

Az elsőbbségi hatás, a propagulumnyomás és a jelleg hasonlóság alkalmazása inváziós fajok honos fajok vetésével történő visszaszorítására

Sáradi Nóra^{1,2,3}, Csákvári Edina^{1,2}, Berki Boglárka⁴,
Csecserits Anikó^{1,2}, Csonka Anna Cseperke^{1,2,4},
Bruna Paolinelli Reis⁵, Vörös Márton^{1,4}, Török Katalin¹ és
Halassy Melinda^{1,2}

¹HUN-REN Ökológiai Kutatóközpont, Ökológiai és Botanikai Intézet,
2163 Vácrátót, Alkotmány út 2–4.

²Egészségbiztonság Nemzeti Laboratórium (EBNL), HUN-REN Ökológiai
Kutatóközpont, 1113 Budapest, Karolina út 29.

³Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Növénytermesztési-tudományok Intézet,
2100, Gödöllő, Páter Károly u. 1.

⁴Eötvös Loránd Tudományegyetem, Növényrendszertani, Ökológiai és Elméleti Biológiai
Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C

⁵Centre for Ecology, Evolution and Environmental Changes, Faculdade de Ciências,
Universidade de Lisboa, Campo Grande, C2, Piso 5, 1749-016 Lisboa, Portugal

*E-mail: saradi.nora@ecolres.hu

Összefoglaló: Az ökológiai restauráció létfontosságú a növényi invázió korlátozásában, az inváziókontroll és a biotikus rezisztencia növelése révén. Hipotézisünk szerint az elsőbbségi hatással, a honos fajok megnövelt propagulumnyomásával, valamint a jelleg hasonlósággal erősíthető az invázió elleni biotikus rezisztencia. Kutatásunkban homokpusztagyepi modell fajokkal, kontrollált kísérletben teszteltük három különböző életformát és funkcionális csoportot képviselő inváziós faj és négy, jellegükben eltérő mértékben hasonló honos növényfaj kompetícióját. Az *Asclepias syriaca* esetében a magmennyiség és a jellegükben hasonlóbb vetett fajok voltak meghatározóak. A *Conyza canadensis* esetében mindhárom tényező szignifikáns hatással bírt. A *Tragus racemosus* esetében a honos fajok elsőbbségi vetése hátráltatta a csiranövények megtelepedését. Eredményeink alapján az inváziós fajok korlátozhatóak honos fajok vetésével, különösen nagyobb magzsűrűség, valamint magkeverék használata esetén, továbbá ha biztosítani tudjuk a honos fajok korábbi megtelepedését.

Kulcsszavak: biotikus rezisztencia, elsőbbségi hatás, honos fajok vetése, inváziós növények, növényi jellegek, ökológiai restauráció, propagulumnyomás

Bevezetés

Az inváziós vagy más néven özönfajok jelenléte és terjedése jelentős problémát okoz a világ szinte minden élőhelyén. Amellett, hogy veszélyeztetik a biodiverzitást, számottevő gazdasági kárt okozhatnak a növénytermesztésben, erdészetben és más, a biológiai sokféleségtől és az ökoszisztéma-szolgáltatásoktól függő iparágakban. Az Európai Unió becslése szerint évi 12 milliárd euró gazdasági kárt okoznak az inváziós növényfajok (Khomeenko *et al.* 2023, Haubrock *et al.* 2021).

Ha az inváziós fajok már tartósan megtelepedtek, akkor az irtási és kezelési költségeik drasztikusan megnőnek. Amikor egy özönnövény pl. sűrű rizómahálózatot hoz létre, és készen áll a további terjedésre, a teljes kiirtás gyakorlatilag lehetetlenné válik. Ráadásul egy inváziós növény kiirtása nem garantálja az őshonos életközösség állapotjavulását (Reid *et al.* 2009, Case *et al.* 2016). Az irtási procedúra zavarással járhat, ami így képes elősegíteni az ismételt inváziót (Buckley *et al.* 2007). Az özönfajok megtelepedési esélye csökkenthető, ha a zavarást követően gyorsan viszonylag zárt, a rendelkezésre álló forrásokat minél jobban kihasználó őshonos vegetációt állítanak helyre (Schuster *et al.* 2018).

A biotikus rezisztencia a közösségben élő fajok azon képessége, amellyel korlátozzák más fajok megtelepedését (Levine *et al.* 2004). Az őshonos fajok betelepítése, például magvetéssel, képes növelni egy életközösség invázióval szembeni biotikus ellenállását (Halassy *et al.* 2023). Az inváziós fajokkal szembeni versengésen alapuló biotikus rezisztenciát számos tényező határozza meg, melyek közül a legfontosabbak a magasabb őshonos fajgazdagság vagy funkcionális diverzitás, a jelleghasonlóság (funkcionális tulajdonságok vagy funkcionális csoportok hasonlósága az inváziós és honos fajok között), a vetett magsűrűség (propagulumnyomás) és az elsőbbségi hatások (Hess *et al.* 2020, Drenovsky *et al.* 2012, Byun *et al.* 2020a, Weidlich *et al.* 2021).

