

SZAKDOLGOZAT

Gombos Karolin

2023



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

Szent István Campus

Növénytermesztési-tudományok Intézet

Mezőgazdasági mérnök szak, BSc.

Levelező tagozat

**A GYOMHATÁS, MINT BIOTIKUS STRESSZ HATÁSA A FOTOSZINTÉZISRE ÉS
A NÖVEKEDÉSRE SZEMESCIROK (SORGHUM BICOLOR) ESETÉBEN**

Konzulens: **Dr. Balogh János**

egyetemi tanár

Növényélettan és Növényökológia Tanszék

Készítette: **Gombos Karolin**

Gödöllő

2023

Tartalomjegyzék

BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS	4
1. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	6
1.1. A CIROK BEMUTATÁSA.....	6
1.1.1. <i>A cirok származása és morfológiája</i>	<i>6</i>
1.1.2. <i>A cirok helye a globális gabonatermesztésben</i>	<i>7</i>
1.1.3. <i>A ciroktermesztés hazai helyzete.....</i>	<i>8</i>
1.2. A CIROK TERMESZTÉSTECHNOLÓGIÁJA	10
1.2.1. <i>A cirok gyomviszonyai</i>	<i>11</i>
1.2.2. <i>A cirok gyomirtása.....</i>	<i>11</i>
1.3. A FOTOSZINTÉZIS.....	12
1.3.1. <i>A napsugárzás és a fotoszintetikus pigmentek</i>	<i>14</i>
1.3.2. <i>A fényenergia megkötése</i>	<i>16</i>
1.3.3. <i>A fotoszintetikus elektrontranszportlánc</i>	<i>17</i>
1.3.4. <i>A fluoreszcencia jelensége.....</i>	<i>19</i>
1.3.5. <i>A szénredukciós szakasz</i>	<i>20</i>
1.3.6. <i>A széndioxid redukciója C4-es növényekben</i>	<i>21</i>
1.4. A NÖVÉNYI STRESSZ	22
1.5. A FLUORESCENCIA INDUKCIÓ	24
2. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	26
2.1. A KISPARCELLÁS KÍSÉRLET ELŐKÉSZÍTÉSE	26
2.1.1. <i>A kisparcellás kísérlet megvalósítása</i>	<i>27</i>
2.2. FLUORESCENCIAMÉRÉS.....	29
2.3. FRISS ZÖLDTÖMEG MÉRÉSE.....	30
2.4. SZÁRÍTÓSZEKRENYES MÉRÉS.....	30
2.5. ADATFELDOLGOZÁS	31
3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK	32
3.1. A FRISS ZÖLDTÖMEG MÉRÉSÉNEK EREDMÉNYEI	32
3.2. A SZÁRAZTÖMEG MÉRÉSÉNEK EREDMÉNYEI.....	33
3.3. A FLUORESCENCIAMÉRÉS EREDMÉNYEI	35
4. ÖSSZEFOGLALÁS.....	40
5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	42
IRODALOMJEGYZÉK.....	43
ÁBRÁK ÉS TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE	46
MELLÉKLETEK	47

Bevezetés és célkitűzés

Az ENSZ közgyűlése a 2023-as évet a köles nemzetközi évének nyilvánította (International Year of Millets – IYM 2023). A programban szereplő gabonák a kölesféléken kívül magukban foglalják a cirkot is, melyre az angol nyelvben a latin eredetű *sorghum* név mellett a *great millet* („nagy köles”) elnevezés is használatos. Az ENSZ Élelmezésügyi és Mezőgazdasági Szervezete (FAO) vezetésével azt tűzték ki célul, hogy felhívják a figyelmet az alternatív gabonák világelelmezésben rejlő potenciáljára. A köles és a cirok mellett szóló legfőbb érvek között szerepel, hogy számos táplálkozási és egészségügyi előnnyel rendelkeznek, ellenálló, kedvezőtlen és változó klimatikus körülmények között is termesztethők. Termesztésük fenntartható, munkahelyeket teremt, és nem utolsó sorban csökkenti a termesző országok gabonaimportnak való kiszolgáltatottságát. Mindezek alkalmassá teszik ezt a gabonacsoportot, hogy globálisan hozzájáruljon az élelmiszerbiztonsághoz. Az IYM 2023 azt reméli, hogy fel tudja kelteni a társadalom és a politikai döntéshozók érdeklődését – és támogatását – az alternatív gabonafélék iránt (FAO 2023 – <https://www.fao.org/millets-2023/en>).

Jövendőbeli mezőgazdasági mérnökként a személyes érdeklődésem középpontjában is azok a növények állnak, melyek egyrészt képesek alkalmazkodni a várhatóan bekövetkező szárazabb hazai klímához és aszályosabb időszakban is kielégítő terméshozamot várhatunk tőlük, másrészt termesztésbe vonásukkal elősegíthetjük a növénytermesztési ágazat fenntarthatóbbá tételét. Azt gondolom, hogy a cirok vetésforgóba állításával nő a biodiverzitás, „több lábon állnak” a gazdák, globálisan nézve pedig csökkenhetnek az éhínségek, mivel a cirok könnyen hozzáférhető állati takarmányt és olcsó gabonaalternatívát jelent. A növénytermesztésben az egyik legnagyobb kihívást a gyomok jelenléte adja, ezek hatékony és környezetkímélő módon történő visszaszorítása kulcsfontosságú a fenntartható mezőgazdaság szempontjából.

Szakdolgozatomban azt vizsgálom, hogy a gyomhatás, mint biotikus stressz milyen hatással van a szemes cirok [*Sorghum bicolor*, (L.) Moench.] fotoszintézisére és növekedésére. A gyomosodás következtében a fő növénynél tápanyag- és vízhiány alakul ki, mely a növekedésben és a fotoszintetikus paraméterekben is megjelenik. A gyomirtószer használata szintén megviseli a főnövényt és visszaveti a fejlődésben, azaz stresszt okoz. Az általam vizsgált kérdés az, hogy a gyomirtószer használata vagy a gyomok jelenléte okoz-e

nagyobb stresszt a ciroknak, melyik veti vissza jobban a növény fejlődését? Más megfogalmazásban: hogyan teljesít a cirok a gyomokkal szemben? Az elvégzett kísérlet során arra szeretnék rámutatni, hogy a mechanikai gyomirtás előnyösebb a cirok fotoszintetikus teljesítménye szempontjából, mint a herbicides kezelés. Továbbá felállítottam egy hipotézist, ami szerint a gyomirtószer jobban csökkenti a fotoszintetikus teljesítményt, mint a gyomok jelenléte.

1. Szakirodalmi áttekintés

1.1. A cirok bemutatása

1.1.1. A cirok származása és morfológiája

A cirok kultúrnövényként való termesztésének kezdete kb. 5000 évvel ezelőttre tehető. Géncentruma Szudán (De Candolle), esetleg Etiópia (Vavilov) lehetett. Az afrikai eredetből következik, hogy különösen jó a hő- és aszálytűrő képessége. Vad őse a *Sorghum arundinaceum*, a "szavanna füve". A domesztikáció legjelentősebb eredménye, hogy a kultúrváltozat betakarításig megtartja a magját. Afrikában, a szubszaharai régióban ma is a legfontosabb gabonaféle. A Kárpát-medencében a 18-19. században jelent meg, akkor még szegélynövényként alkalmazták. Az Egyesült Államokban eleinte melasz készítés, majd takarmányozás céljából termesztették. Manapság azokon a vidékeken van jelentősége, ahol az éghajlat túl száraz a kukorica termesztéséhez (Surányi, 2018).

A cirok egyszikű trópusi, szubtrópusi növény, a pászitfűfélék (Poaceae) családjába tartozik. Termesztett rasszai a bicolor, guinea, caudatum, kafir, és durra. C4-es fotoszintézist folytat, emiatt hatékonyabb a szén-dioxid megkötése és magasabb a napi szárazanyaggyarapodása. Rendkívül jól tűri a meleget és a szárazságot. Nagy és sűrű mellékgyökérendszert fejleszt, ezáltal több vizet képes felszívni. Tömött, hengeres, náduszokkal tagolt szára viaszos. Leveli a kukoricáéhoz hasonló, felületük szintén viasszal borított, így kevesebbet párologtat a növény. Bugavirágzatában a virágok nyílása a hajnali órákra esik, mely szintén a meleg éghajlathoz való alkalmazkodás jele. Az elpusztult buga helyett képes a felső náduszokból elágazásokat hozni és azokból új virágzatot növeszteni. Különleges tulajdonsága, hogy szárazságstressz hatására nyugalmi állapotba kerül, és amint vízhez jut folytatja a növekedést. Szélbeporzású, ön- és idegentermékenyülés egyaránt jellemző rá. A szemtermés változatos színű, fehértől a sárgán és rózsaszínen át a sötétbarnáig terjed, a tannintartalom a sötétebb színű magokban magasabb (1. ábra). A cséplést segíti, hogy a szemet többnyire nem borítja pelyva (Antal, 2005).



1. ábra

Cirok szemtermésének színváltozatai

(Forrás: Sorghum Checkoff – Sorghum Grain Color

<https://www.sorghumcheckoff.com/agronomy-insights/sorghum-grain-color-2/>)

1.1.2. A cirok helye a globális gabonatermesztésben

Világviszonylatban a kukorica, búza, rizs és árpa után a cirok az ötödik legnagyobb mennyiségben termesztett gabonanövény, 2022-ben 58.5 millió tonna volt a világ ciroktermése (Statista 2023)

A vezető ciroktermesztő ország az USA (11.375 tonna a 2021/2022-es termesztési évben – Statista 2023). Ott az eddig felsorolt hasznosítási módokon felül nagy hagyománya van a cirok bioetanolként való felhasználásának, és előszeretettel készítenek belőle – gluténmentes – alkoholos italokat, elsősorban sört és whiskyt, valamint kutatások folynak akvakultúrában való használatáról is (Sorghum Checkoff, <https://www.sorghumcheckoff.com/sorghum-101/what-is-sorghum/>).

A cirok roppantva vagy darálva alkalmas abraktakarmánynak, de csak a fehér színű változata, a sötétebb változatoknak túl magas a tannin (csersav) tartalma. Fehérjetartalma valamivel magasabb a kukoricáénál. Táplálkozási célra is inkább a fehér magvú fajták vannak használatban, a sötétebb magvú változatok az afrikai kontinensen elterjedtek, ott is elsősorban azért, mert ezeket a madarak a magas tannintartalom miatt kevésbé károsítják. Magja nem tartalmaz glutént, így kiemelt helye van a ciroknak a gluténmentes táplálkozásban. (Antal, 2005).

A cirok európai népszerűsítéséért alakult meg Brüsszelben 2017 szeptember 26-án a Sorghum ID szakmaközi szervezet. Célul tűzték ki a cirokágazat érdekképviselőt az európai uniós szervek és az országok kormányai felé, valamint a cirok népszerűségének növelését és

a benne rejlő piaci lehetőségek kihasználásának elősegítését (Sorghum ID, <https://www.sorghum-id.com/hu/bemutakozas/>).

1.1.3. A ciroktermesztés hazai helyzete

Egyre több szakember gondolja úgy, hogy a klímaváltozás hatására hazánkban is nőni fog az extrém magas hőmérséklettel járó aszályos időszakok száma. Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change) 2013-ban adta ki ötödik jelentését, mely igazolja a globális felmelegedés tendenciájának folytatódását. Az okok egyértelműen az antropogén hatásokban keresendők. Ezek közül is kiemelt helyen szerepel a növekvő energiaigények fosszilis energiákból való kielégítése és az emberi tevékenységek nyomán légkörbe kerülő metán megnövekedett szintje (Bartholy, et al., 2014).

Mivel a globális klímamodellek nem adnak elég pontos adatokat, ezért az ELTE Meteorológiai Tanszékének kutatói készítettek egy, a Kárpát-medencére vonatkozó regionális klímamodelt. A tanulmány a két legfontosabb meteorológiai tényezőre, a hőmérsékletre és a csapadékra fókuszált. Megállapították, hogy a 21. század végéig jelentős felmelegedés várható hazánkban, gyakori extrém szárazsággal kísérve a nyári időszakban. Télen a kiugróan alacsony hőmérsékleti értékek csökkenésével és növekvő csapadékkal számolhatunk (Bartholy, et al., 2014).

A kapott eredmények alapján a nyári középhőmérséklet (az 1961-1990-es referencia periódushoz képest) 2050-re 3,7 °C-kal, 2100-ra pedig 6,0-8,0 °C-kal magasabb lesz. Az átlagos csapadékösszeg nyáron 2050-re 17%-kal, 2100-ra 43-58%-kal lesz alacsonyabb. Továbbá növekedni fog az extrém meleg nyári napok száma és a csapadék nélküli napok száma, valamint az aszályos időszakok hossza (Bartholy, et al., 2014).

