

SZAKDOLGOZAT

Oláh Zsuzsanna Xénia

2024



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

Budai Campus

Kertészettudományi Intézet

Kertészmérnök alapképzési szak

**A szárazság hatása a lándzsás útifű (*Plantago lanceolata* L.)
életmenetére**

Belső konzulens: Dr. Csergő Anna Mária
docens

**Belső konzulens
intézete/tanszéke:** Növénytan Tanszék

Készítette: Oláh Zsuzsanna Xénia

Budapest

2024

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. Irodalmi áttekintés	5
2.1. Szárazság.....	5
2.2. A szárazság hatása a növények életmenetére	7
2.2.1. A szárazság hatása a vegetatív jellegek alakulására.....	8
2.2.2. A szárazság hatása a generatív jellegek alakulására	9
3. Anyag és módszer	11
3.1. A lándzsás útifű.....	11
3.2. A kísérlet helyszíne	14
3.3. Az esőkizárók felépítése	17
3.4. A kísérlet kivitelezése	18
3.5. A vizsgálat módszere.....	19
3.5.1. Adatfelvétel	19
3.5.2. Statisztikai elemzések	19
4. Eredmények	20
4.1. A szárazság hatása a vegetatív jellegek alakulására.....	21
4.2. A szárazság hatása a generatív jellegek alakulására	24
5. Eredmények megvitatása	26
5.1. A szárazság hatása a vegetatív jellegek alakulására.....	26
5.2. A szárazság hatása a generatív jellegek alakulására	26
6. Következtetések és javaslatok.....	28
7. Összefoglalás	30
8. Köszönetnyilvánítás.....	32
9. Irodalomjegyzék	33
10. Ábrák jegyzéke	39
11. Mellékletek.....	40
1.sz. melléklet: Feldolgozott minták száma és feltáró statisztika	40
2.sz. melléklet: Statisztikai modellek felépítése és eredménye	41
3.sz. melléklet: Nyilatkozat.....	42
4.sz. melléklet: Nyilatkozat.....	43

1. Bevezetés

A globális éghajlatváltozás felgyorsulásával az aszályesemények gyakorisága és intenzitása egyre nő (Dai, 2011, 2013; Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc), 2023; Smith és mtsai., 2024), ami világszerte jelentős veszélyt jelent az ökoszisztémákra. Az aszály az egyik leggyakoribb abiotikus stresszforrás, amely a növénypopulációkat érinti, és messzemenő hatással van mind a mezőgazdasági rendszerekre, mind a természetes növényközösségekre (Dai, 2011; Wilhite, 2000). Annak ellenére, hogy az aszály az ökológiai és mezőgazdasági változások mozgatórugójaként vitathatatlan fontossággal bír, még mindig hiányosságok vannak annak megértésében, hogy a szárazsággal szembeni hosszútávú kitettség hogyan befolyásolja a növényfajok vegetatív és reprodukív tulajdonságait, a különböző populációk életmenetének alakulását.

A növények életciklusa - a magcsírázástól a vegetatív növekedésen át a szaporodásig - szorosan kapcsolódik a környezeti feltételekhez, és a víz elérhetősége alapvető szerepet játszik ebben. Bár egyes fajok adaptív mechanizmusokat fejlesztettek ki a vízhiány elviselésére, továbbra is kulcsfontosságú megérteni, hogy a szárazság milyen mértékben befolyásolja a különböző növényi jellegek és életszakaszok alakulását, a különböző szárazságra adott választási stratégiák pontosan milyen fenológiai változásokban nyilvánulnak meg.

Az aszályos körülmények gyakoribbá válásával a növények növekedési mintázata és szaporodási teljesítménye megváltozhat, ami a fajok összetételének megváltozásához, a biodiverzitás csökkenéséhez (D'Odorico és mtsai., 2013; Huang és mtsai., 2016; Van Der Molen és mtsai., 2011) és a mezőgazdasági hozamok súlyos visszaeséséhez vezethet (Dai, 2011). Ha megértjük, hogy az aszály hogyan befolyásolja ezeket a tulajdonságokat, megbízhatóbban tudjuk előrejelezni, hogy a növénypopulációk hogyan reagálhatnak a jövőbeli éghajlati változások potenciális forgatókönyveire. Ez az ismeret a szárazságnak ellenálló növények nemesítéséhez és a szárazságstresszel szemben különösen érzékeny fajok megőrzéséhez is elengedhetetlen.

A rövid életű növényekben a reprodukív tulajdonságok a fitneszre gyakorolt hatásuk miatt genetikailag jobban meghatározottak lehetnek, míg a vegetatív tulajdonságok nagyobb plaszticitást mutathatnak a rövid távú zavarások pufferelése érdekében (Villellas és mtsai., 2021). Következésképp a vegetatív és generatív növényi jellegek alakulásának feltérképezése kritikus fontosságú a növények ellenálló képességének és a stresszes körülmények közötti hosszú távú túlélésének megértéséhez.

A szárazság a növényi fejlődésre gyakorolt hatását elkülönítő kísérleti vizsgálatok elengedhetetlenek a vízellátottság, a növények növekedése és a szaporodási siker közötti összetett kölcsönhatások interpretációjának sikerességéhez.

A PlantPopNet (Buckley és mtsai., 2019, <https://www.plantpopnet.com/>) nemzetközi ökológiai kutatóhálózat keretein belül több országban végzünk kísérletet lándzsás útifű (*Plantago lanceolata* L.) populációkon a hosszútávú szárazság növényi életmenetre gyakorolt

hatásainak megértése céljából. A dolgozatom a magyarországi, keszthelyi kísérleti területen, az általam 2024 évben gyűjtött fenológiai adatok egy részét dolgozza fel.

1.1. Célkitűzés:

Az aszály a lándzsás útifű (*P. lanceolata*) populációk fennmaradására gyakorolt közvetlen hatásainak megértése, a növény életmenetére gyakorolt hatásainak vizsgálatán keresztül.

A munkánk során az alábbi kérdésekre kerestünk választ:

Milyen hatást gyakorol a szárazság a lándzsás útifű vegetatív jellegeinek (levelek száma, legnagyobb levél hossza, szélessége) alakulására?

Milyen hatást gyakorol a szárazság a lándzsás útifű generatív jellegeinek (virágzatok száma, virágzati hossz) alakulására?

2. Irodalmi áttekintés

2.1. Szárazság

Az aszály egy visszatérő, szélsőséges éghajlati jelenség, amelyet a hónapoktól akár évekig tartó, az adott szárazföldi területen szokásosnál alacsonyabb csapadékmennyiség jellemez. Tehát aszály alatt egy átmeneti csapadékszegény időszakot értünk. Ilyen éghajlati jelenségek a világ legtöbb részén előfordulnak, viszont a szárazabb területek hajlamosabbak rá, mivel csapadékmennyiségüket döntően csupán néhány csapadékesemény határozza meg (Sun és mtsai., 2006).

Az aszálynak négy típusát különböztethetjük meg (Wilhite & Glantz, 1985; Wilhite, 2000):

(1) A meteorológiai aszály hónapoktól akár évekig tartó, az átlagosnál kevesebb csapadékkal járó időszak. Gyakori együtt járója a szokásosnál magasabb hőmérséklet. Megelőzi, valamint kiváltja az aszály többi formáját. A meteorológiai aszályt a nagyléptékű légköri áramlási mintázatok tartós anomáliái (pl. magas légnyomás) okozzák, amelyeket leggyakrabban anomális trópusi tengerfelszíni hőmérsékletek váltanak ki (Hoerling és mtsai., 2006).

(2) A mezőgazdasági aszály olyan száraz talajjal jellemezhető időszak, amely az átlagosnál kevesebb csapadék, intenzív, de ritkább esőzések vagy a normálisnál nagyobb párolgás miatt következik be, és igen gyakran a növények növekedésének csökkenéséhez, hozamvisszaeséshez vezet.

(3) Hidrológiai aszály akkor következik be, amikor a folyók vízhozama, valamint a tavakban vagy felszín alatti víztározókban tárolt vízmennyiség a hosszú távú átlagos szintek alá csökken. Az aszály ezen formájának kialakulása egy lassabb folyamat, amely során a tárolt víz kimerül, de nem pótlódik (Dai, 2011).

(4) A szocioökonómiai aszály definíciója egy adott gazdasági termék kínálatát és keresletét a meteorológiai, hidrológiai és mezőgazdasági aszály elemeivel vonja összefüggésbe. Ilyen társadalmi-gazdasági aszály akkor következik be, amikor a gazdasági javak iránti kereslet meghaladja a kínálatot az időjárással összefüggő vízellátás hiányának következtében (Wilhite & Glantz, 1985).

Az ökoszisztémák szintjén az aszályesemények lehetnek:

(1) Állandóak - olyan régiókban, ahol sivatagi éghajlat uralkodik;

(2) Szezonálisak - ahogy az a félszáraz régiókban megfigyelhető;

(3) Rendszertelenek, avagy változóak - ahogyan a nedves éghajlatú régiókban előfordulhat (ez általában kisebb, korlátozott kiterjedésű területeken fordul elő, és az aszály visszatérése kiszámíthatatlan); vagy

(4) Zöld aszályok - ahogy az akkor fordul elő, amikor a csapadékeseményekben nem történik kimaradás, de a beérkező csapadék így is kevesebb, mint az evapotranszpiráció, ami regionális egyenlőtlenséget okoz. Az utóbbi esetben a levegő relatív páratartalma csökken, ami

a talaj nedvességtartalmának csökkenéséhez vezet. A nedvesség elpárolog a légkörbe, és csapadék formájában visszajön, de nem elég ahhoz, hogy tartósan megnövelje a talaj nedvességtartalmát. Az aszály ezen megjelenése nehezebben érzékelhető, mint az előbb említett formái (da Silva és mtsai., 2013).

Az elmúlt évtizedekben megfigyelt felszíni felmelegedés túlnyomóan az emberi tevékenység nyomán felszabaduló üvegházhatású gázok növekedésének tulajdonítható. Továbbá a nagymértékű üvegházhatású gázkibocsátás valószínűleg nagyban hozzájárult az Indiai-óceán és a trópusi Csendes-óceán felmelegedéséhez, ami az afrikai és kelet-ázsiai szárazság fő előidézője (Dai, 2011). Ezért arra a következtetésre juthatunk, hogy az emberiség jelentős szerepet játszott a közelmúltbeli nagymértékű aszályok kialakulásában - bár az ENSO (El Niño–Déli Oszcilláció), illetve a trópusi Atlanti-óceán felszíni hőmérsékletének és az ázsiai monszunoknak a természetes változásai is szignifikáns hatással lehettek azok kialakulására (Dai, 2011).

Az éghajlati rendszerben bekövetkező számos változás a globális felmelegedés növekedésével közvetlen összefüggésben fokozódik. Ezek közé tartozik a szélsőséges melegek, a tengeri hőhullámok, a heves csapadékesemények, valamint egyes régiókban a mezőgazdasági és ökológiai aszályok gyakoriságának és intenzitásának növekedése; az intenzív trópusi ciklonok arányának növekedése; valamint a sarkvidéki tengeri jég, a hótakaró és a permafroszt csökkenése (Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC), 2023).

Az európai meteorológiai és hidrológiai aszályok közelmúltbeli tendenciáival kapcsolatban egyetértenek a szakértők: az elmúlt évtizedekben Dél-Európában egyre gyakoribbá és súlyosabbá váltak az aszályok (Briffa és mtsai., 2009; Vicente-Serrano és mtsai., 2014; Spinoni és mtsai., 2015), különösképp a mediterrán térségben (Hoerling és mtsai., 2012), leginkább tavasszal és nyáron (Spinoni és mtsai., 2017). A Kárpátok térségében ugyancsak egyértelmű növekedés volt tapasztalható az aszályesemények gyakoriságát és súlyosságát tekintve (Spinoni és mtsai., 2013, 2014). Általános konszenzus van továbbá azzal kapcsolatban, hogy a 21. századi Európában várhatóan tovább fog növekedni a meteorológiai illetve mezőgazdasági aszályok gyakorisága (Forzieri és mtsai., 2016), valamint súlyosságuk ugyancsak egyre drasztikusabb lesz (Dai, 2011, 2013; Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC), 2023; Smith és mtsai., 2024).

A melegebb éghajlat fokozni fogja a nagyon csapadékos és nagyon száraz időjárási és éghajlati eseményeket és évszakokat, ami hatással lesz az árvizekre és aszályokra egyaránt, de ezen események helye és gyakorisága a regionális légkörben bekövetkező változásoktól függ, beleértve a monszunokat és a középső szélességi körök viharjainak pályáit. Az SSP2-4.5, SSP3-7.0 és SSP5-8.5 forgatókönyvek szerint az El Niño–Déli Oszcillációhoz kapcsolódó csapadékváltozékonyság a 21. század második felére nagy valószínűséggel felerősödik (Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC), 2023).

Továbbá számos bizonyíték támasztja alá, hogy a Golf-áramlat hőszállítása alapvetően befolyásolja az egész északi félteke éghajlatát. Mivel az antropogén éghajlatváltozás az előrejelzések szerint gyengíti az Atlanti meridionális áramlási rendszert (AMOC), az európai éghajlat ezzel összefüggő változásai várhatóak (Palter, 2015). Az óceáni áramlatokban

bekövetkező változás és az ehhez kapcsolódó hatások valószínűleg befolyással lesznek az óceáni hőfelvételre, ezáltal a felmelegedés mértékére az északi féltekén, vagy akár globálisan is (Winton és mtsai., 2013).

Egyes országokban a száraz és félszáraz területek mérete várhatóan növekedni fog, ami elsivatagosodáshoz vezethet (da Silva és mtsai., 2013).

A közeljövőben fokozódni fog az ökoszisztémák szárazságérékenysége, ami a biodiverzitás drasztikus csökkenését fogja maga után vonni – ennek értelmében a fajösszetétel nagy mértékű változása várható (D’Odorico és mtsai., 2013; Huang és mtsai., 2016; Van Der Molen és mtsai., 2011).

Kevés szélsőséges természeti esemény okoz olyan mértékű gazdasági és ökológiai károkat, mint az aszály, amely minden évben emberek millióit érinti (Wilhite, 2000). A nagymértékű szárazság súlyos hatással van a mezőgazdaságra, a vízkészletekre, egész ökoszisztémákra, ezáltal több irányból veszélyezteti az alapvető emberi jólétet (Dai, 2011).