A jelleghasonlóság alkalmazásánál azt az elvet használjuk ki, hogy az azonos funkcionális tulajdonságokkal rendelkező fajok hasonlóképpen használják ki a rendelkezésre álló forrásokat (niche-hasonlóság), így intenzívebben kell versenyezniük egymással, mint az eltérő funkcionális tulajdonságokkal rendelkező fajoknak, amik megosztják a különböző forrásokat (Young *et al.* 2009). Az özönfajok sikere részben a nagy propagulumnyomásnak köszönhető, mivel a nagyobb magmennyiséggel és magasabb bevándorlási aránnyal növekszik a megtelepedés esélye, csökkentve ezáltal a források elérhetőségét más fajok számára (Stringham & Lockwood 2021). Ezen elmélet alapján lehetséges az inváziós fajok visszaszorítása az őshonos fajok propagulumnyomásának növelésével. Elsőbbségi hatás alatt azt értjük, hogy a területre korábban érkező fajok befolyásolják a későbbi időpontokban érkező fajok megtelepedését, növekedését vagy szaporodását

(Fukami 2015). Ha az inváziós fajok megjelenése előtt őshonos fajok kerülnek elvetésre, az erőforrások korai felhasználása révén erős konkurenciát jelentenek a később érkező fajoknak, így a honos életközösség ellenállóbbá válik az invázióval szemben (Weidlich *et al.* 2021). Egy metaanalízisben Halassy és munkatársai (2023) a három faktor közül az elsőbbségi hatást találták a legerősebbnek az invázió elleni rezisztencia növelésére.

Korábbi kutatásunkban kimutattuk a propagulumnyomás és egy kompetitor honos faj (*Festuca vaginata* W. ET K., 1809) vetésének szerepét három, a pannon homokpusztagyepeken gyakori, gyorsan terjedő és esetenként körülményesen irtható özönnövény, a közönséges selyemkóró (*Asclepias syriaca* L., 1762), a kanadai betyárkóró (*Conyza canadensis* (L. Cronquist, 1943)) és a bugás tövisperje (*Tragus racemosus* (L.) All., 1785) megtelepedésének korlátozásában (Csákvári *et al.* 2023). Jelen kutatásunk célja, hogy megvizsgáljuk, hogy a honos fajok propagulummennyiségének és a vetett fajok jelleg hasonlóságának hatása mellett az elsőbbség és a három hatás együttesen hogyan befolyásolja a három inváziós faj megtelepedését.

Anyag és módszer

A feltett kérdések megválaszolásához egy fóliasátorban, kontrollált körülmények között állítottuk fel cserepes kísérletet (1. ábra). Az alkalmazott őshonos fajokat de Bello és munkatársai (2021) módszertana alapján választottunk ki az inváziós fajok mellé, a tulajdonság-hasonlóságokra alapozva. Ehhez elvégeztünk egy jelleg hasonlóság-elemzést, amelyben összesen 12 jelleg alapján rangsoroltuk a fajokat a tulajdonságtérben számolt távolság alapján (Gower-távolság súlyozott változata). Az elemzésbe 214 homokpusztagyepi fajt vontunk be a Kiskunságban gyűjtött fajkészletadatok alapján (Csecserits *et al.* 2011). A rangsor első 30 fajából



1. ábra. A fóliasátorban elhelyezett kísérleti cserepek. A fotó 2022 márciusában készült.

az élőhelyi igények és a magok elérhetősége alapján választottunk három fajt. Ezek a tejoltó galaj (*Galium verum* L., 1753), a buglyos fátyolvirág (*Gypsophila paniculata* L., 1753) és az orvosi szappanfű (*Saponaria officinalis* L., 1753) voltak (1. táblázat). A tulajdonsághasonlóság alapján kiválasztott fajok mellett egy őshonos, kompetitív, évelő fűvet, a magyar csenkeszt (*Festuca vaginata* Waldst. et Kit. ex Willd.) is bevontuk a kísérletbe. Továbbá teszteltük a négy őshonos fajt 1:1:1:1 magszámarányban tartalmazó magkeveréket (Mix) is.

1. táblázat. Az őshonos és az inváziós fajok 12 tulajdonságra kiterjedő hasonlóságelemzése (de Bello et al. 2021) alapján számolt hasonlóságok. A hasonlóságskálázás 0 (a leghasonlóbb) és 1 (a legkevésbé hasonló) között változik. Az egyes oszlopokban található leghasonlóbb értékeket vastagon szedtük.

	<i>Conyza canadensis</i>	<i>Tragus racemosus</i>	<i>Asclepias syriaca</i>
<i>Saponaria officinalis</i>	0,1565	0,1674	0,2071
<i>Gypsophila paniculata</i>	0,1648	0,3004	0,1670
<i>Galium verum</i>	0,2059	0,2206	0,1986
<i>Festuca vaginata</i>	0.2892	0.2803	0.2869

Az inváziós növények magjait kiskunsági felhagyott szántók és utak mentén gyűjtöttük (Peszéradaci-rétek, fülöpházi homokbuckák) 2021 szeptemberében. A magokat megtisztítottuk, de a kanadai betyárkóró repítőfüggelékeit nem távolítottuk el. A honos magokat egy kiskunsági magtermesztőtől vásároltuk. Minden magot szárítva tároltunk a felhasználásig. Megmértük a gyűjtött magok ezermagtömegét, és teszteltük a csírázási képességüket is.

A laboratóriumban tesztelt csírázóképeség átlagosan 60% volt mind a honos, mind az inváziós fajokra. Az őshonos *S. officinalis* esetében mértük a legnagyobb értéket (89,6%), ezt pedig az inváziós *A. syriaca* követte (81,8%). A legalacsonyabb értéket az őshonos *G. verum* (34,4%) esetében mértük (Csákvári et al. 2023) (2. táblázat).