A fentiekből következik, hogy a kukorica termesztése egyre kevésbé fog megtérülni. Ennek legfőbb oka, hogy hosszan tartó csapadékhiányra termés kieséssel reagál, és ez problémát jelent a hazai állatállomány takarmányellátása szempontjából. Beltartalmi értékeit nézve a kukorica részben vagy egészben kiváltható a szemes cirokkal, mégpedig alacsonyabb önköltséggel. (Hasonló a helyzet a tömegtakarmányok terén is, silókukorica és a silócirok viszonylatában.) A cirok további előnyei közé tartozik, hogy kevesebb kártevője van, gombabetegségek nem jellemzők rá, így a termés toxinokkal kevésbé szennyezett. Termesztéséhez speciális gépberuházásra nincs szükség, a vetésforgóba jól beilleszthető (2.

ábra). Nem utolsó sorban a cirok garantáltan GMO-mentes, mivel kevésbé jelentős növény révén nincsenek még rá géntechnológiai eljárások kifejlesztve. Számítások szerint a cirok vetésterületének növelésével az országban rendelkezésre álló takarmányalap is nőne. (Agrárunió, 2023).

A cirok hazai elterjedésének egyik akadálya a növény negatív megítélése, mely abból ered, hogy az elmúlt évtizedekben korszerűtlen hibridek terjedtek el: alacsony termőképesség, gyenge beltartalmi értékek, magas tannintartalom jellemezte ezeket a fajtákat. Az utóbbi évek nemesítő munkájának köszönhetően azonban megjelentek a tanninmentes hibridek, ezek már gond nélkül beilleszthetők a takarmányreceptúrába. A cirok használható még madárelesésként, valamint emberi táplálkozásban is (mint GMO- és gluténmentes élelmiszer), és folyamatosan bővül az exportpiac is. Az utóbbi években elindult a hazai integráció a ciroktermelés felfuttatására. Termesztésnél figyelni kell az egyszikű gyomok irtására, lehetőleg preemergens kezelés formájában. Betakarításnál is figyelni kell, a mag az ideális 16-17%-os szemnedvesség tartalmat már akkor eléri, amikor a levél és a szár még zöld, ezért gyakran túl sokáig várnak az aratással, a szem nedvességet vesz fel, a termés rosszabb minőséggel kerül betakarításra (Agronapló 2021).



2. ábra
Szemes cirok Komádi (Hajdú-Bihar) határában, 2023 augusztus
(Forrás: saját fotó)

Az elmúlt évek adatai alapján elmondhatjuk, hogy hazánkban (és egész Európában) a cirok vetésterülete folyamatosan nő, és mostanra elérte azt a kritikus tömeget, ami alapján

biztonságosnak mondható a termesztése – a termelők számára elérhető a megfelelő minőségű vetőmag, tudják értékesíteni az előállított terménymennyiséget, és az állattartók, takarmány-előállítók is számíthatnak az ellátásbiztonságra. Megfelelő termesztéstechnológia alkalmazása mellett a szemes cirok termése 5-7 tonna között alakul hektáronként, de intenzív viszonyok mellett a 8-10 tonnát is elérheti (Avar, 2022).

1.2. A cirok termesztéstechnológiája

A cirok talajjal szemben nem igényes, bírja a sótartalmat és az enyhén savanyú talajt (4,5 pH-ig), sekély termőrétegű talajon viszont nem termesztendő. Érdekeség, hogy bár szárazsághoz alkalmazkodott növényről van szó, a nedves talajokat is kifejezetten jól tűri. Szubtrópusi eredetéből adódóan melegigényes (termofil) növény, a termesztés szempontjából ez az egyik legmeghatározóbb tulajdonsága. A hideg talajt nem tűri, a mag csírázásához minimum 12 °C, de inkább 14-15 °C szükséges (Antal, 2005).

Elővetemény tekintetében jó, ha korán lekerülő növény után vetjük, vetéskor nagyon fontos a meleg, nedves, morzsás magágy. Hűvösebb időben vontatott a csíranövény fejlődése, ezért érdemes a vetéssel május elejéig várni. Ahhoz, hogy a gyökerek minél mélyebbre tudjanak hatolni elengedhetetlen a megfelelő mélységben lazított talaj. A vetés 2 cm-es mélységbe és 24-36 cm-es sortávra történik, a csíraszám megválasztásánál figyelembe kell venni, hogy a cirok vetőmag csírázóképesége elmarad más vetőmagokétól, a hiányos kelést viszont bokrosodással kompenzálni tudja. Betegségek közül a gombafertőzések a legjelentősebbek, ezek ellen csávázással lehet védekezni. A rovarkártevők ellen leginkább a csírázás és kelés időszakában kell védekezni (Antal, 2005). Betakarításnál előnyösebb az alacsonyabb termet (< 1m), ennek elérését a nemesítésben törpeséggének segítik (Antal, 2005).

A manapság hazánkban alkalmazott hibridek rövid tenyészidejűek, így megfelelő nedvességtartalom mellett lehet őket betakarítani (a hosszú tenyészidejű fajták hajlamosak a befülledésre), a kora őszi fagyok is kevésbé fenyegetik őket (Antal, 2005).

A cirok termőképessége közepkötött mezőségi talajokon 4-9 t/ha ez nagymértékben függ az alkalmazott fajtától/hibridtől és a termesztés színvonalától (extenzív vagy intenzív) (Antal, 2005).

1.2.1. A cirok gyomviszonyai

A kultúrnövénynek és a vetésterületen élő gyomnövényeknek ugyanazokra az erőforrásokra van szükségük a megfelelő fejlődéshez: fényre, vízre és ásványi tápanyagokra. Ahhoz, hogy szükségletüket kielégítsék, egymással fognak versengeni, közöttük kompetíció lép fel. Vizsgálatok igazolták, hogy a gyomborítottság növekedése minden esetben a hozam csökkenéséhez vezet (Birkás, 2017).

Raunkiaer dán botanikus a növényeket szaporodási és túlélési stratégiájuk alapján különböző csoportokba osztotta. Ezeket az életformacsoportokat Ujvárosi Miklós módosította, ezzel segítve a növénytermesztőket a gyomok elleni küzdelemben (Birkás, 2017).

A cirok tipikus gyomnövényei a magról kelő, nyárutói egyévesek, azaz a T4-es gyomok. Ezek a cirokkal egyidőben kelnek, hasonlóan melegigényesek és rendkívül jól bírják a szárazságot. Legjelentősebbek az *Amaranthus* spp. – disznóparéj fajok, a *Chenopodium* spp. – libatop fajok, a *Datura stramonium* – csattanó maszlag, az *Ambrosia artemisiifolia* – parlagfű, egyszikűek közül pedig az *Echinochloa crus-galli* – kakaslábfű és a *Digitaria sanguinalis* – pirók ujjasmuhar. Gondot okozhatnak még az évelő gyomfajok, a G1-es *Sorghum halepense* – fenyércirok és a G3-as *Cirsium arvense* – mezei aszat és *Convolvulus arvensis* – aprószulák. Ezek föld alatti áttelelő képlettel (rizómával, szaporítógyökérrel) rendelkeznek, ezek segítségével vegetatív úton szaporodnak. A talajműveléshez jól alkalmazkodtak, ezért nagyon nehezen irthatók (Birkás, 2017).

1.2.2. A cirok gyomirtása

Cirok esetében a kezdeti fejlődés vontatott, rossz az állomány gyomelnyomó képessége, mindenképpen szükség van gyomirtásra. A növény gyomirtószerekre kimondottan érzékeny, ezért fontos a hatóanyag körültekintő megválasztása és az előírányzott dózis betartása. A gyomok visszaszorítását pre- és posztemergensen is végezhetjük, utóbbit a cirok 15-20 leveles állapotában érdemes elvégezni (Antal, 2005).

Az integrált növényvédelem szellemében első körben agrotechnikai eljárásokkal segítjük a növényt abban, hogy fel tudja venni a versenyt a gyomkonkurenciával. Megfelelő talajelőkészítéssel és a vetés szakszerű elvégzésével gyorsíthatjuk a cirok kezdeti fejlődését. Mivel az egyik legjelentősebb gyomcsoport a pázsitfűfélék közül kerül ki, amik a cirokhoz hasonlóan egyszikűek, a vetést mindenképpen preemergens gyomirtásnak kell megelőzni és

gyommentes talajba vetni. A vetést követően fogasboronával történhet a sorközök gyommentesen tartása. A kétszikű gyomokra alkalmazott herbicidek alkalmazásával érdemes megvárni a cirok 3-4 leveles fejlettségi állapotát, mivel ilyenkor már kevésbé érzékeny a gyomirtószerekre. Cirok gyomirtására kontakt és szisztémikus szerek egyaránt rendelkezésre állnak (Sorghum ID, <https://www.sorghum-id.com/hu/a-sikeresgyomirtas-titka/>).

Az utóbbi években kutatások folytak a kémiai szerek csökkentett dózisban való alkalmazásáról (Rosales-Robles et al. 2005), a különböző herbicid kombinációk hozamra mért hatásáról (Bararpour et al. 2019). Jóvér and Radócz (2015) az egyes gyomirtószerek, azok kombinációja, valamint a mechanikai gyomirtás hatásának összehasonlításáról készítettek tanulmányt.

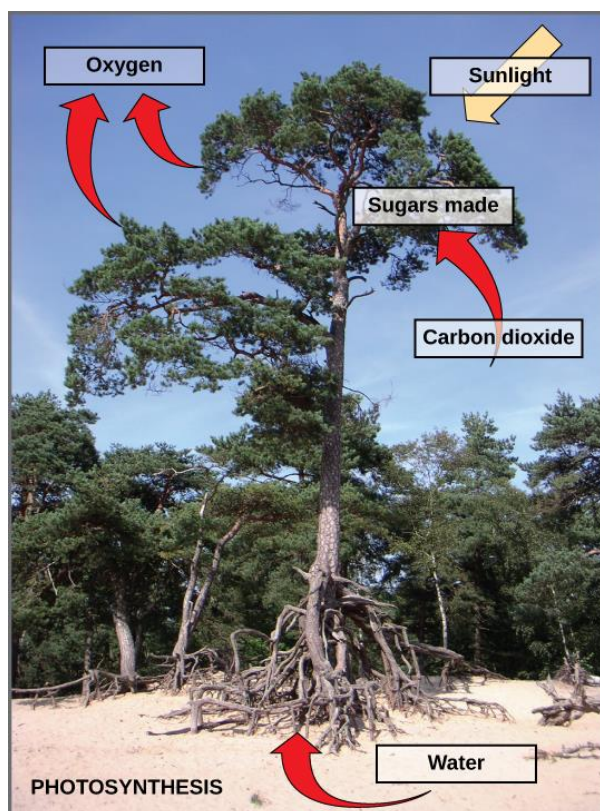
A cirok a kukoricánál érzékenyebb a herbicidekre és a kémiai gyomszabályozásra viszonylag kevés készítmény áll rendelkezésre. Állományban már csak a kétszikűek (magról kelő és évelő) ellen tudunk védekezni, a leggyakrabban alkalmazott hatóanyagok a dikamba és a proszulfuron (Nagy 2021). A dikamba egy aromás karbonsav mely szelektíven ható szisztémikus levélherbicid. A növények növekedését gátolja a megnyúlási szakaszban. Hormonhatású, az auxintranszportot gátolja és roncsolja a szállítószöveteket. A proszulfuron egy szulfonilurea, a növény fehérje-anyagcseréjébe avatkozik be az aminosav bioszintézis gátlásával (Fodor, 2011).

1.3. A fotoszintézis

A fotoszintézis lényege, hogy a fotoautotróf szervezetek (növények, algák, cianobaktériumok) a Napból származó fényenergiát megkötik, kémiai energiává alakítják, majd az így átalakított energia segítségével szerves anyagokból szerves anyagokat képeznek. A folyamat során nemcsak saját testüket építik fel, hanem biztosítják a heterotróf élőlények szervesanyag-szükségletét is. Mindemellett megkerülhetetlen szerepük van az atmoszféra gázegyensúlyának fenntartásában: a földi élethez nélkülözhetetlen oxigént juttatnak a légkörbe és hatalmas mennyiségű légköri szén-dioxidot tárolnak szerves kötések formájában (3. ábra) (Tuba & Csintalan, 2009).

Tudományosabb értelmezés szerint a fotoszintézis egy elektronátmenettel járó redoxfolyamat, melyben - szárazföldi növények esetében – az elektron-/hidrogén-donor a víz, az elektron-/hidrogén-akceptor pedig a szén-dioxid (Tuba & Csintalan, 2009).

