



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

Szent István Campus

Mezőgazdasági Mérnök Bsc Szak

**A klímaváltozás hatása a kukorica
termésmennyiségére és minőségére**

Belső konzulens: Dr. Tarnawa Ákos

egyetemi docens

Készítette: **Británszki Tamás József**

I2YXE2

nappali

TARTALOM

1. Bevezetés, célkitűzések	4
2. Szakirodalmi áttekintés	7
2.1. A klímaváltozás általános hatásai a mezőgazdaságra	7
2.1.1. Hőmérséklet-változások és szélsőségek	7
2.1.2. Csapadék, vízellátottság és aszályhatások	8
2.1.3. CO ₂ -koncentráció és fotoszintézis.....	11
2.1.4. Talajminőség és tápanyag-hasznosulás	12
2.1.5. Globális és hazai trendek a növénytermesztésben	14
2.1.6. Európai és globális terméshozam-trendek.....	15
2.1.7. Magyarországi éghajlati tendenciák és megfigyelések	17
2.1.8. Növény-specifikus hatások.....	18
2.1.8.2. A klímaváltozás hatása a kukoricára	18
2.1.9. Adaptációs lehetőségek a mezőgazdaságban	20
2.1.9.1. Precíziós mezőgazdaság	20
2.1.9.2. Fajtaválasztás és nemesítés	21
2.1.9.3. Agrotechnikai innovációk és fenntartható gazdálkodás.....	23
3. Anyag és módszer	25

3.1. Kísérlet bemutatása	25
3.2. Kísérlet közbeni megfigyelések	27
4. Eredmények és értékelésük	29
4.1. Javaslatok	31
5. Összefoglalás.....	32
6. Köszönetnyilvánítás	34
7. Irodalomjegyzék.....	35

1.BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

A szakdolgozatom témaválasztását a mezőgazdasági kötődésem indokolta, mivel a családi gazdaságunkban is ezzel foglalkozunk. Ezen belül az egyik legjelentősebb és legrelevánsabb témát, a klímaváltozás hatását választottam, ami napjaink egyik legjelentősebb globális problémája, amely az emberiség jövőjét gazdasági, társadalmi és ökológiai szempontból egyaránt határozza meg.

Az éghajlatváltozás a Föld légkörének, óceánjainak és szárazföldi ökoszisztémáinak hosszú távú, emberi tevékenységek által is befolyásolt módosulását jelenti. A probléma gyökerei egészen a 18-19. században bekövetkezett ipari forradalomig nyúlnak vissza, amikor a nagyban megnövekedett energiaigény a fosszilis energiahordozók fokozott felhasználásához vezetett, ezáltal drasztikusan megnövelve a légkörünk szén-dioxid- és metánkoncentrációját (IPCC, 2021). Az 1950-es évektől kezdődően a tudományos közösség egyre több kutatást végzett ezzel kapcsolatban, és bizonyítékokat mutattak fel arra, hogy az üvegházhatású gázok felhalmozódása globális felmelegedéshez vezethet, amelynek hatásai az éghajlati rendszer minden elemében meg fog mutatkozni (NASA, 2023).

Az éghajlatváltozás következményei világszerte mindenhol érzékelhetők: nő az átlaghőmérséklet, megváltozik a csapadék eloszlása és mennyisége, valamint egyre gyakoribbá válnak a szélsőséges időjárási események, például a hóhullámok, aszályok, árvizek és viharok, valamint a tengerek szintje is folyamatosan emelkedik a jégtakarók olvadása miatt (WMO, 2022). Ezek a folyamatok nemcsak a természetes ökoszisztémákat érintik, hanem a társadalmunk működését is alapvetően befolyásolják.

Különösen érzékeny terület a mezőgazdaság, amely szoros kapcsolatban áll a klimatikus tényezőkkel, mivel nagyban függ tőlük és amelynek termelékenysége döntő hatással van az élelmiszer-ellátás biztonságára (FAO, 2016). A növénytermesztés alapvetően időjárás- és éghajlatfüggő tevékenység. A növények növekedése és fejlődése olyan környezeti tényezőktől függ, mint a hőmérséklet, a csapadék eloszlása és mennyisége, a napfény intenzitása, a talajnedvesség, valamint a légköri szén-dioxid szintje. A klímaváltozás ezen

tényezőket egyaránt befolyásolja, így közvetlen hatást gyakorol a termés mennyiségére és minőségére. A magasabb hőmérséklet például gyorsítja a növények fejlődési ciklusát, ami rövidebb vegetációs időszakot eredményezhet, és ezáltal csökkentheti a termésmennyiséget (Olesen & Bindi, 2002). Az aszályos időszakok gyakoriságának növekedése és a csapadék egyenetlen eloszlása szintén rontja a hozamokat, míg a szélsőséges időjárási események, mint a jégesők, viharok és hirtelen lehűlések közvetlen termés kiesést okozhatnak (Trnka et al., 2014). Ezzel párhuzamosan a növények minőségi paraméterei is változnak: a fehérje-, olaj-, cukor- vagy keményítőtartalom módosulhat, ami hatással van az élelmiszeripari feldolgozásra és a végtermék értékére (Rötter & van de Geijn, 1999). Bár a magasabb CO₂-szint bizonyos esetekben növelheti a fotoszintetikus aktivitást és a biomassza-termelést, a legtöbb kutatás szerint ezek az előnyök nem mindig vagy csak részben érvényesülnek, és legtöbbször semlegesítődnek a hő- és vízstressz negatív hatásai miatt (Hatfield & Prueger, 2015).

A klímaváltozás hatása a növénytermesztésre világszerte eltérő módon jelentkezik. A mérsékelt égövi területeken, különösen Európában a termékenységi viszonyok változása, a talajnedvesség csökkenése és a szélsőséges időjárás következményei jelentik a legnagyobb kihívást a gazdáknak (Olesen et al., 2011). Az IPCC (2021) legfrissebb jelentése szerint a közép-európai régióban, így Magyarországon is, a következő évtizedekben várhatóan tovább nő az átlaghőmérséklet, miközben a csapadék évi eloszlása egyre szélsőségesebb lesz és a mennyisége csökkenni fog. A téli és tavaszi hónapokban több, a nyári időszakban pedig kevesebb csapadék várható, ami jelentős aszályokat idézhet elő a legkritikusabb növekedési fázisokban.

Magyarország földrajzi elhelyezkedése miatt különösen kitett a klímaváltozás káros hatásainak. Az OMSZ (2023) adatai szerint Magyarország éves átlaghőmérséklete az 1901 és 2020 közötti időszakban mintegy +1,2 °C-kal emelkedett, és az éves csapadékmennyiség is csökkenést mutat. Az Alföldön egyre gyakoribbak a szinte csapadékmentes nyarak, a Dunántúlon pedig nő a hóhullámok és a villámárvizek száma. A búza, a kukorica és a napraforgó, amelyek a hazai növénytermesztés alappilérrei már napjainkban is érzékenyen reagálnak az éghajlati változásokra. Az éghajlati trendekben megfigyelhető

csapadékcsökkenés és az aszályhajlam növekedése egyre nagyobb kihívást jelent a hazai mezőgazdaság számára, ami a különböző növénykultúrák, például a kukorica és a napraforgó terméseredményeire is kedvezőtlen hatással lehet. (Lakatos et al., 2021).

A növénytermesztés alkalmazkodóképességének javítása érdekében elengedhetetlen az agronómiai és technológiai innováció. Az öntözési rendszerek fejlesztése, a szárazságtűrő fajták nemesítése, a precíziós gazdálkodás nagyobb térhódítása, valamint a talajvédelem és a szervesanyag-gazdálkodás fejlesztése mind nélkülözhetetlenek a jövő fenntartható növénytermesztésének kialakításában (Xing & Wang 2024). Ezzel egy időben a mezőgazdasági termelésnek a drasztikus klímaváltozás csökkentéséhez is hozzá kell járulnia az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésével, például az energiahatékonyság növelésével és a megújuló energiaforrások alkalmazásával.

A jelen szakdolgozat célja, hogy átfogó képet nyújtson a klímaváltozás növénytermesztésre gyakorolt hatásairól, ezen belül a kukorica termésmennyiségének és minőségének változásaira, valamint egy az otthoni gazdaságban elvégzett kísérletre, amely egy kukorica tőszám vizsgálat. A dolgozat bemutatja a hazai és nemzetközi kutatási eredményeket, elemzi a klimatikus tendenciákat, valamint feltárja azokat az alkalmazkodási stratégiákat, amelyek elősegíthetik a fenntartható és versenyképes mezőgazdasági termelést a jövő kihívásai közepette. A téma aktualitását az adja, hogy a klímaváltozás hatásai már nemcsak a távoli jövő fenyegetéseként jelennek meg, hanem napjainkban is valós problémát jelentenek és már a saját bőrünkön érezzük a káros következményeit. A klímadaptációs megoldások kidolgozása és bevezetése nem csupán a mezőgazdaság jövőbeli fenntarthatóságát, hanem Magyarország élelmiszer-önellátását és vidékfejlesztési potenciálját is meghatározza.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. A KLÍMAVÁLTOZÁS ÁLTALÁNOS HATÁSAI A MEZŐGAZDASÁGRA

A mezőgazdaságot többféleképpen érinti az éghajlatváltozás, mivel függ a meteorológiai tényezőktől, a talaj minőségétől és az egyes növények biológiai igényeitől. A hőmérséklet emelkedésének, a csapadékeloszlás változásának, a légköri CO₂-koncentráció növekedésének és a szélsőséges időjárási események gyakori előfordulásának hatásai közvetlenül és közvetve befolyásolják a növények fejlődését, hozamát és minőségét (IPCC, 2021, WMO, 2022). A főbb hatásokat a következő alfejezetekben fogom kifejteni.

2.1.1. Hőmérséklet-változások és szélsőségek

Az ipari forradalom előtti szinthez képest közel 1,1 °C-kal nőtt a globális átlaghőmérséklet, és a növekedés a következő évtizedekben tovább fog folytatódni, ha a jelenlegi kibocsátási trendeket vesszük figyelembe (NASA, 2023, IPCC, 2021). Az elmúlt öt legmelegebb év mind 2015 után következett be, ami nagyon jól szemlélteti a globális felmelegedés gyorsulását (WMO, 2022). A hőmérséklet-emelkedés a mezőgazdasági rendszerekre több szinten hat: módosítja a növények fiziológiai folyamatait, megváltoztatja a tenyészidőszak hosszát, valamint növeli a hőstressz és a vízhiány kockázatát. A növényélettani válaszok tekintetében a C3 típusú növények, például a búza, rizs, szójabab vagy árpa különösen érzékenyek a 30 °C feletti hőmérsékletekre, mivel a *Rubisco* enzim oxigenáz aktivitása fokozódik, ami a fotoszintetikus hatékonyság csökkenését eredményezi (Hatfield & Prueger, 2015). Ez gyorsabb érési folyamatokhoz, kisebb magmérethez és alacsonyabb terméshozamhoz vezethet (Asseng et al., 2015). A 35 °C feletti hőmérsékletek a virágzás idején már terméskötődési problémákat okoznak, különösen gabonaféléknél. A C4 növények, mint a kukorica, köles vagy a cukornád hatékonyabb hőmérséklet-toleranciával

