számos szektor számára jól interpretálható és fontos tényező lehet. Az ilyen elemzés létjogosultságát a természetvédelmi és restauráció prioritások megállapításához, valamint a tájértékelésben látjuk. Élőhelyspecifikus sérülékenységi térképek fontos alapot nyújthatnak a veszélyeztetett élőhelyek állományaira vonatkozó védelmi prioritások felállításában. Azok az állományok őrizhetők meg leghatékonyabban jelenlegi formájukban, amelyek kevésbé sérülékenyek klímaváltozás esetén. Ugyanakkor a magas sérülékenység még nem jelenti, hogy az adott állományról le kell mondjon a természetvédelem, inkább arra hívja fel a figyelmet, hogy ezeken a helyeken inkább a természetes folyamatok védelmén kell legyen a hangsúly, hogy az állomány természetes úton átalakulhasson egy olyan élőhelybe, amely kevésbé érzékeny a klímaváltozásra vagy akár profitál belőle. A hangsúly itt a természetes folyamatokon van, amelyek szintén lehetnek a természetvédelem alanyai, így biztosítva a biodiverzitás és az ökoszisztéma szolgáltatások szintjének megőrzését is.

Az erdészeti és élőhelyrestaurációs tervezéshez elengedhetetlen, hogy a célállomány jövőbeli viszonyairól is tájékozódjunk. A modern élőhelyrestauráció elmélete elmozdult a korábbi álláspontról, amikor múltbeli állapotokat állítottak helyre, ehelyett a cél ma már önfenntartó állományok létrehozása (SOMODI és mtsai. 2012, TÖRÖK és mtsai. bírálatra leadva), amelyek mind a jelen, mind a jövőbeli éghajlati viszonyok között fenn tudnak maradni. Ezért lényeges, hogy feltérképezzük az adott helyszínen a létfeltételeiket a jelenben és a jövőben egyaránt megtaláló élőhelyek körét. Ezek közül a legkevésbé sérülékeny(ek) jelölhetők ki a restauráció céltársulásainak. Például, eredményeink alapján, a bükkösök (K5_K7a) meglehetősen alkalmatlanoknak bizonyultak arra, hogy restaurációs céltársulások legyenek és az erdészeti döntéseknél is figyelembe érdemes venni az adott helyen becsült sérülékenységüket. Még ha sérülékeny is a természetes vegetáció egy része egyes helyeken, szem előtt kell tartani, hogy a természetes fajkészletű és dinamikájú ökoszisztémák fenntartása kevesebb külső erőfeszítést igényel és kiegyenlített ökoszisztéma-szolgáltatás profoliót biztosít, mint a mesterséges zöldfelületek. Ezért a természetes élőhelyek restaurációjára érdemes törekedni amikor csak lehetséges.

Mivel elemzésünket a meglévő állományokra terveztük és végeztük el, ezért eredményeink helyi restaurációs prioritások megállapításához nem szolgálnak közvetlen információval. Ugyanakkor azok a következtetések, amelyeket a sérülékenységelemzésből levontunk hasznosak lehetnek restaurációs megfontolásokhoz is. Az elemzésünkben a klímaváltozás által kedvezően érintettnek becsült gyepek (lössztyep és szikes gyepek) a legígéretesebb (fenntartható és költséghatékony) restaurációs célpontok Magyarországon. Ha erdők közül kell választani a cseres tölgyesek (L2a_L2b) a legígéretesebb jelöltek, köszönhetően a kivételesen jó alkalmazkodóképességüknek, amely remélhetőleg kiegyenlíti a rájuk nézve kedvezőtlen éghajlatváltozási komponensek hatását.

A tájértékelés és a tájtervezés szintén profitálhat az előállított rétegek alkalmazásából. Ha az ökológiai hálózat vagy a zöld infrastruktúra bármely elemén változtatást tervezünk fel kell mérnünk, hogy a tervezett változtatás kevésbé vagy erősebben sérülékennyé teszi-e a hálózatot klímaváltozás esetén. Sőt, a restaurációs erőfeszítések eredményeink alapján irányíthatók úgy, hogy például a legsérülékenyebb elemet érintsék.