A fotoszintézisnek három szakasza van. A fényszakaszban végbemegy a fényenergia elnyelése és annak kémiai energiává való átalakulása; NADPH (nikotinamid-adenin-dinukleotid) szintetizálódik, ami egy redukáló ágens, valamint ATP, ami az energiát biztosítja a növény minden életfolyamatához. Az első szakasz folyamatai ún. fotokémiai folyamatok, a fény intenzitásától lineárisan függenek. A második szakaszban, a szénredukációs szakaszban fixálódik a szén-dioxid és alakul át szénhidrátokká. A folyamathoz a fényszakaszban képződött NADPH és ATP molekulákra van szükség, ezért a fényszakaszhoz hasonlóan nappal megy végbe. A harmadik szakasz a diffúziós folyamatokat foglalja magában, a szén-dioxid felvételét és az oxigén leadását, valamint az ezzel párhuzamosan zajló légzést (Tuba & Csintalan, 2009).



3. ábra

A fotoszintézis

(Forrás: Lumen Learning – An Overview of Photosynthesis
<https://courses.lumenlearning.com/wm-biology1/chapter/reading-introduction-to-photosynthesis/>)

A fotoszintézis helyszíne a növényi sejt erre specializálódott organeluma, a kloroplasztisz. A benne található kettős membránrendszer felcsavarodva gránumtilakoidokat

alkot, melyeket viszonylag egyenes sztrómatilakoidok kötnek össze. A tilakoidokat körülvevő alapállomány a sztróma, itt vannak a szén-dioxid megkötéséért felelős Calvin-ciklus enzimei. A membránrendszer egy vizes fázist, a lument zárja körül. A tilakoid membránrendszerhez kapcsolódnak a fényenergiát elnyelő és azt kémiai energiává alakító fotokémiai rendszerek, az első és a második fotokémiai rendszer, röviden PSI és PSII (Englone & Tuba, 2007). Ezeknek a fotoszintézisben betöltött szerepére a későbbiekben térek ki.

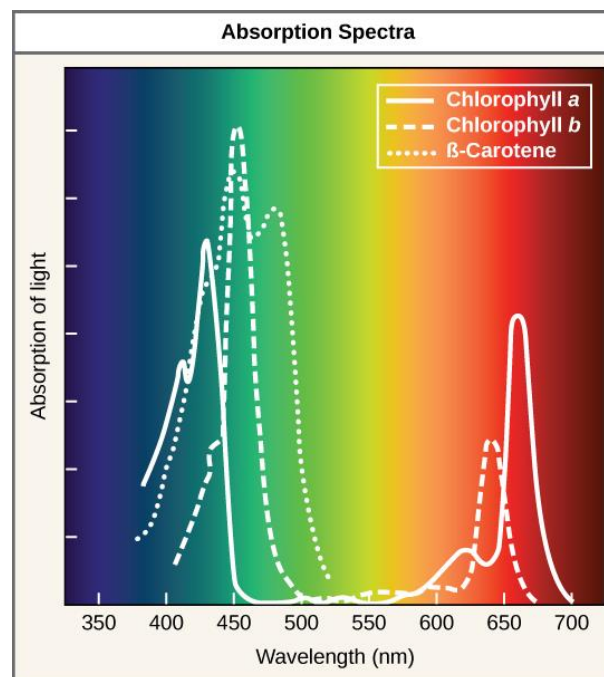
A téma szempontjából fontos megemlíteni a C4-es növényeknél (mint amilyen a cirok is) megfigyelhető kloroplasztisz-dimorfizmust: az ilyen növényekben létezik egy gránum nélküli, csak sztrómatilakoidot tartalmazó kloroplasztisz-forma, ami csak I. fotokémiai rendszert tartalmaz. Vízbontás így ezekben a plasztiszokban nincs (ez a folyamat a PSII-höz kötődik), szénhidrát-felépítő folyamatok viszont igen, erre utal a belsejükben lévő keményítőszemcsék jelenléte (Tuba & Csintalan, 2009). A gránumtilakoid nélküli kloroplasztiszok nem a mezofillumban, hanem a szállítónyalábokat övező nyalábhüvely sejtekben találhatóak (Englone & Tuba, 2007).

1.3.1. A napsugárzás és a fotoszintetikus pigmentek

Amint azt a fejezet első részében említettem, a fotoszintézis egy elektronátmenettel járó redoxfolyamat, melynek során a kis energia tartalmú vízből és szén-dioxidból nagy energia tartalmú szénhidrátok keletkeznek. A folyamat végére 1 mól glükóz szintézise során 2850 kJ/mol többletenergia keletkezik. Ahhoz, hogy ez a folyamat lejátszódhasson, a rendszernek energiát kell nyernie (Pethő, 2016). Ez az energia a Napból származik, elektromágneses sugárzás formájában. A sugárzás hullámokban terjed, a különböző hullámhosszú sugárzásokat az elektromágneses spektrummal jellemezzük. Minél rövidebb a hullámhossz, annál magasabb energiát szállít a sugárzás. A fotoszintézisben csak a spektrum 400 nm (kék) és 700 nm (vörös) közötti tartományába eső fényenergia hasznosul. Ez az emberi szem által is érzékelhető ún. „látható tartomány”, és ezt nevezzük a növényélettanban fotoszintetikusán aktív sugárzásnak. Az ennél alacsonyabb energiájú sugárzás nem elegendő a kémiai folyamatok beindításához, az ennél magasabb energiájú sugárzásnak pedig sejt- és DNS-károsító hatása van (Lumen Learning – Spectrums of Light, <https://courses.lumenlearning.com/wm-biology1/chapter/reading-spectrums-of-light/>).

A fotoszintézishez szükséges energiát a kloroplasztiszban található fotoszintetikus pigmentek kötik meg. A pigmenteknek két nagy csoportját különböztetjük meg, a klorofilokat és a karotinoidokat. A zöld színanyagok a klorofill molekulák, közülük magasabbrendű növényekben a klorofill–a és klorofill–b klorofillformák vesznek részt a fotoszintézisben. Szerkezetüket tekintve Mg-tartalmú tetrapirrolvázak, melyekhez különböző hosszúságú oldalláncok csatlakoznak. Az elektromágneses spektrum kék és vörös tartományában abszorbeálnak. A sárga színanyagok a karotinoidok, ezek közül a fotoszintézis szempontjából az oxigént tartalmazó xantofilok és az oxigént nem tartalmazó karotinok, azon belül is a béta-karotin fontosak. Szerepük az elnyelt fényenergia továbbítása a klorofilok felé, valamint a fotodestrukció elleni védelem. A fotoszintetikus pigmentek legfontosabb jellemzője, hogy delokalizált π -elektronfelhővel rendelkeznek, melynek külső elektronjai gerjeszthetők, ennek köszönhetően képesek elnyelni a fényből származó energiát (Tuba & Csintalan, 2009).

A különböző pigment-típusok jelenléte a növényi szervezetben azzal az előnnyel jár, hogy segítségükkel a növény szélesebb spektrumon tudja elnyelni a fényt. Minden pigmentnek máshol található az elnyelési maximuma: a klorofill–a-nak a vörös tartományban 660 nm-nél, a klorofill–b-nek szintén a vörös tartományban 643 nm-nél. A karotinoidok csak a kék tartományban képesek elnyelni a fényt (4. ábra) (Tuba & Csintalan, 2009).



4. ábra

A különböző fotoszintetikus pigmentek elnyelési tartományai

(Forrás: Lumen Learning – Spectrums of Light

<https://courses.lumenlearning.com/wm-biology1/chapter/reading-spectrums-of-light/>)

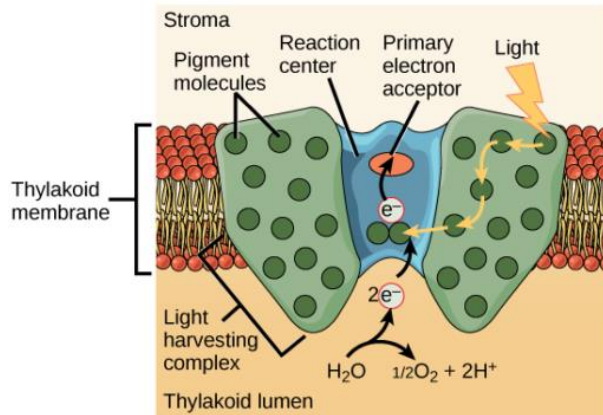
1.3.2. A fényenergia megkötése

A fotoszintetikus pigmentek elnyelik a Nap által kibocsátott fényenergia egységnyi részét, a fotont, ettől az elektronfelhő egyik külső elektronja gerjesztett állapotba kerül és magasabb energiájú elektronpályára lép. Az alapállapotú klorofill S_0 szinglet állapotban van, az energiafelvételt követően S_1 , S_2 , S_3 gerjesztett állapotba vagy triplet (T) állapotba kerül attól függően, hogy milyen magas energiájú pályára lép az elektron. Amíg a klorofill gerjesztett állapotban van, nem képes újabb elektron felvételére. Ehhez először le kell adnia a felvett energiát, hogy a gerjesztett elektron visszakerülhessen eredeti pályájára és a klorofill képessé váljon az újbóli energiafelvételre. Ez megvalósulhat hőleadás vagy fénykibocsátás formájában (utóbbi a fluoreszcenciás kvantumkisugárzás, mely a következő fejezet témája lesz), így viszont a felvett energia nem tud hasznosulni a fotoszintézis során, a növény számára elvész. Az energia csak akkor hasznosul a fotoszintézis során, ha eljut egy fotoszintetikusan aktív klorofill–a molekulára (Pethő, 2016).

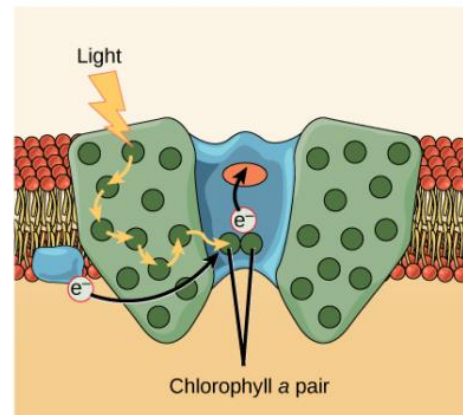
Ha a klorofill rövidebb hullámhosszú – tehát magasabb energiájú – kék fotont nyel el, elektronja külsőbb, nagyobb energiájú pályára kerül, a klorofillmolekula S_3 gerjesztett állapota áll be. A felesleges energiát mindenképpen leadja hő formájában, ami így a fotoszintézisben nem hasznosul. Tehát a fotoszintézis szempontjából a vörös fény hasznosul jobban, aminek az elnyelése S_1 gerjesztett állapotot idéz elő (Pethő, 2016).

A fotoszintetikus pigmentek nem önmagukban, hanem a tilakoid membránon belül, pigment-fehérje komplexekben helyezkednek el, és két, egymástól funkciójában eltérő fotokémiai rendszert alkotnak, ezek a PSI és a PSII (5. ábra). A fényenergiát a fénygyűjtő komplex antennapigmentjei gyűjtik össze, melyben klorofill–a/b és karotinoid molekulák találhatóak. Az energia áramlása a rövidebb hullámhossztól a hosszabb felé történik (Tuba & Csintalan, 2009).

(a) Photosystem II (P680)



(b) Photosystem I (P700)



5. ábra

A PSI és PSII fotokémiai rendszerek

(Forrás: Lumen Learning – Light-Dependent Reactions

<https://courses.lumenlearning.com/wm-biology1/chapter/reading-light-dependent-reactions/>)

A fénygyűjtő komplex pigmentjei eljuttatják az összegyűjtött energiát a fotokémiai reakciócentrumba. Csak az itt található klorofill–a molekulák képesek arra, hogy gerjesztés hatására oxidálódjanak, azaz leadjanak egy elektront – ezekben a klorofill–a molekulákban valósul meg a töltésszétválasztás, vagyis itt indul el a fotokémiai redoxfolyamat. Amikor a fényenergia elnyelődik egy pigmentmolekula által, az energia megkötésre kerül, de még nem tárolódik el a növény által használható formában. A reakciócentrumig csak energiatranszfer történik, elektronátadás nem (Lumen Learning – Light-Dependent Reactions, <https://courses.lumenlearning.com/wm-biology1/chapter/reading-light-dependent-reactions/>).