2. táblázat. A honos és az inváziós fajok csírázási képessége százalékosan (átlaggal és szórással) a laboratóriumi kísérletben (Csákvári et al. 2023).

		Laboratóriumban mért csírázási kapacitás (%)
		Átlag és szórás
Honos fajok	<i>Festuca vaginata</i>	42,8±3,9
	<i>Galium verum</i>	34,4±1,3
	<i>Gypsophila paniculata</i>	75,6±2,3
	<i>Saponaria officinalis</i>	89,6±1,5
Inváziós fajok	<i>Asclepias syriaca</i>	81,8±1,0
	<i>Conyza canadensis</i>	44,0±7,6
	<i>Tragus racemosus</i>	55,8±7,4

Az inváziós fajokat külön-külön vetettük el önmagukban, párban valamennyi honos fajjal, illetve a négy honos fajból álló magkeveréssel (Mix) 5,7 literes virágcserepekben, amelyeket 2:1 arányban megtöltöttünk virágföld és homok keverékével. Az inváziós növények esetében cserepenként 12 magot vetettünk el, míg a honos fajok esetében cserepenként 12 magot (a Mix esetében honos fajonként három magot), illetve a magmennyiség hatásának tesztelésére ötszörös mennyiséget (60 magot) vetettünk el szabályos elrendezésben. Az elsőbbségi hatás vizsgálatára az inváziós fajokat a honos fajokkal egyszerre (2021. szeptember), illetve a honos fajok vetése után egy hónappal (2021. október) vetettük. Valamennyi kezelést összesen hét ismétlésben végeztük el. Minden szaporítóanyagot a talajfelszínen helyeztünk el, kivéve a közönséges selyemkóró esetében, melynél a csírázás érdekében szükséges volt földdel enyhén betakarnunk a magokat (Yenish *et al.* 1996). A cserepeket természetes fényen és kültéri hőmérsékleten tartottuk, emellett az első fagyokig hetente locsoltunk. A fóliasátor hőmérsékletét és páratartalmát EasyLog EL-USB adatrögzítő eszközzel monitoroztuk. A csíranövények növekedését kilenc héten keresztül monitoroztuk (2021. október 20. – 2021. december 15.), majd további kétszer, 2022 márciusában és áprilisában is. Az elemzéshez meghatároztuk az egyes cserepekben található fajok monitoring-periódusban mért legmagasabb (max) csíranövényszámát.

Ajelleghasonlóság, a propagulumnyomás és az elsőbbség hatását a csíranövények számára általánosított lineáris vegyes modellek (glmmTMB) (Brooks *et al.* 2017), valamint negatív binomiális általánosított lineáris modell (glm.nb; MASS csomag) (Venables & Ripley 2002, Zuur *et al.* 2009) segítségével elemeztük a három inváziós faj esetében külön-külön. A magyarázó változók a propagulumnyomás (0, 12 vagy 60 mag), az elsőbbségi hatás (együttvetés vs. késleltetett vetés) és a vetett fajok (négy faj és magkeverék [Mix]) voltak. Amennyiben szükséges volt, úgy a függő változókat négyzetgyök-transzformáltuk, hogy teljesítsék az adatok homogenitására és normalitására vonatkozó feltételeket. Az illesztett modellek normalitását a *DHAR*ma funkcióval ellenőriztük (Hartig 2020). A modellek véglegesítése után Anova-tesztet végeztünk. Az egyes magyarázó változók szignifikanciáját a II Wald khi-négyzet (χ^2) próba határozta meg. Amennyiben találtunk szignifikáns értéket a vizsgált magyarázó változók interakciójában, úgy post hoc tesztet végeztünk. Post hoc analízisként az *emmeans* csomag *contrast* és *tukey* funkcióját használtuk (Lenth 2023). Minden statisztikai elemzést az R (2023.12.1) programban végeztünk (R Core Team 2022).

Eredmények

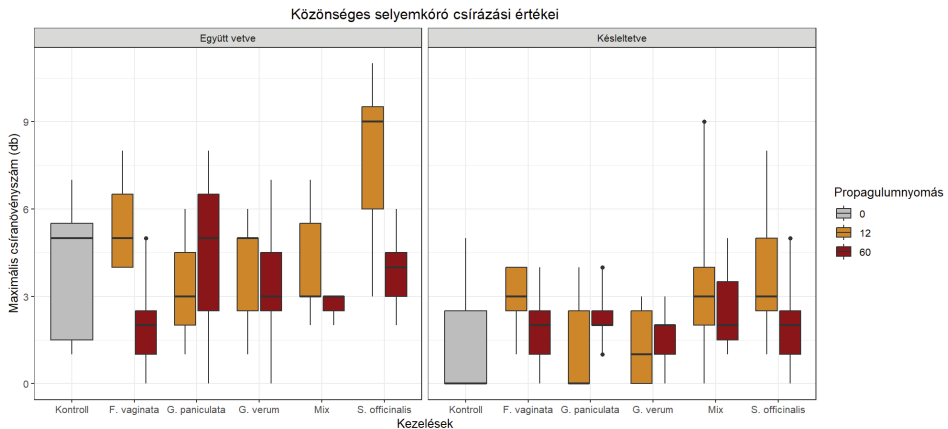
Közönséges selyemkóró (*Asclepias syriaca*)

Vizsgálatunk alapján mindhárom magyarzó változó szignifikánsan befolyásolta a közönséges selyemkóró csírázási értékeit, a propagulumnyomás és a vetett fajok pedig egymással interakcióban is szignifikáns hatással bírtak (3. táblázat). A közönséges selyemkóró csíranövényesszáma a *Saponaria officinalis* 12 magos

3. táblázat. A közönséges selyemkóró (*Asclepias syriaca*) csíranövényesszámára vonatkozó elemzések statisztikai (Anova) eredményei a három magyarzó változó hatásának függvényében. A szignifikáns értékek ($p < 0,05$) vastagon vannak szedve.