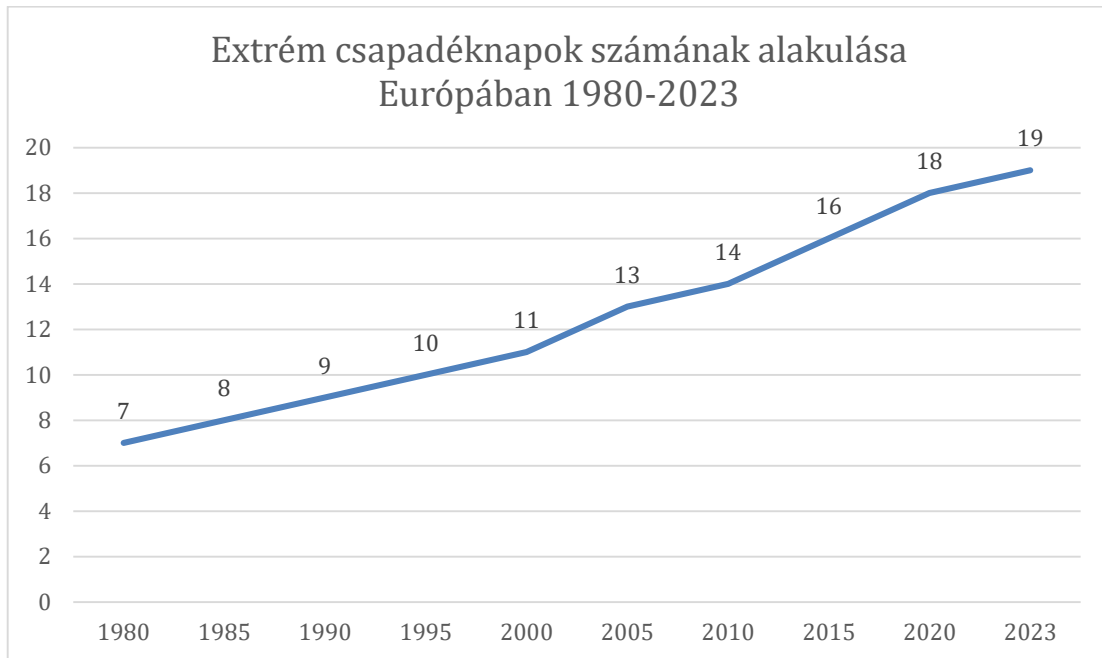
rendelkeznek, de a tartós hőhullámok és az éjszakai minimumhőmérséklet-emelkedés az ő terméshozamukat is csökkentik, mivel befolyásolják a légzési veszteségeket és a szemképződés minőségét (Olesen & Bindi, 2002, Lobell et al., 2011). Az extrém hőmérsékleti események, különösen a hőhullámok gyakorisága és intenzitása világszerte növekszik. Európában az elmúlt évtizedekben a hőmérsékleti szélsőségek váltak a terméshozam-ingadozások egyik legfontosabb meghatározójává (Trnka et al., 2014). Modellvizsgálatok szerint a 2050-es évekre a búza és a kukorica terméshozam-csökkenés akár 10-20 %-ot is elérhet, ha nem valósul meg hatékony adaptáció (Wing, I. S., et al., 2021). A magas hőmérséklet nemcsak a hozamra, hanem a termés minőségére is hat: a fehérjetartalom, az olajösszetétel és a tápanyagsűrűség romolhat (Zhao et al., 2017). Magyarország mezőgazdasága különösen érzékeny az ország kontinentális éghajlata miatt a hőmérsékleti szélsőségekre. Az Országos Meteorológiai Szolgálat adatai szerint a 20. század közepe óta a nyári középhőmérséklet több mint 1,5 °C-kal nőtt, és a hőhullámos napok száma megháromszorozódott (OMSZ, 2023). Az 1990-es évektől több olyan év fordult elő, amikor a tartós meleg és a csapadékhiány miatt a búza és a kukorica terméshozama 15-40 %-kal elmaradt a sokéves átlagtól. A 2022-es, aszályos, forró nyár például történelmi hozamcsökkenést okozott (KSH, 2023). A jövőre nézve a projekciók szerint a hőmérsékleti szélsőségek további fokozódása várható, ami a vetésidők, fajtaválasztás és öntözési stratégiák újragondolását teszi szükségessé.

Összességében a hőmérséklet-változások és szélsőségek közvetlenül befolyásolják a mezőgazdasági termelékenységet, mind a hozamok, mind a minőségi mutatók tekintetében. Az alkalmazkodási intézkedések kulcsfontosságúak a klímaváltozás negatív hatásainak mérséklésében.

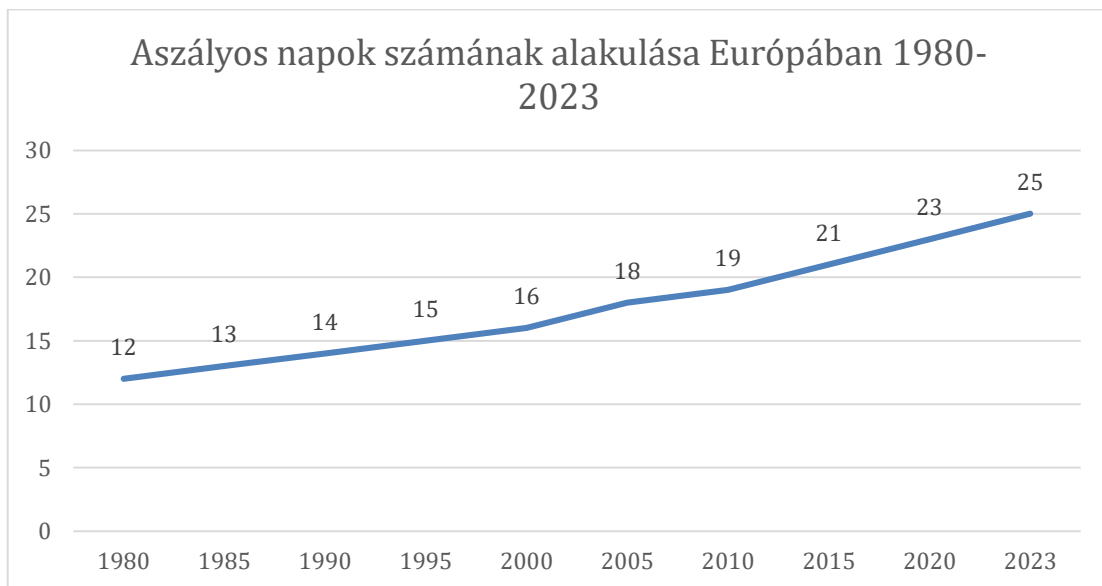
2.1.2. Csapadék, vízellátottság és aszályhatások

A csapadék mennyisége és időbeli eloszlása alapvetően meghatározza a növények vízellátottságát, fotoszintetikus aktivitását és tápanyag-felvételét. A klímaváltozás hatására az elmúlt évtizedekben jelentősen módosultak a csapadékviszonyok Európában: a téli időszakokban gyakoribbá váltak a heves, nagy intenzitású esőzések, míg a tavaszi és nyári

hónapokban nőtt az aszályos időszakok hossza és gyakorisága (IPCC, 2021, OMSZ, 2023). Az európai csapadékeloszlás térbeli és időbeli változékonysága növekszik, ami hozzájárul ahhoz, hogy egyes régiókban rövid időn belül akár különböző vízellátottsági helyzetek is kialakulhatnak (Spinoni et al., 2015).



Forrás: Európai Környezetvédelmi Ügynökség (EEA)



A növekvő aszályos periódusok különösen kritikusak a vetési, kelési és virágzási fázisban, amikor a növények vízigénye a legmagasabb. A vízhiány gátolja a sejtnyúlást és a fotoszintézist, ami közvetlen termésvesztéshez vezet (Olesen et al., 2011). A gabonafélék esetében az aszályos stressz csökkenti a kalászképződést és a magkitelítődést, míg a kukoricánál a szemképződés és csőtöltődés időszakában tapasztalt vízhiány drasztikusan csökkentheti a hozamot (Farooq et al., 2009). Napraforgónál és repcénél a virágzáskori vízhiány akár 40-50%-os termésvesztést is okozhat, mivel a pollen életképessége és a megtermékenyülés aránya is romlik (Hatfield & Prueger, 2015, Trnka et al., 2014). Az aszály nemcsak a mennyiségi, hanem a minőségi jellemzőket is befolyásolja. Búzában az aszály és a hőstressz együttesen csökkenti a sikértartalmat és a fehérjeösszetételt, ami rontja a sütőipari minőséget (Olesen et al., 2011, Zhao et al., 2017). Kukoricában a szemek keményítőtartalma és energiasűrűsége csökken, ami az állattenyésztésre és a bioenergia-termelésre is kihat (Lesk et al., 2016). A csapadékhiány és az aszály a talaj vízháztartására is súlyos hatással van. A hosszan tartó száraz időszakok csökkentik a talaj nedvességtartalmát, ami gátolja a mikrobiális aktivitást és a tápanyag-feltáródást (De Silva et al. 2025). Ennek következtében romlik a növények tápanyag-felvétele, különösen a nitrogéné, ami további hozamcsökkenést okozhat (Lal, 2020). A talaj kiszáradása növeli a porosodást, a szerkezetromlást és az eróziót, ami hosszú távon a termőföld minőségének degradációjához vezethet. Magyarországon az elmúlt két évtizedben az aszályok gyakorisága és intenzitása növekedett, különösen az Alföld térségében. Az KSH (2024) jelentése szerint az elmúlt években az ország területének több mint 50%-án volt tapasztalható súlyos mezőgazdasági aszály. A 2022-es év példátlan vízhiányt hozott, a kukorica terméshozam országos átlagban 44%-kal csökkent és több mint 55%-kal az elmúlt öt év átlagához képest (KSH, 2023). Az aszályos években nő az öntözési igény, de a felszín alatti vízkészletek csökkenése korlátozza a vízpótlás lehetőségeit. A jövőre vonatkozó klímamodellek alapján a Kárpát-medencében a nyári csapadékmennyiség további csökkenése és az aszályos napok számának növekedése várható (Bartholy & Pongrácz, n.d., IPCC, 2021).

Összességében a vízhasználat hatékonyságának növelése és az öntözés modernizálása kulcsfontosságú a mezőgazdasági termelékenység fenntartásában a klímaváltozás hatásának fokozódó körülményei között.

2.1.3. CO₂-koncentráció és fotoszintézis

A légköri szén-dioxid (CO₂) koncentráció az iparosodás előtti, mintegy 280 ppm értékről 2023-ra meghaladta a 420 ppm-et, és a jelenlegi kibocsátási trendek alapján az évszázad közepére akár még az 500 ppm-et is elérheti (NOAA, 2023, IPCC, 2021). A CO₂-koncentráció emelkedése közvetlenül befolyásolja a növények fotoszintézisét, különösen a C3 típusú növények esetében, amelyek fotoszintetikus útvonalukból adódóan hatékonyabban tudják hasznosítani a magasabb CO₂-szintet (Rötter & van de Geijn, 1999). Ezt a jelenséget „CO₂-trágyázási hatásnak” nevezik, amely elméletben növeli a nettó fotoszintézis sebességét, a vízhasznosítás hatékonyságát és a biomassza-felhalmozódást (Ainsworth & Long, 2020). A CO₂-trágyázási hatás leginkább zárt vagy ellenőrzött körülmények között (pl. üvegházakban vagy kísérleti parcellákon) mutatható ki. Szabadföldi körülmények között a hatás gyakran gyengébb, mert a növények növekedését nemcsak a CO₂-szint, hanem más korlátozó tényezők is mint a vízellátottság, a tápanyagok rendelkezésre állása és a hőmérséklet is befolyásolják (Leakey et al., 2009). Magas CO₂-koncentráció esetén például a sztomák részben záródhatnak, ami csökkenti a transzspirációt és növeli a vízfelhasználás hatékonyságát, azonban a túlzott záródás a levelek hőmérsékletének emelkedését és a hőstressz fokozódását okozhatja (Engineer et al., 2015). A C3 növények általában nagyobb relatív hozamnövekedést mutatnak a CO₂-emelkedés hatására, mint a C4 növények (pl. kukorica, cirok), amelyek fotoszintézisük során már eleve hatékonyabban hasznosítják a CO₂-t (Kimball, 2016). A becslések szerint 550 ppm-es CO₂-koncentráció mellett a C3 növények fotoszintézise akár 30%-kal is nőhet laboratóriumi körülmények között, de a tényleges terméshozam-emelkedés a szántóföldön általában ennél jóval kisebb (Ainsworth & Long, 2020, Taylor et al., 2021, Gardi et al., 2022). A légköri CO₂-emelkedés nemcsak a növekedést, hanem a termés minőségét is befolyásolja. Számos kísérlet kimutatta, hogy a magas CO₂-szint mellett termesztett növények szemtermésében a fehérje-, vas- és cinktartalom csökken, ami táplálkozási szempontból hátrányos (Myers et

al., 2014). A búza esetében a szemfehérje-tartalom 5-15%-kal, a vas- és cinkkoncentráció akár 10-20%-kal is csökkenhet a jelenlegi légköri szinthez képest (Myers et al., 2017). Ez a jelenség a hígítási hatásból ered: a megnövekedett szénbeépüléshez nem társul arányosan nagyobb tápanyag-felvétel. A termények beltartalmi értékének romlása hosszú távon az élelmiszer-minőségre és a humán táplálkozásra is kedvezőtlenül hathat (Smith & Myers, 2018). A CO₂-hatás továbbá kölcsönhatásban áll más klimatikus tényezőkkel. Aszályos körülmények között a magasabb CO₂-szint némileg javíthatja a vízhasznosítás hatékonyságát, azonban a vízhiány és a hőstressz együttesen nagymértékben csökkenti a pozitív hatást (Trnka et al., 2014). A nitrátellátás szintén meghatározó tényező: alacsony nitrogénszinteken a CO₂-trágyázási hatás alig érvényesül, mivel a növény nem tudja a többlet-asszimilátát megfelelően beépíteni (Ainsworth & Rogers, 2007). A mezőgazdasági rendszerek szintjén a CO₂-koncentráció növekedése tehát kettős hatású: egyfelől rövid távon bizonyos termények esetében hozamnövekedést idézhet elő, másfelől hosszabb távon a tápanyag-arányok eltolódása, a talajvízhiány és a hőstressz miatt csökkenhet a növények fiziológiai teljesítménye és a termények minősége. A jövő mezőgazdasági stratégiáinak ezért figyelembe kell venniük a CO₂-hatás komplex, többtényezős természetét, valamint a termékenység és táplálkozási minőség közötti kompromisszumokat (FAO, 2018, IPCC, 2021).