1.3.3. A fotoszintetikus elektrontranszportlánc

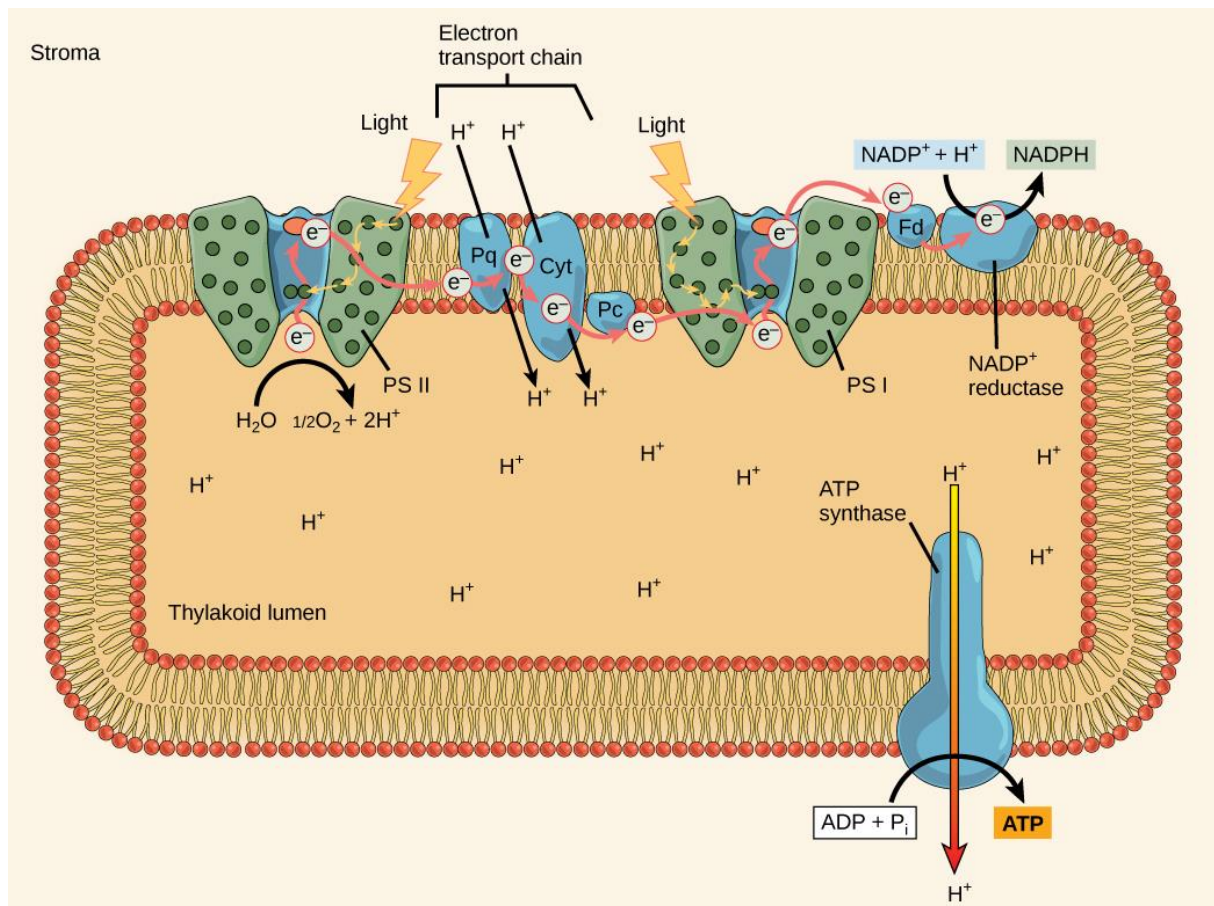
A Napból nyert energia kémiai energiává való alakítása a fotokémiai rendszerekben (PSI és PSII), a fotoszintetikus elektrontranszportlánc (6. ábra) részvételével zajlik le. A PSII a gránumtilakoid, a PSI pedig a sztrómatilakoid membránhoz kötötten helyezkedik el. Felépítésük hasonló, mindkettő egy csak klorofill–a-t tartalmazó reakciócentrumból és az azt körülvevő fénygyűjtő komplexből áll. A reakciócentrumok klorofill–a molekuláit abszorpció maximumuk hullámhossza szerint az első pigmentrendszerben P₇₀₀-nak, a második pigmentrendszerben P₆₈₀-nak nevezzük. Az elektrontranszportlánc a PSII-ből indul ki (Tuba & Csintalan, 2009).

Amikor a pigmentrendszer által begyűjtött fényenergia eljut a PSII reakciócentrumába, az ott lévő klorofill-a molekula oxidálódik, azaz lead egy elektront. Miután ez az elektron levált a klorofill-a-ról, először egy kioltóra kerül (Q – Quencher). Azért nevezik így, mert képes meggátolni, hogy a klorofill-a fluoreszcencia formájában adja le a gerjesztési energiát (bővebben I. később). Az elektron ezután a plasztokinonra kerül, majd a citokróm b_6/f komplexen át a plasztocianinra, ami elszállítja a PSI-be (Tuba & Csintalan, 2009).

Az oxidálódott klorofill egy vízmolekula bontásából származó elektronnal fogja pótolni elvesztett elektronját. A vízbontás melléktermékeként molekuláris oxigén marad vissza, mely egy része a mitokondriális oxidatív foszforiláció folyamatában használandó fel, a maradék pedig a gázcsere nyílásokon át távozik a rendszerből (Lumen Learning – Light-Dependent Reactions, <https://courses.lumenlearning.com/wm-biology1/chapter/reading-light-dependent-reactions/>). Egy oxigén molekula képződéséhez két vízmolekulát kell lebontani, amihez 4 foton szükséges (Tuba & Csintalan, 2009).

Az elektrontranszportláncban az elektronok energiát veszítenek, ez az energia arra fordítódik, hogy a sztrómából protonokat pumpáljon át a tilakoid membrán lumenjébe. A folyamatban a citokróm komplex vesz részt. Az így kialakult a pH-különbség teszi lehetővé a fotofoszforiláció keretében az ATP (adenozin-trifoszfát) képződését, mégpedig a következőképpen: a lumenben megnő a hidrogén-ion koncentráció, az azonos töltetű ionok egymást taszítják. A taszítás és a koncentráció-különbség miatt diffúzióval átszivárognak a sztrómába. A tilakoid membránba ágyazottan található egy fehérje típusú enzim, az ATP-szintáz, amely a rajta áthaladó ionok energiáját arra használja, hogy egy foszfát-csoportot kapcsoljon egy ADP (adenozin-difoszfát) molekulához, létrehozva ezzel az ATP-t. Ez az ATP szolgáltatja majd az energiát a szénredukációs szakaszban a szénhidrát-szintézishez (Lumen Learning – Light-Dependent Reactions, <https://courses.lumenlearning.com/wm-biology1/chapter/reading-light-dependent-reactions/>).

Az energiát vesztett elektronoknak újból energiát kell nyerniük, ezért a PSI-ben is található egy fénygyűjtő komplex. Az itt található antennapigmentek az általuk felvett foton energiáját eljuttatják a PSI reakciócentrumába. A P_{700} oxidálódik, lead egy elektront, ami a ferredoxint redukáló szubsztancia (FRS) közvetítésével egy ferredoxin nevű vegyületre jut, onnan pedig az $NADP^+$ reduktázon át egy $NADP^+$ molekulára, $NADPH$ -dá redukálva azt. A PSI-ben működik egy ciklikus elektrontranszport is, melynek során az elektron a ferredoxinról a citokrómra és a plasztocianinon át a P_{700} -ra jut vissza (Tuba & Csintalan, 2009).



6. ábra

A fotoszintetikus elektrontranszportlánc és a fotofoszfóráció

(Forrás: Lumen Learning – Light-Dependent Reactions

<https://courses.lumenlearning.com/wm-biology1/chapter/reading-light-dependent-reactions/>)

1.3.4. A fluoreszcencia jelensége

Amikor a PSII reakciócentrumában lévő klorofill–a molekula gerjesztett állapotba kerül, az elektrontranszportlánc keretében egy kinon típusú kioltó molekulának (Q) adja át külső pályára került elektronját. Amíg a Q redukált állapotban van, nem tud újabb elektront felvenni, a klorofill a többlet energiát csak hő vagy fénykibocsátás formájában tudja leadni. Utóbbi jelenséget nevezzük fluoreszcenciának. Az így elvesztett energia a fotoszintézisben nem hasznosul. Ha a Q kioltó funkciója valamilyen oknál fogva gátolt, emelkedik a fluoreszcencia szint, ami mérésekkel kimutatható. (Tuba & Csintalan, 2009).

A gerjesztési energia kioltásának három útja, a fotoszintézisben való hasznosulás, a hőleadás és a fluoreszcens fénykibocsátás egymással versengésben van. Ebből következik, hogy a magasabb fluoreszcenciát mutató értékek a fotoszintézis alacsonyabb hatásfokára utalnak. Amikor az első kioltó (Q_A) veszi át a gerjesztési energiát, azt a jelenséget nevezzük

fotokémiai kioltásnak. A hó formájában történő energia leadás – más kioltási folyamatok mellett – a nem-fotokémiai kioltás. Kioltás hiányában létrejön a fluoreszcencia jelensége (Baker, 2008). A fotoszintézisben történt legapróbb változások is kimutathatók a fluoreszcencia kibocsátás mérése által, így a fluoreszcencia alapján becsülhető a fotoszintetikus apparátus hatékonysága. A kapott mérési eredmények értelmezésére pedig különféle fluoreszcencia-paraméterek állnak rendelkezésre (Kalaji, et al., 2014).

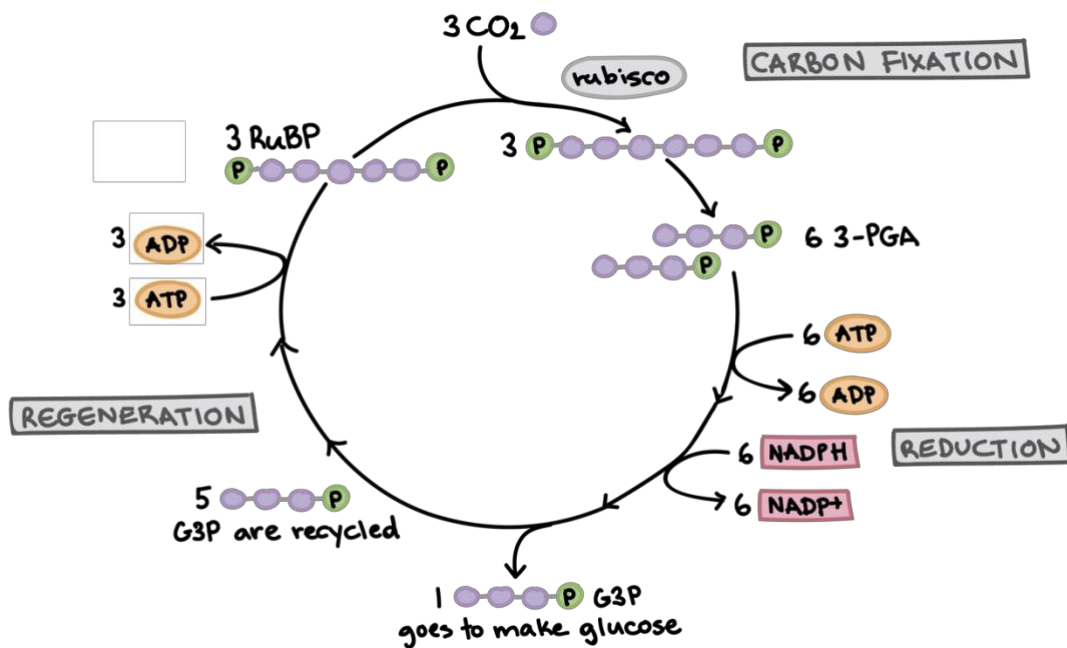
1.3.5. A szénredukciós szakasz¹

A fotoszintézis második fő szakasza szénredukciós szakasz, C3-as növények esetében ez a Calvin-ciklus (felfedezője után elnevezve) (7. ábra). A kapcsolódó reakciópartnerek és enzimek a sztrómában találhatóak meg, ezért a folyamat helyszíne is ez. A szén-dioxid ebben a szakaszban redukálódik szénhidráttá. A reakciósorozatban közreműködik a fényszakaszban képződött ATP és NADPH, mint energiaforrás és redukáló ágens. Első lépésként megtörténik a szén-dioxid fixálása: a gázcserenyílásokon át felvett CO₂ rácsatlakozik primer akceptorára, egy ribulóz-1,5-difoszfát (RuDP) molekulára, a ribulóz-1,5-difoszfát-karboxiláz/oxigenáz (RUBISCO) enzim katalizálásával. Eredményképpen egy rendkívül labilis, hat szénatomos molekula képződik, ami rögtön szét is bomlik két három szénatomos vegyületre. Ez a glicerinsav-3-foszfát a CO₂-fixálás primer terméke. A második szakaszban redukálódik a szén-dioxid, a két glicerinsav-3-foszfát egy-egy ATP-ből energiát vesz fel és glicerinsav-1,3-difoszfáttá alakul. (Gyakorlatilag egy-egy foszfát kapcsolódik a molekulákra, az ATP-k pedig visszaalakulnak ADP-tá.) Ezt követően egy-egy NADPH redukálja a vegyületeket (átad egy elektront és visszaalakul NADP⁺ formává) és két gliceraldehid-3-foszfát keletkezik (Tuba & Csintalan, 2009).