Mindennek értelmében rendkívüli fontosságú, hogy megértsük, illetve feltérképezzük milyen hatással bírnak az aszályesemények a növényvilágra, mennyiben, milyen irányba módosítják a növények életmenetét – ezen reakciók megértése lehetővé teszi, hogy az emberiség hatékonyabb válaszokkal bírjon az elkerülhetetlenül fokozódó szárazodásra.

2.2. A szárazság hatása a növények életmenetére

A globális klímaváltozással járó átlagosnál melegebb hőmérséklet és szárazság várhatóan drámai hatással lesz az ökoszisztémákra, illetve nagyban megváltoztathatja a növények teljesítményét befolyásoló morfológiai és kémiai tulajdonságokat (da Silva és mtsai., 2013; Orians és mtsai., 2019).

Az abiotikus stresszhatások a termés kiesés fő okait képezik - a legtöbb jelentős kultúrnövény átlagos terméshozamát akár több, mint 50%-kal csökkenthetik. Az abiotikus stressz okozta termés kiesés évente több százmillió dolláros veszteséget okoz világszerte, a mezőgazdasági ipar fenntarthatóságát ezáltal komolyan veszélyeztetve (da Silva és mtsai., 2013; Mahajan & Tuteja, 2005). Az aszály vitathatatlanul az egyik legfontosabb tényező, amely világszerte korlátozza a növénytermesztést.

Az aszály tápanyaghiányt okozhat, még a műtrágyázott talajokban is, mivel az egyes tápanyagok mobilitása csökken, ami az ásványi anyagok talajmátrixból a gyökerekbe történő diffúziójának, felszívódásának alacsonyabb sebességéhez vezet (da Silva és mtsai., 2013).

A növényeknek életciklusuk során nagy mennyiségű vízre és tápanyagra van szükségük - a talaj víztartalmának csökkenése fejlődésük minden aspektusát befolyásolja (da Silva és mtsai., 2013). A szárazság a növényi reakciók széles skáláját válthatja ki (Anjum és mtsai., 2011).

A lombhullató fajok hatékony mechanizmusokkal rendelkeznek a szárazsággal való megbirkózásra. Ilyen például a sztomák záródása, a levél tájolásának megváltoztatása és a levélfelület csökkentése - a levelek eldobása a transzspirációs vízvesztés minimalizálása érdekében (Gindaba és mtsai., 2005).

A növények által a szárazsággal való megbirkózásra használt mechanizmusokat három általános kategóriába sorolhatjuk (da Silva és mtsai., 2013; Xu és mtsai., 2010):

(1) Menekülés - nyugalmi állapot a száraz időszakban, a növényi életciklus befejezése még a súlyos aszály kezdete előtt (da Silva és mtsai., 2013).

(2) Késleltetés - fokozott vízfelvétel és csökkentett vízvesztés révén. Megnyilvánulhat például a gyökérrendszer fokozott fejlődésében, a fajlagos levélfelület csökkentésében (Jackson és mtsai., 2000; Mahajan & Tuteja, 2005).

(3) Fiziológiai tolerancia - a normális életfunkciók fenntartása alacsony sejtvíztartalom mellett is. A szövetek turgiditásának fenntartása az ozmotikus alkalmazkodóképesség javításán, a sejtfalak rugalmasságának növelésén keresztül (Morgan, 1984). Metabolikus útvonalak megváltoztatása, például fokozott antioxidáns anyagcsere a súlyos stressz alatti túlélés érdekében (Peñuelas és mtsai., 2004). Szárazságtűrést elősegítő biokémiai-fiziológiai tulajdonságok evolúciója (Hoffmann & Merilä, 1999; Sherrard és mtsai., 2009).

A folyamatok valójában egyszerre, árnyaltan szoktak közrejátszani és megnyilvánulni a növények szárazságstresszre adott válaszaiban (Xu és mtsai., 2010).

A rövid távú szárazság általában gátolja a fotoszintézist, elnyomja a hajtásnövekedést és ezzel egyidejűleg gyors változásokat idéz elő a levelek biokémiájában, beleértve az ozmoregulációs funkciójú metabolitok megnövekedett koncentrációját, a tápanyagvesztéséget, a C/N/P/K sztöchiometria változását és a másodlagos metabolitok csökkent vagy megnövekedett koncentrációját (Goufo és mtsai., 2017; Selmar & Kleinwächter, 2013).

A tartós szárazságstressz olyan tulajdonságok eltolódását okozza, amelyek fokozzák az elkerülést és/vagy a stresszel kapcsolatos metabolitok, például az ozmoregulátorok és antioxidánsok koncentrációjának változását, amelyek növelik a szárazságtűrést (Moradi, 2016; Rodgers és mtsai., 2012). Továbbá hatására bizonyos hormonok – például ABA (abszizinsav) – előállítása fokozódik, amely eredményeképp a kedvezőtlen körülmények közti túlélés esélyét növelő fiziológiai, morfológiai változások következnek be (Wahab és mtsai., 2022).

2.2.1. A szárazság hatása a vegetatív jellegek alakulására

A szárazság növényekre gyakorolt élettani hatásai közül leggyakrabban leírt a vegetatív növekedésben megfigyelhető redukció, különösen a hajtásnövekedés csökkenése (da Silva és mtsai., 2013; Mahajan & Tuteja, 2005). A levélnövekedés általában érzékenyebb a szárazságra, mint a gyökérnövekedés (Mahajan & Tuteja, 2005; Reinelt és mtsai., 2023). A csökkentett levélnövekedés előnyös a növények számára a vízhiányos körülmények között, mivel a kisebb levélfelület a transzspiráció csökkenését eredményezi. Ezzel összhangban, a fajlagos levélfelület csökkentése érdekében számos kifejlett növény, például a gyapot, ha szárazságnak van kitéve, a szenescencia felgyorsításával és az idősebb levelek eldobásával reagál. Ami a gyökeret illeti, a gyökérzet relatív növekedése fokozódhat, ami nagyban elősegíti, hogy a gyökérrendszer több vizet vonjon ki a mélyebb talajrétegekből is (Mahajan & Tuteja, 2005).

Az extrém szárazságot átélt helyszíneken a föld feletti nettó elsődleges termelés összességében átlagosan ~35%-kal csökken, a gyepek és a cserjések esetében ~38%-kal, illetve 21%-kal (Smith és mtsai., 2024).

Orians és mtsai. (2019) lándzsás útifű modellnövényen vizsgálták a szárazság, illetve a hőmérséklet hatását a növények méretére, illetve a levelek biokémiai összetételére, egy terepi kísérlet (Boston Area Climate Experiment) keretei között. 50% - os csapadékkizárást alkalmaztak, redukciós esőkizárók telepítésével. Eredményeik szerint a levelek száma tekintetében a csapadéknak marginális hatása volt - meglepő módon a szárazságkezelte lándzsás útifű növényeknek általában több levelük volt. A leghosszabb levél hossza esetében a csapadéknak nem volt jelentős hatása.

Reinelt és mtsai. (2023) a szárazság hatását vizsgálták a hajtás- illetve gyökérnövekedésre, valamint azok lebomlóképeségére, három, az európai mérsékelt övi gyepekben gyakran előforduló növényen, köztük lándzsás útifűvön, üvegházi körülmények közt. Tanulmányukban a szárazság levélfelületre, illetve levélhosszúságra gyakorolt szignifikáns negatív hatásáról számoltak be mindhárom növényfaj, így a lándzsás útifű esetén is.

Több kísérletes kutatás során kimutatták az aszály lándzsás útifű vegetatív növekedésére gyakorolt negatív hatását, a szárazságstressz általi csökkent átlagos növénymagasságot (Shojaei és mtsai., 2023), emellett többen leírtak ugyancsak redukált hajtástömeget, illetve relatív levélfelületet is (Lozano és mtsai., 2020).

A vegetatív tulajdonságok környezeti feltételekhez való plasztikus alkalmazkodása Villellas és mtsai. (2021) kísérletében is megnyilvánult: a fajlagos levélfelület száraz körülmények között csökkent, hogy csökkentse a levélfelületen keresztül történő vízvesztéséget.

2.2.2. A szárazság hatása a generatív jellegek alakulására

A növények terméshozamának és termésösszetevőinek aszály okozta csökkenése a talaj alacsony víztartalmára reagáló sztómák záródásának tulajdonítható, ami csökkenti a CO₂ felvételét, és ennek következtében a fotoszintézist (Cornic, 2000; Flexas és mtsai., 2004). Összefoglalva, az uralkodó szárazság csökkenti a növények növekedését és fejlődését, ami a virágzás és a termésfejlődés akadályozottságához, ezáltal kevesebb, kisebb méretű terméshez vezet. A termésfejlődést az asszimilát-megoszlás változása és a szacharóz- és keményítőszintetizáló enzimek aktivitásának csökkenése nagyban nehezíti, hátráltatja (Anjum és mtsai., 2011).

Hansen és mtsai. (2013) *Plantago coronopus*-on végzett üvegházi kísérlet keretei közt vizsgálták a vegetatív és generatív növekedésbe fektetett erőforrás-elosztás változását a szárazság hatására. Megfigyelésük során valamennyi vizsgált *P. coronopus* populáció növényei nagyobb mértékű reprodukív allokációt mutattak a szárazságkezelés hatására.

Weißhuhn és mtsai. (2011) egy üvegházi kísérlet keretei közt tanulmányozták a szárazság hatását különböző gyepalkotó fajok növekedésére. Az aszály növelte a lándzsás útifű

esetén a reprodukzív allokációt, ami arra utal, hogy ez a faj korai elvirágzással és termésképzéssel menekül a kedvezőtlen körülmények elől.

Villella és mtsai. (2021) egy több kezelést (a víz és a fény elérhetőségének különböző kombinációit) alkalmazó tenyészkerti kísérlet és globális szintű felmérések kombinálásával a lándzsás útifű populációi közötti funkcionális jelleg-változások fő forrásait különítették el. Megfigyeléseik szerint a reprodukzív tulajdonságok határozott genetikai differenciálódást mutattak, amely nagymértékben meghatározta a megfigyelési mintázatokat, de csak akkor, ha a tulajdonságokat korrigálták a biomasszában előforduló különbségekkel. A vegetatív tulajdonságok nagyobb plaszticitást, valamint ellentétes genetikai és plasztikus válaszokat mutattak, elfedve a tulajdonságok terepen megfigyelt változatossága mögött meghúzódó genetikai komponenst. Ezek az eredmények a reprodukzív tulajdonságok megfigyelési és genetikai mintázatai közötti nagyobb összhangra utalnak, amint az a fitnesshez való szorosabb kapcsolatuktól is várható.

3. Anyag és módszer

3.1. A lándzsás útifű

A *Plantago lanceolata* L. a *Lamiales* rendbe, azon belül a *Plantaginaceae* családba tartozó növényfaj. Euráziában őshonos, de a világ többi részére is behurcolták, így mára már kozmopolita gyomnövénynek számít (Grigore és mtsai., 2015; Pol és mtsai., 2021). A lándzsás útifű réteken, legelőkön, útszegélyek mentén gyakran előforduló, rövid életű, évelő (*hemikriptophyta*) növény (Sagar & Harper, 1964).

A növény (1. ábra) főgyökeres gyöktörzsszel rendelkezik, rövid szártagú hajtásain tőlevelek fejlődnek, tőlevélrózsát alkotva. Egy egyed egy vagy több tőlevélrózsa is alkothat. Leveli lándzsásak, 3-5 érűek, szélük ép vagy ritkán fogazott, lehetnek kopaszok vagy akár dúsan szőrözöttek. Tőkocsánya hengeres, átlagosan 2-4 cm hosszú, végálló füzérvirágzatban végződik. A tőkocsányok száma tőlevélrózsáinként és egyedenként változó. A virágzat különböző, természetben előforduló mutáns formái ismertek (Sagar & Harper, 1964).

Apró (4 mm átmérőjű), szél porozta virágait protogynia jellemzi. 4 tagúak, hártásos, tővükben hártás szegélyű murva ül. A 2-2 csészelevél forrt, a 4 szírom pártacsövet alkot, a 4 sárgásfehér színezetű porzó hosszabb, feltűnően kiállva a virágzathoz (Sagar & Harper, 1964).

Termése egy-kétmagvú, harántirányban kupakkal nyíló tok (csalmatok). A magok hosszúkásak, közepükön vájattal. A virágzás elhúzódó, áprilistól az első fagyokig tarthat. A magok érése gyors, de az időjárási tényezőktől erősen függő. A magok érésük után azonnal kilökődhetnek, de nincs aktív szóródási mechanizmusuk – a szétszóródott magok már az adott őszi periódusban, vagy az azt követő év tavaszán szintén kicsírázhatnak (Sagar & Harper, 1964).

A lándzsás útifűvet már évszázadok óta használják gyógyászati célokra a világ különböző részein. Számos hatékony bioaktív kémiai összetevőt, például polifenolokat, tanninokat, flavonoidokat, alkaloidokat, terpenoidokat, irridoid glikozidokat, zsírsavakat és poliszacharidokat tartalmaz, amelyek hozzájárulnak a specifikus terápiás hatások kifejtéséhez. Ennek megfelelően antioxidáns, antibakteriális, sebgyógyító, gyulladáscsökkentő, citotoxikus és antiulcerogén hatással rendelkezik (Abate és mtsai., 2022).

Manapság gyógynövényként leggyakrabban a felső légutak gyulladása esetén használják, szirup, esetleg tea formájában, de a bőr regenerálódásának felgyorsítására kifejlesztett gyógyászati készítményekben is előfordul (Abate és mtsai., 2022; Pol és mtsai., 2021).

A kozmetikai iparban a legkülönbözőbb termékek – krémek, testápolók - összetevőjeként használt Európa szerte (Grigore és mtsai., 2015).

A levelek nyersen is fogyaszthatók, akár salátákban étkezési céllal felhasználhatók (Abate és mtsai., 2022).