A durva léptékű tájtervezésben (pl. térbeli és regionális tervezés, tájrehabilitáció) is felhasználhatók az eredmények, ezáltal a tervezés tudományos alapokra helyeződhet és jobban felkészültté válik a tájhasználati konfliktusok megelőzésére. A jelen eredményeken nyugvó tájépítészeti és rehabilitációs projektek építeni tudnak az ökológiai folyamatokra. Így a döntéshozók költséghatékonyabban tudják elkerülni a természetes mintázatokhoz és folyamatokhoz kapcsolt konfliktusokat és katasztrófákat azáltal, hogy a sérülékeny területek (zöld) infrastruktúrájára áldoznak, jogszabályokkal motiválják a tájhasználatváltást (pl. erdősítés, gyepesítés), a természetvédelmi területeket a tágabb térbeli kontextust figyelembe véve jelölik ki stb. A természetes és természetközeli élőhelyekre várható hatások, az alkalmazkodóképesség és a sérülékenység jövőbeli alakulásának figyelembe vétele megváltoztathat néhány eddig széles körben alkalmazott és tudományosan nem megalapozott tájtervezési stratégiát.

Összességében elmondható, hogy részletes eredményeket szolgáltatunk, amelyek bemeneti adatként jelennek meg a NATÉR adatbázisban. Emellett szemléltettük ezek lehetséges további alkalmazásait, hangsúlyozva, hogy még ennél is jóval szélesebb a lehetséges felhasználások köre. Az általunk elvégzett sérülékenység-elemzés felhívta a figyelmet a magyarországi hegységek kiemelt sérülékenységére klímaváltozás esetén, emellett példaként szolgál a célzott sérülékenységelemzések tervezéséhez, az átadott adatbázisban rejlő lehetőségek kiaknázásához. A további kutatások során több klímaváltozási forgatókönyv figyelembe vételével jobban felmérhetjük az előrejelzések bizonytalanságát. Több jövőbeli időszak vizsgálata is fontos továbblépési irány. Ezek mellett a várható hatás és alkalmazkodóképességi eredmények ökológiai szempontú továbbelemzése ígérkezik tudományos szempontból gyümölcsözőnek.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönjük Sántha Eszter hozzájárulását a magyar fordításhoz.