2.1.4. Talajminőség és tápanyag-hasznosulás

A talajminőség és a tápanyag-hasznosulás kulcsszerepet játszik a mezőgazdasági termelés fenntarthatóságában és a növények produktívitasában. A klímaváltozás következtében megváltozó hőmérsékleti és csapadékviszonyok jelentős hatást gyakorolnak a talaj fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságaira (Lal, 2015). Szélsőséges időjárási események, mint a hóhullámok, intenzív esőzések vagy elhúzódó aszályok fokozhatják a talajdegradációt (pl. csökkenő talajszerves-anyag-tartalom, erózió, gyorsabb szervesanyag-lebontás) (Lal, 2012). A magas hőmérséklet és a csökkenő talajnedvesség hatására a mikrobiális aktivitás és az enzimatikus folyamatok módosulnak, ami befolyásolja a szervesanyag-lebontást és a tápanyag-feltáródást (Smith et al., 2015). Az aszályos időszakokban a nitrifikáció és a denitrifikáció folyamatai lelassulnak, azonban a heves esőzések során a talaj nitrogén- és

foszforkimosódása fokozódik, ami tápanyagveszteséget és vízminőségi problémákat is okozhat (Kundzewicz et al., 2016). Ez a folyamat hosszú távon a talaj tápanyagszolgáltató képességének romlásához vezet. A szervesanyag-tartalom csökkenése nemcsak a tápanyag-körforgásra, hanem a talaj vízmegtartó képességére és szerkezetére is negatívan hat. A humuszanyagok lebomlása során keletkező szén-dioxid további üvegházhatású gázkibocsátást eredményez, ami visszacsatolási folyamatként tovább erősíti a klímaváltozást (Lal, 2004, Smith et al., 2019). Emellett a talaj szerkezetének romlása rontja a növények gyökérfejlődését és vízfelvételét, különösen a sekély gyökérzetű növények, mint a búza vagy a repce esetében (Cavaliere-Polizeli et al., 2022). A magyarországi kutatások is megerősítik, hogy a változó csapadékeloszlás és a fokozódó aszályok hatására a talaj vízháztartása és tápanyag-szolgáltató képessége romlik. Vizsgálatok szerint a kukorica és búza terméshozamának csökkenése szélsőséges időjárási éveken — különösen alacsony talaj-nedvesség és gyenge nitrogénellátottság esetén — szoros összefüggést mutathat a talaj víz- és tápelem-készletével (Lakatos et al. 2021). Hosszú távon a talaj termőképességének megőrzéséhez nélkülözhetetlen a szervesanyag-visszapótlás, a mulcshasználat, valamint a minimális talajbolygatású művelési rendszerek bevezetése. A talaj mikrobiális közösségeinek sokfélesége szintén kulcsfontosságú a tápanyag-hasznosulás szempontjából. A klímaváltozás hatására egyes mikrobiális csoportok dominanciája megváltozhat, ami befolyásolja a nitrogén- és foszforciklust, valamint a növények szimbionta kapcsolatait, például a mikorrhiza-kapcsolatokat (Bardgett & Caruso, 2020). Ezek a változások hosszú távon a talaj ökoszisztéma-szolgáltatásainak csökkenéséhez és a termelési stabilitás romlásához vezethetnek. A fenntartható talajgazdálkodás ezért kulcsfontosságú alkalmazkodási stratégia. Az olyan gyakorlatok, mint a talajtakaráson alapuló gazdálkodás, a szerves trágyák és komposzt alkalmazása, valamint a vetésforgó és a zöldtrágyázás, mind hozzájárulhatnak a talaj szerkezetének és tápanyagtartalmának megőrzéséhez (FAO, 2020). Ezen intézkedések nemcsak a termékenységet növelik, hanem javítják a talaj szénmegkötő képességét is, ezáltal hozzájárulnak az éghajlatváltozás mérsékléséhez (Lal, 2015).

Összességében a talajminőség romlása és a tápanyag-hasznosulás csökkenése a klímaváltozás egyik legkritikusabb, de gyakran alulértékelt következménye. Az éghajlati

alkalmazkodás sikeressége nagymértékben függ attól, hogy a mezőgazdasági gyakorlatok mennyire képesek fenntartani vagy javítani a talaj funkcionális állapotát a változó klimatikus feltételek mellett.

2.1.5. Globális és hazai trendek a növénytermesztésben

A klímaváltozás a növénytermesztésre gyakorolt hatásait tekintve az egyik legösszetettebb kihívás, amellyel a globális élelmiszerrendszer szembesül. Az éghajlati tényezők, különösen a hőmérséklet-emelkedés, a csapadékeloszlás változása, a fokozódó időjárási szélsőségek és a növekvő légköri CO₂-koncentráció mind befolyásolják a növények növekedését, fejlődését és terméshozamát (IPCC, 2021). Az utóbbi évtizedekben a globális átlaghőmérséklet növekedésével párhuzamosan megfigyelhető a terméshozamok regionális átrendeződése, ami különösen a trópusi és szubtrópusi térségekben jelent kihívást (FAO, 2020). Globális szinten a kutatások azt mutatják, hogy a 2 °C-os hőmérséklet-emelkedés esetén a fő gabonafélék, mint például a búza, a kukorica, a rizs és a szója terméshozama átlagosan 5-15%-kal csökkenhet, különösen az alacsonyabb szélességi öveken (Zhao et al., 2017, Rosenzweig et al., 2020). A hőstressz és a vízhiány együttesen komoly korlátot jelenthet a termelés számára, miközben a magasabb CO₂-koncentráció mérsékelt javíthatja a fotoszintézist, főként a C3 típusú növényeknél (Ainsworth & Long, 2020). Azonban a CO₂-trágyázási hatás csak részben képes ellensúlyozni a hő- és aszálystressz negatív következményeit (Gardi et al., 2022). A növénytermesztés földrajzi eltolódása is érzékelhető. Európában és Észak-Amerikában egyes növényfajok termesztési határai észak felé tolódnak, miközben a mediterrán és közép-európai térségekben a hőmérséklet- és vízstressz miatt csökken a termőképesség (Trnka et al., 2014, EEA, 2016). Az éghajlati övezetek eltolódása lehetőséget teremt új fajok termesztésére is például a korábban délebbi területeken jellemző szőlő- vagy napraforgó-fajták északi régiókban való megjelenésére, ugyanakkor növeli a kockázatot a kártevők és növénybetegségek elterjedése révén (Olesen et al., 2011, Deutsch et al., 2018). Hazai viszonylatban a Kárpát-medence klímája különösen érzékeny az éghajlati változásokra. Magyarországon az elmúlt 120 évben az átlaghőmérséklet több mint 1,2 °C-kal nőtt, miközben a csapadékeloszlás egyenlőtlené vált: nőtt az aszályos és a hirtelen, intenzív esőzésekkel jellemzett időszakok aránya

(OMSZ, 2023). Ezek a változások közvetlenül befolyásolják a növénytermesztés biztonságát és a hozamstabilitást. A kukorica, a búza és a napraforgó esetében egyre gyakrabban tapasztalható évjáratonként jelentős termésingadozás, amely a hőstressz és az aszályos periódusok együttes hatásának tudható be (Pinke et al., 2024). A hosszabb tenyészidőszak és a melegebb tavaszok ugyanakkor bizonyos növényfajok esetében, például a szőlő és a napraforgó kedvezőbb feltételeket teremthetnek, de a vízellátás hiánya és az extrém időjárás gyakorisága korlátozza e potenciális előnyök kihasználását (Kis et al., 2020). A magyar kutatások szerint az öntözés, a vetésidő optimalizálása, a szárazságtűrő fajták alkalmazása, valamint a talajkímélő művelési technológiák kulcsszerepet játszanak az alkalmazkodásban (Madarász, 2015).

Globális és hazai szinten egyaránt kijelenthető, hogy a klímaváltozás nemcsak az átlagos terméshozamokat módosítja, hanem fokozza a hozamingadozást és a termelési kockázatot is. A mezőgazdasági rendszerek jövőbeli ellenálló képessége nagymértékben attól függ, hogy a gazdálkodók és a döntéshozók milyen mértékben képesek beépíteni az adaptív stratégiákat a termesztéstechnológiába és az agrárpolitikába.

2.1.6. Európai és globális terméshozam-trendek

A globális mezőgazdasági terméshozamok az elmúlt öt évtizedben folyamatosan növekedtek, ami betudható a mezőgazdasági technológiák fejlődésének, a műtrágyahasználatnak, az öntözött területek kiterjedésének és a nemesített fajták alkalmazásának (FAO, 2018). Azonban az utóbbi évtizedekben, különösen a 2000-es évektől kezdve ezek a növekedések lassuló tendenciát mutatnak, amelyek legjobban a trópusi és szubtrópusi térségekben figyelhetők meg, ahol a klímaváltozás negatív hatásai egyre erősebben érvényesülnek (Lobell et al., 2011). A globális átlaghőmérséklet emelkedése, a csapadékeloszlás változása, valamint az extrém időjárási események gyakoriságának növekedése közvetlenül hat a fő élelmiszernövények, mint például a búza, kukorica és rizs terméshozamára (IPCC, 2021). Európában a mezőgazdasági terméshozam-trendek jelentős regionális eltéréseket mutatnak. Az északi régiókban, mint például Skandináviában és a Balti-államokban, a mérsékelt hőmérséklet-emelkedés és a hosszabb vegetációs időszak

miatt potenciálisan kedvezőbb feltételek alakulnak ki a növénytermesztés számára (Olesen et al., 2011, EEA, 2020). Ugyanakkor a déli és keleti térségekben, ideértve a mediterrán országokat és Közép-Kelet-Európát, így Magyarországot is a magasabb hőmérséklet és az aszályos időszakoknak a megnövekedése érzékelhetően negatív hatásokat okoz. A terméshozamok stagnálása, illetve csökkenése már most is tapasztalható, különösen a nyári növények esetében (Trnka et al., 2014). A búza esetében a kedvezőtlen időjárási események, például a hóhullámok és az aszályos periódusok, Európa-szerte jelentős terméskieséseket eredményeznek. Trnka és munkatársai (2014) kimutatták, hogy a szélsőséges hőmérsékletek akár 10-15%-kal is csökkenthetik a búzatermést, különösen a Közép- és Dél-Európai térségben. A kukorica, mint C4 típusú növény, általában jobban tolerálja a hőmérséklet-emelkedést, azonban a hosszabb aszályos időszakok és a vízhiány a virágzás és a szemképződés során akár 30-40%-os hozamvesztést is okozhatnak (Lobell et al., 2011). A napraforgó, amely jelentős szerepet játszik az európai olajnövény-termelésben, érzékenyen reagál a vízhiányra: a terméshozam mellett az olajtartalom is csökkenhet (Farooq et al., 2009). A globális elemzések szerint a terméshozam-ingadozások gyakorisága nő, amit az extrém időjárási események súlyosbodásának tudható be. Az egymást követő aszályos és csapadékos évek váltakozása, valamint a hóhullámok és heves csapadékesemények együttes hatása fokozza a stabil mezőgazdasági termelés bizonytalanságát (Olesen & Bindi, 2002, Ray et al., 2015). Az olyan térségekben, ahol a vízgazdálkodás és az öntözési infrastruktúra fejletlenebb, a klímaváltozás hatásai különösen súlyosak lehetnek (FAO, 2018). A légköri CO₂-koncentráció növekedése ugyan elméletileg kedvező lehet a fotoszintézis hatékonyságára és a biomassza-termelésre, különösen a C3 típusú növények esetében, mint a búza és a rizs, de ez a pozitív hatás a hőstressz, a tápanyagkorlátozás és a vízhiány miatt nagyrészt korlátozott (Rötter & van de Geijn, 1999, Trnka et al., 2014). A FAO (2021) becslései szerint 2050-re a globális terméshozam-növekedés üteme akár 20-30%-kal is elmaradhat a jelenlegi élelmiszer-keresleti trendekhez képest, ha nem történnek jelentős adaptációs intézkedések.