A lándzsás útifű levele kifejezetten ízletes a legelő állatok számára, és ásványi anyagokban gazdag takarmányt biztosít (Stewart, 1996). A vegyes legelőkön a szarvasmarhák,

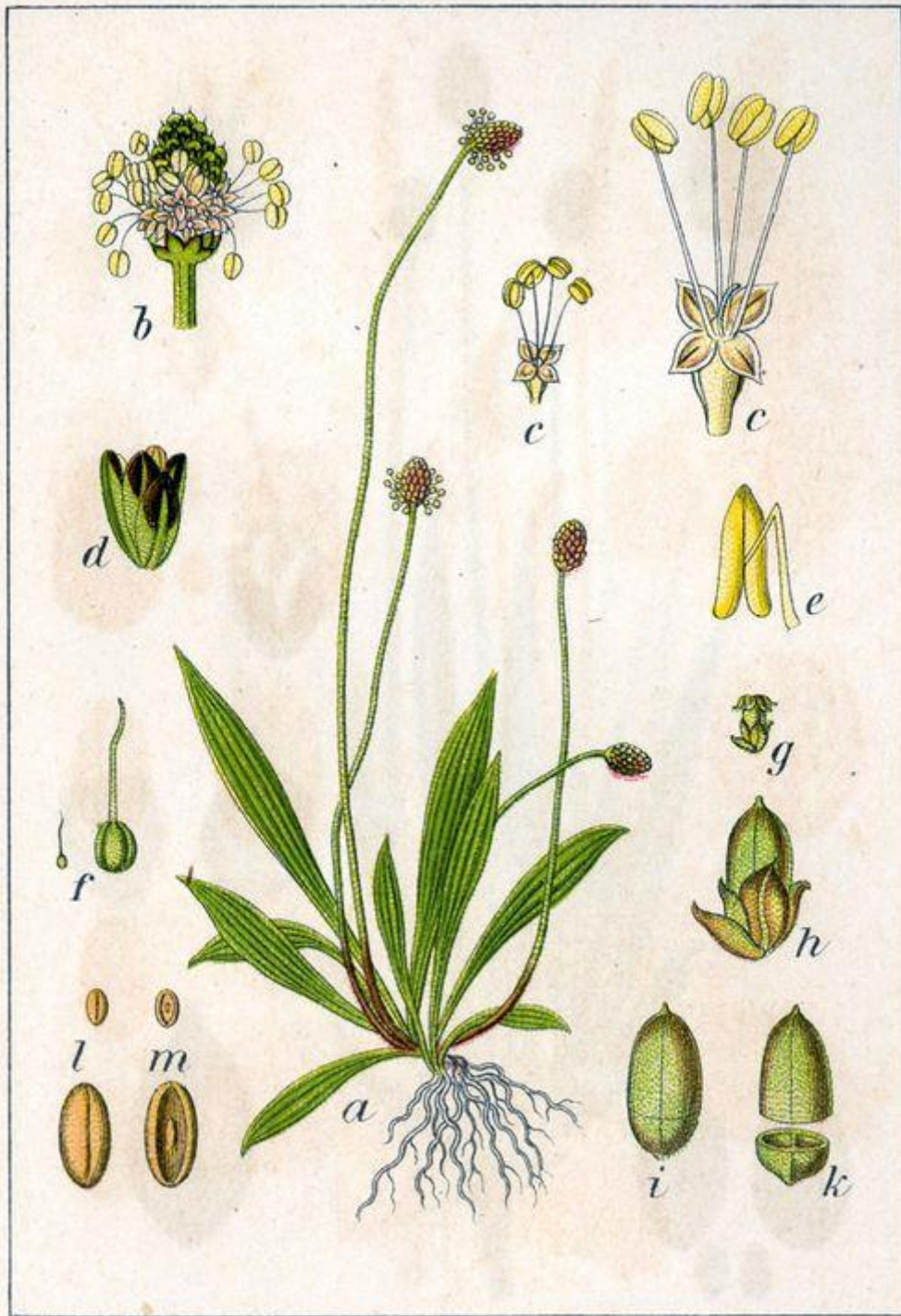
juhok, szarvasok és lovak a legtöbb hüvelyes és fűféle előtt szelektíven lelegelik (Sagar & Harper, 1964).

Bár szélmegporzású, számtalan rovar - többek közt méhek és kétszárnyúak - látogatja virágjait (Sharma és mtsai., 1993). Viszont a mézelő méhek lándzsás útifűről történő pollengyűjtése csak időszakosan figyelhető meg. Ez a viselkedés az adott méhcsaládok fő táplálékforrásainak virágzásához kapcsolható - az útifű fajok virágporát a mézelő méhek a más, táplálékosabb virágpor-típusok helyettesítésére használják, és csak kiegészítő forrásként gyűjtik (Sabugosa-Madeira és mtsai., 2008).

A *P. lanceolata* jó bioindikátorként használható a nehézfémek felhalmozódásának kimutatására ipari és városi területeken (Grigore és mtsai., 2015). Több kísérletben kimutatták, hogy a cink, ólom, illetve kadmium kimutatására egyaránt alkalmas indikátornövény (Dimitrova & Yurukova, 2005; Nadgórska-Socha és mtsai., 2017).

A lándzsás útifű kiváló modellszárú a hosszan tartó szárazság növényi életmenetre gyakorolt hatásainak vizsgálatára, mivel általában 2-5 évig él (Lacey és mtsai., 2003; Roach, 2003), évelő kozmopolita lágyszárú gyomnövény, amely a C3-as fotoszintetikus úton rögzíti a szén-dioxidot és tág tűrőképességet mutat a vízkorlátozással szemben (Cavers és mtsai., 1980; Cranston és mtsai., 2016; Orians és mtsai., 2019; Rodgers és mtsai., 2012).

Tafel 61.



Spitz-Wegerich, *Plantago lanceolata*.

1. ábra: Lándzsás útifű - illusztráció

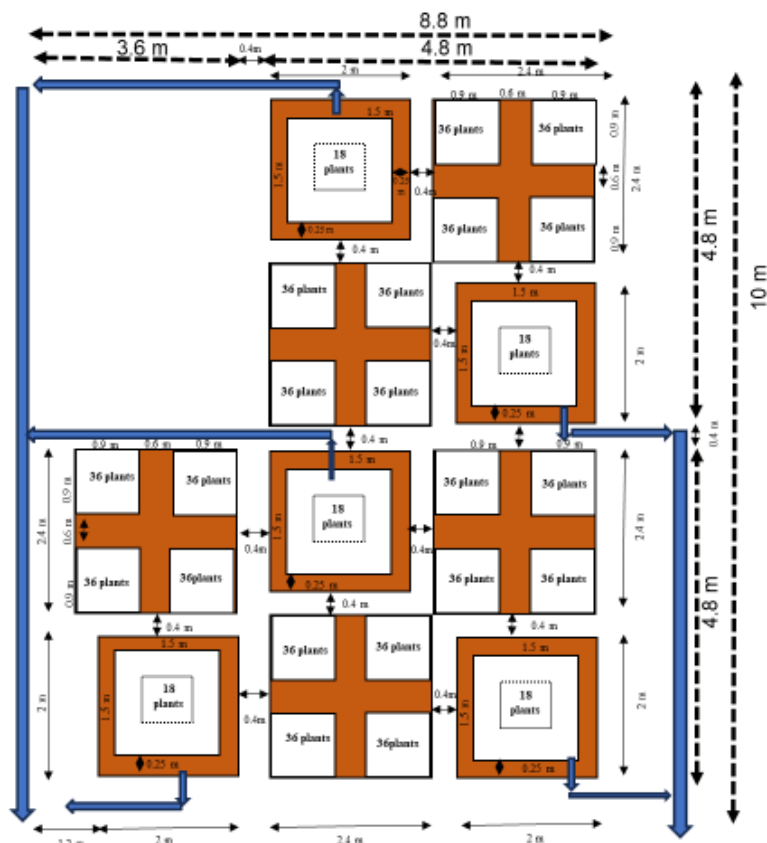
Forrás: Sturm, J., & Sturm, J. G. (1796). *Deutschlands Flora in Abbildungen*.

3.2. A kísérlet helyszíne

A kísérletet a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem keszhelyi Georgikon kampuszának botanikus kertjében létesítettük. A 8,8 m × 10 m parcella vadhálós kerítéssel lett elkerítve a nagyobb testű növényevők elleni védekezés céljából. A terület a szárazsággkísérlet mellett egy kölcsönös átültetési tenyészkerti („common garden”) kísérletnek ad helyet.

A szárazsággkísérletet 30 növényen, növényenként három ismétléssel (azonos anyanövény magjából csírázott növények), azaz összesen 90 egyeden végezzük. A kísérlet kontrollcsoportja a kölcsönös átültetési kísérlet szintén 90 egyedből álló, keszhelyi populációja. A kísérlet elején cserepenként három magot vetettünk, amelyből kicsírázott három növényből végül csak egyet hagytunk meg, a többit biomassa mintagyűjtés céljával eltávolítottuk.

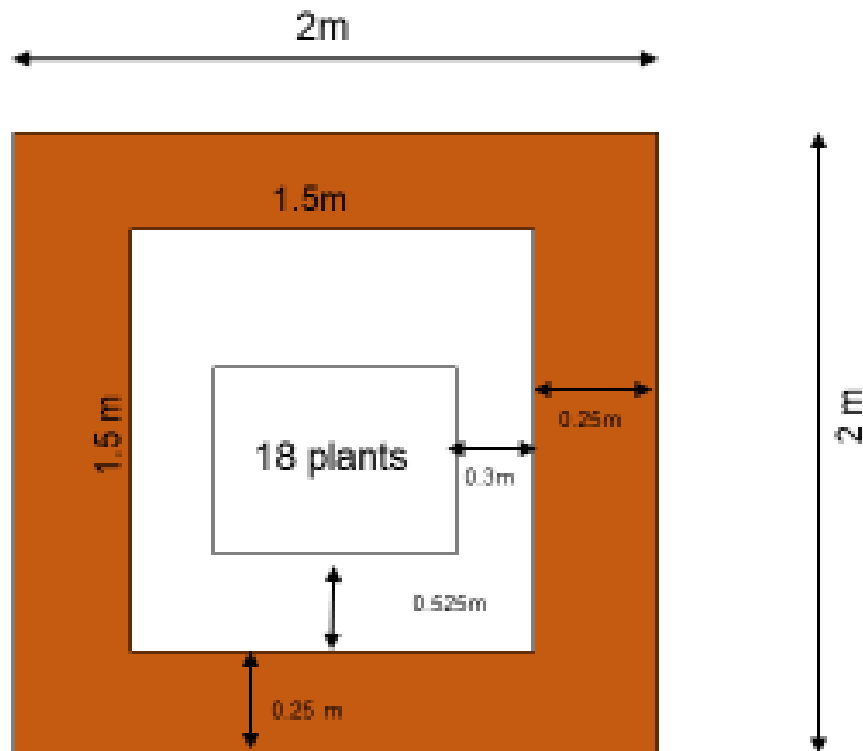
A kísérleti területet összesen 10 blokkra osztottuk – 5, esőkizáróval felszerelt blokkban találhatóak a szárazságkezelt növények, illetve 5 blokkban találhatóak a kölcsönös átültetési adaptáció kísérlet, tehát a kontrollcsoport növényei is. A tenyészkert kísérlet kontrollcsoport blokkjai továbbá négy kvadrátra vannak felosztva. A szárazsággkísérlet és a kölcsönös átültetési kísérlet blokkjai párokban helyezkednek el a kísérleti területen (2. ábra).



2. ábra: A keszhelyi kísérleti terület alaprajza.

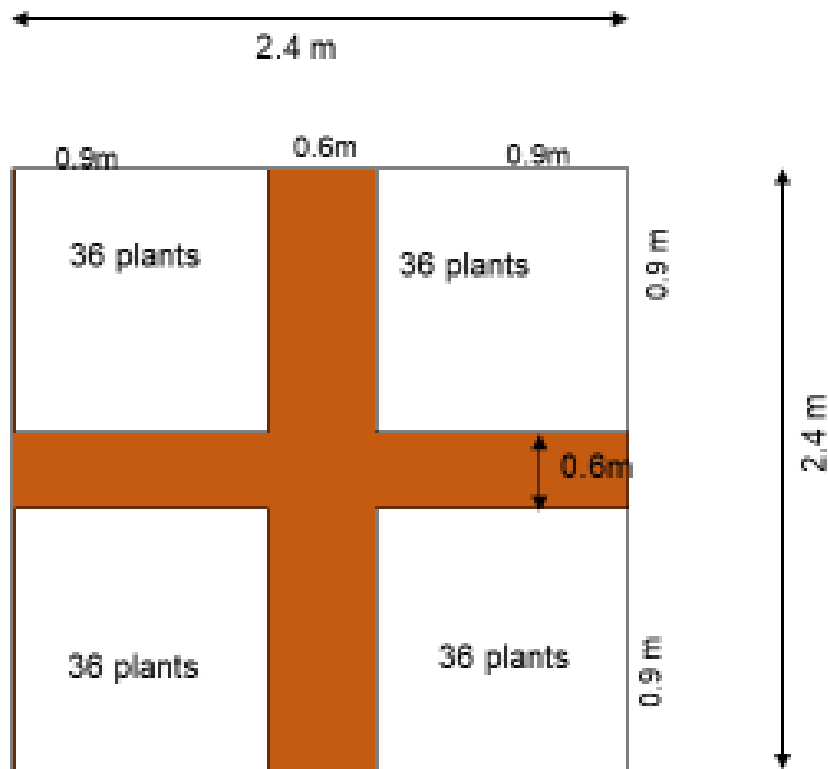
A színes-keresztes blokkok a kölcsönös átültetési kísérlet blokkjai. A színes négyzeteken belül fehér négyzetként ábrázolt blokkokban találhatóak az esőkizárók.

A szárazságkísérlet minden blokkjában 18 cserepet helyeztünk el. A $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ parcellákon, az $1,5\text{ m} \times 1,5\text{ m}$ – es esőkizárók alatt a cserepek 3×6 – os elrendezésben lettek leásva – a hosszabb oldal az esőkizáró zsindelyeivel merőlegesen, a rövidebb oldal azokkal párhuzamosan futva. A blokkokon belül az esőkizáró minden oldalán $0,25\text{ m}$ - es üres sávot, illetve az esőkizáró és a cserepek közt további $0,3\text{ m}$, illetve a másik oldalon $0,52\text{ m}$ puffertsávot hagyva. A cserepek a blokkok közepén $0,9\text{ m} \times 0,45\text{ m}$ területet foglalnak el (3. ábra).



3. ábra: Az esőkizárók és az alattuk elhelyezett növények elhelyezkedése egy blokkon belül

A kontrollcsoport növényeiből blokkonként ugyancsak 18-at helyeztünk el, azon belül, kvadrátonként számuk változó. A 2,4 m × 2,4 m – es parcellákon belül négy, 0,9 m × 0,9 m – es kvadrát található, amelyeken belül 36-36 növényt helyeztünk el. A kvadrátokat 0,6 m széles utak választják el, egymást keresztezve. A növények ezen felül teljesen randomizált elrendezés szerint lettek elhelyezve (4. ábra).