Az utolsó lépésben regenerálódik a ribulóz-1,5-difoszfát. A gliceraldehid-3-foszfátnak három szénatomja van, ezért háromszor kell a szén-dioxid fixálásnak lejátszódnia. Minden körben két molekula gliceraldehid-3-foszfát keletkezik, így a végére összesen hat ilyen vegyület jön létre. Ebből csak egy hagyja el a rendszert és fordítódik cukorszintézisre, a többi öt a ribulóz-1,5-difoszfát újraképződésére fordítódik. (Lumen Learning – Light-Independent

¹ A folyamat megértésében segítségemre volt a következő YouTube videó:
https://www.youtube.com/watch?v=NqCmzk4Z9LA&ab_channel=LoveSnow

Reactions, <https://courses.lumenlearning.com/wm-biology1/chapter/reading-light-independent-reactions/>).



7. ábra
A Calvin-ciklus

(Forrás: Khan Academy - AP®/College Biology – Photosynthesis – The Calvin cycle
<https://www.khanacademy.org/science/ap-biology/cellular-energetics/photosynthesis/a/calvin-cycle>)

1.3.6. A széndioxid redukciója C4-es növényekben

C4-es fotoszintézist folytató növényeknél is a Calvin ciklusban megy végbe a szénhidrát-szintézis, a szén-dioxid viszont ezt megelőzően a Hatsch-Slack-Kortschak-ciklusban fixálódik. C4-es növényekben a levelek Kranz-anatómiájú felépítést mutatnak. Az edénynyalábokat két klorenchima réteg veszi körül, a belső a hüvelyparenchima, a külső a mezofillum réteg. A kloroplasztisz dimorfizmus következtében a nyalábhüvely sejtekben csak gránum nélküli kloroplasztiszok találhatóak, ezekben nincs PSII, tehát nincs vízbontás és elektrontranszportlánc, nem termelődik oxigén és nem képződik NADPH.

A szén-dioxid a mezofillum kloroplasztiszaiban fixálódik, a primer termék az oxálcetsav. Az oxálcetsav almasavvá alakul, és ilyen formában szállítódik át a nyalábhüvelysejtek kloroplasztiszaiba, ahol dekarboxilálódik, a felszabadult szén-dioxid pedig a ribulóz-1,5-difoszfatához kötődve a Calvin-ciklus keretében szénhidráttá redukálódik. Itt az almasav pirozólósavvá alakul és visszatér a mezofillumba, ahol regenerálódik. Az oxálcetsav-almasav átalakulást a malát- vagy almasav-dehidrogenáz enzim katalizálja, ez

az enzim termeli az NADPH-t is, ami vízbontás hiányában a nyalábhüvely kloroplasztiszokban nincs. Az ATP termelődését a korábban említett – csak a PSI-re jellemző – ciklikus elektrontranszportlánc biztosítja (Tuba & Csintalan, 2009).

A C₄-es fotoszintézis út egyik nagy előnye, hogy a hüvelyparenchima kloroplasztiszaiban nincs vízbontásból származó oxigén, ez pedig a RUBISCO enzim karboxiláz aktivitásának kedvez, háttérbe szorítva az oxigenáz funkciót. Másik előnye, hogy az almasavnak köszönhetően képes CO₂-t koncentrálni a hüvelyparenchima kloroplasztiszaiban, ez a magas koncentráció pedig maximálisra növeli a szén-dioxid megkötés reakciósebességét. Összefoglalva a C₄-es növények fotoszintetikus hatékonysága jobb és szárazanyag-termelésük is magasabb. Ehhez a hatékonysághoz hozzájárul még, hogy fénytélítettség nem, vagy csak nagyon magas fényintenzitáson következik be, a fotorespiráció korlátozott, továbbá az asszimilációs termékek transzlokációja is gyorsabb. Mindezek lehetővé teszik, hogy a C₄-es növények stresszhatás alatt, zártabb sztómák mellett is képesek hatékonyan fotoszintetizálni, ezáltal jobban reagálnak a szárazság- és hőstresszre (Tuba & Csintalan, 2009).

1.4. A növényi stressz

A haszonnövényeinket körülvevő környezetnek minden esetben vannak fejlődésüket segítő és számukra hátrányos elemei is. Ha a kedvezőtlen környezeti tényezők elérnek egy kritikus értéket, akkor a növény károsodik, esetleg el is pusztul. Ezeket a káros környezeti tényezőket stresszoroknak nevezzük (Pethő, 2016). A stresszel kapcsolatos legfőbb probléma, hogy hatására a növény gyarapodása leáll. Ennek oka, hogy kedvezőtlen körülmények között a növény szénmérlege negatív lesz, vagyis a mitokondriális légzéssel és a fotorespirációval elvesztett szén meghaladja a fotoszintézis által beépített szén mennyiségét. A szénmérlegből tehát következtetni lehet a növény anyagcseréjében beállt változásokra, így a stresszre is (Tuba & Csintalan, 2009).

A stressztényezőket abiotikus és biotikus tényezőkre bonthatjuk. Előbbi csoportba sorolható többek között a túl magas vagy túl alacsony hőmérséklet, a víz korlátozott hozzáférhetősége (aszály), a tápelemhiány vagy a talaj szennyezettsége. Biotikus környezeti tényezők alatt a növényt körülvevő – és arra ható – más élőlényeket értjük (mikroorganizmusok, állati kártevők, gyomok), de tulajdonképpen ezek is az abiotikus faktorok

megváltoztatásán keresztül hatnak a növényre (Tuba & Csintalan, 2009). A jelen dolgozatban vizsgált gyomhatás például korlátozza a kultúrnövény által felvehető víz- és tápanyagmennyiséget, árnyékol, továbbá kártevők és kórokozók megtelepedését segítheti.

Szárazságstressz esetén záródnak a gázcserenyílások, csökken a szén-dioxid felvétel, ezzel szemben a légzésből származó lebontás nő. Emiatt a növény kevesebb szárazanyagot tud létrehozni. A vízhiány miatt a vízbontásból kevesebb ATP és NADPH tud képződni, amik szükségesek lennének a CO₂-fixációhoz, a fehérjeszintézishez és más anyagcsere folyamatokhoz. Az árnyékstressznek kitett növények már alacsonyabb szinten elérik a fényteltődési pontot, ami felett már nem nő a fotoszintézis hatékonysága. Ez a C4-es növényekre is igaz, amik telítettségi pontjukat csak nagyon magas fényintenzitáson érik el. Ennek következménye az alacsonyabb intenzitású fotoszintetikus elektrontranszport (Tuba & Csintalan, 2009).

A stressz egyik legfontosabb következménye a szabadgyökök képződése, melyek rendkívül reaktívak. A szabadgyökök olyan molekulák, melyek egy párosítatlan elektronnal rendelkeznek. A leggyakoribb ilyen vegyületek a szinglet oxigén, a szuperoxid gyök (O₂⁻), a hidroxil gyök (OH⁻) és a hidrogén-peroxid (H₂O₂). Azért veszélyesek, mert redukálják és ezáltal bontják a növény szerves vegyületeit, többek között károsítják a membránokat (Pethő, 2016).

A növények a számukra kedvezőtlen körülményekhez különböző adaptációs mechanizmusok segítségével próbálnak alkalmazkodni. Úgy módosítják anyagcsere-folyamataikat, hogy belső környezetük a megváltozott ökológiai feltételek ellenére is a lehető legideálisabb legyen (Pethő, 2016). Ezek a stresszválaszok molekuláris szinten kimutathatók, minden növény esetében hasonló biokémiai mechanizmusok figyelhetők meg. Amennyiben a védekezés sikeres, a növény nem mutat szabad szemmel látható stressztüneteket (Tuba & Csintalan, 2009).

A vízhiányra adott egyik válasz a sztómazáródás a párologtatás csökkentése érdekében. A másik a növekedést biztosító anyagcserefolyamatok leállítására, hogy a növény minél inkább meg tudja őrizni raktározott tartaléktápanyagait. Árnyékstressz esetén növekszik a fotoszisztémák pigment-protein komplexének klorofill-b és xantofill tartalma, a hatékonyabb fénygyűjtés érdekében (Tuba & Csintalan, 2009).

A szabadgyökök semlegesítésére is többféle védekező mechanizmus áll a növények rendelkezésére. A fotoszintézis során is keletkezik szinglet oxigén, de ezeket a karotinoidok

semlegesítik. A membránt akkor károsítják, ha felhalmozódnak. Szuperoxid gyökök akkor jönnek létre, ha a sztómák a stressz miatt zártak, emiatt nem jut be a szén-dioxid, hogy felvegye a nagy energiájú elektront, így az a vízbontásból származó oxigén molekulára kerül. A szuperoxid szabadgyökök szuperoxid-dizmutáz vagy peroxidáz enzim segítségével hidrogén-peroxiddá alakulnak, melyet a kataláz enzim bont vízzé és oxigénné (Pethő, 2016).

Témánk szempontjából kiemelt jelentőségű a fotoinhibíció, azaz a fénygátlás jelenségének bemutatása. A fotoinhibíció elsődleges oka a túl erős megvilágítás, de a stresszhatásnak való kitettség is kiválthatja. Stressz hatására gyakran csökken a növény számára rendelkezésre álló víz és szén-dioxid, amik a fotoszintézis kiinduló vegyületei. Hiányukban nem működik a fotoszintetikus elektrontranszportlánc és a Calvin-ciklus, a fotoszintézis termékei helyett a fent említett szabadgyökök keletkeznek. A bejövő fotonok hatására viszont továbbra is gerjesztett állapotba kerülnek a PSII elektronjai, amiket így nincs, ami felvegyen, a felesleges energia fluoreszcencia formájában tud csak távozni (Tuba & Csintalan, 2009).

1.5. A fluoreszcencia indukció

Növények egészségi állapotának vizsgálatakor megkerülhetetlen a fotoszintetikus teljesítmény mérése. Manapság az in vivo mérésekhez ún. modulált klorofill fluorométereket használunk. Ezek kis méretű, könnyen hordozható eszközök, használatuk viszonylag egyszerű. Működési elvük az, hogy szabályozható az általuk kibocsátott fénysugárzás, és úgy vannak beállítva, hogy csak az általuk indukált fluoreszcencia kibocsátást mérik (Maxwell & Johnson, 2000).

A méréseket sötétadaptált növényeken végezzük el. Ha egy levelet sötétben tartanak, az elsődleges kioltó Q_A oxidált állapotban van, a PSII reakciócentrum ilyenkor nyitottnak tekintendő. A mérőeszköz első lépésben egy gyengébb erejű modulált fényel világítja meg a levelet, ami nem elég az elektrontranszport beindítására. Ezt követheti egy távoli vörös tartományba eső megvilágítás, ami működésbe hozza a PSI fotoszisztémát, ezzel eltávolítva az elektront a kioltó molekuláról, biztosítva annak oxidált állapotát. Ekkor kapjuk meg első adatunkat, az F_0 -t, ami a minimum fluoreszcencia-szintet takarja. Ezután felvillanások sorozata következik, ami folyamatosan redukált állapotban tartja a Q-t és ezzel egyidőben zárt

állapotban a PSII-t. (A zárt állapotú fotoszisztéma nem tud elektront átadni a redukált Q-nak, így a többlet energia csak fluoreszcencia formájában távozik.) Ezzel megkapjuk a maximális fluoreszcencia értéket (F_m). Az $F_m - F_0$ adja a változó fluoreszcencia (F_v) értékét. Az F_v/F_m mérőszámot pedig arra használjuk, hogy meghatározzuk a PSII kvantum-hatásfokát (Baker, 2008). A kiugró fluoreszcencia értékek után a megvilágítás hatására aktiválódnak a fotoszintézishez szükséges enzimek, beindul a fotokémiai kioltás és a fluoreszcencia végül beáll egy egyensúlyi értékre, ez az ún. steady state fluoreszcencia, jele F_s .

Az F_v/F_m lesz az egyik legfontosabb mérőszámunk, mivel ez az arány optimális körülmények között konzisztensnek bizonyult a fejlődő növényeknél. Másrészt megfigyelték, hogy stresszhatásnak kitett növények csökkenő F_v/F_m értéket mutatnak. A másik fontos mérőszámunk az F_0 , mert minimális fluoreszcencia mellett a PSII nyitott, a Q oxidált állapotban van (Baker, 2008). Sötétadaptált növényeken végzett méréseknél tehát az F_v/F_m érték egyértelmű indikátora az adott növény fotoszintetikus teljesítményének. Optimális értéke a legtöbb növényfaj esetében 0,83, az ennél alacsonyabb érték stresszre utal, a fotoinhibíció keresztül (Maxwell & Johnson, 2000). C4-es növények esetében már a 0,78-as érték is kielégítő fotoszintetikus hatékonyságra utal (Kalaji, et al., 2014). Az F_0 érték minél alacsonyabb annál jobb, de Baker (2008) szerint nem lehet teljes bizonyossággal állítani, hogy az F_0 -ban bekövetkezett változások kizárólag a PSII nem megfelelő működésének tudhatók be.