<i>Asclepias syriaca</i>			
Kezelések	χ^2	Df	P érték
Elsőbbségi hatás	40,9315	1	<0,001
Propagulumnyomás	21,0981	2	<0,001
Vetett honos fajok	17,2254	4	0,0017
Elsőbbségi hatás * Propagulumnyomás	3,4061	2	0,1821
Elsőbbségi hatás * Vetett honos fajok	7,7770	4	0,1000
Propagulumnyomás * Vetett honos fajok	22,7694	4	0,0001
A három változó együtt	2,3236	4	0,6764

kezelésében volt a legmagasabb, maximálisan 11 csíranövénnyel. A legalacsonyabb csíranövényesszámot a *Galium verum* és a Mix kezelésekben találtuk 60 honos mag mellett, maximálisan 3 csíranövénnyel (2. ábra). A honos fajok elsőbbsége vagy nagyobb mennyiségben történő vetése esetén is szignifikánsan alacsonyabb



2. ábra. A közönséges selyemkóró (*Asclepias syriaca*) maximális csíranövényesszáma az elsőbbségi hatással, a vetett honos fajok mellett, illetve a különböző propagulumnyomású kezelésekben.

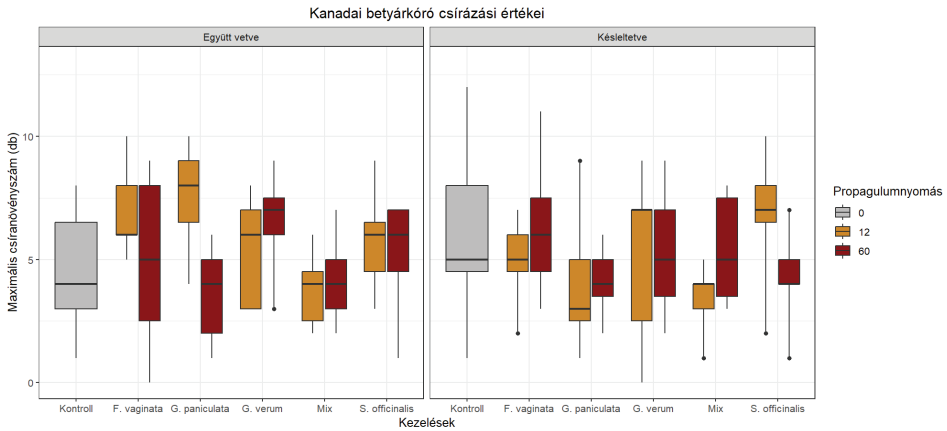
volt a közönséges selyemkóró csíranövényeinek száma. A vetett fajok közül a selyemkóróhoz leghasonlóbb két faj, a *G. verum* ($p=0,0094$), illetve a *Gypsophila paniculata* ($p=0,0473$) vetése szignifikánsan alacsonyabb csíranövényszámhoz vezetett a *S. officinalissal* összevetve. Az interakciós post hoc teszt alapján a négy honos faj magkeveréke szignifikánsan ($p=0,0001$) alacsonyabb selyemkóró csíraszámot eredményezett, mint a *S. officinalis*.

Kanadai betyárkóró (*Conyza canadensis*)

A kanadai betyárkóró csíranövényszámára a statisztikai vizsgálatok alapján a vetett fajok voltak szignifikáns hatással önmagukban, emellett a propagulumnyomással páros, illetve a propagulumnyomással és az elsőbbségi hatással hármas interakcióban (4. táblázat). A legmagasabb csíranövényszámot a *Festuca vaginata* késleltetett, 60 magos kezelésében találtuk 11 csíranövénnyel, míg a legalacsonyabb értékeket a Mix és a *G. paniculata* kezeléseknél találtuk. A Mix esetében a késleltetett vetés 12 magos kezelésében, míg a *G. paniculata* esetében az együtt vetett és a késleltetett, 60 magos kezelésében volt az alacsonyabb csíranövényesség (Mix: 5 db, *G. paniculata* 6 db) (3. ábra). A post hoc tesztek csak a háromváltozós interakció esetében erősítették meg a szignifikáns hatást, kizárólag a kis mennyiségben vetett *G. paniculata* mellett történő késleltetett vetésnek volt szignifikáns negatív hatása ($p=0,0467$). Ez a faj a betyárkóróhoz hasonló volt, de nem ez a faj állt legközelebb hozzá a tulajdonságtérben.

4. táblázat. A kanadai betyárkóró (*Conyza canadensis*) csíranövényességére vonatkozó elemzések statisztikai (Anova) eredményei a három magyarázó változó hatásának függvényében. A szignifikáns értékek ($p<0,05$) vastagon vannak szedve.

<i>Conyza canadensis</i>			
Kezelések	χ^2	Df	P érték
Elsőbbségi hatás	0,4502	1	0,5022
Propagulumnyomás	1,0189	2	0,6008
Vetett honos fajok	10,7598	4	0,0294
Elsőbbségi hatás * Propagulumnyomás	3,6926	2	0,1578
Elsőbbségi hatás * Vetett honos fajok	3,5825	4	0,4654
Propagulumnyomás * Vetett honos fajok	11,3100	4	0,0232
A három változó együtt	10,9188	4	0,0274



3. ábra. A kanadai betyárkóro (*Conyza canadensis*) maximális csíranövényesszáma az elsőbbségi hatással, a vetett honos fajok mellett, illetve a különböző propagulumnyomású kezelésekben.