4. ábra: A kontrollcsoport blokkjainak méretei, illetve az azokon belül található kvadrátok elhelyezkedése

3.3. Az esőkizárók felépítése

Redukciós esőkizárók (Hoover és mtsai., 2018) alkalmazásával a kísérleti területen jellemző természetes csapadékmennyiség 50% - os csökkentésével egy szárazságszintet állítottunk be mind az öt blokkban (5. ábra).

Az esőkizárók által felfogott csapadék a földfelszín alatt futó csöveken keresztül van elvezetve a kísérleti parcella bal felső sarkában található tartályba. A tartály nem hermetikusan zárt, a vizet lassan visszaengedi a talajba 2 m mélységben.

Az esőkizárók alapjának mérete 154 cm × 154 cm. A hátsó, hosszabb lábak mérete ~101 cm, a rövidebb lábak 60 cm magasak. A zsindelek hossza ~ 159, 5 cm, szélességük hajlítás után ~ 11 cm, lejtésük 15°. Anyaguk teljesen átengedi a fényt és az UV sugárzást egyaránt. Az 50% - os csapadékkizárást 7 db zsindeley biztosítja.



5. ábra: Esőkizáró a keszthelyi kísérleti területen

3.4. A kísérlet kivitelezése

A magok gyűjtése a PlantPopNet készthelyi, állandó útifű állományról 2023 júliusában történt. A magok gyűjtését leszámítva a kísérlet minden további lépésében alapvető szerepet töltöttem be.

A vetés 2024 március végén történt, 15 cm × 15 cm × 20 cm-es műanyag cserepekbe. A használt közeget kétharmad mosott kvarchomok és egyharmad helyi termőföld összekeverésével állítottuk elő. Az így kapott közeget a nagyobb gyökérdarabok eltávolítása végett átrostáltuk. A cserepeket töltésénél a felső 2 cm-t üresen hagytuk.

A cserepeket leástuk a földbe, a peremek és a földfelszín közt 3 cm-es távolságot hagyva. A cserepek lesüllyesztésének célja az volt, hogy csökkentsük a talaj kiszáradásának sebességét, illetve télen a fagyás veszélyét. A cserepek alatt agroszövetet helyeztünk el, annak érdekében, hogy a gyökerek kevésbé tudjanak a cserepekből kinőve vizet felvenni a talajból, illetve a gyomok kevesebb sikerrel tudjanak behatolni azokba.

A cserepeket műanyag címkékkel jelöltük, melyekre a növények egyedi azonosító kódját jegyeztük fel.

A kísérlet kezdetén cserepenként három magot vetettünk el. A vetés vízzel benedvesített fogpiszkálók segítségével történt, 1 – 1,5 cm-es mélységben. A fogpiszkálót minden egyes magnál bent hagytuk a földben – ezáltal lehetővé téve a csíranövények megkülönböztetését egyéb, a természetes magbankban megtalálható, egyidejűleg csírázó növénytől, illetve nagyban megkönnyítve a csírázási adatok rögzítésénél az adott növények pozíciójának könnyed leolvasását. Az magokat a cserép közepén, egymástól körülbelül 3 – 5 cm-es távolságba vetettük el, háromszög formában. Ennek megfelelően, óramutató járásával megegyezően haladva, első, második, illetve harmadik számozást társítottunk minden cserépben található egyed egyedi azonosító kódjához a továbbiakban.

A vetést követő hat hetes időperiódusban az összes növényt azonos kezelésben részesítettük. Ezen időszak alatt négyszer öntöztünk, a magok maximális csírázását biztosítva, illetve szükség szerint időszakos gyomlálást végeztünk.

A hat hét leteltével azon cserepekbe, amelyekben egy mag sem csírázott ki, azonos anyanövénytől származó egyedeket ültettünk át – összesen 20 egyedet, ebből 4-et a szárazságkezelt, 16-ot a kontrollcsoportba. Ezeket a növényeket az átültetés után egy hétig külön locsoltuk a túlélés biztosítása érdekében. Minden cserépben egy-egy növényt hagytunk meg – a többi növényt óvatosan, gyökerestül eltávolítottuk, majd biomassa adatgyűjtés céljából gyökér- és hajtás részekre daraboltuk, átmostuk és papírtasakokba helyeztük. Következésképp a csírázási időszak végén anyanövényenként három-három cserépben egy-egy növény maradt, összesen 14 cserép kivételével (4 a szárazságkezelt, 10 a kontrollcsoportból), amelyekben az alacsony csírázás miatt nem volt növény.

A vegetációs időszakban havonta egyszer megváltoztattuk a cserepek helyzetét, a gyökerek cserépből való kinövésének visszafogása, illetve az esetleges egyenlőtlen esőkizárás elkerülése végett. A cserepeket óramutató járásával megegyező irányban kezdtük el havonta

egy lépést mozgatni, tehát mindent növényt minden átrendezés alkalmával eddigi jobboldali szomszédja helyére helyeztünk.

A helyszínen összesen négy TMS-4 Standard mikroklíma mérő eszköz segítségével rögzítjük a talajnedvességet- és hőmérsékletet, valamint a léghőmérsékletet, két-két műszerrel az esőkizárók alatt és a kontrollcsoport blokkjaiban egyaránt.

3.5. A vizsgálat módszere

3.5.1. Adatfelvétel

2024 április 11-től május 13-ig heti kétszer (minden hét hétfő és csütörtök napján) rögzítettük a csírázott növények számát és identitását. A továbbiakban heti egy alkalommal rögzítettük tovább a csírázási adatokat, július 4-ig.

2024 május 16-tól heti egy alkalommal, nyolc héten keresztül végeztünk méréseket a *P. lanceolata* egyedeken. Feljegyeztük a növények túlélését, valamint fenológiai méréseket végeztünk. A mért jellegek a tölevélrózsák száma, levelek száma, leghosszabb levél hossza és szélessége, virágzati tőszárak száma, valamint a leghosszabb virágzati száron található virágzat hossza voltak. Emellett feljegyeztük az egyedek virágzatainak fenológiai állapotát (bimbó, virág, fejlődő magok, érett magok, már szétszóró magok) és a rovarrágási kár (herbivória) előfordulását (igen/nem).

A dolgozatomban ezen fenológiai mérések során gyűjtött adatok egy részét dolgozom fel.

3.5.2. Statisztikai elemzések

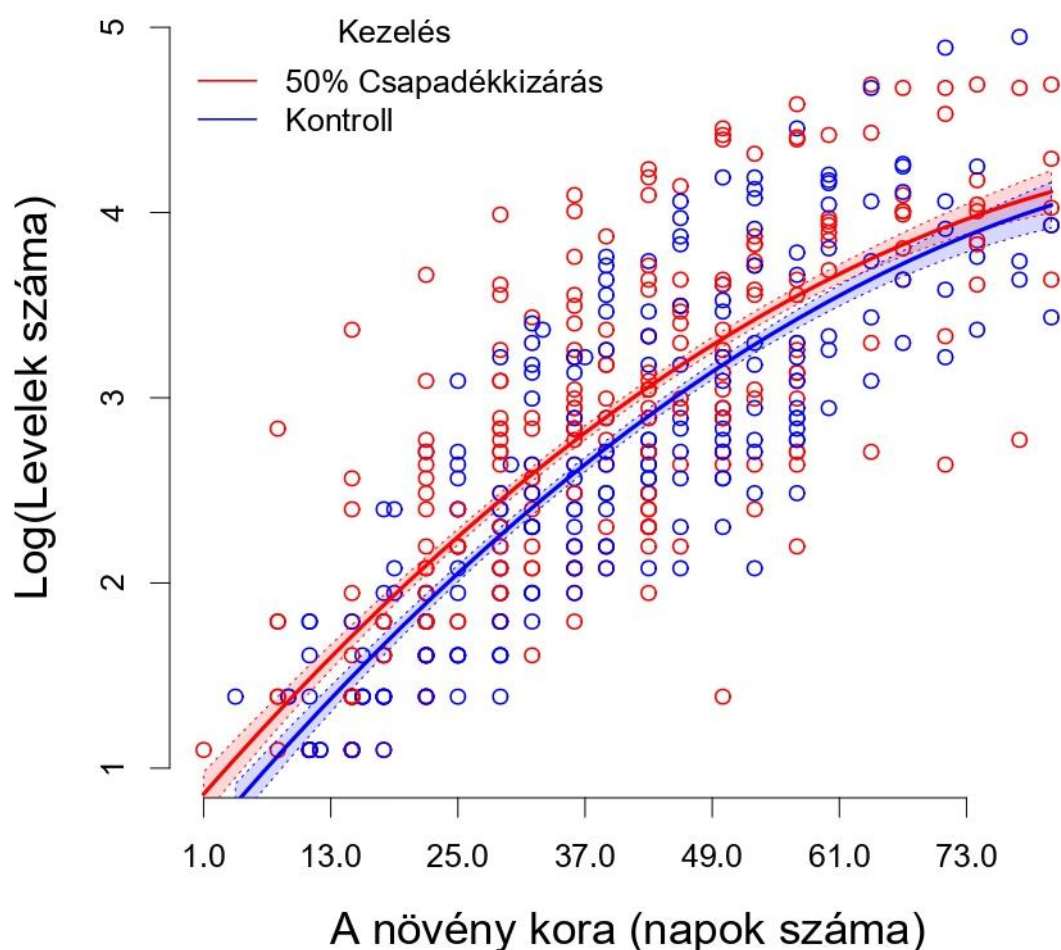
A szárazságkezelés hatását az általunk megfigyelt vegetatív, illetve generatív növényi jellegekre általános kevert lineáris modellekkel (GLMM, Gausz-féle hibaeloszlással, illetve negatív binomiális) vizsgáltam, a glmmTMB R programcsomag segítségével (Brooks és mtai., 2017). A növények napban megadott életkorát a csírázási adatsor segítségével állapítottam meg. A bizonytalan korú (2024. 04. 11-ig csírázó) növényeket kiszűrtem az adatsorból, valamint az elemzésből az átültetett növényeket szintén kizártam, mivel ezután már túl kevesen voltak ahhoz, hogy az átültetés okozta növekedésbeli különbségeket megbízhatóan figyelembe tudjam venni a modellekben. A függő változókat a reziduálisok normál eloszlása céljából szükség esetén (a Gausz-féle hibaeloszlást alkalmazó modelleknél) transzformáltam. A folytonos magyarázó változót (növények kora) skáláztam az hatás összehasonlíthatósága céljából a különböző jellegek között. A függő változók a vizsgált jellegek, fix hatások a kezelés, a növény életkora, a növény életkorának négyzetes hatása és a kezelés és a növény kora közötti interakció voltak. Random hatásként az anyanövény identitását, illetve a cserepek egyedi azonosító kódját, valamint a blokkok és kvadrátok azonosító számát adtuk meg. A fix hatások szignifikancia értékeit ANOVA tesztek elvégzésével vizsgáltam, amelyhez újraillesztettem a modellt a kívánt változó nélkül, majd a teljes és a csökkentett modell összehasonlításából nyert Chi-négyzet és p értékeket feljegyeztem. A statisztikai elemzéseket az RStudio 2024.4.2.764 programcsomag (2024) segítségével végeztem el. A modellek felépítésének részletei a 2. sz. mellékletben láthatók.

4. Eredmények

A dolgozatomban a vegetatív jellegek (levélszám, levélhossz és levélfelület) alakulásának modellezéséhez összesen 482 - 255 szárazságkezelt, 227 kontrollcsoport - felvételt használtam fel. A virágzati szám alakulásának modellezéséhez összesen 536 - 286 szárazságkezelt, 250 kontrollcsoport - felvétel állt rendelkezésemre, a virágzati hossz modellezéséhez ez a szám 280 - 154 szárazságkezelt, 126 kontrollcsoport – volt (1.sz. melléklet).

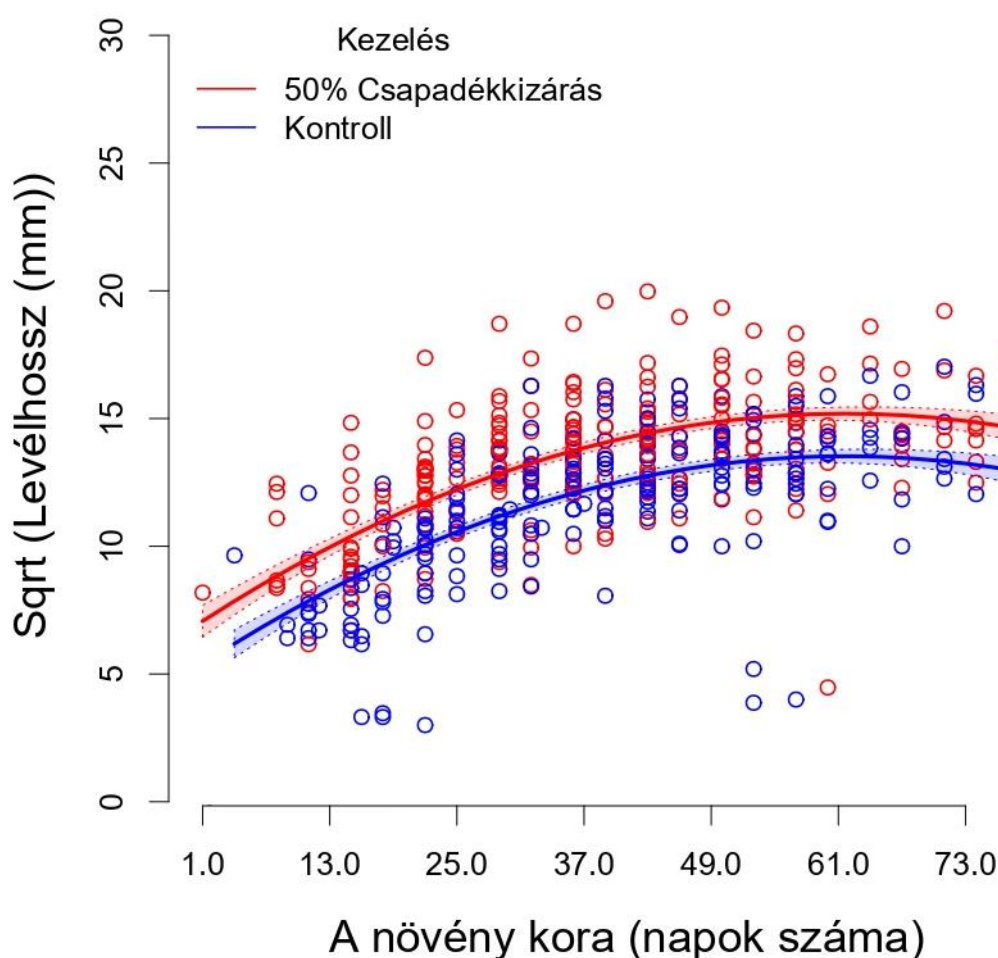
4.1. A szárazság hatása a vegetatív jellegek alakulására

A levelek számára a kezelés önmagában nem volt szignifikáns hatással ($\chi^2 = 1,441$ $p = 0,230$), tehát nem volt közvetlen, jelentős különbség a levelek számát tekintve a kontrollcsoport és az esőkizárásban részesült növények között. A növények életkora magában nem volt szignifikáns hatással ($\chi^2 = 0$, $p = 1$), az életkor négyzetének hatása azonban szignifikáns volt ($\chi^2 = 125,74$, $p = 2,2e-16$), jelezve a levélszám nemlineáris növekedését az életkor előrehaladtával, a szárazságkezelt és kontroll csoportokban egyaránt. A kezelés és a növények életkora közötti kölcsönhatás szintén szignifikáns volt ($\chi^2 = 5,551$, $p = 0,018$). Ez arra utal, hogy a kor előrehaladtával a kontrollcsoport növényeinél gyorsabban nőtt a levelek száma a szárazsággal kezelt növényekéhez képest (2. sz. melléklet, 6. ábra).