Összefoglalva tehát az európai és globális trendek egyaránt azt mutatják, hogy a klímaváltozás következtében a növénytermesztés egyre sérülékenyebb. A precíziós gazdálkodási technológiák, a klímaturó fajták nemesítése, a vízgazdálkodás fejlesztése és

az agroökológiai gyakorlatok elterjesztése kulcsfontosságúak a termésbiztonság fenntartása és a globális élelmezésbiztonság biztosítása érdekében (EEA, 2020, IPCC, 2021).

2.1.7. Magyarországi éghajlati tendenciák és megfigyelések

Magyarország éghajlata mérsékelt kontinentális, amelyet az évi hőmérsékleti amplitúdó, a viszonylag alacsony csapadékmennyiség és a gyakori időjárási szélsőségek jellemeznek. Az ország földrajzi fekvése miatt különösen érzékeny az éghajlati változásokra, hiszen a Kárpát-medence zárt medencejellege miatt a légköri és hidrológiai folyamatok hatásai felerősödhetnek (OMSZ, 2023). Az elmúlt évszázadban Magyarországon az átlaghőmérséklet mintegy 1,2-1,5 °C-kal emelkedett, ami meghaladja a globális átlagot (Life-CLIMCOOP, 2021). A hazai adatok is alátámasztják, hogy a nyári hónapokban a melegedés mértéke fokozódik, és emellett a hőhullámok gyakorisága és tartóssága is növekvő tendenciát mutat (Bartholy et al., 2008, WMO 2022). A csapadékmennyiség éves összege ugyan nem mutat egyértelműen csökkenő tendenciát, de az eloszlása jelentősen megváltozott. A nyári hónapokban gyakoribbá váltak az intenzív záporok és zivatarok, míg a tavaszi és őszi időszakban nőtt a csapadékhiányos periódusok hossza (OMSZ 2023). Ennek következtében az aszályos évek száma az 1980-as évektől kezdve jelentősen emelkedett, ami a talajnedvesség-tartalom csökkenésével és a mezőgazdasági hozamok ingadozásával járt együtt. Az OMSZ (2023) adatai szerint a 2000-es évek után az ország területének több mint 50%-át rendszeresen sújtja aszály, különösen az Alföldön és a Duna-Tisza közén. A növénytermesztés szempontjából a hőmérséklet és a csapadékeloszlás változásai közvetlenül befolyásolják a fenológiai fázisokat. A búza esetében a korai hőstressz a kalászolást és a szemkitelítődést akadályozza, ami a siker- és fehérjetartalom csökkenéséhez vezethet (Trnka et al., 2014). A kukorica termésmennyisége az aszályos években akár 60-80%-kal is visszaeshet, különösen, ha a virágzási időszakban jelentkezik vízhiány (Másfél-fok.hu, 2022). A napraforgó olajtartalma és terméshozama szintén nagymértékben függ a csapadékviszonyoktól, így a csapadékeloszlás ingadozása közvetlenül kihat a termésminőségre és -stabilitásra (Harsányi et al., 2021). A klímaváltozás hatásai a növénytermesztés mellett a talajok állapotában is megmutatkoznak. Az aszály és az eróziós folyamatok fokozódása miatt csökken a talaj szervesanyag-tartalma, ami a

tápanyag-hasznosulást és a vízmegtartó képességet is rontja (Magyar Tudományos Akadémia., 2024). A hazai talajok vízháztartása már jelenleg is jelentős területi és időbeli ingadozást mutat, ami a mezőgazdaság számára komoly ökológiai és gazdasági kockázatot jelent. (Várallyay, 2015). A hazai éghajlati trendek tehát egyértelműen összhangban vannak a globális változásokkal, ugyanakkor Magyarországon a kontinentális klíma miatt a szélsőségek erősebben érvényesülnek. Az alkalmazkodás ezért kulcskérdés a mezőgazdaságban. A precíziós mezőgazdasági technológiák, a vízgazdálkodási infrastruktúra fejlesztése, a klímaturó növényfajták nemesítése, valamint a talajkímélő művelési módok elterjesztése a legfontosabb stratégiai irányok közé tartoznak. Az adaptációs intézkedések mellett szükséges a hazai agrárpolitikai keretek megerősítése is, amelyek támogatják a gazdálkodók kockázatkezelési és klímaalkalmazkodási képességeit. A magyarországi megfigyelések alapján a klímaváltozás hatásainak mérséklése érdekében komplex, tudományosan megalapozott stratégiák kidolgozása és integrált mezőgazdasági monitoringrendszer működtetése elengedhetetlen (Magyarország Kormánya, 2018)

2.1.8. Növény-specifikus hatások

A klímaváltozás hatásai növényfajonként hasonlóak annak ellenére, hogy a különböző kultúrák eltérő biológiai jellemzőkkel és stressztűrő képességgel rendelkeznek, azonban nem jelenthetjük ki, hogy teljes mértékben megegyeznek. A globális hőmérséklet-emelkedés, a csapadékeloszlás változása és a hőhullámok gyakoribb előfordulása nemcsak a terméshozamot, hanem a növények minőségi paramétereit is befolyásolja. A következő alfejezetben az fentiekben említett tényezőknek a kukoricára gyakorolt hatását szeretném bemutatni.

2.1.8.2. A klímaváltozás hatása a kukoricára

A kukorica (*Zea mays*) a világ egyik legfontosabb takarmány- és ipari növénye, amely C4 típusú fotoszintézise révén relatív hőtűrővel rendelkezik, ugyanakkor érzékeny a vízhiányra és az extrém hőmérsékleti eseményekre. A klímaváltozás következtében a globális hőmérséklet emelkedése, a csapadék mennyiségének és eloszlásának

bizonytalansága, valamint a szélsőséges időjárási események együttesen hatnak a terméshozamra és a minőségre (Olesen & Bindi, 2002). A kukorica fejlődési fázisai közül különösen a virágzás és a szemképződés kritikus. A hőstressz ezen időszakokban a pollen életképességét csökkenti, ami a megtermékenyítést és a csövek kitelítődését akadályozza. A magas hőmérséklet gyorsítja az érési folyamatokat, ami rövidebb vegetációs időszakot eredményez, és gyakran alacsonyabb hozamhoz vezet (Hatfield & Prueger, 2015). A stresszhatások különösen súlyosak, ha egyidejűleg aszály is fellép, mivel a talajnedvesség csökkenése csökkenti a fotoszintézis hatékonyságát, rontja a tápanyagfelvételt, és fokozza a növényben a stresszhormonok termelődését (Trnka et al., 2014). A csapadék ingadozása és az aszályok gyakorisága a kukorica esetében növeli a termésingadozást. A szélsőségesen száraz és csapadékos időszakok váltakozása a talajeróziót és a tápanyag-kimosódást fokozza, hosszú távon csökkentve a talaj termőképességét (Rötter & van de Geijn, 1999). Az intenzív esőzések előidézhetik a talaj tömörödését, ami akadályozza a gyökérfejlődést és a vízfelvételt, tovább csökkentve a terméshozamot. A klímaváltozás nemcsak a kukorica termésmennyiségét, hanem a minőségét is kedvezőtlenül befolyásolja. A hő- és vízhiány hatására a szemek keményítőtartalma és fehérjetartalma ingadozik, ami a takarmányozási értéket és az ipari felhasználhatóságot is csökkenti. Az emelkedő hőmérséklet és az aszályos periódusok hatására növekedhet a *mycotoxin*-szennyeződés kockázata is, mivel a stresszes növény hajlamosabb a penészfertőzésekre. A fenntartható kukoricatermesztés érdekében a gazdálkodóknak több adaptációs stratégiát kell alkalmazniuk. A precíziós mezőgazdasági technológiák segítik a tápanyag- és vízgazdálkodás optimalizálását, míg a klímaturó hibridek alkalmazása csökkenti a hő- és vízhiány hatását (Gebbers & Adamchuk, 2010). Az öntözés optimalizálása és a talajnedvesség-megőrző gyakorlatok, például mulcsozás vagy talajtakarás, növelik a stressztűrő képességet, és csökkentik a hozam-ingadozást. Globális és hazai szinten egyaránt megfigyelhető, hogy a kukoricatermesztés bizonytalansága növekszik. Magyarországon a hőhullámok és aszályos évek gyakorisága fokozódott, ami a termésingadozást és a minőség romlását eredményezte (Pinke et al., 2024). A kutatások szerint a klímaváltozás hatásainak mérséklésére irányuló intézkedések, mint a vízgazdálkodás javítása, a klímaturó fajták alkalmazása és a precíziós gazdálkodás, kulcsfontosságúak a fenntartható termelés biztosításához (Olesen et al., 2011).

Összességében a klímaváltozás komplex kihívást jelent a kukoricatermesztés számára: a hőstressz, az aszályok és az extrém időjárási események kombinált hatása növeli a termésingadozást, csökkenti a hozamot és rontja a minőséget. A fenntartható és adaptív gazdálkodási gyakorlatok alkalmazása nélkül a kukoricatermesztés gazdasági és élelmiszerbiztonsági szempontból is kockázatosabbá válik.

2.1.9. Adaptációs lehetőségek a mezőgazdaságban

A klímaváltozás hatásainak mérséklése és a mezőgazdasági termelés fenntarthatóságának biztosítása érdekében számos adaptációs stratégia alkalmazható. Ezek a stratégiák a gazdálkodási gyakorlatok, a technológiai fejlesztések és a növényfajták tudatos kiválasztásának kombinációján alapulnak. Az alábbiakban bemutatom a legfontosabb lehetőségeket.

2.1.9.1. Precíziós mezőgazdaság

A precíziós mezőgazdaság (precision agriculture) napjaink egyik legfontosabb agrárinnovációs irányzata, amely az információs technológia, a távérzékelés és az adatvezérelt döntéshozatal integrálásával támogatja a fenntartható és hatékony termelést. Lényege, hogy a gazdálkodási döntések a térbeli és időbeli változékonyság figyelembevételével, pontos helyspecifikus adatok alapján történnek. A rendszer fő célja, hogy a rendelkezésre álló erőforrásokat, különösen a vizet, tápanyagokat és növényvédő szereket optimális mennyiségben és időzítéssel juttassa el a növényekhez, minimalizálva a veszteségeket és a környezeti terhelést (Gebbers & Adamchuk, 2010, Liakos et al., 2018). A precíziós technológiák alapját olyan eszközök képezik, mint a globális helymeghatározó rendszerek (GPS), a drónok, a szenzorhálózatok, valamint a műholdas távérzékelés, amelyek lehetővé teszik a termőterület heterogenitásának részletes feltérképezését. Az így nyert információk alapján célzott beavatkozások végezhetők, például differenciált tápanyag-kijuttatás, helyspecifikus öntözés vagy precíziós vetés. Ezek az eljárások hozzájárulnak a termelés gazdasági hatékonyságához és az éghajlatváltozás okozta kockázatok mérsékléséhez (Pierpaoli et al., 2013). A klímaváltozás szempontjából a

precíziós mezőgazdaság kulcsfontosságú adaptációs eszköz, hiszen csökkenti a hőstressz, az aszály és a tápanyaghiány negatív hatásait. Az automatizált öntözőrendszerek például a valós idejű talajnedvesség-adatokra reagálva pontosan szabályozzák a vízfelhasználást, ami különösen fontos a vízhiányos régiókban (FAO, 2018). A távérzékelés és a szenzorok által gyűjtött adatok lehetővé teszik a növényállomány állapotának korai felismerését, így a stressztünetek és betegségek időben kezelhetők (Sishodia, Ray, & Singh, 2020). Magyarországon és Közép-Európában a precíziós mezőgazdaság alkalmazása fokozatosan terjed, köszönhetően az egyre elérhetőbb technológiáknak és a digitalizációs fejlesztéseknek (Czibere et al., 2023). Az országban több kutatás is rámutatott arra, hogy a precíziós tápanyag-gazdálkodás és öntözés jelentős mértékben növeli a termésbiztonságot, miközben csökkenti a termelési költségeket és a környezeti terhelést. A technológia hozzájárul a talaj termékenységének megőrzéséhez és a vízgazdálkodás hatékonyságának javításához is, ami a klímaváltozás okozta kihívások kezelésében elengedhetetlen.