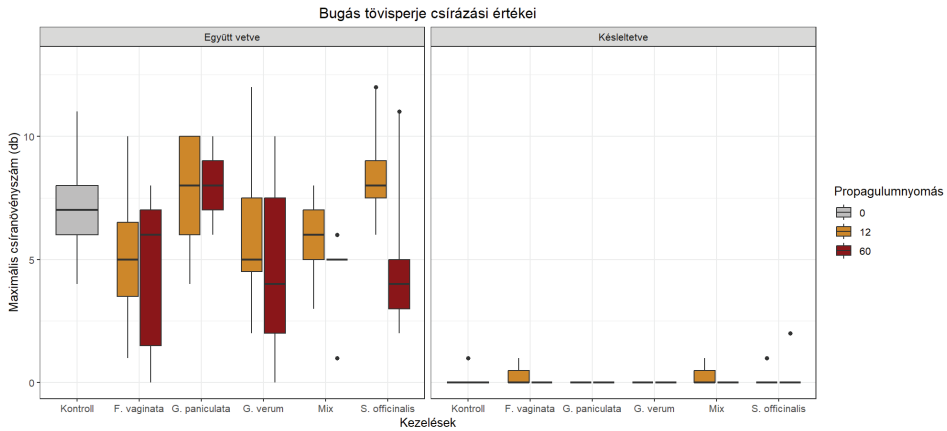
Bugás tövisperje (Tragus racemosus)

A bugás tövisperje csírázását mindhárom magyarázó változó befolyásolta, de a statisztikai teszt alapján az elsőbbségi hatás volt a legjelentősebb (5. táblázat). A

5. táblázat. A bugás tövisperje (*Tragus racemosus*) csíranövényességére vonatkozó elemzések statisztikai (Anova) eredményei a három magyarázó változó hatásának függvényében. A szignifikáns értékek ($p < 0,05$) vastagon vannak szedve.

<i>Tragus racemosus</i>			
Kezelések	χ^2	Df	P érték
Elsőbbségi hatás	578,41	1	<0,001
Propagulumnyomás	6,13	1	0,0132
Vetett honos fajok	13,28	4	0,0099
Elsőbbségi hatás * Propagulumnyomás	0,47	1	0,4933
Elsőbbségi hatás * Vetett honos fajok	7,94	4	0,0939
Propagulumnyomás * Vetett honos fajok	3,96	4	0,4120
A három változó együtt	5,36	4	0,2520

legmagasabb csíranövényértékeket a *G. verum*mal és a *S. officinalisszal* történő, kis mennyiség melletti (12 honos mag) együttvetéses kezelésekben találtuk, ahol minden elültetett *T. racemosus* mag kikelt (12 db) (4. ábra). A honos fajok elsőbbségének szignifikáns negatív hatása volt a tövisperje csíranövényeinek számára. A propagulumnyomás és a vetett fajok esetén nem találtunk a post hoc tesztek alapján szignifikáns hatást.



4. ábra. A bugás tövisperje (*Tragus racemosus*) maximális csíranövényesszáma az elsőbbségi hatással, a vetett honos fajok mellett, illetve a különböző propagulumnyomású kezelésekben.

Diszkusszió

Egy kontrollált kísérletben, fóliasátorban, cserepekben elvetve vizsgáltuk három özönnövény (közönséges selyemkóró, kanadai betyárkóró, bugás tövisperje) megtelepedési sikerét őshonos fajok vetése mellett. Hipotézisünk az volt, hogy a honos fajok elsőbbsége, nagyobb propagulumnyomása és a nagyobb jelleg hasonlóság segítségével lehetséges hátráltatni az inváziós idegenhonos fajok csíranövényeinek megtelepedését. Eredményeink azt mutatják, hogy mindhárom tényező (elsőbbségi hatás, propagulumnyomás, jelleg hasonlóság) befolyásolhatja az inváziós fajok csíranövényeinek megtelepedését. Eredményeink fajspecifikusak; míg a közönséges selyemkóró esetében a propagulumnyomás és a hasonló honos fajok jelenléte voltak meghatározók, addig a kanadai betyárkóró esetében mindhárom tényező jelentős hatással bírt. A bugás tövisperje esetében viszont az elsőbbség volt a legnagyobb befolyásoló tényező.

A honos fajok elsőbbségének negatív hatását az özönnövények megtelepedésére két faj, a közönséges selyemkóró és a bugás tövisperje esetében mutattuk ki. Eredményeink a selyemkóró esetén reményt adnak arra, hogy a felhagyott szántók korai bevetése csökkentheti a faj állomány nagyságát és további terjedését, ami összhangban áll terepi restaurációs kísérletek eredményeivel is (Reis *et al.* 2022). A bugás tövisperje esetében feltételezzük, hogy a fóliasátoron belüli hőmérséklet-ingadozás (2021. október és február között: min.: -8 °C, max.: 36,5 °C) nagy szerepet játszhatott az alacsony csíranövényességben. Emiatt a *Tragus racemosus* a tavaszi időszak helyett már télen kicsírázott, és a később elvetett magokból kikelt

fiatal csíranövények fagyérzékenyséjük miatt (Jabbour *et al.* 1996) elpusztultak. Ez rámutat arra, hogy a klímaváltozás befolyásolhatja az inváziót és az invázióval szembeni ellenálló képesség mechanizmusait (Hulme 2017).