HIVATKOZÁSOK

- BELSLEY, D. A. 1991: Conditioning diagnostics: collinearity and weak data regression. — New York, NY, USA: Wiley.
- BÖLÖNI, J., MOLNÁR, Zs. & KUN, A. (eds) 2011: Magyarország élőhelyei. A hazai vegetációtípusok leírása és határozója. — ÁNÉR 2011. MTA ÖBKI, pp. 441. (Habitats in Hungary. Description and identification guide of the Hungarian vegetation.) In Hungarian with English summary.
- BREIMAN, L. 2001: Random forests. — *Machine Learning* 45, 5–32.
- BÜHLMANN, P., HOTHORN, T., 2007: Boosting algorithms: regularization, prediction and model fitting. — *Statistical Science* 22, 477–505.
- CARTER, T. R., JONES, R. N., LU, X., BHADWAL, S., CONDE, C., MEARN, 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. (ed): *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.
- CHENNAMANENI, P. R., ECHAMBADI, R., HESS, J. D., & SYAM, N. 2016. Diagnosing harmful collinearity in moderated regressions: A roadmap. *International Journal of Research in Marketing*, 33, 172–182
- CLAVIER project: Climate Change and Variability: Impact in Central and Eastern Europe EU Framework Programme 6. — GOCE Contract Number: 037013.
- COLLINS, F. C. 1995: A comparison of spatial interpolation techniques in temperature estimation. — PhD Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.
- COOK, E. A. 2002: Landscape structure indices for assessing urban ecological networks. — *Landscape and urban planning* 58, 269–280.
- CZÚCZ, B., TORDA, G., MOLNÁR, Zs., HORVÁTH, F., BOTTA-DUKÁT, Z. & KRÖEL-DULAY Gy. 2009: A spatially explicit, indicator-based methodology for quantifying the vulnerability and adaptability of natural ecosystems. — In: FILHO, W. L. & MANNKE, F. (eds): *Interdisciplinary Aspects of Climate Change*. — Peter Lang Scientific Publishers, Frankfurt, 209–227.
- CZÚCZ, B., CSECSERITS, A., BOTTA-DUKÁT, Z., KRÖEL-DULAY, Gy., SZABÓ, R., HORVÁTH, F. & MOLNÁR, Zs. 2011: An indicator framework for the climatic adaptive capacity of natural ecosystems. — *Journal of Vegetation Science* 22, 711–725.
- CZÚCZ, B., MOLNÁR, Z., HORVÁTH, F., NAGY, G. G., BOTTA-DUKÁT, Z., TÖRÖK, K., 2012: Using the natural capital index framework as a scalable aggregation methodology for regional biodiversity indicators. — *Journal for Nature Conservation*, 20, 144–152.
- DORMANN, C. F. , ELITH, J., BACHER, S., BUCHMANN, C., CARL, G., CARRÉ, G., GARCÍA MARQUÉZ, J. R. , GRUBER, B., LAFOURCADE, B., LEITÃO, P. J., MÜNKEMÜLLER, T., McCLEAN, C., OSBORNE, P. E., REINEKING, B., SCHRÖDER, B., SKIDMORE, A. K., ZURELL, D., LAUTENBACH, S. 2013: Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. — *Ecography* 36, 27–46.
- DRYAS, I., USTRNUL, Z., 2007: The Spatial Analysis of the Selected Meteorological Fields in the Example of Poland. — In: DOBESCH, H. et al. (ed.): *Spatial interpolation for climate data: the use of GIS in climatology and meteorology*. 87–96. London: ISTE Ltd.
- ELITH, J., GRAHAM, C. H., ANDERSON, R. P., DUDÍK, M., FERRIER, S., GUIAN, A., HUIMANS, R. J., HUETTMANN, F., LEATHWICK, J. R., LEHMANN, A., LI, J., LOHMANN, L. G., LOISELLE, B. A., MANION, G., MORITZ, C., NAKAMURA, M., NAKAZAWA, Y., OVERTON, J. M., PETERSON, A. T., PHILLIPS, S. J., RICHARDSON, K. S., SCACHETTI-PEREIRA, R., SCHAPIRE, R. E., SOBERÓN, J., WILLIAMS, S., WISZ, M. S. & ZIMMERMANN, N. E. 2006: Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. — *Ecography* 29, 129–151.
- ELITH, J., LEATHWICK, J. R., HASTIE, T. 2008: A working guide to boosted regression trees. — *Journal of Animal Ecology* 77, 802–813.
- FRANKLIN, J. 1995: Predictive vegetation mapping: geographic modeling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. — *Progress in Physical Geography* 19, 474–499.
- FRIEDMAN, J. H. 2002: Stochastic gradient boosting. — *Computational Statistics & Data Analysis* 38, 367–378.
- GOOVAERTS, P. 1999: Using elevation to aid the geostatistical mapping of rainfall erosivity. — *Catena* 34, 227–242.
- GOOVAERTS, P. 2000: Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. — *Journal of Hydrology* 228, 113–129.
- HAIR, J. F. JR., ANDERSON, R. E., TATHAM, R. L., BLACK, W. C. 1995: *Multivariate data analysis*. — Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall.
- HARTKAMP, A. D., DE BEURS, K., STEIN, A. & WHITE J. W. 1999: *Interpolation Techniques for Climate Variables*. Geographic Information Systems Series 99-01. — International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT).
- HENGL, T., HEUVELINK, G. B. M., ROSSITER, D. G., 2007: About regression-kriging: From equations to case studies. — *Computers & Geosciences* 33, 1301–1315.
- HEVESI, J. A., ISTOK, J. D. & FLINT, A. L. 1992: Precipitation Estimation in Mountainous Terrain Using Multivariate Geostatistics. Part I: Structural Analysis. — *Journal of Applied Meteorology* 31/7, 661–676.