Összességében a precíziós mezőgazdaság nemcsak a hozamok stabilitását és a gazdasági versenyképességet erősíti, hanem a fenntartható agrárgazdálkodás egyik kulcseleme is. Az adatalapú döntéshozatal révén a gazdák képesek reagálni a gyorsan változó környezeti feltételekre, ezzel biztosítva az élelmiszer-termelés hosszú távú fenntarthatóságát a klímaváltozás korában.

2.1.9.2. Fajtaválasztás és nemesítés

A tudatos fajtaválasztás és a növénynemesítés a mezőgazdasági adaptáció egyik legfontosabb eleme, különösen a klímaváltozás által okozott stresszhatások, mint például a hőmérsékleti szélsőségek, az aszály, a kórokozók és a kártevők terjedése elleni védekezésben. A megfelelő fajta kiválasztása alapvetően határozza meg a termelés sikerességét, mivel a genetikai adottságok döntően befolyásolják a növények élettani reakcióit a környezeti változásokra (Ceccarelli, 2015). A klímaváltozás hatására napjainkban a nemesítési programok legfőbb célja a hozam növelése helyett, a termésstabilitás, a stressztűrés és a minőség megőrzése lett. A klímaturó, szárazság- és hőstressz-rezisztens fajták előállítására lehetővé teszi, hogy a mezőgazdasági termelés

fenntartható maradjon még szélsőséges éghajlati körülmények között is (Witcombe et al., 2007). Emellett a szárazságtűrő és hőstressz-rezisztens fajták gyakran jobb vízhasznosítási hatékonysággal, fejlettebb gyökérrendszerrel és erőteljesebb antioxidáns-védelemmel rendelkeznek, ami hozzájárul a stresszhatásokkal szembeni ellenálló képességükhöz (Farooq et al., 2009), míg a modern nemesítési technikák, mint a marker-asszisztált és a genom-szintű szelekció, jelentősen felgyorsítják a klímátűrő fajták fejlesztését (Crossa et al., 2017). Emellett a génszerkesztési technológiák, különösen a CRISPR/Cas9, új lehetőségeket kínálnak a növények stressztoleranciáját meghatározó gének célzott módosítására (Scheben & Edwards, 2017). Ezek az innovációk lehetővé teszik olyan genotípusok létrehozását, amelyek kombinálják a magas terméspotenciált a környezeti rugalmassággal. A fajtaválasztás során a gazdálkodóknak figyelembe kell venniük a helyi agroökológiai viszonyokat, mint például a talajtípust, a csapadékeloszlást, a hőmérsékleti trendeket és a növényvédelmi kockázatokat. A helyspecifikus fajták alkalmazása csökkenti a hozamingadozást és növeli a természés gazdasági hatékonyságát (Olesen et al., 2011). Magyarországon például az utóbbi években nőtt az igény az aszálytűrő kukorica- és búzafajták iránt, amelyek jobb termésstabilitást mutatnak az egyre gyakoribb száraz időszakokban. A nemesítés ugyanakkor nemcsak a stressztűrés javítására irányul, hanem a termésminőség, például a fehérje- és olajtartalom optimalizálására is, amely az élelmiszerbiztonság és a feldolgozóipar szempontjából egyaránt fontos (FAO, 2018). A helyi genetikai erőforrások megőrzése és bevonása a nemesítési programokba kulcsfontosságú, hiszen ezek a genotípusok gyakran olyan adaptív tulajdonságokat hordoznak, amelyekre a jövő klímaviszonyai között is szükség lesz (Ceccarelli, 2015).

Összességében a fajtaválasztás és a nemesítés stratégiai szerepet tölt be a klímaváltozáshoz való alkalmazkodásban. Az új genetikai technológiák és a tradicionális nemesítési módszerek kombinációja lehetővé teszi a fenntartható és reziliens növénytermesztés megvalósítását mind globális, mind regionális szinten.

2.1.9.3. Agrotechnikai innovációk és fenntartható gazdálkodás

Az agrotechnikai innovációk és a fenntartható gazdálkodási gyakorlatok kulcsfontosságú szerepet töltenek be a mezőgazdasági rendszerek klímaváltozáshoz való alkalmazkodásában és a stabil élelmiszer-termelés hosszú távú fenntarthatóságának biztosításában. A modern agrotechnikai megoldások célja, hogy növeljék a termelés hatékonyságát, miközben csökkentik a környezeti terhelést, javítják a talaj egészségét és mérséklik az extrém időjárási események negatív hatásait (Lal, 2020).

A talajmegőrző művelés, amely a forgatás nélküli (no-till) vagy minimális talajbolygatással járó rendszereket foglalja magában. Ez segít megőrizni a talaj szerkezetét, csökkenti az eróziót és fokozza a szervesanyag-tartalmat. E technika révén a talaj szénmegkötő képessége növekszik, ami hozzájárul a klímaváltozás mérsékléséhez (Govaerts et al., 2009). A talajban maradó növényi maradványok (mulcs) javítják a vízmegtartó képességet és védik a talajt a kiszáradástól, ami különösen fontos a változó csapadékeloszlás a növekvő aszályos időszakok miatt (Hatfield & Prueger, 2015).

A vetésforgó és a diverzifikált növénytermesztés alapvető elemei a fenntartható gazdálkodásnak. A különböző növényfajok váltakozó termesztése csökkenti a kórokozók és kártevők felszaporodását, javítja a talaj tápanyagmérlegét, valamint hozzájárul a talaj mikrobiális aktivitásának fenntartásához (Yang et al., 2023). A hüvelyesek például természetes módon képesek megkötni a légköri nitrogént, így mérséklik a műtrágya-felhasználás szükségességét és javítják a talaj tápanyag-ellátottságát.

A talajtakarás és a mulcsozás tovább fokozza a talajnedvesség megőrzését, mérsékli a párolgást és a hőingadozást, ezzel is stabilabb mikroklímát biztosítva a növények gyökérszónájában (Lichtfouse, 2009). A szerves és szintetikus tápanyagok tudatos, „okos” kombinálása lehetővé teszi a növények kiegyensúlyozott tápanyagellátását, miközben minimalizálja a kimosódást és a talaj savanyodását (Chang et al., 2024). Az ilyen rendszerek hozzájárulnak a mezőgazdasági ökoszisztémák ellenálló képességéhez, különösen a vízhiányos és szélsőséges időjárási körülmények között.

Az öntözési technológiák fejlesztése szintén az egyik legfontosabb agrotechnikai innováció. A precíziós öntözés, a csepegtető rendszerek és a szenzorvezérelt vízadagolás lehetővé teszik, hogy a növények pontosan a szükséges vízmennyiséget kapják, ezáltal csökken a pazarlás és a túlóntözésből fakadó tápanyag-kimosódás (Hatfield & Prueger, 2015). Az adaptív gazdálkodás elvei szerint a vízgazdálkodás és a talajművelés folyamatosan a helyi környezeti viszonyokhoz igazítható, ami különösen fontos a klímaváltozás okozta bizonytalanságok kezelésében (Bindi & Olesen, 2011).

Európában és Magyarországon is egyre nagyobb hangsúlyt kapnak a fenntartható agrotechnikai megoldások, különösen a talajmegőrző rendszerek, a vetésforgó és a víztakarékos öntözési módszerek (Tóth et al., 2025). A kutatások szerint ezek a gyakorlatok hosszú távon nemcsak a hozamok stabilizálását szolgálják, hanem hozzájárulnak a mezőgazdasági ökoszisztémák regeneratív képességének fenntartásához is.

Összefoglalva, a precíziós mezőgazdaság, a tudatos fajtaválasztás és nemesítés valamint az agrotechnikai innovációk és a fenntartható gazdálkodási rendszerek alkalmazása a klímaváltozáshoz való sikeres alkalmazkodás elengedhetetlen eszközei. Az integrált, helyspecifikus és erőforrás-hatékony megoldások révén csökkenthető a mezőgazdasági termelés környezeti lábnyoma, miközben növelhető a gazdaságok rugalmassága és versenyképessége a változó klimatikus feltételek között. A mezőgazdasági adaptációs stratégiák kombinált alkalmazása lehetővé teszi a termés hozamok és minőség stabilizálását a változó éghajlati körülmények között. Az alkalmazkodás nemcsak a gazdasági fenntarthatóságot biztosítja, hanem hozzájárul az élelmiszerbiztonság és a környezeti stabilitás megőrzéséhez.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1. Kísérlet bemutatása

A klímaváltozás egyik legjelentősebb hatása a csapadékeloszlás egyre szélsőségesebbé válása és a hőmérsékleti anomáliák fokozódása, ami különösen a vízigényes szántóföldi növények, így a kukorica termesztését érinti érzékenyen. Az utóbbi évek tapasztalatai alapján Magyarországon is egyre gyakoribbak a hosszan tartó aszályos időszakok, amelyek a kukoricatermesztés terméshozamát jelentősen csökkentik. Ebben az összefüggésben a vetéssűrűség optimalizálása az egyik leghatékonyabb agrotechnikai eszköz lehet a stresszhelyzetek mérséklésére és a vízhasznosulás javítására. A hagyományosan alkalmazott 70 000 tő/ha vetéssűrűség aszályos években nem feltétlenül biztosítja a legjobb eredményeket, mivel a növények között fokozódik a verseny a korlátozott víz- és tápanyagforrásokért. Az alábbi kísérletben azt fogjuk vizsgálni, hogy a kevesebb tőszámmal javítható-e a kukorica termésmennyisége és minősége.

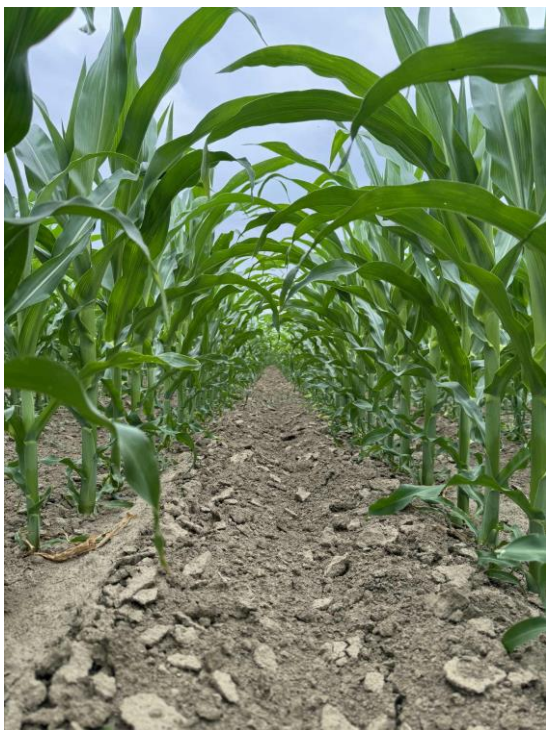
A kísérletet 2025 tavaszán kezdődött el Tolna vármegyében, Szakály határában. A kísérleti területünk egy 3 hektáros terület, három, egyenként 1 hektáros sávra felosztva. A sávokba azonos talajművelést végeztünk, azonos fajtát vetettünk, egységes tápanyagutánpótlással és növényvédelmi kezelésekkel. Az egyetlen különbség a sávok között a vetéssűrűség volt. Az 1. sávban 63 000 tő/ha, a 2. sávban 67 000 tő/ha, míg a 3. sávban 70 000 tő/ha tőszámmal történt a vetés amelyet precíziós vetőgéppel végeztünk el, hogy a tőtávolság pontosan megfeleljen a beállított tőszámoknak. A teljes területet rovarölő szerrel is kezeltük a rágáskárok megelőzése érdekében, így a különbségek kizárólag a tőszámból és az abból fakadó fiziológiai eltérésekből adódtak. A vegetációs időszak alatt csapadékhiányos körülmények uralkodtak, a nyári hónapokban mindössze 60-70 mm csapadék hullott, ami az átlagos érték mintegy 40-50%-a. Szerencsére ennek a csapadéknak a nagy részét még éppen időben, Július első felében kaptuk, ami így megmentette a kísérletünket és az idejű kukoricatermésünket is.