2. Anyag és módszer

2.1. A kisparcellás kísérlet előkészítése

A kísérlet elvégzésére 2022 május-júniusában került sor, helyszínül az egyetem Szent István Campus-ának területén található botanikus kert szolgált. A terület talaja, ahol a parcellák elhelyezkedtek, egy gyenge homoktalaj. Elővetemény nem volt, a vetést megelőző évben a terület parlagon volt, 2020-ban kukorica kísérlet zajlott ugyanitt. A kísérletet öntözés nélkül terveztük végig vinni, de a 2022-es extrém aszályos évben ez a terv megghiúsult, a kísérlet sikerességének érdekében két alkalommal öntözésre került sor. A területet hat kis parcellára osztottuk a következő szempontok szerint: két parcellát a kísérlet teljes tartama alatt mechanikai gyomirtással gyommentesen tartottunk (kapálás és manuális gyomeltávolítás); mivel az itt fejlődő növények nem voltak kitéve sem a gyomok, sem a gyomirtószer által kifejtett stresszhatásnak, ez lett a kontroll csoport. Két parcellán semmilyen gyomszabályozás nem történt, két parcellán pedig kémiai gyomirtást alkalmaztunk. A választott gyomirtó a Syngenta forgalmazásában elérhető Casper nevű készítmény volt, melyet cirok posztemergens gyomirtására ajánlanak.

A kísérlet során azt szeretnénk volna megfigyelni, hogy hogyan fejlődik a cirok a különböző stresszhatások következtében. A parcellák elhelyezkedését nem állt módunkban befolyásolni, a közvetlen szomszédságukban egy erdősáv volt, ami jelentős árnyékoló hatást jelentett. Az árnyékosabb parcellák is kaptak napfényt, de napi szinten ca. 2 órával kevesebbet. A különböző parcellák különböző fényviszonyait és a rajtuk alkalmazott kezelési módot az 1. táblázat szemlélteti. Szabad szemmel is látható volt, hogy az árnyékolt területen lévő növények fejlettsége messze alul maradt a napos parcellák állományához képest.

1. táblázat

A kísérleti parcellák elhelyezkedése (sárgával jelölve a napos, szürkével az árnyékos parcellák)

1. parcella - Gyomosan hagyott	3. parcella - Kémiai gyomszabályozás	5. parcella - Mechanikai gyomszabályozás
2. parcella - Mechanikai gyomszabályozás	4. parcella - Gyomosan hagyott	6. parcella - Kémiai gyomszabályozás

2.1.1. A kisparcellás kísérlet megvalósítása

2022 márciusában (12. hét) megtörtént a terület felásása a talaj átforgatása céljából és 50 kg/ha-nak megfelelő mennyiségű NPK műtrágya került kiszórásra. 2022. május 3-án végeztük a vetést, GK Emese vetőmaggal. A vetést gyomfelvételezés előzte meg, ennek célja a területen található tipikus gyomfajok felmérése volt (8. ábra). A várakozásoknak megfelelően a tavasszal kelő, nyárutói T4-es gyomfajokat találtuk, valamint néhány évelőt: fehér libatop (*Chenopodium album*), parlagfű (*Ambrosia artemisiifolia*), csattanó maszlag (*Datura stramonium*), madárkeresűfű (*Polygonum aviculare*), kakaslábű (*Echinochloa crus-galli*), aprószulák (*Convolvulus arvensis*), szarvaskerep (*Lotus corniculatus*), lándzsás útifű (*Plantago lanceolata*), közönséges cickafark (*Achillea millefolium*).



8. ábra
Néhány tipikus gyom a területen a vetést megelőzően
(Forrás: saját fotó)

A vetés előtti talajelőkészítés során kapálással minden gyomot eltávolítottunk a területről, majd gereblyével elegyengettük a talajfelszínt, elsimítottuk a rögöket. A magágykészítésnél egy szerszámnyél segítségével igyekeztünk minél egyenletesebb mélységben kialakítani a magágyat (9. ábra). A magágyba ezúttal már csak nitrogén műtrágya került, 50kg/ha-nak megfelelő mennyiségben. 34%-os ammónium-nitrát (NH_4NO_3)-ot használtunk. A szükséges mennyiséget a tanszék laborjában mértük ki. Vetéskor 20 cm-es sortávot és 7-8 cm-es tőtávot alkalmaztunk. Ezzel párhuzamosan elkezdtünk a laborban vetőmagot csíráztatni, ezekkel a csírákkal pótoltuk a töveket ott, ahol hiányos volt a kelés. Itt fontos megjegyezni, hogy helyenként a tervezettnél sűrűbb lett a soronkénti csíraszám és elmaradt az ilyenkor szükséges ritkítás, ez később befolyásolta a zöldtömeg-mérésnél kapott eredményeket.



9. ábra
A magágy kialakítása a vetéshez
(Forrás: saját fotó)

A tervezetnek megfelelően két parcellát (kontroll csoport) igyekeztünk folyamatosan gyommentesen tartani. A manuálisan elvégzett gyomirtást heti rendszerességgel végeztük: máj. 14., máj. 21., máj. 28., jún. 5., és jún. 14. napokon. A kémiai gyomirtással kezelt parcellák vegyszeres kezelésére jún. 14-én került sor, Casper gyomirtóval, 0,4kg/ha-nak megfelelő mennyiséggel (1 g/l-es hígításban). A két érintett parcella összesen 8,75m², a felhasznált gyomirtó 0,175 g/fél liter víz/parcella. A pontos mennyiség kiméréséhez a laborban rendelkezésre álló precíziós mérleget használtuk.

2.2. Fluoreszcenciamérés

A fluoreszcencia mérésére június 24-én került sor. Erre azért volt szükség, mert a kapott fluoreszcencia értékekből következtetni lehet a növények stresszeltségére. A méréshez Hansatech FMS2+ modulált klorofill fluorométert használtunk. Az eszköz kis méreténél fogva könnyen hordozható, ezért alkalmas terepi mérésekre. Az eszközhöz cserélhető akkumulátorok is tartoznak, így megszakítás nélkül tudtuk végezni a munkát. Az

eszközhöz tartozó levélcsipeszt a levélre csíptettük. A leveleket a mérést megelőzően 15 percig sötétben tartottuk, hogy elérjük a sötétadaptált állapotot. Ezután kezdődött a fényimpulzusok kibocsátása és maga a mérés. Az eszköz sípolással jelezte, ha elkészült. A munka végeztével számítógépre csatlakoztattuk a fluorométert és Excel formátumban kinyertük mért adatokat. A fluoreszcencia mérés részletes eredményeit az 1. számú melléklet tartalmazza.

2.3. Friss zöldtömeg mérése

A kísérletnek nem volt célja a teljes vegetációs időszak vizsgálata, csak a kezelést követő állapot felmérése, ezért a fluoreszcenciamérést követően, július 7-én minden növényi részt eltávolítottunk a parcelláról. Egy hordozható mérleg segítségével parcellánként lemértük az összes cirok növény, majd az összes gyomnövény friss zöldtömegét (utóbbi esetében kivételt képeztek a gyommentesen tartott kontroll parcellák). A biomassza mérést azért tartottuk fontosnak elvégezni, mert érzékeltetni szeretnénk volna, hogy parcellánként milyen gyomkompetíciónak volt kitéve a cirokállomány. Az eredményeket a 2. sz. melléklet tartalmazza.

2.4. Szárítószelekrényes mérés

Ennek keretében parcellánként 5-5 mintát vettünk a cirokból (5-5 db növény), ezeknek lemértük a friss zöldtömegét. A gyomok közül a teljes területről vettünk egy vegyes mintát, annak is lemértük a friss tömegét. Minden mintát külön zacskóba helyeztünk és megfelelő azonosítóval láttunk el (parcella száma, növény neve, dátum). A mintákat szárítószelekrényben leszárítottuk, hogy meghatározhassuk a száraztömeget és az eredeti víztartalmat, majd a kapott adatok alapján megbecsüljük a parcellánkénti száraztömeget a cirokra és a gyomokra is. A szárazanyag-mérésre azért volt szükség, hogy következtetni tudjunk a növény szénmérlegére és azon keresztül a stresszeltség állapotára. A száraztömeg mérés eredményeit a 3. sz. melléklet tartalmazza. A vizsgálatok zárásaként a területen lévő gyomfajokból egy-egy példányt szárítva eltettünk későbbi beazonosításra.

2.5. Adatfeldolgozás

Az adatok feldolgozását Excel és annak ANOVA nevű bővítménye segítségével végeztük el. Az adatokat táblázatokba foglaltuk és az áttekinthetőség érdekében leíró statisztikákat készítettünk: átlagot számoltunk, megnéztük, hogy mennyire szórnak az adatok és információt gyűjtöttünk az adatsorok homogenitásáról a relatív szórás kiszámolásával. T próbát végeztünk a hipotézis bizonyítása végett. A legrészletesebb eredményeket a fluoreszcenciamérés adta és ez szolgált a hipotézis bizonyítása alapjául is, így a legtöbb figyelmet ennek az adatsornak szántuk. Diagramokkal tettük átláthatóbbá az összefüggéseket és Excel függvények, valamint ANOVA segítségével ellenőriztük a számítások helyességét. Utóbbi rendkívül részletes adatokkal szolgált a különböző kezeléseket kapott cirokállományok összehasonlítására.

3. Eredmények és értékelésük

3.1. A friss zöldtömeg mérésének eredményei

A parcellánkénti kultúrnövény állomány és az ott található összes gyom friss tömegének adatait a 2. táblázat tartalmazza. (A kézi gyomeltávolításban részesült parcellák esetében ez a mérés nem releváns, ezért nem szerepel adat ezekben a cellákban.) Az 1-es, 2-es és 4-es parcellák a napos részre estek, itt minden növényfaj esetében nagyobb zöldtömeget kaptunk. Ezzel szemben a 3-as, 5-ös és 6-os parcellák esetében korlátozott volt a besugárzás, itt ennek megfelelően a zöldtömeg értékek is alacsonyabbak.

2. táblázat
Biomassza adatok parcellánkénti lebontásban (cirok és gyomok)

Parcella	Cirok friss tömeg (g)	Gyomok friss tömeg (g)	Összes friss tömeg (g)	Gyom / cirok %
1 (gyomos)	940	455	1395	48,4%
2 (mech.)	1625	0	1625	-
3 (vegysz.)	355	820	1175	231,0%
4 (gyomos)	610	380	990	62,3%
5 (mech.)	285	0	285	-
6 (vegysz.)	305	470	775	154,1%

A parcellák különböző fényellátottsága miatt készítettem egy összesítést a napos és árnyékos parcellák adatainak összevonásával is, melynek adatait a 3. táblázatban foglaltam össze. (A gyommentesen tartott parcellák adatait figyelmen kívül hagytam a torzító hatás elkerülése végett.) A kapott adatokból világosan kitűnik, hogy a C4-es fotoszintézisű cirok zöldtömeg képzésben messze felülmúlta környezetében élő gyomokat. Az árnyékos részeken a napfény hiánya erősen korlátozó tényezőként hatott, az ilyen területeken a cirok jóval gyengébben fejlődött, ezzel szemben a gyomok biomasszája csaknem kétszerese volt a cirokállományénak.

3. táblázat
A biomassa adatok fényviszonyok szerinti megoszlása

Fény-ellátottság	Ciok friss tömeg (g)	Gyomok friss tömeg (g)	Összes friss tömeg (g)	Gyom / ciok %
napos	1550	835	2385	53,9%
árnyékos	660	1290	1950	195,5%

A kísérletünk szempontjából releváns, kezelésenkénti összesítés eredményei a 4. táblázatban láthatóak. Ezen adatok alapján egyértelműen arra lehet következtetni, hogy a vegyszeres gyomirtás nem hozta meg a kívánt eredményt. A kezeletlen, gyomosan hagyott parcellákon a gyomkonkurencia ellenére is több, mint kétszer annyi a ciok biomasszája, mint a kémiai gyomirtással kezelt állományoké. A kapott eredményt némileg torzítja, hogy a gyomosan hagyott parcellák a kísérlet teljes tartama alatt korlátlan besugárzásban részesülhettek, míg a vegyszeresen kezelt állományok fejlődését nagyban hátráltatta a közeli erdőszáv árnyékoló hatása.