- 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.
- HOLDAWAY, M. R. 1996: Spatial modeling and interpolation of monthly temperature using kriging. — *Climate Research* 6, 215–225.
- HORVÁTH, F., MOLNÁR, Zs., BÖLÖNI, J., PATAKI, Zs., RÉVÉSZ, A., OLÁH, K., KRASSER, D. & ILLYÉS, E. 2008: Fact sheet of the MÉTA database. — *Acta Botanica Hungarica* 50, 11–34.
- IPCC 2007: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (ed: PARRY, M. L., CANZIANI, O. F., PALUTIKOF, J. P., VAN DER LINDEN, P. J. & HANSON, C. E.). Cambridge University Press, Cambridge, UK 976 p.
- KINDLMANN, P., BUREL, F. 2008: Connectivity measures: a review. — *Landscape ecology* 23, 879–890.
- KNOTTERS, M., BRUS, D. J. & OUDE VOSHAAR, J. H., 1995: A comparison of kriging, co-kriging and kriging combined with regression for spatial interpolation of horizon depth with censored observations. — *Geoderma* 67, 227–246.
- KRIGE, D. G. 1966: Two-dimensional weighted average trend surfaces for ore-evaluation. — *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 66, 13–38.
- LAM, N. S. 1983: Spatial interpolation methods: a review. — *The American Cartographer* 10, 129–135.
- LI, J. & HEAP, A. J. 2014: Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. — *Environmental Modelling & Software* 53, 173–189.
- LUKACS, P.M., BURNHAM, K.P., ANDERSON, D.R., 2010: Model selection bias and Freedman's paradox. — *Annals of the Institute of Statistical Mathematics* 62, 117–125.
- LUO, W., TAYLOR, M. C. & PARKER, S. R., 2008: A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales. — *International Journal of Climatology* 28, 947–959.
- MCCULLAGH, P. & NELDER, J. A. 1989: *Generalized Linear Models*. — Chapman and Hall, London.
- MILLER, J. & FRANKLIN, J. 2002: Modelling the distribution of four vegetation alliances using generalized linear models and classification trees with spatial dependence. — *Ecological Modelling* 157, 227–247.
- MOLNÁR, Zs., BARTHA, S., SEREGÉLYES, T., ILLYÉS, E., BOTTA-DUKÁT, Z., TÍMÁR, G., HORVÁTH, F., RÉVÉSZ, A., KUN, A. & BÖLÖNI, J., 2007: A grid-based, satellite-image supported, multi-attributed vegetation mapping method (MÉTA). — *Folia Geobotanica et Phytotaxonomica* 42, 225–247.
- MOLNÁR, Zs., BIRÓ, M. & BÖLÖNI, J. (eds) 2008: APPENDIX (English names of the Á-NÉR habitat types; Natura 2000 habitats and their Á-NÉR habitats equivalents). — *Acta Botanica Hungarica* 50 (Suppl.), 249–255.
- O'BRIEN, R. M. 2007. A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. — *Quality & Quantity* 41, 673–690.
- PARRY, M. L., CARTER, T. R. 1998: *Climate Impact and Adaptation Assessment: A Guide to the IPCC Approach*. — Earthscan London, UK. 166 p.
- PÁSZTOR, L., LABORCZI, A., TAKÁCS, K., SZATMÁRI, G., DOBOS, E., ILLÉS, G., BAKACSI, Zs. & SZABÓ, J. 2015: Compilation of novel and renewed, goal oriented digital soil maps using geostatistical and data mining tools. — *Hungarian Geographical Bulletin* 64/1, 49–64.
- RIDGEWAY, G. with contributions from others., 2015: gbm: Generalized Boosted Regression Models. R package version 2.1.1. URL: CRAN.R-project.org/package=gbm.
- SLUITER, R. 2008: Interpolation methods for climate data. Literature review. KNMI, R&D Information and Observation Technology. — De Bilt.
- SOMODI, I., VIRÁGH, K., SZÉKELY, B. & ZIMMERMANN, N. E. 2010: Changes in predictor influence with time and with vegetation type identity in a post-abandonment situation. — *Basic and Applied Ecology*, available online.
- STROBL, C., BOULESTEIX, A.-L., ZEILEIS, A. & HOTHORN, T. 2007: Bias in random forest variable importance measures: Illustrations, sources and a solution. — *BMC Bioinformatics* 8, Article no.: 25.
- SWETS, J. A. 1988: Measuring the accuracy of diagnostic systems. — *Science* 240(4857), 1285–1293.
- SZALAI, S., AUER, I., HIEBL, J., MILKOVICH, J., RADIM, T., STEPANEK, P., ZAHRADNICEK, P., BIHARI, Z., LAKATOS, M., SZENTIMREY, T., LIMANOWKA, D., KILAR, P., CHEVAL, S., DEAK, GY., MIHIC, D., ANTOLOVIC, I., MIHAJLOVIC, V., NEJEDLIK, P., STASTNY, P., MIKULOVA, K., NABYVANETS, I., SKYRYK, O., KRAKOVSKAYA, S., VOGT, J., ANTOFIE, T. & SPINONI, J. 2013: Climate of the Greater Carpathian Region. Final Technical Report. — www.carpatclim-eu.org.
- TABIOS, GQ III. & SALAS, J. D. 1985: A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. — *Water Resource Bull.* 21, 365–380.
- TVEITO, O. E., WEGEHENKEL, M., VAN DER WEL, F. & DOBESCH, H. 2006: The Use of Geographic Information Systems in Climatology and Meteorology. — Final Report COST Action 719.
- WU, T. & LI, Y. 2013: Spatial interpolation of temperature in the United States using residual kriging. — *Applied Geography* 44, 112–120.

A NATÉR projekt izlandi, liechtensteini és norvégiai támogatásból valósul meg.

A jelen szakmai munkaanyag Izland, Liechtenstein és Norvégia EGT-támogatásokon és a REC-en keresztül nyújtott anyagi hozzájárulásával valósult meg. A jelen dokumentum tartalmáért a Magyar Földtani és Geofizikai Intézet felelős.

További információk a támogatási programról:

www.nagis.hu

eea.rec.org

eeagrants.org

norvegalap.hu