1.ábra: A 70 000 tőszámú állomány növekedés közben



2.ábra: A 67 000 tőszámú állomány növekedés közben



3. ábra: A 63 000 tőszámú állomány növekedés közben

3.2. Kísérlet közbeni megfigyelések

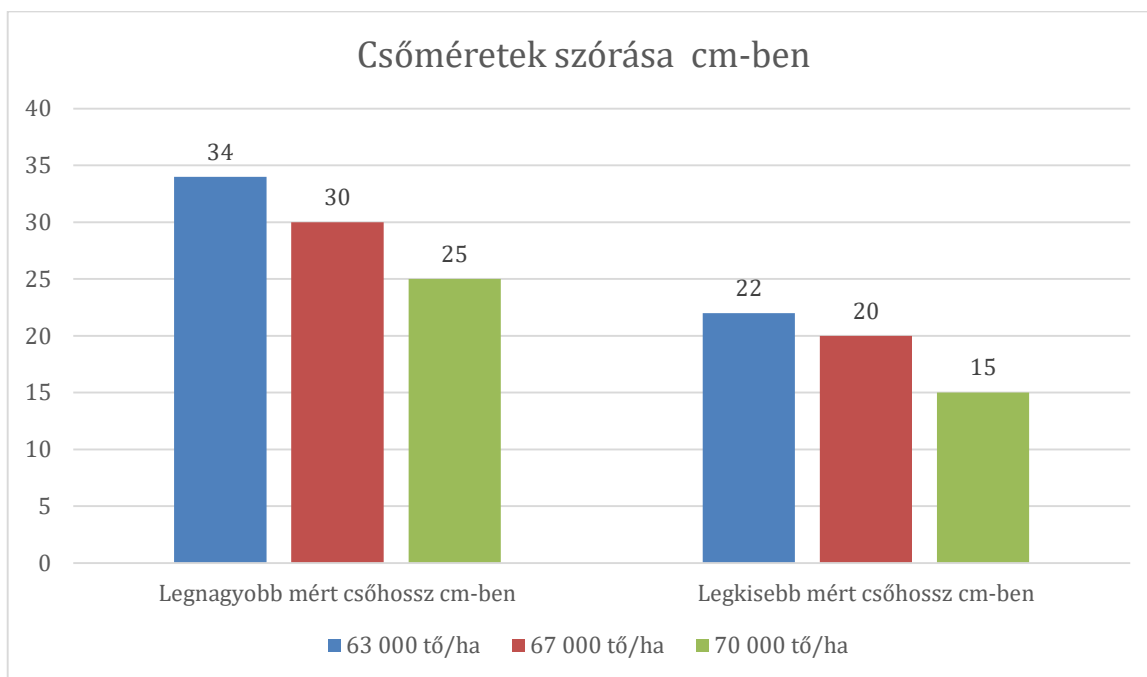
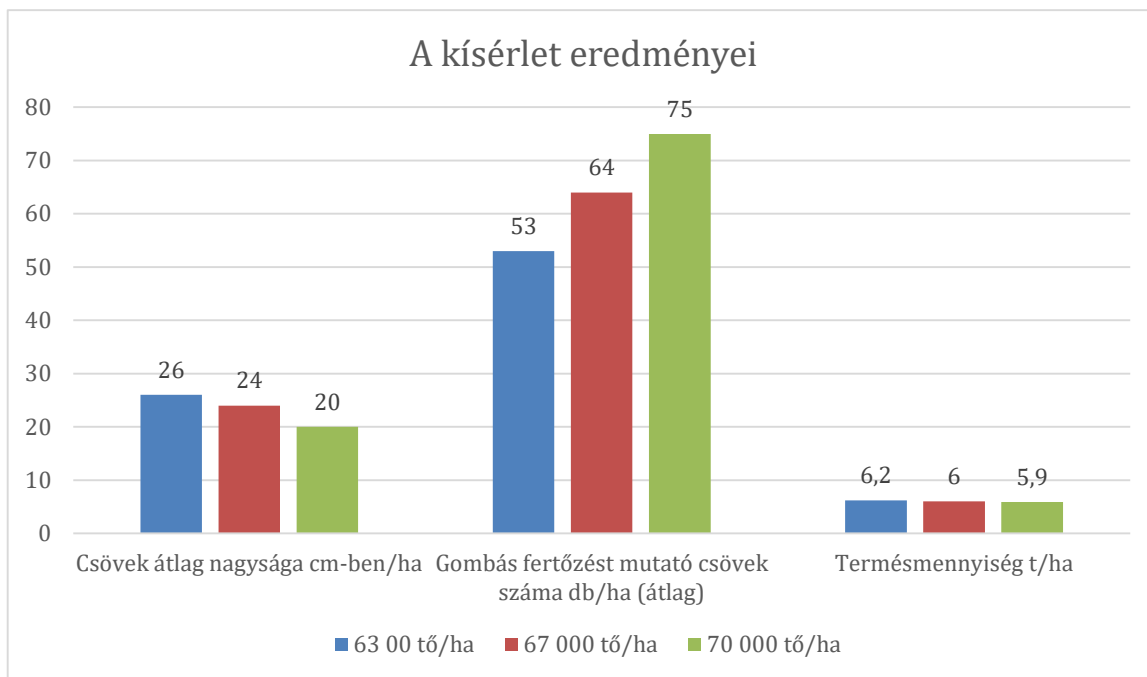
A kelési időszakban nem volt érzékelhető különbség a három tőszám (63 000, 67 000 és 70 000 tő/ha) között. Ennek elsődleges oka az volt, hogy a tavaszi vetés után kedvező mennyiségű és eloszlású csapadék hullott, amely biztosította a magvak egyenletes nedvességellátását és egységes kelését. A talaj felső rétege jól átnedvesedett, így minden sávban egységes, kiegyenlített állomány alakult ki, a növények kezdeti fejlődése között nem volt jelentős különbség, a levelek egészséges, élénkzöld színt mutattak, ami arra utal, hogy a tápanyagellátottság és a gyökérfejlődés kedvezően alakult. Az állomány sűrűsége ekkor még nem gyakorolt érdemi hatást a növények vitalitására, mivel a tavaszi hőmérsékleti és csapadékviszonyok kiegyenlítettek voltak. A növények V4-V6 fenológiai állapotáig mindhárom sávban hasonló magasságot és levélszámot mutattak, és a kezdeti gyomnyomás is alacsony maradt. A növényállományok fejlődése között a címerhányás időszakában jelentkeztek először látható különbségek. A 67 000 tő/ha vetéssűrűségű sávban a kezdeti fejlődés ugyancsak egyenletes volt, a növények kiegyensúlyozott növekedést mutattak (2.

ábra) A legritkább tőszámú (63 000 tő/ha) sávban a növények erősebb szárát, nagyobb levélfelületet és mélyebb gyökérzetet fejlesztettek, ami kedvezőbb vízhasznosulást eredményezett (3. *ábra*). Ezzel szemben a sűrűbb állományban (70 000 tő/ha) több növény mutatta a vízhiányos stressz jeleit, a levelek gyorsabban elszáradtak, a csövek kisebbek maradtak (1. *ábra*), és az érés sem volt egyenletes.

Összességében a kísérlet során végzett megfigyelések azt mutatták, hogy bár a kelés és a korai fejlődés során nem volt különbség a tőszámok között, az aszályos időszak előrehaladtával a ritkább vetés előnye egyre inkább megmutatkozott. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy kedvező tavaszi körülmények esetén a tőszám hatása csak a nyári stresszidőszakban válik mérhetővé, amikor a vízellátottság és a növényi versengés döntően befolyásolja a termés mennyiségét és minőségét.

4. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

A kísérlet eredményeinek a kiértékelésénél 3 fő szempontot vettem figyelembe. Ezek a csövek nagysága, a gombás fertőzést mutató csövek mennyisége és a termésmennyiség. Ennek a három szempontnak az adatai láthatóak az alábbi táblázatban.



1.táblázat: A kísérlet eredményei

Tőszámok	Csövek átlag nagysága/ha	Gombás fertőzést mutató csövek/ha (átlag)	Termésmennyiség/ha
63 000 tő/ha	26 cm	53	6,2 t/ha
67 000 tő/ha	24 cm	64	6 t/ha
70 000 tő/ha	20 cm	75	5,9 t/ha



4.ábra: A 3 különböző sávból szedett minták különbsége

A tőszámkísérlet során kapott eredmények alapján egyértelműen kimutatható, hogy az alacsonyabb vetéssűrűség kedvező hatással volt a kukorica fejlődésére, termésmennyiségére, minőségére és stressztűrésére az aszályos 2025-ös évjáratban. Az adatok szerint a 63 000 tő/ha vetéssűrűség mellett a növények átlagosan 26 cm hosszúságú csöveket fejlesztettek, míg a 67 000 és 70 000 tő/ha sávokban ez az érték 24 cm-re, illetve 20 cm-re csökkent. Ez azt mutatja, hogy a növények a ritkább állományban nagyobb tenyészterülethez és több vízhez, illetve tápanyaghoz jutottak, ami kedvezett a szemképződésnek és a csőteliődésnek.

A gombás fertőzést mutató csövek száma is jól mutatja a tőszám hatását a növényállomány mikroklímájára és egészségi állapotára. A ritkább vetés (63 000 tő/ha) esetében átlagosan 53 darab gombás fertőzést mutató cső/ha volt megfigyelhető, míg a sűrűbb állományban (70 000 tő/ha) ez a szám 75-re emelkedett. A sűrűbb állományban kialakuló zártabb lombkorona magasabb páratartalmú mikroklímát eredményezett, amely kedvez a *Fusarium* fajok és más gombák fertőzésének. Ezzel szemben a ritkább vetés jobb szellőzést biztosított, ami csökkentette a fertőzés kialakulásának valószínűségét.

A termésmennyiség alakulása szintén alátámasztja, hogy a kisebb tőszám aszályos körülmények között előnyösebb lehet. A 63 000 tő/ha sűrűség mellett 6,2 t/ha termésátlagot mértek, míg a 67 000 és 70 000 tő/ha esetén ez 6,0 t/ha és 5,9 t/ha volt. Bár a különbség abszolút értékben nem nagy, agronómiai szempontból jelentős, mivel az alacsonyabb tőszám kevesebb ráfordítással (vetőmag, víz, tápanyag) érte el a legjobb eredményt. A csökkenő hozam a sűrűbb állományban arra utal, hogy a növények versengése a vízért és tápanyagokért fokozódott, ami a szemkitelítődés és a szemszám csökkenését eredményezte.

4.1. Javaslatok

A kísérlet összesített eredményei tehát azt mutatják, hogy aszályos évjáratban a kukoricánál az optimális tőszám inkább a 63 000-67 000 tő/ha tartományban helyezkedik el. Ebben az intervallumban biztosítható a növények számára elegendő tenyészterület, kedvezőbb vízhasznosítás és jobb mikroklíma a csövek fejlődése szempontjából. A magasabb tőszámú

állományok terméspotenciálja elméletben nagyobb lehet kedvező évjáratban, azonban vízhiányos körülmények között a stresszhatás miatt a tényleges hozam visszaesik. A vizsgálat egyben rávilágít arra is, hogy a klímaváltozás hatásaihoz való alkalmazkodásban a tőszám dinamikus beállítása kulcsfontosságú lehet. A precíziós vetéstechnológia segítségével a jövőben lehetőség nyílik arra, hogy a talajnedvesség, a domborzati viszonyok és az előrejelzett időjárás alapján változó tőszámú vetés valósuljon meg. Ez hozzájárulhat a vízhiányos területek hozambiztonságának növeléséhez és a környezeti terhelés csökkentéséhez.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A kísérlet eredményei egyértelműen rávilágítanak arra, hogy az aszályos körülmények között a kukorica esetében a 63 000 tő/ha vetéssűrűség biztosította a legkedvezőbb egyensúlyt a termésmennyiség, a termésminőség és a növényegészség szempontjából. A ritkább állományban a növények nagyobb tenyészterülettel rendelkeztek, így hatékonyabban tudták kihasználni a rendelkezésre álló víz- és tápanyagforrásokat, ami jobb fejlődési feltételeket eredményezett a vegetáció teljes ideje alatt. A nagyobb csomómelekek és az alacsonyabb gombás fertőzési arány arra utalnak, hogy a növények kevesebb abiotikus stresszt szenvedtek el, és kedvezőbb mikroklíma alakult ki az állományban.