4. táblázat
A biomassa adatok kezelésekre szerinti megoszlása

Kezelések	Ciok friss tömeg (g)	Gyomok friss tömeg (g)	Összes friss tömeg (g)	Gyom / ciok %
1 (gyomos)	1550	835	2385	53,9%
3 (vegysz.)	660	1290	1950	195,5%
2 (mech.)	1910	0	1910	0,0%

3.2. A száraztömeg mérésének eredményei

A különböző kezelésekre (vegyszeresen gyomirtott és gyomosan hagyott) eredményeinek összehasonlítására a ciok száraz tömegének méréséből származó adatokat is használtunk. Kezelésenként 10-10 növényegyed száraztömegét mértük meg, de mivel a tömegek nem egyedenként, hanem parcellánként kerültek kiszámításra, ezért kezelésenként átlagot számítottam belőlük. Ezen kívül a teljes területről gyűjtöttünk egy

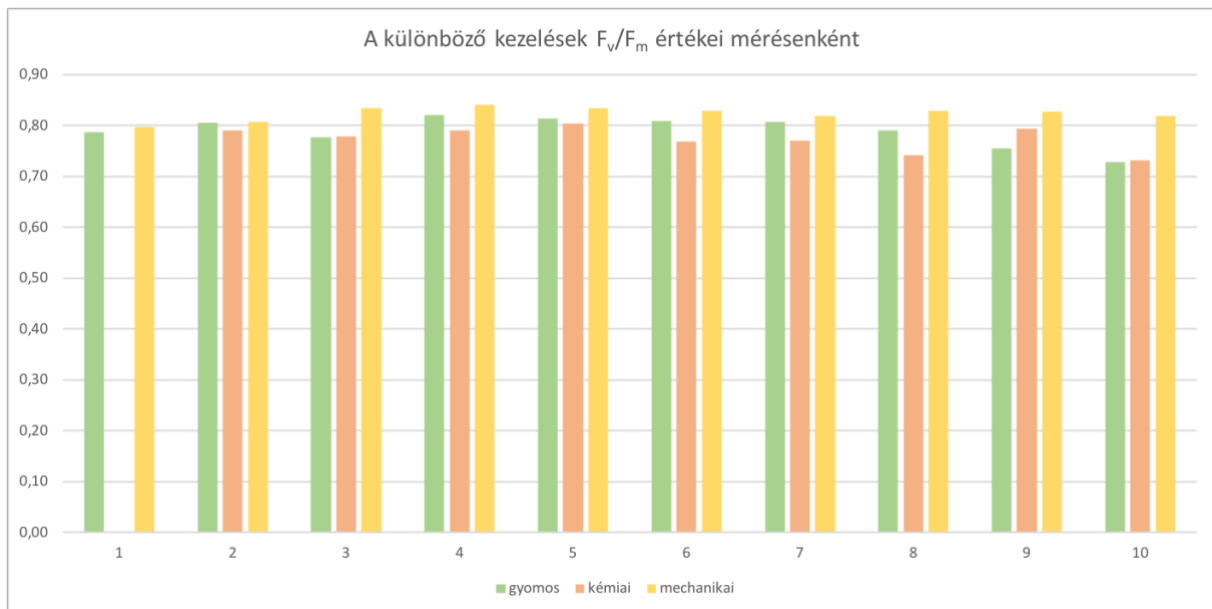
vegyes gyommintát, mert szeretnénk volna látni, hogy a kultúrnövénnyel szemben milyen száraztömeg képzésére képes egy vadon nőtt növényállomány. Az 5. táblázat tartalmazza a száraztömeg mérések összesített eredményeit. A várakozásoknak megfelelően a mechanikai gyomirtással gyommentesen tartott állomány adta a legnagyobb száraztömeg arányt 26,2%-kal. A gyomos állomány szárazanyag képződése ca. 1,5%-kal meghaladta a herbiciddel kezelt állományét, ebből arra lehet következtetni, hogy a gyomirtó hatására csökkent a cirok fotoszintézisének hatékonysága, kevesebb szén épült be. Viszont itt is torzították az eredményeket a kezelésként különböző sugárzási viszonyok. A gyomok – feltehetően jobb alkalmazkodó képességükből adódóan – még a gyommentes cirokállománynál is nagyobb száraz zöldtömeget produkáltak. Ez arra enged következtetni, hogy a gyomnövények különböző stresszhatások alatt is hatékonyabb fotoszintézist tudnak folytatni és több szénét kötnek meg, mint egy haszonnövény.

5. táblázat
A biomassza adatok kezelése szerinti megoszlása

Összesítés	friss tömeg (g)	száraz tömeg (g)	nedvesség (g)	nedvesség (%)	Száraz tömeg (%)
1 (gyomos)	66,64	16,39	50,25	75,0%	25,0%
3 (vegysz.)	58,97	13,91	45,07	76,4%	23,6%
2 (mech.)	116,78	30,57	86,21	73,8%	26,2%
gyom vegyes	211,56	62,88	148,68	70,3%	29,7%

3.3. A fluoreszcenciamérés eredményei

A fluoreszcencia mérés segítségével arra a kérdésre szeretnénk volna választ kapni, hogy van-e szignifikáns különbség a gyomosan hagyott és a kémiai gyomirtásban részesített növényállomány fotoszintetikus teljesítménye között. Ehhez kezelésként 10-10 cirok egyedét választottunk ki mintának, melyek levelén megmértük a fluoreszcenciát. A legrelevánsabb F_v/F_m érték adatokat tartalmazza mérésenként lebontva az 10. ábra.



10. ábra
 F_v/F_m értékek növényegyenként kezelésekre lebontva

A fluoreszcencia mértékéről – és ezen keresztül a fotoszintézis hatékonyságáról – az F_v/F_m (6. táblázat) és az F_0 (7. táblázat) mérőszámok adnak releváns információt, ezért ezeket a paramétereket vettük figyelembe. Az F_v/F_m értéke C4 növények esetében 0,78-tól tekinthető optimálisnak, az ennél alacsonyabb érték csökkenő fotoszintetikus hatékonyságra utal. Az F_0 érték esetében az alacsonyabb értékek jelzik a fotoszintézis működésének optimális szintjét. (Az egyik levélen mérési hibából adódóan kiugró értéket kaptunk, ezért azt a számítások során nem vettük figyelembe, az érintett cellában nem szerepel érték.)

6. táblázat
Az F_v/F_m értékek mérésenként

F _v /F _m	gyomos	kémiai	mech.
1	0,79	-	0,80
2	0,81	0,79	0,81
3	0,78	0,78	0,83
4	0,82	0,79	0,84
5	0,81	0,80	0,84
6	0,81	0,77	0,83
7	0,81	0,77	0,82
8	0,79	0,74	0,83
9	0,76	0,79	0,83
10	0,73	0,73	0,82
Átlag	0,79	0,77	0,82

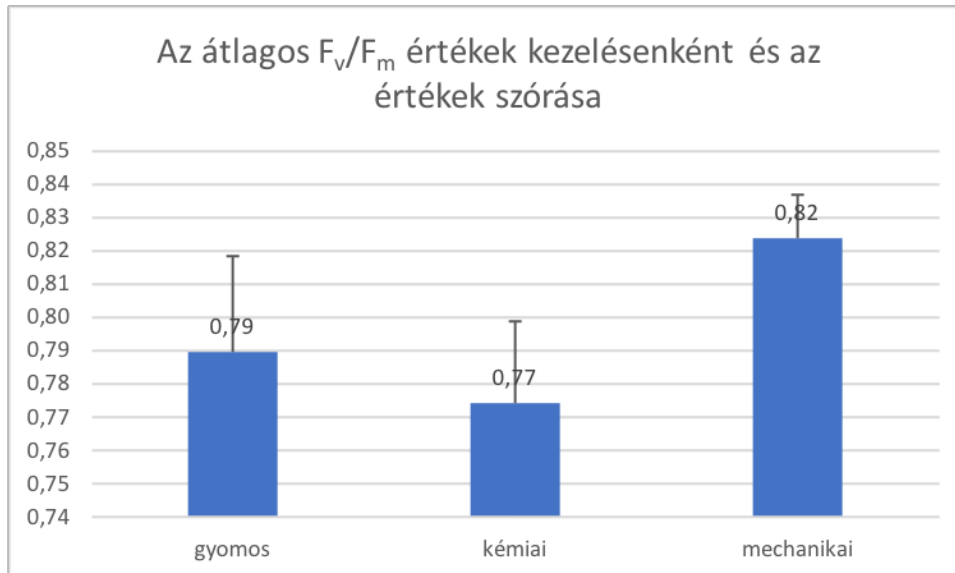
7. táblázat
Az F_o értékek mérésenként

F _o	gyomos	kémiai	mech.
1	59		34
2	64	78	62
3	67	63	66
4	65	77	59
5	62	59	57
6	65	81	64
7	65	73	76
8	70	90	61
9	78	67	59
10	90	91	63
Átlag	69	75	60

Az adatelemzés első lépéseként átlagot számoltunk, melyet használni tudunk a további számításokhoz. A kapott átlagokból látszik, hogy egyedül a mechanikai gyomirtásban részesített állomány közelíti meg a legtöbb növénynél elvárt 0,83-as F_v/F_m értéket, a vegyszeres kezeléssel átesett állomány átlaga a C4-eseknél kielégítő 0,78-as értéket sem éri el (11. ábra). Ezután kiszámítottuk a kapott értékek szórását is. Végül néztünk egy relatív szórást (V%) (8. táblázat), ami az adathalmaz homogenitásáról ad információt. Mindhárom sor esetében bőven 10% alatt marad ez az érték, tehát kifejezetten homogén adatsorral dolgozunk.



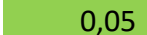
8. táblázat
Az F_v/F_m adatok relatív szórása

	V% (F _v /F _m)
gyomos	3,7%
vegyszeres	3,2%
mechanikai	1,6%



11. ábra
Átlag és szórás F_v/F_m értékre nézve

A kísérlet elején felállított hipotézis szerint a gyomosan hagyott és a gyomirtószerrel kezelt cirokállomány fotoszintetikus teljesítménye nem lesz egyenlő. Ezt a hipotézis felírtuk matematikailag, és tesztelésére kétmintás átlagpróbát végeztünk független minták használatával, az F_v/F_m értékekre vonatkozóan. Ehhez szükséges, hogy a szórásértékek azonosak legyenek a két adatsor esetében, ezt kétmintás variancia próbával ellenőriztük. Majd készítettünk egy t próbát, 5%-os szignifikanciaszint mellett, mely a következő eredménnyel zárult:

	INVERZ.T
$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$	 
	2,11
Aktuális t:	 0,05

A kapott eredmények alapján a nullhipotézist elvetettük és azt állapítottuk meg, hogy nincs szignifikáns különbség a gyomirtószerrel kezelt és a gyomosan hagyott állomány fotoszintetikus teljesítménye között.

Ezután az Excel T.PRÓB függvényével is ellenőriztük az eredményt, hasonló értéket kapva. Majd elvégeztük ugyanezt az összehasonlítást minden kezelési típusra. Az F_v/F_m értékekre alapozott számítás (9. táblázat) szerint a mechanikai gyomirtással gyommentesen

tartott cirok fotoszintetikus teljesítménye szignifikánsan különbözik a gyomosan hagyott állomány teljesítményétől és a vegyszeres gyomirtással kezelt állomány teljesítményétől is.

9. táblázat
T próba a különböző kezelésekre F_v/F_m értékek vonatkozásában

F_v/F_m t próba	gyomos - kémiai	0,23137
	kémiai - mechanikai	0,00003
	gyomos - mechanikai	0,00305

Ugyanezt az összehasonlítást F_0 értékre elvégezve a következő adatokat kaptuk (10. táblázat):

10. táblázat
T próba a különböző kezelésekre F_0 értékek vonatkozásában

F_0 t próba	gyomos - kémiai	0,15382
	kémiai - mechanikai	0,00686
	gyomos - mechanikai	0,07330

Itt már nem csak a gyomosan hagyott és a gyommentesen tartott parcellák között mutatkozott szignifikáns különbség, hanem gyomosan hagyott és vegszerrel permetezett parcellák között is, tehát a gyomosan hagyott állomány minimum fluoreszcencia szintje szignifikánsan alacsonyabb volt a herbiciddel kezelt állományénál, ezáltal hatékonyabb fotoszintézist folytatott.

Következő lépésként egyutas varianciaanalízist készítettünk ANOVA-val. Az így kapott p érték azt mutatja meg, hogy 5% szignifikancia szint mellett van-e különbség a különböző adatsorok között ($p > 0,05$). A mérés megerősítette, hogy az F_v/F_m értékek tekintetében nincs szignifikáns eltérés a két állomány között ($p = 0,00024$). Kíváncsiak voltunk F_0 paraméterre is, az itt kapott érték ($p = 0,011659$) már azt mutatta, hogy a két kezelés értékei szignifikánsan eltérnek egymástól. Ebből arra következtetünk, hogy a herbiciddel kezelt állomány minimum fluoreszcencia szintje (F_0) emelkedést mutat a gyomosan hagyott állományhoz képest, tehát gyengébb a fotoszintetikus teljesítménye. Azt viszont nem lehet egyértelműen kijelenteni,

hogy az eltérést a PSII sérülésének vagy egyéb tényezőknek köszönhető. Az ANOVA analízis eredményeit a 4. számú melléklet részletezi.