A közösleges selyemkóró csíranövényeinek megtelepedését emellett negatívan befolyásolta a honos fajok megemelt magmennyisége, míg a másik két özönfaj esetében ez nem volt szignifikáns kezelés. A nagyobb mennyiségben történő vetés hatékony lehet az inváziós fajok visszaszorításában, de ezt üvegházi körülmények között nem mindig tudták igazolni (Halassy *et al.* 2023). Ezenkívül létezhetnek küszöbértékek, mind az inváziós fajok, mind a honos fajok magmennyiségére, amelyek felett a honos fajok mennyiségi növelése már nincs hatással (Schantz *et al.* 2015).

A vetett fajok hasonlóságának hatása jelen eredményeink alapján nem teljesen egyértelmű. A közösleges selyemkóró esetében ugyan a leghasonlóbb fajoknak volt szignifikáns hatása, de ez nem tért el szignifikánsan a legkevésbé hasonló fajtól, a *F. vaginátától*. A kanadai betyárkóró esetében a második leghasonlóbb fajnak volt szignifikáns hatása, de csak az elsőbbséggel és nagyobb magmennyiséggel kombinálva. Korábbi kutatásunkban (Csákvári *et al.* 2023) a magmennyiség mellett a kompetitív fű (*Festuca vaginata*) vetése szignifikánsan negatív hatással bírt az inváziós fajok csírázási százalékára, ez a faj többnyire alacsony jelleg hasonlóságot mutatott az inváziós fajokkal. Ugyanakkor a jelen vizsgálat a csíranövények száma alapján az erős kompetitor hatását nem tudta alátámasztani. Bár bizonyos vetett fajok a közösleges selyemkóró és a betyárkóró esetén is jelentős hatással bírtak, mindkét faj vizsgálatában a magkeverék mellett találtuk a legkevésbé csíranövényt. Korábbi vizsgálatok alapján is bebizonyosodott, hogy honos magkeverékek alkalmazása invázióval szemben rezisztensebb életközösségeket képes létrehozni (Davies *et al.* 2014), ami a diverzitás rezisztencianövelő szerepére utal. A kanadai betyárkóró esetén a honos faj negatív hatása előrelépést jelent, mert Shah és munkatársai (2014) szerint a faj megtelepedését csak a helyi, azonos régióból (Észak-Amerika) származó fajok voltak képesek korlátozni, míg az általuk vizsgált, Európában őshonos és filogenetikailag hasonló fajok (*Daucus carota* L., 1753; *Brachypodium pinnatum* (L.) P. Beauv., 1812; *Dactylis glomerata* L., 1753; *Molinia caerulea* (L.) Moench, 1794; *Epilobium hirsutum* L., 1753) sikertelennek bizonyultak.

Korábbi vizsgálatunkkal összhangban többféle kezelés együttes hatása jelen kutatásunkban is jelentősen csökkentette az özönfajok csíranövényeinek a megtelepedését (Csákvári *et al.* 2023). Számos kutatás igazolja, hogy több kezelési módszer egyidejű használata növelheti az invázióval szembeni ellenállást, pl. a propagulumnyomás és magas fajgazdagság együttes alkalmazása (Carter és Blair 2012), honos fajok nagyobb biomasszája és az elsőbbségi hatás (Yannelli *et al.*

2020), elsőbbségi hatás és tulajdonság-hasonlóság együttes alkalmazása (Byun *et al.* 2020b). Ez összhangban áll az inváziós idegenhonos fajok kezelésére irányuló globális stratégiákkal, ami hangsúlyozza a korai beavatkozás és az integrált megközelítések szerepét (Meyerson *et al.* 2022).

A növényi invázió világszerte veszélyezteti a biológiai sokféleséget, így ezen probléma megoldásához szoros együttműködésre van szükség az ökológusok, a természetvédelmi szakértők és a döntéshozók között. Eredményeink alapján a honos fajok vetése csökkentheti az inváziós növények megtelepedését, elsősorban az elsőbbség és a honos fajok nagyobb mennyiségben és keverékben történő vetése, illetve többféle módszer kombinálása révén. Kutatásaink alátámasztják, hogy magvetéses restaurációs módszerekkel lehetséges növelni egy élőhely biotikus ellenállását, így hozzájárulhatnak integráltabb élőhely helyreállítási tervek kidolgozásához a Pannon homoki gyepekben előforduló inváziók megelőzéséhez és visszaszorításához.

Köszönetnyilvánítás – A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH K138060) és az Egészségbiztonság Nemzeti Laboratórium (RRF-2.3.1-21-2022-00006) támogatta. Halassy Melinda munkásságát ezenkívül a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj (Magyar Tudományos Akadémia Bo/00145/23/8) is támogatta. Köszönjük a Nemzeti Botanikus Kertnek a kísérleti helyszín biztosítását.