Az adatok alapján a sűrűbb vetés (67 000-70 000 tő/ha) növelte ugyan az egységnyi területre jutó növényszámot, azonban fokozta a vízért és tápanyagért folytatott versenyt, ami aszályos évjáratban a hozam és a minőség rovására ment. A zártabb növényállomány miatt a levegőáramlás csökkent, ami kedvezett a gombás betegségek, különösen a *Fusarium* fajok megtelepedésének. Ezzel szemben a ritkább tőszámú sávban a jobb szellőzés és a kedvezőbb talajnedvességi viszonyok egészségesebb növényállományt eredményeztek, ami közvetlenül javította a termés minőségét.

A kísérlet tehát rávilágít arra, hogy a jövőben a tőszám dinamikus, időjáráshoz igazított megválasztása kulcsfontosságú lehet a kukoricatermesztés fenntarthatósága szempontjából. Az optimális tőszám nem állandó érték, hanem az adott év meteorológiai viszonyaitól, a talaj vízmegtartó képességétől és a fajta genetikai tulajdonságaitól függ. Ennek megfelelően

a termelők számára a rugalmas tőszámstratégia bevezetése jelentheti az egyik leghatékonyabb adaptációs eszközt a klímaváltozás hatásaival szemben.

A vizsgálat eredményei azt is alátámasztják, hogy a precíziós mezőgazdasági technológiák alkalmazása, mint például a változó tőszámú vetés, talajnedvesség-monitoring és célzott tápanyag-kijuttatás tovább növelheti a gazdálkodás hatékonyságát. Ezek a technológiák lehetővé teszik a termőhelyi különbségekhez való alkalmazkodást, csökkentik a termelési kockázatokat, és hozzájárulnak a víz- és inputanyag-használat optimalizálásához.

Véleményem szerint a kísérlet sikeresnek tekinthető mivel bizonyította, hogy az aszályos években a ritkább tőszám nemcsak gazdaságilag lehet előnyösebb, hanem agronómiai és környezeti szempontból is fenntarthatóbb megoldást kínál. A tőszámoptimalizálás tehát nem csupán terméshozam-növelő tényező, hanem a klímaváltozásra adott adaptációs válasz is, amely hosszú távon hozzájárulhat a hazai és nemzetközi kukoricatermesztés stabilitásához és versenyképességéhez.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretném őszinte hálámat kifejezni konzulensemnek Dr. Tarnawa Ákosnak, a MATE Növénytermesztési Tudományok Intézete, Agronómiai Tanszék docensének, aki szakdolgozatom elkészítése során értékes szakmai iránymutatásával, türelmével és támogató hozzáállásával segítette munkámat. Tanácsai és útmutatásai nagyban hozzájárultak a dolgozat megvalósításához.

Hálás szívvel köszönöm családomnak a tanulmányaim során nyújtott folyamatos támogatást, bátorítást és szeretetet, amely nélkül ez a munka nem jöhetett volna létre.

7. IRODALOMJEGYZÉK

1. Ainsworth, E. A., & Long, S. P. (2020). *30 years of free-air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation?* *Global Change Biology*, 27(1), 27-49. <https://doi.org/10.1111/gcb.15375>
2. Ainsworth, E. A., & Rogers, A. (2007). *The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: Mechanisms and environmental interactions.* *Plant, Cell & Environment*, 30(3), 258-270. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01641.x>
3. Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., ... & Zhu, Y. (2015). *Rising temperatures reduce global wheat production.* *Nature Climate Change*, 5(2), 143-147. <https://doi.org/10.1038/nclimate2470>
4. Bardgett, R. D., & Caruso, T. (2020). *Soil microbial community responses to climate extremes: resistance, resilience and transitions to alternative states.* *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1794), Article 20190112. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0112>
5. Bartholy, J., & Pongrácz, R. (n.d.). *Regionális éghajlatváltozás - Modelleredmények elemzése a Kárpát-medence térségére* [PDF]. ELTE Meteorológiai Tanszék. Retrieved November 10, 2025, from <https://nimbus.elte.hu/oktatas/metfuzet/EMF024/PDF/01-Bartholy-Pongracz-EMF24.pdf>
6. Bartholy, J., & Pongrácz, R. (2008). *Regional climate projections for the Carpathian Basin: Results from the PRECIS model.* *Időjárás*, 112(3-4), 249-264. <https://www.met.hu/downloads.php?fn=%2Fmetadmin%2Fnewspaper%2F2013%2F07%2F055709504d11a1fe875754a267a7ef08-112-3-4-7-bartholy.pdf>
7. Bindi, M., & Olesen, J. E. (2011). *The responses of agriculture in Europe to climate change.* *Regional Environmental Change*, 11(1), 151-158. <https://doi.org/10.1007/s10113-010-0173-x>
8. Cavalieri-Polizeli, K. M. V., Marcolino, F. C., Tormena, C. A., Keller, T., & de Moraes, A. (2022). *Soil structural quality and relationships with root properties in single and integrated farming systems.* *Frontiers in Environmental Science*, 10, 901302. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.901302>
9. Ceccarelli, S. (2015). *Efficiency of plant breeding.* *Crop Science*, 55(1), 87-97. <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.02.0158>

10. Chang, X., Li, Y., Zhang, Q., Liu, H., Wang, S., & Chen, J. (2024). *Combined application of chemical and organic fertilizers improves nutrient utilization efficiency and reduces nutrient losses in crop production systems*. *Agronomy*, **14**(4), 655. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040655>
11. Crossa, J., Pérez-Rodríguez, P., Cuevas, J., Montesinos-López, O., Jarquín, D., de los Campos, G., ... & Singh, S. (2017). *Genomic selection in plant breeding: Methods, models, and perspectives*. *Trends in Plant Science*, **22**(11), 961-975. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.08.011>
12. Czibere, I., Kovách, I., & Loncsák, N. (2023). Hungarian farmers and the adoption of precision farming. *European Countryside*, **15**(3), 366-380. <https://doi.org/10.2478/euco-2023-0020>
13. De Silva, A. M., Wang, J., Li, Y., & Zhang, H. (2025). Impact of drought on soil microbial communities. *Microorganisms*, **13**(7), 1625. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13071625>
14. Deutsch, C. A., Tewksbury, J. J., Tigchelaar, M., Battisti, D. S., Merrill, S. C., Huey, R. B., & Naylor, R. L. (2018). Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science*, **361**(6405), 916-919. <https://doi.org/10.1126/science.aat3466>
15. Engineer, C. B., Ghaste, M., & Dubey, P. K. (2015). *CO₂ sensing and CO₂ regulation of stomatal conductance: insights from recent advances and future prospects*. *Frontiers in Plant Science*, **6**, 730. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4707055/?utm_source
16. European Environment Agency (EEA). (2016). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016: An indicator-based report*. EEA Report No 1/2016. Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/climate-change-impacts-and-vulnerability-2016>
17. European Environment Agency (EEA). (2020). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2020: An indicator-based report*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2800/660244>
18. FAO. (2016). *Climate change and food security: Risks and responses*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
19. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2018). *The State of Food and Agriculture 2018: Migration, Agriculture and Rural Development*. Rome: FAO. ISBN 978-92-5-130568-3.

20. FAO. (2018). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2018: Building climate resilience for food security and nutrition*. Rome: FAO. Retrieved from <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f5019ab4-0f6a-47e8-85b9-15473c012d6a/content>
21. FAO. (2020). *State of knowledge of soil biodiversity -ú- Status, challenges and potentialities*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cb1928en>
22. FAO. (2020). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2020: Transforming food systems for affordable healthy diets*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. <https://www.unicef.org/media/72676/file/sofi-2020-full-report.pdf>
23. FAO. (2021). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture: Systems at Breaking Point*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/ecb51a59-ac4d-407a-80de-c7d6c3e15fcc/content>
24. Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). *Plant drought stress: Effects, mechanisms and management*. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 185-212. <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>
25. Gardi, M. W., Haussmann, B. I. G., Malik, W. A., Högy, P. (2022). *Effects of elevated atmospheric CO₂ and its interaction with temperature and nitrogen on yield of barley (Hordeum vulgare L.): a meta-analysis*. *Plant and Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05386-5>
26. Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828-831. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1183899>
27. Govaerts, B., Verhulst, N., Castellanos-Navarrete, A., Sayre, K. D., Dixon, J., & Dendooven, L. (2009). *Conservation agriculture and soil carbon sequestration: Between myth and farmer reality*. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 28(3), 97-122. <https://doi.org/10.1080/07352680902776358>
28. Harsányi, E., Bashir, B., Alsilibe, F., Alsafadi, K., Alsalman, A., Széles, A., ... Mohammed, S. (2021). *Impact of Agricultural Drought on Sunflower Production across Hungary*. *Atmosphere*, 12(10), 1339. <https://doi.org/10.3390/atmos12101339>

29. Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). *Temperature extremes: Effect on plant growth and development*. *Weather and Climate Extremes*, 10, 4-10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>
30. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
31. Kimball, B. A. (2016). Crop responses to elevated CO₂ and interactions with H₂O, N, and temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 383-394. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369526616300334?utm_source
32. Kis, A., Pongrácz, R., Bartholy, J., Gočić, M., Milanović, M., & Trajković, S. (2020). Multi-scenario and multi-model ensemble of regional climate change projections for the plain areas of the Pannonian Basin. *Időjárás*, 124(2), 157-190. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2020.2.2>
33. Központi Statisztikai Hivatal. (2023). *Harvest results of main crops, 2022*. Központi Statisztikai Hivatal. <https://www.ksh.hu/s/publications/harvest-results-of-main-crops-2022/>
34. Központi Statisztikai Hivatal. (2024). *Aszályal érintett területek - Fenntartható fejlődési célok, 3.16*. <https://www.ksh.hu/kiadvanyok/fenntarthato-fejlodes-indikatorai/2024/3-16>
35. Kundzewicz, Z. W., Krysanova, V., Dankers, R., Hirabayashi, Y., Kanae, S., Hattermann, F. F., ... Schellnhuber, H.-J. (2016). *Differences in flood hazard projections in Europe - their causes and consequences for decision making*. *Hydrological Sciences Journal*, 62(1), 1-14. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1241398>
36. Lakatos, M., Bihari, Z., Izsák, B., & Szentés, O. (2021). *Globális és hazai éghajlati trendek, szélsőségek változása: 2020-as helyzetkép*. *Scientia et Securitas*, 2(2), 164-171. <https://doi.org/10.1556/112.2021.00037>
37. Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623-1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
38. Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875-5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>

39. Lal, R. (2020). Regenerative agriculture for food and climate. *Journal of Soil and Water Conservation*, 75(5), 123A-124A.
40. Lal, R. (2020). *Soil organic matter and water retention*. *Agronomy Journal*, 112(5), 3265-3277. <https://doi.org/10.1002/agj2.20282>
41. Lal, R. (2012). *Climate change and soil degradation: Mitigation by sustainable management of soils and other natural resources*. *Agricultural Research*, 1(3), 199-212. <https://doi.org/10.1007/s40003-012-0031-9>
42. Leakey, A. D. B., Ainsworth, E. A., Bernacchi, C. J., Rogers, A., Long, S. P., & Ort, D. R. (2009). Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: Six important lessons from FACE. *Journal of Experimental Botany*, 60(10), 2859-2876. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp096>
43. Lesk, C., Rowhani, P., & Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529(7584), 84-87. <https://doi.org/10.1038/nature16467>
44. Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>
45. Lichtfouse, E. (Ed.). (2009). *Sustainable Agriculture*. Springer.
46. Life-CLIMCOOP. (2021, december 8). *Magyarország éghajlata napjainkban - A klímaváltozás hatásai és várható szélsőségek*. <https://life-climcoop.hu/2021/12/08/magyarország-eghajlata-napjainkban-a-klimavaltozas-hatasara-milyen-szelsoseges-idojarasi-esemenyek-varhatok-magyarorszagon-es-hogyan-hatnak-az-eletunkre/>
47. Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616-620. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
48. Madarász, B. (Szerk.). (2015). *Környezetkímélő talajművelési rendszerek Magyarországon - elmélet és gyakorlat*. MTA CSFK Földrajztudományi Intézet. https://hungarian-geography.hu/konyvtar/kiadv/ktrm/pdf/KTRM_2015_teljes.pdf?utm_source
49. Magyar Tudományos Akadémia. (2024). *A jelenkori klímaváltozás hatásairól és az alkalmazkodás lehetőségeiről: MTA állásfoglalás az Alkotmánybíróság számára*. Magyar Tudományos Akadémia.