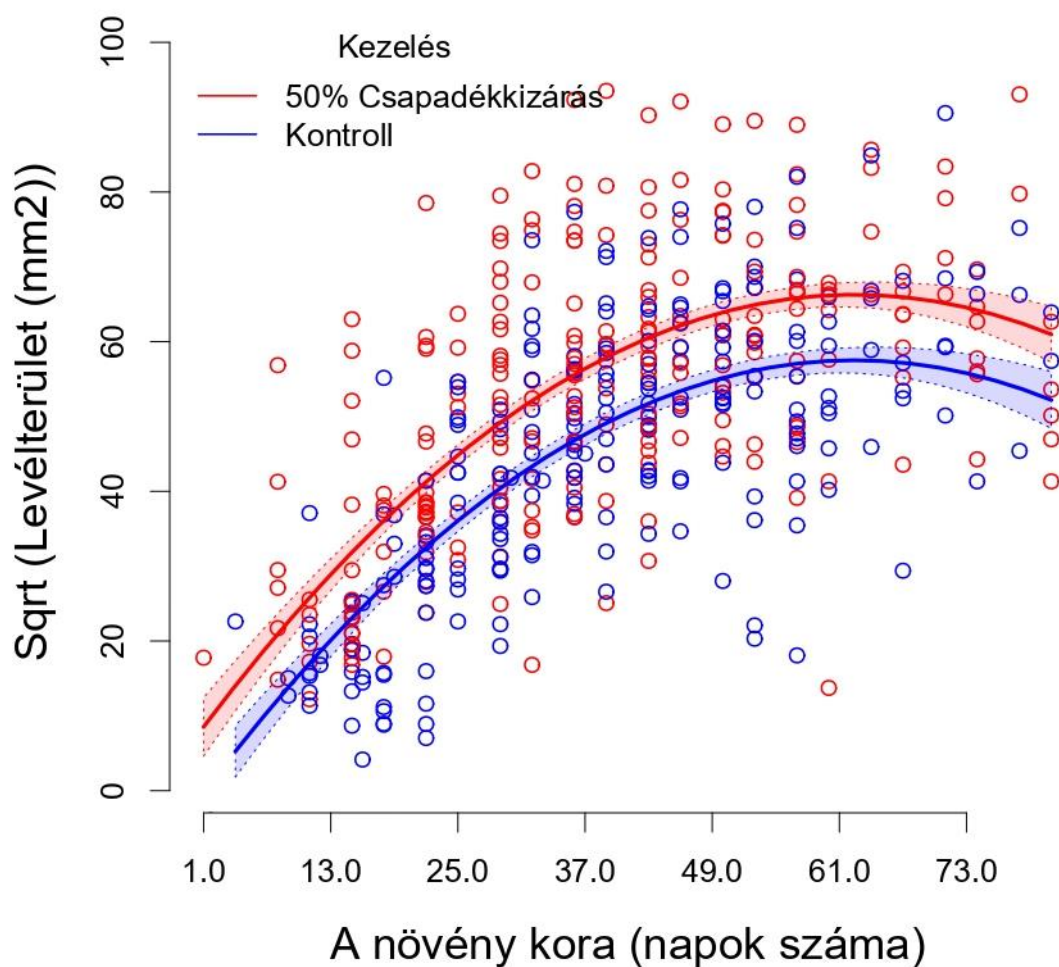
6. ábra: A levélszám alakulása a szárazságkezelt- és kontroll csoportokban a növények életkorának előrehaladtával

A levélhosszra a kezelés szignifikáns, pozitív hatással volt ($\chi^2 = 11,007$, $p = 0,001$), így a kontrollcsoport növényeinek levelei szignifikánsan rövidebbek voltak, a szárazsággal kezelt növényekéhez képest. A növények életkora ($\chi^2 = 376,44$, $p = 2,2e-16$) és annak négyzete ($\chi^2 = 101,09$, $p = 2,2e-16$) egyaránt szignifikáns hatással voltak a levélhossz alakulására, jelezve a pozitív, nemlineáris kapcsolatot az életkor és a levélhossz alakulása között. A növények életkora és a kezelés közötti kölcsönhatás nem volt szignifikáns, tehát nem mutatkozott jelentős eltérés a két csoport között a jelleg időbeli alakulását tekintve (2. sz. melléklet, 7. ábra).



7. ábra: A levélhossz alakulása a szárazságkezelt- és kontroll csoportokban az életkor előrehaladtával

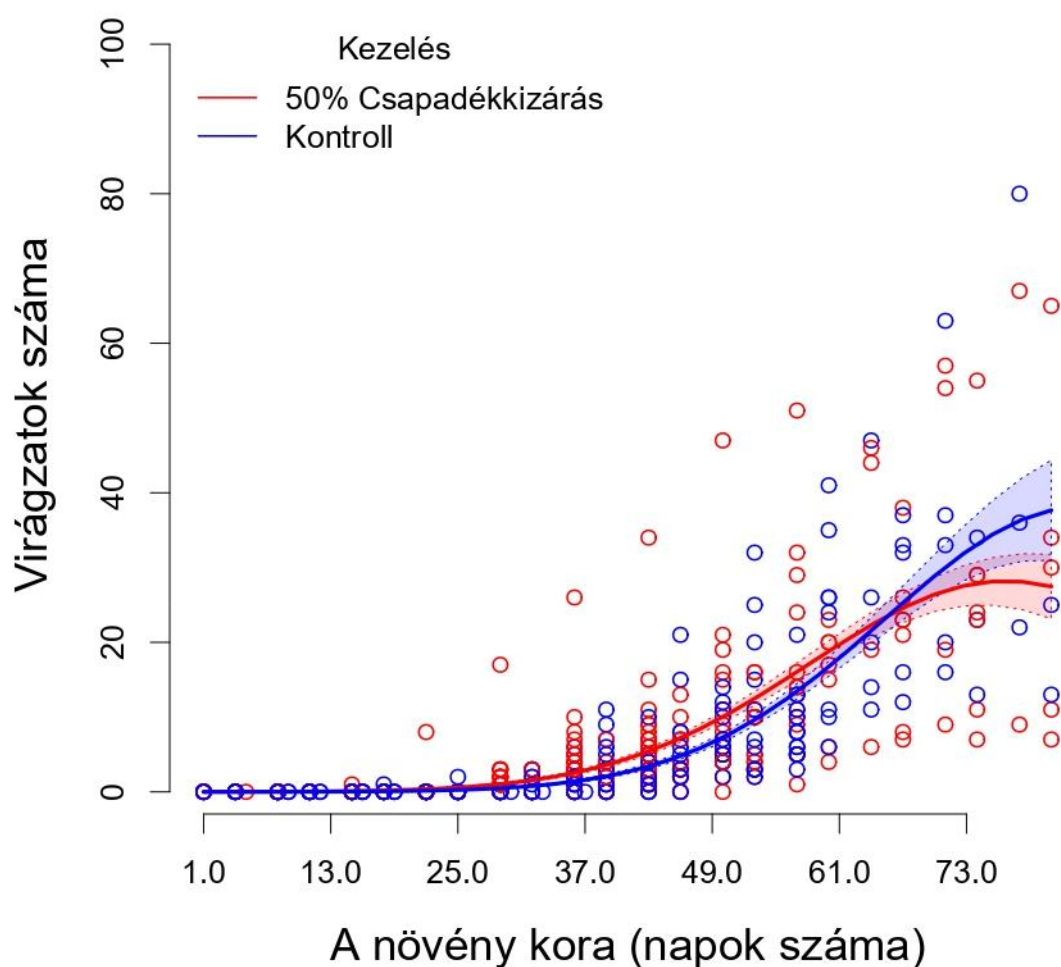
A levélterületre a kezelés ugyancsak szignifikáns hatást gyakorolt ($\chi^2 = 7,773$, $p = 0,005$), így a kontrollcsoport növényeinek levélterülete szignifikánsan kisebb volt, mint a szárazságkezelt növényeké. A növények életkora ($\chi^2 = 408,39$, $p = 2,2\text{e-}16$) és annak kvadratikus tagja ($\chi^2 = 132,66$, $p = 2,2\text{e-}16$) szignifikáns hatással voltak, ami pozitív, nemlineáris kapcsolatot jelez a növények életkora és a levélterület alakulása között. A növények életkora és a kezelés közötti kölcsönhatás nem volt szignifikáns, tehát a jelleg időbeli alakulásában nem mutatkozott jelentős különbség a két csoport között (2. sz. melléklet, 8. ábra).



8. ábra: A levélterület alakulása a szárazságkezelt- és kontroll csoportokban a növények életkorának előrehaladtával

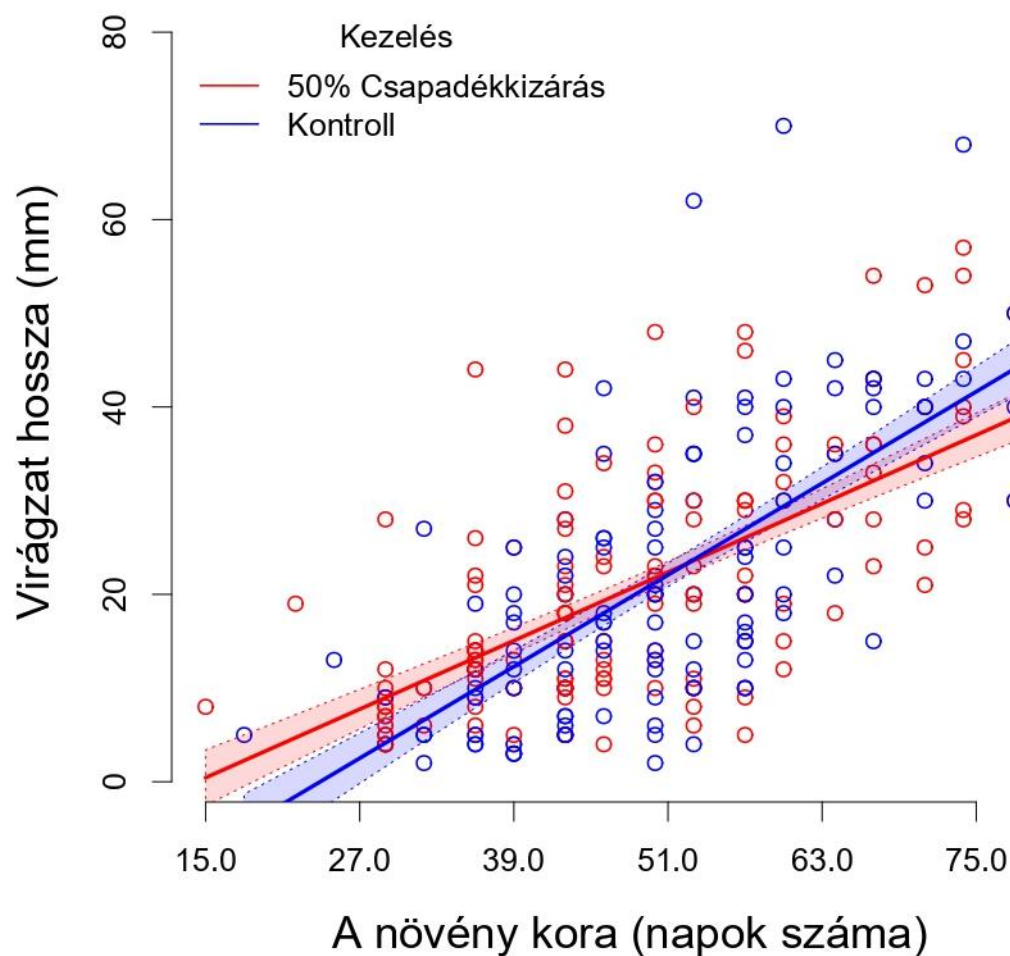
4.2. A szárazság hatása a generatív jellegek alakulására

A virágzatot hordozó tőkocsányok számára a kezelés szignifikáns hatást gyakorolt ($\chi^2 = 6,580$, $p = 0,010$), így a kontrollcsoport növényeinek kevesebb virágzati tőkocsánya volt, mint a csapadékkizárásban részesült növényeknek. A növények életkora ($\chi^2 = 0$, $p = 1$), valamint a kezelés és a növény kora közötti kölcsönhatás ($\chi^2 = 0$, $p = 1$) nem voltak szignifikáns hatással. A növények életkorának négyzete ($\chi^2 = 128,04$, $p = 2,2e-16$) erős szignifikáns hatással bírt, tehát az életkor és a virágzatok száma közt nemlineáris kapcsolat volt (2. sz. melléklet, 9. ábra).



9. ábra: A virágzatok számának alakulása a szárazságkezelte- és kontroll csoportokban a növények életkorának előrehaladtával

A virágzatok hosszára a kezelés önmagában nem volt szignifikáns hatással ($\chi^2 = 0,514$, $p = 0,473$) tehát a virágzatok hossza nem különbözött jelentősen a kontrollcsoport növényei és a szárazságkezelt növények között. A növények életkora pozitív szignifikáns hatással volt a virágzathosszra ($\chi^2 = 0,021$, $p = 2,2e-16$) jelezve a virágzati hossz és az életkor közti lineáris összefüggést. A kezelés és a növények életkora közötti kölcsönhatás szintén szignifikáns volt ($\chi^2 = 11,027$, $p = 0,001$). Ez arra utal, hogy a növények életkorának előrehaladtával a virágzatok hossza gyorsabban növekedett a kontrollcsoportban, mint a szárazsággal kezelt csoportban (2. sz. melléklet, 10. ábra).