Irodalomjegyzék

- Brooks, M. E., Kristensen, K., van Benthem, K. J., Magnusson, A., Berg, C. W., Nielsen, A., Skaug, H. J., Maechler, M., Bolker, B. M. (2017): glmmTMB Balances Speed and Flexibility Among Packages for Zero-inflated Generalized Linear Mixed Modeling. *The R Journal* 9(2): 378–400. <https://doi.org/10.32614/RJ-2017-066>
- Buckley, Y. M., Bolker, B. M., Rees, M. (2007): Disturbance, invasion and re-invasion: Managing the weed-shaped hole in disturbed ecosystems. *Ecology Letters* 10: 809–817. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01067.x>
- Byun, C., Choi, H., Kang, H. (2020a): Effects of cutting and sowing seeds of native species on giant ragweed invasion and plant diversity in a field experiment. *Journal of Ecology and Environment* 44(1): 1–8. <https://doi.org/10.1186/s41610-020-00173-8>
- Byun, C., de Blois, S., Brisson, J. (2020b): Restoring functionally diverse communities enhances invasion resistance in a freshwater wetland. *Journal of Ecology* 108: 2485–2498. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13419>
- Carter, D. L., Blair, J. M. (2012): High richness and dense seeding enhance grassland restoration establishment but have little effect on drought response. *Ecological Applications* 22: 1308–1319. <https://doi.org/10.1890/11-1970.1>
- Case, E. J., Harrison, S., Cornell, H. V. (2016): After an invasion: Understanding variation in grassland community recovery following removal of a high-impact invader. *Biological Invasions* 18: 371–380. <https://doi.org/10.1007/s10530-015-1009-x>

- Csákvári, E., Sáradi, N., Berki, B., Csecserits, A., Csonka, A. C., Reis, B. P., Török, K., Valkó, O., Vörös, M., Halassy, M. (2023): Native species can reduce the establishment of invasive alien species if sown in high density and using competitive species. *Restoration Ecology* 31: e13901. <https://doi.org/10.1111/rec.13901>
- Csecserits, A., Czúcz, B., Halassy, M., Kröel-Dulay, G., Rédei, T., Szabó, R., Szitár, K., Török, K. (2011): Regeneration of sandy old-fields in the forest steppe region of Hungary. *Plant Biosystems* 145: 715–729. <https://doi.org/10.1080/11263504.2011.601340>
- Davies, K. W., Johnson, D. D., Nafus, A. M. (2014): Restoration of exotic annual grass-invaded rangelands: Importance of seed mix composition. *Invasive Plant Science and Management* 7: 247–256. <https://doi.org/10.1614/IPSM-D-12-00093.1>
- de Bello, F., Botta-Dukát, Z., Lepš, J., Fibich, P. (2021): Towards a more balanced combination of multiple traits when computing functional differences between species. *Methods in Ecology and Evolution* 12: 443–448. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13537>
- Drenovsky, R. E., Grewell, B. J., D'antonio, C. M., Funk, J. L., James, J. J., Molinari, N., Parker, I. M., Richards, C. L. (2012): A functional trait perspective on plant invasion. *Annals of Botany* 110(1): 141–153. <https://doi.org/10.1093/aob/mcs100>
- Fukami, T. (2015): Historical contingency in community assembly: Integrating niches, species pools, and priority effects. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 46: 1–23. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110411-160340>
- Halassy, M., Batáry, P., Csecserits, A., Török, K., Valkó, O. (2023): Meta-analysis identifies native priority as a mechanism that supports the restoration of invasion-resistant plant communities. *Communications Biology* 6: 1100. <https://doi.org/10.1038/s42003-023-05485-8>
- Haubrock, P. J., Turbelin, A. J., Cuthbert, R. N., Novoa, A., Taylor, N. G., Angulo, E., Ballesteros-Mejia, L., Bodey, T. W., Capinha, C., Diagne, C., Essl, F., Golivets, M., Kirichenko, N., Kourantidou, M., Leroy, B., Renault, D., Verbrugge, L., Courchamp, F. (2021): Economic costs of invasive alien species across Europe. In: Zenni, R. D., McDermott, S., Garcia-Berthou, E., Essl, F. (eds.): Economic costs of biological invasions around the world. *NeoBiota* 67: 153–190. <https://doi.org/10.3897/neobiota.67.58196>
- Hartig, F. (2020): DHARMA: Residual diagnostics for hierarchical (multi-level/mixed) regression models. R package version 0.3.3.0
- Hess, M. C., Buisson, E., Jaunatre, R., Mesléard, F. (2020): Using limiting similarity to enhance invasion resistance: Theoretical and practical concerns. *Journal of Applied Ecology* 57(3): 559–565. <https://www.doi.org/10.1111/1365-2664.13552>
- Hulme, P. E. (2017): Climate change and biological invasions: evidence, expectations, and response options. *Biological Reviews* 92(3): 1297–1313. <https://doi.org/10.1111/brv.12282>
- Jabbour, A. A., Kalapos, T., Hahn, I., Kovács-Láng, E., (1996): Field water relations of three sand steppe grass species. *Abstracta Botanica* 20(1): 37–46.
- Khomenko, T., Tonkha, O., Pikovska, O. (2023): Invasive plant species and their threat to biodiversity. *Plant and Soil Science* 14(1): 51–65. <https://doi.org/10.31548/plant1.2023.51>
- Lenth, R. (2023): *emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means*. R package version 1.8.4-1, <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>
- Levine, J. M., Adler, P. B., Yelenik, S. G. (2004): A meta-analysis of biotic resistance to exotic plant invasions. *Ecology Letters* 7: 975–989. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00657.x>
- Meyerson, L. A., Pauchard, A., Brundu, G., Carlton, J. T., Hierro, J. L., Kueffer, C., Pandit, M. K., Pyšek, P., Richardson, D. M., Packer, J. G. (2022): Moving toward global strategies for managing invasive alien species. In: Clements D. R., Upadhyaya M. K., Joshi S., Shrestha A. (eds.): *Global Plant Invasions* Springer, pp. 331–360. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89684-3_16