50. Magyarország Kormánya. (2018). *Második Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia (NÉS-2) 2018-2030, kitekintéssel 2050-ig*. Országgyűlés által elfogadott változat. https://vizeink.hu/wp-content/uploads/2022/10/VGT3/hatteranyagok/1_6_hatteranyag_NES_Ogy_által_elfogadott.pdf
51. Másfél fok.hu. (2022, március 11). *IPCC: Magyarországon a kukorica akár 60-80%-kal is visszaeshet a klímaváltozás miatt*. <https://masfelfok.hu/2022/03/11/ipcc-jelentes-klimavaltozas-vilag-eleskamrai-magyarorszag-kukorica-mezogazdasag/>
52. Myers, S. S., Smith, M. R., Guth, S., Golden, C. D., Vaitla, B., Mueller, N. D., ... & Huybers, P. (2017). Climate change and global food systems: Potential impacts on nutrition. *Annual Review of Public Health*, 38, 259-277. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-031816-044356>
53. Myers, S. S., Zanutti, A., Kloog, I., Huybers, P., Leakey, A. D. B., Bloom, A. J., ... & Schwartz, J. (2014). Increasing CO₂ threatens human nutrition. *Nature*, 510(7503), 139-142. <https://doi.org/10.1038/nature13179>
54. NASA. (2023). *Global Climate Change: Vital Signs of the Planet*. <https://climate.nasa.gov>
55. NOAA. (2023). *Global Monitoring Laboratory: Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends>
56. Olesen, J. E., & Bindi, M. (2002). Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy*, 16(4), 239-262. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00004-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00004-7)
57. Olesen, J. E., Trnka, M., Kersebaum, K. C., Skjelvåg, A. O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., & Micale, F. (2011). Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy*, 34(2), 96-112. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.11.003>
58. Országos Meteorológiai Szolgálat. (2023). *Éves és évszakos középhőmérsékletek változása - Hőmérséklet (1901-)*. Retrieved November 10, 2025, from https://www.met.hu/eghajlat/eghajlatvaltozas/megfigyelt_hazai_valtozasok/homerseklet_es_csapadektrendek/kozephomerseklet/index.php
59. Országos Meteorológiai Szolgálat. (2023). *Éves és évszakos csapadékösszegek változása (1901-2020)*. Retrieved November 10, 2025, from

https://www.met.hu/eghajlat/eghajlatvaltozas/megfigyelt_hazai_valtozasok/homerseklet_es_csapadektrendek/csapadekosszegek/index.php

60. Pinke, Z., Decsi, B., Demeter, G., Kalicz, P., Kern, Z., & Ács, T. (2024). *Continental lowlands face rising crop vulnerability: Structural change in regional climate sensitivity of crop yields, Hungary (Central and Eastern Europe), 1921-2010. Regional Environmental Change*, 24, Article 33. <https://doi.org/10.1007/s10113-024-02192-w>
61. Pierpaoli, E., Carli, G., Pignatti, E., & Canavari, M. (2013). Drivers of precision agriculture technologies adoption: A literature review. *Procedia Technology*, 8, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.11.010>
62. Ray, D. K., Gerber, J. S., MacDonald, G. K., & West, P. C. (2015). Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature Communications*, 6, 5989. <https://doi.org/10.1038/ncomms6989>
63. Rosenzweig, C., Mbow, C., Barioni, L. G., Benton, T. G., Herrero, M., Krishnapillai, M., ... & Wiebe, K. (2020). Climate change responses benefit from a global food system approach. *Nature Food*, 1(2), 94-97. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37128000/>
64. Rötter, R. P., & van de Geijn, S. C. (1999). Climate change effects on plant growth, crop yield and livestock. *Climate Research*, 11(1), 1-20. https://www.researchgate.net/publication/281200577_Climate_change_effects_of_plant_growth_crop_yield_and_livestock
65. Scheben, A., & Edwards, D. (2017). Genome editors take on crops. *Science*, 355(6330), 1122-1123. <https://doi.org/10.1126/science.aal4680>
66. Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, 12(19), 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>
67. Smith, M. R., & Myers, S. S. (2018). Impact of anthropogenic CO₂ emissions on global human nutrition. *Nature Climate Change*, 8(9), 834-839. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0253-3>
68. Smith, P., House, J. I., Bustamante, M., Sobocká, J., Harper, R., Pan, G., ... & Paustian, K. (2015). Global change pressures on soils from land use and management. *Global Change Biology*, 21(2), 1008-1028. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.13068>

69. Smith, P., Soussana, J. F., Angers, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, D. P., ... & Paustian, K. (2019). *How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal*. *Global Change Biology*, 26(1), 219-241. <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>
70. Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J. V., & Barbosa, P. (2015). European drought climatologies and trends based on a multi-indicator approach. *Global and Planetary Change*, 127, 50-57. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.01.012>
71. Taylor, C. A., & Schlenker, W. (2021). *Environmental drivers of agricultural productivity growth: CO₂ fertilization of US field crops* (NBER Working Paper No. 29320). National Bureau of Economic https://www.nber.org/system/files/working_papers/w29320/w29320.pdf
72. Tóth, E., Magyar, M., Cseresnyés, I., Dencső, M., Laborczi, A., Szatmári, G., & Koós, S. (2025). *Climate-smart agricultural practices—Strategies to conserve and increase soil carbon in Hungary*. *Land*, 14(6), 1206. <https://doi.org/10.3390/land14061206>
73. Trnka, M., Rötter, R. P., Ruiz-Ramos, M., Kersebaum, K. C., Olesen, J. E., Žalud, Z., & Semenov, M. A. (2014). Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. *Nature Climate Change*, 4(7), 637-643. <https://doi.org/10.1038/nclimate2242>
74. Várallyay, G. (2015). *Soils, as the most important natural resources in Hungary (potentialities and constraints) - A review*. *Agrokémia és Talajtan*, 64(2), 321-338. <https://doi.org/10.1556/0088.2015.64.2.2>
75. Wing, I. S., De Cian, E., & Mistry, M. N. (2021). Global vulnerability of crop yields to climate change. *Journal of Environmental Economics and Management*, 109, 102462. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102462>
76. Witcombe, J. R., Hollington, P. A., Howarth, C. J., Reader, S., & Steele, K. A. (2007). Breeding for abiotic stresses for sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 703-716. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2610105/?utm_source
77. WMO. (2022). *State of the Global Climate 2022*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.

78. Xing, Y., Wang, X. (2024). *Precision Agriculture and Water Conservation Strategies for Sustainable Crop Production in Arid Regions*. *Plants*, 13(22): 3184. DOI:10.3390/plants13223184.
79. Yang, X., Hu, H., Yang, G.-W., et al. (2023). *Crop rotational diversity enhances soil microbiome network complexity and multifunctionality*. *Geoderma*, 431, 116562. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116562>
80. Zhao, C., Liu, B., Piao, S., Wang, X., Lobell, D. B., Huang, Y., ... & Asseng, S. (2017). Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(35), 9326-9331. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>

MATE Szervezeti és Működési Szabályzat

III. Hallgatói Követelményrendszer

III.1. Tanulmányi és Vizsgaszabályzat

6.13. sz. függelék: A MATE egységes szakdolgozat / diplomadolgozat / záródolgozat / portfólió készítési útmutatója

4.2. sz. melléklete: Nyilatkozat a záródolgozat/szakdolgozat/diplomadolgozat/portfólió nyilvános hozzáféréseiről és eredetiségéről (módosítva: 2025. október 16.)

NYILATKOZAT

a szakdolgozat nyilvános hozzáféréseiről és eredetiségéről

A hallgató neve: Británszki Tamás József
A Hallgató Neptun kódja: I2YXE2
A dolgozat címe: A klímaváltozás hatása egyes növények termésmennyiségére és minőségére
A megjelenés éve: 2025
A konzulens intézetének neve: Növénytermesztési Tudományok Intézet
A konzulens tanszékének a neve: Agronómiai 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. Továbbá kijelentem, hogy a dolgozat elkészítése során alkalmazott mesterséges intelligencia-eszközök (pl. szöveggenerálás, nyelvi javítás, fordítás, adatelemzés) használata nem helyettesítette a saját kutatási és alkotói munkámat, azok alkalmazását a források között vagy a módszertani részben feltüntettem, és a szakmai-etikai elvárásoknak megfelelően jártam el.

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 tulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem könyvtári repozitóri rendszerébe. Tudomásul veszem, hogy a megvédett és

- nem titkosított dolgozat a védést követően
- titkosításra engedélyezett dolgozat a benyújtásától számított 5 év eltelte után nyilvánosan elérhető és kereshető lesz az Egyetem könyvtári repozitóri rendszerében.

Kelt: 2025 év 11 hó 05 nap

Británszki Tamás József
Hallgató aláírása

Hallgatók, doktoranduszok nyilatkozata mesterséges intelligencia (MI) alkalmazásáról

1. Általános adatok

Hallgató neve:	Británszki Tamás József
Neptun-kódja:	I2YXE2
Képzési szint (a megfelelőt jelölje X-szel):	<input checked="" type="checkbox"/> BSc/BA <input type="checkbox"/> MSc/MA <input type="checkbox"/> Doktori (PhD) <input type="checkbox"/> Egyéb:
Tantárgy neve/kódja*:	
A munka címe:	A klímaváltozás hatása egyes növények termésmennyiségére és minőségére

* doktori értekezés esetén nem kitöltendő

2. Nyilatkozat az MI használatáról

Alulírott, etikai felelősségem teljes tudatában az alábbi nyilatkozatot teszem:

(Kérjük, válasszon egyet az alábbi lehetőségek közül!)

A) Nem alkalmaztam mesterséges intelligencia rendszert vagy szolgáltatást.

(Amennyiben ezt jelölte, a további táblázatok kitöltése nem szükséges.)

B) Alkalmaztam mesterséges intelligencia rendszert vagy szolgáltatást.

(Kérjük, töltsse ki a vonatkozó táblázatokat!)

3. A mesterséges intelligencia használatának részletezése

I. TÁBLÁZAT: Asszisztensi vagy kisebb mértékű felhasználás (pl. fordítás, nyelvi korrektúra, ötletelés stb.)

(Ezen felhasználások esetében a konkrét promptok és válaszok csatolása nem szükséges.)

A felhasználás célja	Alkalmazott MI-eszköz neve és verziója	Érintett rész (ha nem a szöveg egészére vonatkozik)
fordítás, forrás keresés	CHAT-GPT-5	

II. TÁBLÁZAT: Jelentős tartalmi hozzájárulás (pl. egy teljes ábra vagy egy hosszabb szövegrész generálása)

(Ezekben az esetekben a felhasznált kulcsfontosságú promptok és az MI által adott nyers válaszok dokumentálása és a munka mellékletében való csatolása szükséges.)

A felhasználás célja	Alkalmazott MI-eszköz neve,	Az érintett fejezet / ábra / táblázat pontos sorszáma	A prompt-naplót tartalmazó melléklet

	verziója, elérhetősége		bejegyzésének sorszám

3/A. Oktató által előírt kiegészítő szabályok (ha vannak)

Amennyiben az adott tantárgy oktatója vagy témavezetője az MI-eszközök használatára vonatkozóan külön szabályokat vagy elvárásokat határozott meg, kérjük, az alábbi mezőben foglalja össze ezeket:

Pl. az MI használatának tilalma bizonyos feladattípusokra; csak konkrét eszköz használatára engedélyezett; eltérő hivatkozási elvárások; dokumentációs forma stb.

Oktató vagy témavezető által előírt szabályok:

.....

.....

.....

.....

4. Minden hallgatóra vonatkozó nyilatkozat:

Kijelentem, hogy az MI által esetlegesen generált tartalmakat minden esetben kritikailag felülvizsgáltam, szerkesztettem és a munkába illesztettem. A leadott munka minden eleméért, annak eredetiségéért és tudományos helytállóságáért teljes körű felelősséget vállalok. Tudomásul veszem, hogy a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem a benyújtott munkát mesterséges intelligencia detektorral ellenőrizheti, és eljárást kezdeményezhet, amennyiben a nyilatkozatom valótlan vagy hiányos.

Kelt: GÖDÖLLŐ....., 2025. 17..... hó 11..... nap

Britenki Tamas

Hallgató aláírása

Mélységben az MI használata ellenőrzésére

Tamara Alon

Konzulens/Témavezető aláírása

NYILATKOZAT

Británszki Tamás József (név) (hallgató Neptun azonosítója: I2YXE2) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a szakdolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A szakdolgozatot a záróvizsgán történő védeésre javaslom / nem javaslom¹.

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

Kelt: 2025 év 11 hó 11 nap

Tamás József
belső konzulens

¹ A megfelelő aláhúzendó.

² A megfelelő aláhúzendó.