10. ábra: A virágzati hossz alakulása a szárazságkezelt- és kontroll csoportokban a növények életkorának előrehaladtával

5. Eredmények megvitatása

5.1. A szárazság hatása a vegetatív jellegek alakulására

A levelek számára a szárazságkezelés önmagában nem volt szignifikáns hatással - viszont a kezelés és kor kölcsönhatása szignifikáns volt, tehát, bár mindkét csoportban lassult a levelek számának gyarapodása a kor előrehaladtával, a szárazságkezelte növényeknél jelentősen nagyobb mértékű csökkenés mutatkozott az új levelek fejlesztésének sebességében, mint a kontrollcsoport növényeinél.

A jelenségnek több, akár egyidejűleg felmerülő potenciális mozgatórugója lehet. Stresszhelyzetben a generatív növekedés előtérbe kerülhet a vegetatív növekedéssel szemben (Hansen és mtsai., 2013; Weißhuhn és mtsai., 2011). Továbbá a szárazságstressz hatására a növények jellemzően több energiát fordítanak a gyökérnövekedésre, mint a föld feletti vegetatív struktúrák fejlesztésére (Jackson és mtsai., 2000; Mahajan & Tuteja, 2005; Reinelt és mtsai., 2023). Az aszály hatására a fajlagos levélfelület és a transzspiráció csökkentésének céljával a szenescencia egyaránt felgyorsulhat (Mahajan & Tuteja, 2005). A sztómák záródása csökkent fotoszintézishez vezet (Cornic, 2000; Flexas és mtsai., 2004; Gindaba és mtsai., 2005), illetve a vízhiány tápanyaghiányhoz vezethet abban az esetben is, ha a talajmátrixban egyébként megfelelő mennyiségben lennének elérhetőek a növény számára szükséges tápanyagok (da Silva és mtsai., 2013). Mindezen tényezők jelentősen negatívan befolyásolhatják a levelek számának növekedését, magyarázhatják az idő előrehaladtával fokozottan csökkenő levélszám-gyarapodást.

A levelek hossza, illetve területe jelentősen nagyobb volt a szárazságkezelte csoportban a kontrollcsoportéhoz képest. A szárazságkezelte és kontroll csoportokban a megfigyelési periódus alatt nem mutatkozott szignifikáns különbség ezen jellegek időbeli alakulását tekintve. A szakirodalom ennek ellenkezőjét írja le – az aszály hatására a növények csökkenteni igyekeznek levélfelületüket, ezáltal a transzspirációt (Jackson és mtsai., 2000; Mahajan & Tuteja, 2005). Shojaei és mtsai. (2023) a lándzsás útifű növényeken a szárazság hatására csökkent átlagos növénymagasságot figyeltek meg. Reinelt és mtsai. (2023) tanulmányukban a szárazság levélfelületre, illetve levélhosszúságra gyakorolt szignifikáns negatív hatásáról számoltak be többek között a lándzsás útifű esetén is. Ebből kifolyólag következtethetünk arra, hogy ezen eredmények nagy valószínűséggel a kísérlet felállításának kezdetén történő, kísérleti hibából adódnak, ugyanis közvetlenül vetés után, mielőtt a cserepek végleges helyükre kerültek volna, a szárazságkezelte növények cserepei megközelítőleg két hétig árnyékosabb, hűvösebb, ezáltal nedvesebb talajviszonyok között csírázhattak, mint a kontrollcsoportéi, amelyeket naposabb területen helyeztünk el. A kezdeti, különböző környezeteknek való kitettség jelentősen befolyásolhatja a növények teljesítményét, akár hosszabb távlatokban is.

5.2. A szárazság hatása a generatív jellegek alakulására

A virágzatok száma szignifikánsan magasabb volt a szárazságkezelte csoportban a kontrollcsoportéhoz mérten. A jelenség potenciális magyarázata lehet, hogy a szárazságstressz hatására előtérbe kerülhet a generatív növekedés a vegetatív növekedéssel szemben (Hansen és mtsai., 2013). Az aszály hatására megnövekedett reprodukció a lándzsás útifű

esetében korábban Weißhuhn és mtsai. (2011) ugyancsak leírták. A kísérlet jelenlegi stádiumában viszont nem mondható ki egyértelműen, hogy ez esetünkben valóban a szárazságkezelés által kiváltott adaptív válasz lett volna a növények részéről – nagy eséllyel ugyancsak a kezdeti, kedvezőbb behatások utóhatásait láthattuk ezen jelleg esetén is.

A virágzati tőkocsányok számában kezdetben gyors növekedés mutatkozott, majd csökkent az új virágzatok fejlesztésének sebessége a szárazságkezelte és kontroll csoportokban egyaránt – a megfigyelési időszak végére, a növények életkorának előrehaladtával ez a lelassult gyarapodás valamivel látványosabb volt a szárazságkezelte csoportban, bár statisztikailag nem volt szignifikáns különbség a két csoport között a jelleg időbeli alakulását tekintve. Castillioni és mtsai. (2022) esőkizárókat alkalmazó kísérletük eredményeként a szárazság hatására korábbra tolódó virágzáscsúcsról számoltak be a C3-as fotoszintetikus útvonalat alkalmazó gyepalkotó fajok esetén. Jentsch és mtsai. (2009) esőkizárókat alkalmazó kísérletük során a szárazság hatását vizsgálták többek közt európai gyepalkotó fajokra. Eredményeik szerint a szárazság hatására a virágzás középidője szignifikánsan korábbi időpontra tolódott, illetve a virágzás elhúzódott. Ebből is következtethetünk arra, hogy a nyolchetes megfigyelési periódusunk valószínűleg rövid volt ahhoz, hogy valóban átfogó képet kapjunk ezen jelleg alakulásáról – a virágzatszám változásának dinamikája a megfigyelési periódus végére kezdett eltérni a szárazságkezelte és kontroll csoportok között. Valószínű, hogy az aszály e tulajdonságra gyakorolt hatása csak a mérések befejezésekor kezdett teljesen megmutatkozni, így a további megfigyelések során kaptunk volna csak reprezentatív képet arról, hogy a szárazságstressz hatására milyen változások következnek be a virágzati tőkocsányok számának alakulásában.

A virágzatok hosszára a szárazságkezelés önmagában nem volt szignifikáns hatással. Ez a megfigyelés összhangban van Villellas és mtsai. (2021) lándzsás útifű populációkon végzett kutatásának eredményeivel, mely szerint a generatív tulajdonságok kevésbé plasztikusak, nagyobb mértékű genetikai hatást mutatnak a vegetatív tulajdonságokhoz mérten.

A szárazságkezelte növények esetén a kor előrehaladtával szignifikánsan lassabb volt a virágzati hossz növekedése a kontrollcsoportéhoz képest. Ezt a jelenséget magyarázhatja, hogy a tartós aszály következtében az erőforrások fokozottan korlátozódnak. A sztómák záródása csökkent fotoszintézishez vezet (Cornic, 2000; Flexas és mtsai., 2004; Gindaba és mtsai., 2005), illetve emellett a tartós vízhiány következtében relatív tápanyaghiány következhet be (da Silva és mtsai., 2013). Az idő előrehaladtával a szárazság kumulatív hatásai fokozzák a fiziológiai stresszt. A hosszan tartó vízhiány korlátozza a tápanyagszállítást és súlyosbítja a növény energiahiányát, mivel a csökkent fotoszintézis hatására a szénhidrátok előállítása visszaesik. Következésképpen a növény a korlátozott erőforrásait a növekedés és szaporodás helyett az alapvető túlélési folyamatokra csoportosítja át, ami a szárazságkezelte egyedeknél a kontrollcsoportéhoz mérten lassabb növekedést eredményezhet a generatív jellegek fejlődésének tekintetében. Ezen folyamatok nem csak a virágzatok megnyúlását, hanem a termésképződést (Anjum és mtsai., 2011) és az életképes magok kifejlődését is jelentősen korlátozhatják.

6. Következtetések és javaslatok

A dolgozatom eredményei betekintést nyújtanak a szárazság által kiváltott, fenológiai jellegekben bekövetkező változásokba a lándzsás útifű populációkon, és ezáltal rávilágítanak az éghajlatváltozásra különösen érzékeny füves ökoszisztémákat fenyegető veszélyekre. A lándzsás útifű a C3-as fotoszintetikus útvonalat használó, évelő lágyszárúak ökológiai modellnövénye - az általunk megfigyelt fenológiai jellegekben bekövetkező változások segíthetnek előre jelezni, hogy az azonos funkcionális csoportokba tartozó gypalkotó fajok milyen válaszreakciókkal bírhatnak az aszályos körülményekre.

Eredményeim alapján az aszályos körülmények lelassítják a lándzsás útifű levélszámának és a virágzatok hosszának növekedését. A levélszám növekedésének lelassulása tovább korlátozhatja a növény fotoszintetikus kapacitást, ezáltal hosszútávon csökkentve a növények kompetíciós képességét. A virágzatok növekedésének korlátozása feltehetőleg a termés hozam és az életképes magok számának csökkenésével járhat, ami idővel akár drasztikus negatív hatással lehet az adott populációk stabilitására, különösen az egymást követő aszályos években. Idővel csökkenhet a populációkon belüli genetikai sokféleség is. Ez a változás veszélyeztetheti a gyepek ellenálló képességét a gyorsuló klímaváltozással szemben, és súlyos hatásokkal bírhat az általuk nyújtott ökoszisztéma-szolgáltatásokra.

Eredményeim hozzájárulnak a növények éghajlatváltozásra adott válaszainak előrejelzését szolgáló ökológiai modellek fejlesztéséhez. Az aszály okozta változások modellekbe történő integrálása jelentősen elősegítheti az olyan ökológiai változások előrejelzésének sikerességét, mint a gyepek faji összetettségének alakulása, növények és beporzók közötti kölcsönhatások változása, a fajok közötti kompetíció alakulása és az ökoszisztémák ellenálló képességének alakulása. Továbbá eredményeink alátámasztják, hogy szükség van olyan természetvédelmi stratégiák kidolgozására, amelyek figyelembe veszik a füves ökoszisztémák hosszan tartó szárazsággal szembeni különleges sebezhetőségét - ami az éghajlatváltozás felgyorsulásával egyre inkább aktuális problémát jelent.

Összességében ezen eredmények nemcsak a növények abiotikus stresszhez való alkalmazkodásával kapcsolatos ismereteinket bővítik, hanem értékes útmutatást nyújthatnak a természetvédelem és a mezőgazdasági erőforrás-gazdálkodás területén is a változó éghajlat fényében.

Ami a jövőbeli munkát illeti, a megfigyelés folytatása a kísérlet keretei között a következő néhány évben világosabb képet fog nyújtani arról, hogy a lándzsás útifű életmenetét hogyan befolyásolja a hosszútávú aszály – pontosabb képet adva a jellegek időbeli alakulásában bekövetkező változásokról és feltárva, hogy az eddig megfigyelt, fenológiai jellegekben történt változások tartósak-e, az elhúzódó szárazságstressz hatására több vegetációs időszakon keresztül pontosan miként alakulnak. A hosszabb megfigyelési időintervallum továbbá lehetővé teszi, hogy jobban feltérképezzük a szárazságstressz további, kumulatív hatásait is.

A PlantPopNet hálózat (Buckley és mtsai., 2019) keretei között, több országban gyűjtött adatok együttes elemzése során lehetőségünk nyílik megvizsgálni, hogy az általunk megfigyelt

szárazságra adott válaszok következtetések-e a különböző éghajlatokhoz adaptálódott lándzsás útifű populációk között. Ezen információk elengedhetetlenek ahhoz, hogy globális szintű, átfogó ismereteket szerezzünk a növények klimatikus stresszhatásokra adott válaszáiról, és ezáltal megalapozott döntéseket hozzassunk a mezőgazdaságban, az ökoszisztémák helyreállításában, illetve a természetvédelmi intézkedések terén a globális klímaváltozás fényében.

7. Összefoglalás

Az előrejelzések szerint az éghajlatváltozás világszerte fokozni fogja az aszályesemények gyakoriságát és súlyosságát (Dai, 2011, 2013; Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC), 2023; Smith és mtsai., 2024) – többek közt a Kárpát-medencében is (Spinoni és mtsai., 2013, 2014). A biológiai sokféleség és az ökoszisztéma-szolgáltatások szempontjából alapvető fontosságú füves ökoszisztémák különösképp érzékenyek ezen eseményekre (Smith és mtsai., 2024). A csapadékviszonyok változása veszélyezteti stabilitásukat és ellenálló képességüket, ezért is elengedhetetlen a különböző gypalkotó fajok szárazságstresszre adott sajátos válaszainak megértése.

Kísérleti körülmények között, redukciós esőkizárók (Hoover és mtsai., 2018) felállításával vizsgáltuk az 50%-os csapadékkizárás hatását a lándzsás útifű (*Plantago lanceolata* L.) életmenetére, a vegetatív és generatív fenológiai jellegek alakulásában bekövetkező változások elemzésén keresztül. A kísérlet a PlantPopNet (Buckley és mtsai., 2019) nemzetközi ökológiai kutatóhálózat keretei közt valósult meg, folyik még jelenleg is. A dolgozatomban nyolchetes időtartam alatt, 2024 május 16. és július 4. között, a keszthelyi kísérleti területen általam gyűjtött fenológiai adatok egy részét dolgozom fel. Az elemzést általános kevert lineáris modellek (GLMM) segítségével végeztem.

A szárazságkezelés nem volt szignifikáns hatással a levelek számára. A növények életkorának előrehaladtával a levélnövekedés üteme mind a szárazságkezelt, mind a kontrollcsoportban lelassult, viszont az életkor és a kezelés közötti kölcsönhatás szignifikáns volt - a szárazságkezelt növényeknél jelentősen nagyobb mértékű csökkenés mutatkozott az új levelek fejlesztésének sebességében az életkor előrehaladtával. Ezt a jelenséget magyarázhatja, hogy a szárazság hatására a növények jellemzően több energiát fordítanak a gyökérnövekedésre, mint a föld feletti vegetatív struktúrák fejlesztésére (Jackson és mtsai., 2000; Mahajan & Tuteja, 2005), illetve az aszály okozta stressz hatására a generatív növekedés szintén előtérbe kerülhet a vegetatív növekedéssel szemben (Hansen és mtsai., 2013; Weißhuhn és mtsai., 2011). Továbbá a szárazságstressz hatására a transzspiráció és a vízveszteség csökkentése érdekében felgyorsulhat a szenescencia (Mahajan & Tuteja, 2005).