- R Core Team (2022): R: *A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Reid, A. M., Morin, L., Downey, P. O., French, K., Virtue, J. G. (2009): Does invasive plant management aid the restoration of natural ecosystems? *Biological Conservation* 142: 2342–2349. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.05.011>
- Reis, B. P., Szitár, K., Kövendi-Jakó, A., Török, K., Sáradi, N., Csákvári, E., Halassy, M. (2022): The long-term effect of initial restoration intervention, landscape composition, and time on the progress of Pannonic sand grassland restoration, *Landscape and Ecological Engineering* 18: 429–440. <https://doi.org/10.1007/s11355-022-00512-y>
- Schantz M. C., Sheley R. L., James J. J. (2015): Role of propagule pressure and priority effects on seedlings during invasion and restoration of shrub-steppe. *Biological Invasions* 17: 73–85. <https://doi.org/10.1007/s10530-014-0705-2>
- Schuster, M. J., Wragg, P. D., Reich, P. B. (2018): Using revegetation to suppress invasive plants in grasslands and forests. *Journal of Applied Ecology* 55: 2362–2373. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13195>
- Shah, M. A., Callaway, R. M., Shah, T., Houseman, G. R., Pal, R. W., Xiao, S., Luo, W., Rosche, C., Reshi, Z. A., Khasa, D. P., Chen, S. (2014): *Conyza canadensis* suppresses plant diversity in its nonnative ranges but not at home: a transcontinental comparison. *New Phytologist* 202(4): 1286–1296. <https://doi.org/10.1111/nph.12733>
- Stringham, O. C., Lockwood, J. L. (2021): Managing propagule pressure to prevent invasive species establishments: propagule size, number, and risk–release curve. *Ecological Applications* 31: e02314. <https://doi.org/10.1002/eap.2314>
- Venables, W. N., Ripley, B. D. (2002): *Modern Applied Statistics with S*. Fourth edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0. <https://www.stats.ox.ac.uk/pub/MASS4/>
- Weidlich, E. W., de Dechoum, M. D. S. (2021): Exploring the potential of using priority effects during ecological restoration to resist biological invasions in the neotropics. *Restoration Ecology* 29(1): e13295. <https://doi.org/10.1111/rec.13295>
- Yannelli, F. A., MacLaren, C., Kollmann, J. (2020): Moving away from limiting similarity during restoration: timing of arrival and native biomass are better proxies of invasion suppression in grassland communities. *Frontiers in Ecology and Evolution* 8: 238. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.00238>
- Yenish, J. P., Fry, T. A., Durgan, B. R., Wyse, D. L. (1996): Tillage effects on seed distribution and common milkweed (*Asclepias syriaca*) establishment. *Weed Science* 44: 815–820.
- Young, S. L., Barney, J. N., Kyser, G. B., Jones, T. S., DiTomaso, J. M. (2009): Functionally similar species confer greater resistance to invasion: Implications for grassland restoration. *Restoration Ecology* 17: 884–892. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2008.00448.x>
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N., Saveliev, A. A., Smith, G. M. (2009): *Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R*. Springer, New York, p. 574.

Using priority effect, propagule pressure and trait similarity to control invasive species by sowing native species

Nóra Sáradi^{1,2,3}, Edina Csákvári^{1,2}, Boglárka Berki⁴, Anikó Csecserits^{1,2}, Anna Cseperke Csonka^{1,2,4}, Bruna Paolinelli Reis⁵, Márton Vörös^{1,4}, Katalin Török¹ & Melinda Halassy^{1,2}

¹*Institute of Ecology and Botany, HUN-REN Centre for Ecological Research, Alkotmány u. 2-4, H-2163 Vácraátót, Hungary*

²*National Laboratory for Health Security, HUN-REN Centre for Ecological Research, Karolina út 29., H-1113 Budapest, Hungary*

³*Institute of Agronomy, Hungarian University of Agriculture and Life Sciences, Páter Károly u. 1, H-2100 Gödöllő, Hungary*

⁴*Doctoral School of Biology, Institute of Biology, Eötvös Loránd University, Pázmány Péter sétány 1/C, H-1117 Budapest, Hungary*

⁵*Centre for Ecology, Evolution and Environmental Changes, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Campo Grande, C2, Piso 5, 1749-016 Lisboa, Portugal*

*E-mail: saradi.nora@ecolres.hu

Ecological restoration is an important tool in controlling plant invasions by management and increasing biotic resistance. We hypothesize that priority effect, increased propagule pressure of native species, and trait similarity enhance invasion resistance. In a controlled experiment, we tested the competition between three invasive species, representing different life forms and functional groups, and four native sandy grassland plant species with varying degrees of similarity. In the case of *Asclepias syriaca*, seed density and the sowing of similar native species were determinant. For *Conyza canadensis*, all three factors had a significant effect. Priority hindered seedling establishment in *Tragus racemosus*. Our results suggest that establishment of invasive plants can be limited by sowing native species, especially with higher seed densities and in seed mixes and by ensuring their earlier presence. Enhanced resistance can be achieved through a combination of different treatments.

Keywords: biotic resistance, ecological restoration, invasive plants, priority effect, propagule pressure, trait similarity

Beérkezett/Received: 2024. 04. 15. Elfogadva/Accepted: 2024. 06. 11.

© A Szerzők/The Authors, 2024

Ez egy szabad hozzáférésű cikk, amely a Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0) licenc alatt jelenik meg./This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0).