A szárazsággal kezelt növények levelei szignifikánsan hosszabbak voltak, illetve szignifikánsan nagyobb területük volt a kontrollcsoporthoz mérten. A szárazságkezelt és kontroll csoportok között nem volt szignifikáns különbség a levélterület időbeli alakulását tekintve. Ezek az eredmények ellentmondanak a szakirodalomban leírtaknak. A szárazságstressz hatására jellemzően csökken a levélfelület (Reinelt és mtsai., 2023), elsősorban a transzspiráció korlátozásának érdekében (Jackson és mtsai., 2000; Mahajan & Tuteja, 2005). Ez az ellentmondás valószínűleg a kísérlet elején elkövetett kísérleti hibának tulajdonítható - a szárazságkezelt növények cserepei vetés után, átmenetileg kedvezőbb talajnedvesség viszonyok között lettek elhelyezve, mint a kontrollcsoport növényeinek cserepei, ami jelentősen befolyásolhatta növekedésüket.

A szárazsággal kezelt növényeknek szignifikánsan több virágzata volt a kontrollcsoport növényeihez képest. A jelenséget magyarázhatja a szárazságstressz hatására növekedő

reproduktív allokáció, amit a lándzsás útifűnél már korábban is leírtak (Weißhuhn és mtsai., 2011). Ez azonban egyaránt lehet a kezdeti kedvezőbb behatások következménye is. A növények életkorának előrehaladtával lelassult a virágzati száraz számának növekedése mindkét csoportban – és bár a megfigyelési időszak végére ez a lelassult gyarapodás valamivel látványosabb volt a szárazságkezelt csoportban, a különbség statisztikailag nem volt szignifikáns. Ezen jelleg időbeli változásában bekövetkező, szárazság-indukálta változásokról hosszabb megfigyelési időszak alatt gyűjtött adatok elemzésével a jövőben teljesebb, átfogó képet kaphatunk.

A szárazság nem volt szignifikáns hatással a virágzati hosszra, ami összhangban van a korábbi megfigyelésekkel, amelyek szerint a generatív tulajdonságok kevésbé plasztikusak, mint a vegetatív tulajdonságok (Villegas és mtsai., 2021). A szárazságkezelt növényeknél azonban a virágzatok hossza szignifikánsan lassabb növekedést mutatott, a kontrollcsoport növényeivel szemben. Ezt a jelenséget magyarázhatja, hogy a tartós aszály következtében az erőforrások fokozottan korlátozódnak, a növények fotoszintetikus kapacitása csökken (Cornic, 2000; Flexas és mtsai., 2004), valamint relatív tápanyaghiány is felléphet (da Silva és mtsai., 2013). A stressz hatására bekövetkező erőforrás-csökkenés nem csupán a virágzatok növekedésének ütemét lassíthatja, hanem hátrányosan befolyásolhatja a termésképződést is (Anjum és mtsai., 2011), ezáltal akadályozva az életképes magvak fejlődését és a sikeres reprodukciót.

A dolgozatom eredményei hozzájárulnak a gyepalkotó fajok szárazságra adott válaszainak megértéséhez, az ökológiai változások előrejelzését szolgáló további modellek kidolgozásához és alátámasztják, hogy proaktív természetvédelmi erőfeszítésekre van szükség a sérülékeny élőhelyek védelme érdekében. A további adatgyűjtés és a PlantPopNet (Buckley és mtsai., 2019) hálózat keretei között, több országban gyűjtött adatok együttes elemzése lehetővé fogja tenni, hogy feltérképezzük a lándzsás útifű jellegeinek alakulását más környezeti kontextusokban, több vegetációs időszakon keresztül. Az ilyen kutatások elengedhetetlenek a gyepalkotó fajok klímaváltozással szembeni reakcióinak megbízható, globális előrejelzéséhez, ami kulcsfontosságú ismereteket nyújt az ökoszisztémák megőrzésére, fenntartására irányuló programok kidolgozásához.

8. Köszönetnyilvánítás

Szeretném kifejezni hálámat Dr. Csergő Anna Mária egyetemi docensnek, konzulensemnek, hogy fáradhatatlanul segítette kutatómunkámat és a szakdolgozatom elkészülését.

Köszönettel tartozom Odongo Meso PhD hallgatónak, aki szakmai tudásával hozzájárult ahhoz, hogy a dolgozat megszülethessen.

Továbbá szeretnék köszönetet mondani Dr. Bódis Judit egyetemi docensnek, Lábadi Vivien és Pacsai Bálint PhD hallgatóknak, illetve Pados Máté kollégámnak a kísérlet felállításában és az adatgyűjtésben nyújtott segítségükért.

9. Irodalomjegyzék

1. Abate, L., Bachheti, R. K., Tadesse, M. G., & Bachheti, A. (2022). Ethnobotanical Uses, Chemical Constituents, and Application of *Plantago lanceolata* L. *Journal of Chemistry*, 2022, 1532031. <https://doi.org/10.1155/2022/1532031>
2. Anjum, S. A., Xie, X. yu, Wang, L. chang, Saleem, M. F., Man, C., & Lei, W. (2011). Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, 6(9), 2026–2032. <https://doi.org/10.21921/jas.5.3.7>
3. Briffa, K. R., Van Der Schrier, G., & Jones, P. D. (2009). Wet and dry summers in Europe since 1750: Evidence of increasing drought. *International Journal of Climatology*, 29(13), 1894–1905. <https://doi.org/10.1002/joc.1836>
4. Brooks, M., E., Kristensen, K., Benthem, K., J. ,van, Magnusson, A., Berg, C., W., Nielsen, A., Skaug, H., J., Mächler, 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. <https://doi.org/10.32614/RJ-2017-066>
5. Buckley, Y. M., Blomberg, S., Crone, E. E., Csörgő, A. M., Ehrlén, J., García, M. B., Anna-Liisa Laine, Roach, D. A., Salguero-Gomez, R., Groenendaal, J. V., & Wardle, G. (2019). *Plantpopnet protocol V1.01 2015*. 634271 Bytes. <https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.7982810.V7>
6. Cavers, P. B., Bassett, I. J., & Crompton, C. W. (1980). THE BIOLOGY OF CANADIAN WEEDS.: 47. *Plantago lanceolata* L. *Canadian Journal of Plant Science*, 60(4), 1269–1282. <https://doi.org/10.4141/cjps80-180>
7. Cornic, G. (2000). Drought stress inhibits photosynthesis by decreasing stomatal aperture – not by affecting ATP synthesis. *Trends in Plant Science*, 5(5), 187–188. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(00\)01625-3](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(00)01625-3)
8. Cranston, L. M., Kenyon, P. R., Morris, S. T., Lopez-Villalobos, N., & Kemp, P. D. (2016). Morphological and Physiological Responses of Plantain (*Plantago lanceolata*) and Chicory (*Cichorium intybus*) to Water Stress and Defoliation Frequency. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 202(1), 13–24. <https://doi.org/10.1111/jac.12129>
9. da Silva, E. C., de Albuquerque, M. B., Azevedo Neto, A. D. de, & Silva Junior, C. D. da. (2013). Drought and Its Consequences to Plants – From Individual to Ecosystem. In *Responses of Organisms to Water Stress*. InTech. <https://doi.org/10.5772/53833>
10. Dai, A. (2011). Drought under global warming: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1), 45–65. <https://doi.org/10.1002/wcc.81>
11. Dai, A. (2013). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 3(1), 52–58. <https://doi.org/10.1038/nclimate1633>

12. Dimitrova, I., & Yurukova, L. (2005). *Bioindication of anthropogenic pollution with Plantago lanceolata (Plantaginaceae): Metal accumulation, morphological and stomatal leaf characteristics.*
13. D'Odorico, P., Bhattachan, A., Davis, K. F., Ravi, S., & Runyan, C. W. (2013). Global desertification: Drivers and feedbacks. *Advances in Water Resources*, 51, 326–344. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.01.013>
14. Flexas, J., Bota, J., Loreto, F., Cornic, G., & Sharkey, T. D. (2004). Diffusive and Metabolic Limitations to Photosynthesis under Drought and Salinity in C₃ Plants. *Plant Biology*, 6(3), 269–279. <https://doi.org/10.1055/s-2004-820867>
15. Forzieri, G., Feyen, L., Russo, S., Voutsoukas, M., Alfieri, L., Outten, S., Migliavacca, M., Bianchi, A., Rojas, R., & Cid, A. (2016). Multi-hazard assessment in Europe under climate change. *Climatic Change*, 137(1–2), 105–119. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1661-x>
16. Gindaba, J., Rozanov, A., & Negash, L. (2005). Photosynthetic gas exchange, growth and biomass allocation of two Eucalyptus and three indigenous tree species of Ethiopia under moisture deficit. *Forest Ecology and Management*, 205(1–3), 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.056>
17. Goufo, P., Moutinho-Pereira, J. M., Jorge, T. F., Correia, C. M., Oliveira, M. R., Rosa, E. A. S., António, C., & Trindade, H. (2017). Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) Metabolomics: Osmoprotection as a Physiological Strategy for Drought Stress Resistance and Improved Yield. *Frontiers in Plant Science*, 8, 586. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00586>
18. Grigore, A., Bubueanu, C., Pirvu, L., Ionita, L., & Toba, G. (2015). *Plantago lanceolata* L. CROPS-SOURCE OF VALUABLE RAW MATERIAL FOR VARIOUS INDUSTRIAL APPLICATIONS. <https://cabidigitallibrary.org>
19. Hansen, C. F., García, M. B., & Ehlers, B. K. (2013). Water availability and population origin affect the expression of the tradeoff between reproduction and growth in *Plantago coronopus*. *Journal of Evolutionary Biology*, 26(5), 993–1002. <https://doi.org/10.1111/jeb.12114>
20. Hoerling, M., Eischeid, J., Perlwitz, J., Quan, X., Zhang, T., & Pegion, P. (2012). On the Increased Frequency of Mediterranean Drought. *Journal of Climate*, 25(6), 2146–2161. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00296.1>
21. Hoerling, M., Hurrell, J., Eischeid, J., & Phillips, A. (2006). Detection and Attribution of Twentieth-Century Northern and Southern African Rainfall Change. *Journal of Climate*, 19(16), 3989–4008. <https://doi.org/10.1175/JCLI3842.1>
22. Hoffmann, A. A., & Merilä, J. (1999). Heritable variation and evolution under favourable and unfavourable conditions. *Trends in Ecology & Evolution*, 14(3), 96–101. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(99\)01595-5](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(99)01595-5)

23. Hoover, D. L., Wilcox, K. R., & Young, K. E. (2018). Experimental droughts with rainout shelters: A methodological review. *Ecosphere*, 9(1), e02088. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2088>
24. Huang, L., He, B., Chen, A., Wang, H., Liu, J., Lü, A., & Chen, Z. (2016). Drought dominates the interannual variability in global terrestrial net primary production by controlling semi-arid ecosystems. *Scientific Reports*, 6(1), 24639. <https://doi.org/10.1038/srep24639>
25. Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc). (2023). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1. kiad.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
26. Jackson, R. B., Sperry, J. S., & Dawson, T. E. (2000). Root water uptake and transport: Using physiological processes in global predictions. *Trends in Plant Science*, 5(11), 482–488. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(00\)01766-0](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(00)01766-0)
27. Jentsch, A., Kreyling, J., Boettcher-Treschkow, J., & Beierkuhnlein, C. (2009). Beyond gradual warming: Extreme weather events alter flower phenology of European grassland and heath species. *Global Change Biology*, 15(4), 837–849. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01690.x>
28. Lacey, E. P., Roach, D. A., Herr, D., Kincaid, S., & Perrott, R. (2003). MULTIGENERATIONAL EFFECTS OF FLOWERING AND FRUITING PHENOLOGY IN PLANTAGO LANCEOLATA. *Ecology*, 84(9), 2462–2475. <https://doi.org/10.1890/02-0101>
29. Lozano, Y. M., Aguilar-Trigueros, C. A., Flaig, I. C., & Rillig, M. C. (2020). Root trait responses to drought are more heterogeneous than leaf trait responses. *Functional Ecology*, 34(11), 2224–2235. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13656>
30. Mahajan, S., & Tuteja, N. (2005). Cold, salinity and drought stresses: An overview. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 444(2), 139–158. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2005.10.018>
31. Moradi, P. (2016). Key plant products and common mechanisms utilized by plants in water deficit stress responses. *Botanical Sciences*, 94(4), 671. <https://doi.org/10.17129/botsci.709>
32. Morgan, J. M. (1984). Osmoregulation and Water Stress in Higher Plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 35(1), 299–319. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.35.060184.001503>
33. Nadgórska-Socha, A., Kandziora-Ciupa, M., Trzęsicki, M., & Barczyk, G. (2017). Air pollution tolerance index and heavy metal bioaccumulation in selected plant species from urban biotopes. *Chemosphere*, 183, 471–482. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.128>

34. Orians, C. M., Schweiger, R., Dukes, J. S., Scott, E. R., & Müller, C. (2019). Combined impacts of prolonged drought and warming on plant size and foliar chemistry. *Annals of Botany*, 124(1), 41–52. <https://doi.org/10.1093/aob/mcz004>
35. Palter, J. B. (2015). The Role of the Gulf Stream in European Climate. *Annual Review of Marine Science*, 7(1), 113–137. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010814-015656>
36. Peñuelas, J., Munné-Bosch, S., Llusà, J., & Filella, I. (2004). Leaf reflectance and photo- and antioxidant protection in field-grown summer-stressed *Phillyrea angustifolia*. Optical signals of oxidative stress? *New Phytologist*, 162(1), 115–124. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2004.01007.x>
37. Pol, M., Schmidtke, K., & Lewandowska, S. (2021). *Plantago lanceolata*—An overview of its agronomically and healing valuable features. *Open Agriculture*, 6(1), 479–488. <https://doi.org/10.1515/opag-2021-0035>
38. Posit team. (2024). RStudio: Integrated Development Environment for R. Posit Software. 2024. <http://www.posit.co/>.
39. Reinelt, L., Whitaker, J., Kazakou, E., Bonnal, L., Bastianelli, D., Bullock, J. M., & Ostle, N. J. (2023). Drought effects on root and shoot traits and their decomposability. *Functional Ecology*, 37(4), 1044–1054. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.14261>
40. Roach, D. A. (2003). AGE-SPECIFIC DEMOGRAPHY IN *PLANTAGO*: VARIATION AMONG COHORTS IN A NATURAL PLANT POPULATION. *Ecology*, 84(3), 749–756. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2003\)084\[0749:ASDIPV\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2003)084[0749:ASDIPV]2.0.CO;2)
41. Rodgers, V. L., Hoepfner, S. S., Daley, M. J., & Dukes, J. S. (2012). Leaf-Level Gas Exchange and Foliar Chemistry of Common Old-Field Species Responding to Warming and Precipitation Treatments. *International Journal of Plant Sciences*, 173(9), 957–970. <https://doi.org/10.1086/667611>
42. Sabugosa-Madeira, B., Ribeiro, H., Cunha, M., & Abreu, I. (2008). The importance of plantain (*Plantago* spp.) as a supplementary pollen source in the diet of honey bees. *Journal of Apicultural Research*, 47(1), 77–81. <https://doi.org/10.1080/00218839.2008.11101427>
43. Sagar, G. R., & Harper, J. L. (1964). *Plantago* Major L., P. Media L. and P. Lanceolata L. *The Journal of Ecology*, 52(1), 189. <https://doi.org/10.2307/2257792>
44. Selmar, D., & Kleinwächter, M. (2013). Stress Enhances the Synthesis of Secondary Plant Products: The Impact of Stress-Related Over-Reduction on the Accumulation of Natural Products. *Plant and Cell Physiology*, 54(6), 817–826. <https://doi.org/10.1093/pcp/pct054>
45. Sharma, N., Koul, P., & Koul, A. K. (1993). Pollination biology of some species of genus *Plantago* L. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 111(2), 129–138. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1993.tb01895.x>

46. Sherrard, M. E., Maherali, H., & Latta, R. G. (2009). WATER STRESS ALTERS THE GENETIC ARCHITECTURE OF FUNCTIONAL TRAITS ASSOCIATED WITH DROUGHT ADAPTATION IN *AVENA BARBATA*. *Evolution*, 63(3), 702–715. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2008.00580.x>
47. Shojaei, A., Shanjani, P. S., Zarghami, R., Jafari, A. A., & Nurmohammadi, G. (2023). *Effects of water deficit on grain yield and yield components of Narrow-leaved plantain (Plantago lanceolata L.)*.
48. Smith, M. D., Wilkins, K. D., Holdrege, M. C., Wilfahrt, P., Collins, S. L., Knapp, A. K., Sala, O. E., Dukes, J. S., Phillips, R. P., Yahdjian, L., Gherardi, L. A., Ohlert, T., Beier, C., Fraser, L. H., Jentsch, A., Loik, M. E., Maestre, F. T., Power, S. A., Yu, Q., ... Zuo, X. (2024). Extreme drought impacts have been underestimated in grasslands and shrublands globally. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(4). <https://doi.org/10.1073/pnas.2309881120>
49. Spinoni, J., Antofie, T., Barbosa, P., Bihari, Z., Lakatos, M., Szalai, S., Szentimrey, T., & Vogt, J. (2013). An overview of drought events in the Carpathian Region in 1961–2010. *Advances in Science and Research*, 10(1), 21–32. <https://doi.org/10.5194/asr-10-21-2013>
50. Spinoni, J., Lakatos, M., Szentimrey, T., Bihari, Z., Szalai, S., Vogt, J., & Antofie, T. (2015). Heat and cold waves trends in the Carpathian Region from 1961 to 2010. *International Journal of Climatology*, 35(14), 4197–4209. <https://doi.org/10.1002/joc.4279>
51. Spinoni, J., Naumann, G., Carrao, H., Barbosa, P., & Vogt, J. (2014). World drought frequency, duration, and severity for 1951–2010: WORLD DROUGHT CLIMATOLOGIES FOR 1951–2010. *International Journal of Climatology*, 34(8), 2792–2804. <https://doi.org/10.1002/joc.3875>
52. Spinoni, J., Naumann, G., & Vogt, J. V. (2017). Pan-European seasonal trends and recent changes of drought frequency and severity. *Global and Planetary Change*, 148, 113–130. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.11.013>
53. Stewart, A. V. (1996). Plantain (*Plantago lanceolata*)—A potential pasture species. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association*, 77–86. <https://doi.org/10.33584/jnzg.1996.58.2221>
54. Sun, Y., Solomon, S., Dai, A., & Portmann, R. W. (2006). How Often Does It Rain? *Journal of Climate*, 19(6), 916–934. <https://doi.org/10.1175/JCLI3672.1>
55. Van Der Molen, M. K., Dolman, A. J., Ciais, P., Eglin, T., Gobron, N., Law, B. E., Meir, P., Peters, W., Phillips, O. L., Reichstein, M., Chen, T., Dekker, S. C., Doubková, M., Friedl, M. A., Jung, M., Van Den Hurk, B. J. J. M., De Jeu, R. A. M., Kruijt, B., Ohta, T., ... Wang, G. (2011). Drought and ecosystem carbon cycling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(7), 765–773. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.01.018>

56. Vicente-Serrano, S. M., Lopez-Moreno, J.-I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sanchez-Lorenzo, A., García-Ruiz, J. M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Trigo, R., Coelho, F., & Espejo, F. (2014). Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environmental Research Letters*, 9(4), 044001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/044001>
57. Villellas, J., Ehrlén, J., Crone, E. E., Csörgő, A. M., Garcia, M. B., Laine, A. L., Roach, D. A., Salguero-Gómez, R., Wardle, G. M., Childs, D. Z., Elder, B. D., Finn, A., Munné-Bosch, S., Bachelot, B., Bódís, J., Bucharova, A., Caruso, C. M., Catford, J. A., Coghill, M., ... Buckley, Y. M. (2021). Phenotypic plasticity masks range-wide genetic differentiation for vegetative but not reproductive traits in a short-lived plant. *Ecology Letters*, 24(11), 2378–2393. <https://doi.org/10.1111/ele.13858>
58. Wahab, A., Abdi, G., Saleem, M. H., Ali, B., Ullah, S., Shah, W., Mumtaz, S., Yasin, G., Muresan, C. C., & Marc, R. A. (2022). Plants' Physio-Biochemical and Phyto-Hormonal Responses to Alleviate the Adverse Effects of Drought Stress: A Comprehensive Review. *Plants*, 11(13), 1620. <https://doi.org/10.3390/plants11131620>
59. Weißhuhn, K., Auge, H., & Prati, D. (2011). Geographic variation in the response to drought in nine grassland species. *Basic and Applied Ecology*, 12(1), 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2010.11.005>
60. Wilhite, D. A. (2000). *Chapter 1 Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions*.
61. Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *WATER INTERNATIONAL*.
62. Winton, M., Griffies, S. M., Samuels, B. L., Sarmiento, J. L., & Frölicher, T. L. (2013). Connecting Changing Ocean Circulation with Changing Climate. *Journal of Climate*, 26(7), 2268–2278. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00296.1>
63. Xu, Z., Zhou, G., & Shimizu, H. (2010). *Plant responses to drought and rewatering*. www.landesbioscience.com/journals/psb/article/11398

10. Ábrák jegyzéke

1. ábra: Lándzsás útifű - illusztráció.....	13
2. ábra: A keszthelyi kísérleti terület alaprajza.	14
3. ábra: Az esőkizárók és az alattuk elhelyezett növények elhelyezkedése a blokkokon belül	15
4. ábra: A kontrollcsoport blokkjainak méretei, illetve az azokon belül található kvadrátok elhelyezkedése	16
5. ábra: Esőkizáró a keszthelyi kísérleti területen	17
6. ábra: A levélszám alakulása a szárazságkezelt- és kontroll csoportokban a növények életkorának előrehaladtával	21
7. ábra: A levélhossz alakulása a szárazságkezelt- és kontroll csoportokban az életkor előrehaladtával.....	22
8. ábra: A levélterület alakulása a szárazságkezelt- és kontroll csoportokban a növények életkorának előrehaladtával	23
9. ábra: A tőkocsányok/virágzatok számának alakulása a szárazságkezelt- és kontroll csoportokban a növények életkorának előrehaladtával.....	24
10. ábra: A virágzati hossz alakulása a szárazságkezelt- és kontroll csoportokban a növények életkorának előrehaladtával	25

11. Mellékletek

1.sz. melléklet: Feldolgozott minták száma és feltáró statisztika

	Levélszám (db)		Levélhossz (mm)		Levéltérület (mm ²)		Virágzatok száma (db)		Virágzathossz (mm)	
Kezelés	50% csapadék- kizárás	Kontroll- csoport	50% csapadék- kizárás	Kontroll- csoport	50% csapadék- kizárás	Kontroll- csoport	50% csapadék- kizárás	Kontroll- csoport	50% csapadék- kizárás	Kontroll- csoport
Adatok száma	255	227	255	227	255	227	286	250	154	149
Átlag kor (nap)	39.17647 (± 17.89020 SD)	39.17621 (± 17.26946 SD)	39.17647 (± 17.89020 SD)	39.17621 (± 17.26946 SD)	39.17647 (± 17.89020 SD)	39.17621 (± 17.26946 SD)	35.53147 (± 19.90797 SD)	36.14000 (± 19.05605 SD)	49.36364 (± 14.27362 SD)	51.44966 (± 12.84388 SD)
Átlag érték	24.05098 (± 23.95767 SD)	20.06167 (± 21.17658 SD)	185.6118 (± 68.61574 SD)	146.2070 (± 61.43085 SD)	3161.104 (± 1964.396 SD)	2329.622 (± 1619.349 SD)	6.328671 (± 11.47738 SD)	5.628000 (± 10.76742 SD)	21.37662 (± 13.13683 SD)	21.68456 (± 14.17081 SD)

2.sz. melléklet: Statisztikai modellek felépítése és eredménye

Modell felépítése	R ² érték	Változók	Becsült érték	Standard hiba	Z érték	Anova X ²	Anova p érték
Levelek száma							
m1 <- glmmTMB(log_no_leaves ~ treatment * age_of_plant + I(age_of_plant^2) + (1 plant_id/pot_id) + (1 block_id/quadrat_id), data = NL_red, family = gaussian, REML=TRUE)	0,911	intercept	2.91380	0.11638	25.04		
		Kezelésn	-0.16121	0.13883	-1.16	1.4413	0.2299
		Növény kora	0.66919	0.02050	32.64	0	1
		Növény kora^2	-0.13198	0.01086	-12.15	125.74	2.2e-16
		Kezelésn:Növény kora	0.06892	0.02933	2.35	5.5506	0.01847
Levélhossz							
m1 <- glmmTMB(sqrt_leaf_length ~ treatment + age_of_plant + I(age_of_plant^2) + (1 plant_id/pot_id) + (1 block_id:quadrat_id), data = LL_red, family = gaussian(), REML=TRUE)	0.747	intercept	14.07617	0.36689	38.37		
		Kezelésn	-1.60006	0.46087	-3.47	11.007	0.0009075
		Növény kora	2.08136	0.08477	24.55	376.44	2.2e-16
		Növény kora^2	-0.66256	0.06229	-10.64	101.09	2.2e-16
Levélterület							
m1 <- glmmTMB(sqrt_leaf_area ~ treatment + age_of_plant + I(age_of_plant^2) + (1 plant_id:pot_id) + (1 block_id/quadrat_id), data = LA_red, family = gaussian(), REML=TRUE)	0.758	intercept	52.1650	2.1745	23.989		
		Kezelésn	-7.4359	2.4710	-3.009	7.773	0.005303
		Növény kora	12.2803	0.4758	25.808	408.39	2.2e-16
		Növény kora^2	-4.4068	0.3532	-12.476	132.66	2.2e-16
Virágzati tőszárak száma							
m1 <- glmmTMB(no_fl_stems ~ treatment * age_of_plant + I(age_of_plant^2) + (1 plant_id/pot_id) + (1 block_id/quadrat_id), data = NFL_red, family = nbinom2(), REML=TRUE)	0.970	intercept	0.61865	0.19564	3.162		
		Kezelésn	-0.57303	0.23510	-2.437	6.5797	0.01031
		Növény kora	2.33672	0.10200	22.909	0	1
		Növény kora^2	-0.46862	0.04295	-10.910	128.04	2.2e-16
		Kezelésn:Növény kora	0.39116	0.09278	4.216	0	1
Virágzat hossza							
m1 <- glmmTMB(inflor_length ~ treatment * age_of_plant + (1 plant_id/pot_id) + (1 block_id/quadrat_id), data = IL_red, family = gaussian, REML = TRUE)	0.806	intercept	21.9354	1.7465	12.560		
		Kezelésn	-1.6876	2.3807	-0.709	0.5141	0.4734
		Növény kora	10.7685	0.7504	14.351	0.0208	2.2e-16
		Kezelésn:Növény kora	3.8996	1.1570	3.371	11.027	0.0008977

3.sz. melléklet: Nyilatkozat

NYILATKOZAT

a szakdolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: Oláh Zsuzsanna Xénia
A Hallgató Neptun kódja: F2LKHB
A dolgozat címe: A szárazság hatása a lándzsás útifű (*Plantago lanceolata* L.) életmenetére
A megjelenés éve: 2024
A konzulens intézetének neve: Kertészettudományi Intézet
A konzulens tanszékének a neve: Növénytan Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott szakdolgozat egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, és az irodalomjegyzékben szerepeltettem.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlant állítottam, tudomásul veszem, hogy a záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkor szellemi tulajdonkezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem MATER Hallgatói Dolgozatok repozitóriumába. Tudomásul veszem, hogy a megvédett és

- nem titkosított dolgozat a védést követően
- titkosításra engedélyezett dolgozat a benyújtásától számított 5 év eltelté után

nyilvánosan elérhető és kereshető lesz az Egyetem MATER Hallgatói Dolgozatok repozitóriumában.

Kelt: Budapest, 2024 október 11.



Hallgató aláírása

4.sz. melléklet: Nyilatkozat

NYILATKOZAT

Oláh Zsuzsanna Xénia (hallgató Neptun azonosítója: F2LKHB) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a szakdolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A záródolgozatot/szakdolgozatot/diplomadolgozatot/portfóliót a záróvizsgán történő védeésre **javaslom / nem javaslom¹**.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem^{*2}

Kelt: Budapest, 2024 november 11.



belső konzulens

¹ A megfelelő aláhúzendó.

² A megfelelő aláhúzendó.