4. Összefoglalás

A klímaváltozás jelenlétét újabb és újabb kutatások erősítik meg, és már rendelkezésre állnak a Kárpát-medencére vonatkozó tanulmányok is. Az állatállomány takarmányozásának jelentős részét kitevő kukorica termesztése a kedvezőtlenebbé váló időjárás miatt várhatóan nem lesz fenntartható, más abraktakarmánnyal kell majd helyettesíteni. A biodiverzitás fenntartása és az élelmezésbiztonság érdekében is több, alternatív gabonaféle termesztésbe vonása lenne kívánatos. A cirok megfelel a fenti feltételeknek, de mint minden haszonnövénynél, ennél is fontos a megfelelő agrotechnikai feltételek megteremtése a maximális hozam elérése érdekében. A gyomok jelenléte az egyik legfőbb terméskorlátozó tényező. Probléma, hogy a gyomirtószereknek – különösen a cirok esetében – kevés fajtája áll rendelkezésre és alkalmazásuknál környezetvédelmi szempontoknak is meg kell felelni.

A kérdés aktualitását jól jelzi, hogy az utóbbi években többen is végeztek a cirok posztemergens gyomirtására irányuló kutatást, többek között Rosales-Robles et al. (2005), Bararpour et al. (2019), Jóvér and Radócz (2015).

Hasonló témában készített tanulmányt Jóvér and Radócz (2015) takarmánycirok esetében. Posztemergensen alkalmazható herbicid hatóanyagokat és azok kombinációit vizsgálták, külön kitérve a gyomok által okozott károkra. Az általuk említett gyomfajok közül *Amaranthus* és *Echinochloa crus-galli* fajokat mi is találtunk a gyomfelvételezés során. A dikamba, ami a Casper gyomirtó egyik hatóanyaga csak mérsékelten gyérítette az *Amaranthus*-t és nem bizonyult hatékonynak egyéb gyomfajok ellen. A Casper másik hatóanyagával, a proszulfuronnal már jobb hatást sikerült elérni. A dikamba-proszulfuron kombináció hatékonyabb volt, mint a két hatóanyag külön-külön. Kiemelték, hogy herbicidválasztásnál figyelni kell az egyes gyomfajok gyakoriságára, és hogy a sorközművelés önmagában nem elegendő a gyomok elleni védekezésben, utóbbi védekezési mód hozta a legrosszabb eredményt. Ez ellentmond az általam kapott eredményeknek, de ez adódhat abból is, hogy a kutatók szántóföldi körülmények között végezték a kísérletet.

A kísérlet során vegyes eredmények születtek. A különböző kezelések biomassa, száraztömeg és fluoreszcencia eredményei fontos összefüggésekre mutattak rá, visszajelzést adtak a növény egészségi állapotáról és fotoszintetikus hatékonyságáról. A legfontosabb konklúzió, hogy herbicides gyomirtás és a gyomok meghagyása esetén egyaránt csökkent a

biomassza és a fotoszintézis hatékonysága is a mechanikai gyomirtásban részesített kontrollcsoporthoz képest.

Az általam elvégzett kísérletek nem adnak teljes körű bizonyosságot arról, hogy a herbicides kezelés a ciroknak okozott stressz mellett is szükséges-e vagy érdemesebb megfontolni a gyomok meghagyását. Utóbbi mellett szól, hogy a 0,78-as optimális F_v/F_m átlagos értéket egyedül a kémiai gyomirtásban részesült állomány nem tudta elérni. Ahhoz viszont további kísérletek elvégzése lenne szükséges, hogy a kizárólag mechanikai gyomirtás alkalmazása szántóföldi körülmények között is hasonló eredménnyel zárulna-e.

5. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani Dr. Balogh János egyetemi tanárnak, aki belső konzulensként minden segítséget megadott szakdolgozatom elkészüléséhez. Továbbá köszönettel tartozom a Szent István Campus Növényélettan és Növényökológia Tanszék laboránsának, Lajkó Melindának, aki felügyelte a szárítószekrényes méréseket és gondoskodott az általam gyűjtött minták tárolásáról. Valamint köszönöm Mészáros Ádám PhD-hallgatónak a fluoreszcencia méréshez nyújtott segítségét.

Irodalomjegyzék

- Agrárunió (2023) – Cirok vagy kukorica? 2022 nagy kérdése megosztja a szakembereket
<https://www.agrarunio.hu/hirek/novenytermesztes/8917-cirok-vagy-kukorica-2022-nagy-kerdese-megosztja-a-szakembereket>
- Agronapló (2021) – Felkapott lett a cirok. In: Agronapló 13 February 2021, p. 31-36
<https://www.agronaplo.hu/szakfolyoirat/2021/02/szantofold/felkapott-lett-a-cirok>
- Antal, J (2005): Növénytermesztés tan 1. – A növénytermesztés alapjai, gabonafélék, Mezőgazda Lap- és Könyvkiadó Kft., Budapest
- Avar, L (2022): Cirok: a jövő kukoricája lehet. In: Magyar Mezőgazdaság, 28 September 2022
<https://magyarmezogazdasag.hu/2022/09/28/cirok-jovo-kukoricaja-lehet>
- Baker, NR (2008): Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis in vivo. In: Annu. Rev. Plant Biol., 59, p. 89-113 https://www.pflanzenphysiologie.uni-rostock.de/storages/uni-rostock/Alle_MNF/Bio_Pflanzenphysiologie/Baker_N_2008.RM.pdf
- Bararpour T, Hale RR, Kaur G, Singh B, Tseng T-MP, Wilkerson TH, Willett CD (2019): Weed Management Programs in Grain Sorghum (*Sorghum bicolor*). In: Agriculture 16 August 2019, 9(8), p. 182 <https://doi.org/10.3390/agriculture9080182>
- Bartholy, J, Pongrácz, R, Pieczka, I (2014): How the climate will change in this century? In: Hungarian Geographical Bulletin 63 (1) 55–67. DOI: [10.15201/hungeobull.63.1.5](https://doi.org/10.15201/hungeobull.63.1.5)
- Birkás, M (szerk.) (2017): Földművelés és földhasználat. Mediaworks Hungary Zrt., Budapest
- Engloner A, Tuba Z (2007): Botanika I., Nemzeti Tankönyvkiadó Zrt.
- Fodor, L (2011): Integrált növényvédelem I. – Az integrált növényvédelem alapjai. Szent István Egyetem, Gazdálkodási és Mezőgazdasági Főiskolai Kar, Növénytermesztési és Agrárkörnyezet-gazdálkodási Tanszék, Gyöngyös
- Food and Agriculture Organization of The United Nations (2023) – International Year of Millets 2023 <https://www.fao.org/millets-2023/en>
- Jóvér, J, Radóczy, L (2015): A posztemergens gyomszabályozás vizsgálata takarmánycirok (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) esetében. In: Magyar Gyomkutatás és Technológia 16. évf. 2. sz. p. 42-53 https://hwrs.hu/wp-content/uploads/2017/10/Gyomkutatás_2015_2.pdf#page=42

- Kalaji, H.M., Schansker, G., Ladle, R.J. et al. (2014) Frequently asked questions about in vivo chlorophyll fluorescence: practical issues. In: Photosynth Res 122, p. 121–158
<https://doi.org/10.1007/s11120-014-0024-6>
- Khan Academy (2023) – AP®/College Biology – Photosynthesis – The Calvin cycle
<https://www.khanacademy.org/science/ap-biology/cellular-energetics/photosynthesis/a/calvin-cycle>
- Lumen Learning (2023) – Biology for Majors I – Module 6: Metabolic Pathways – Light-Dependent Reactions <https://courses.lumenlearning.com/wm-biology1/chapter/reading-light-dependent-reactions/>
- Lumen Learning (2023) – Biology for Majors I – Module 6: Metabolic Pathways – Light-Independent Reactions <https://courses.lumenlearning.com/wm-biology1/chapter/reading-light-independent-reactions/>
- Lumen Learning (2023) – Biology for Majors I – Module 6: Metabolic Pathways – An Overview of Photosynthesis <https://courses.lumenlearning.com/wm-biology1/chapter/reading-introduction-to-photosynthesis/>
- Lumen Learning (2023) – Biology for Majors I – Module 6: Metabolic Pathways – Spectrums of Light <https://courses.lumenlearning.com/wm-biology1/chapter/reading-spectrums-of-light/>
- Maxwell, K – Johnson, GN (2000): Chlorophyll fluorescence – a practical guide. Journal of Experimental Botany, Volume 51, Issue 345, April 2000, Pages 659–668, <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>
- Nagy, V (2021): A teljesség igényével – A Syngenta gyomirtási technológiai ajánlata cirokfélékben, Syngenta Magyarország, 28 April 2021
<https://www.syngenta.hu/press-release/hir/teljesseg-igenyével-syngenta-gyomirtasi-technologiai-ajanlata-cirokfelekben>
- Pethő, M (2016): A növényélettan alapjai, Akadémiai Kiadó, Budapest
<https://mersz.hu/petho-a-novenyelettan-alapjai/>
- Rosales-Robles, E., Sanchez-de-la-Cruz, R., Salinas-Garcia, J., & Pecina-Quintero, V. (2005): Broadleaf Weed Management in Grain Sorghum with Reduced Rates of Postemergence Herbicides. In: Weed Technology, 19(2), p. 385-390 [doi:10.1614/WT-04-170R1](https://doi.org/10.1614/WT-04-170R1)
- Sorghum ID (2023) – Bemutatózás <https://www.sorghum-id.com/hu/bemutakozas/>

Sorghum ID (2023) – A sikeres gyomirtás titka <https://www.sorghum-id.com/hu/a-sikeresgyomirtas-titka/>

Statista (2023) – Sorghum production worldwide in 2021/2022, by leading country (in 1,000 metric tons) <https://www.statista.com/statistics/1134651/global-sorghum-production-by-country/>

Statista (2023) – Worldwide production of grain in 2022/23, by type (in million metric tons) <https://www.statista.com/statistics/263977/world-grain-production-by-type/>

Surányi, B (2018): Kultúrnövények a földhasználatban, Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen

Tuba Z, Csintalan Z (2009): Növényélettan. Szent István Egyetemi Kiadó, Gödöllő

United Sorghum Checkoff Program (2023) – Sorghum Grain Color <https://www.sorghumcheckoff.com/agronomy-insights/sorghum-grain-color-2/>

United Sorghum Checkoff Program (2023) – What Is Sorghum? <https://www.sorghumcheckoff.com/sorghum-101/what-is-sorghum/>

YouTube (2023) – Photosynthesis Light reaction, Calvin cycle, Electron Transport 3D Animation https://www.youtube.com/watch?v=NqCmzk4Z9LA&ab_channel=LoveSnow

Ábrák és táblázatok jegyzéke

5.1. Ábrajegyzék

1. ÁBRA CIROK SZEMTERMÉSÉNEK SZÍNVÁLTOZATAI.....	7
2. ÁBRA SZEMES CIROK KOMÁDI (HAJDÚ-BIHAR) HATÁRÁBAN, 2023 AUGUSZTUS.....	9
3. ÁBRA A FOTOSZINTÉZIS	13
4. ÁBRA A KÜLÖNBÖZŐ FOTOSZINTETIKUS PIGMENTEK ELNYELÉSI TARTOMÁNYAI	15
5. ÁBRA A PSI ÉS PSII FOTOKÉMIAI RENDSZEREK	17
6. ÁBRA A FOTOSZINTETIKUS ELEKTRONTRANSPORTLÁNC ÉS A FOTOFOSZFORILÁCIÓ	19
7. ÁBRA A CALVIN-CIKLUS	21
8. ÁBRA NÉHÁNY TIPIKUS GYOM A TERÜLETEN A VETÉST MEGELŐZŐEN.....	28
9. ÁBRA A MAGÁGY KIALAKÍTÁSA A VETÉSHEZ.....	29
10. ÁBRA Fv/FM ÉRTÉKEK NÖVÉNYEGYEDENKÉNT KEZELÉSEKRE LEBONTVA.....	35
11. ÁBRA ÁTLAG ÉS SZÓRÁS Fv/FM ÉRTÉKRE NÉZVE	37

5.2. Táblázatjegyzék

1. TÁBLÁZAT A KÍSÉRLETI PARCELLÁK ELHELYEZKEDÉSE (SÁRGÁVAL JELÖLVE A NAPOS, SZÜRKÉVEL AZ ÁRNYÉKOS PARCELLÁK).....	27
2. TÁBLÁZAT BIOMASSZA ADATOK PARCELLÁNKÉNTI LEBONTÁSBAN (CIROK ÉS GYOMOK)	32
3. TÁBLÁZAT A BIOMASSZA ADATOK FÉNYVISZONYOK SZERINTI MEGOSZLÁSA.....	33
4. TÁBLÁZAT A BIOMASSZA ADATOK KEZELÉSEK SZERINTI MEGOSZLÁSA.....	33
5. TÁBLÁZAT A BIOMASSZA ADATOK KEZELÉSEK SZERINTI MEGOSZLÁSA.....	34
6. TÁBLÁZAT AZ Fv/FM ÉRTÉKEK MÉRÉSENKÉNT	36
7. TÁBLÁZAT AZ F ₀ ÉRTÉKEK MÉRÉSENKÉNT	36
8. TÁBLÁZAT AZ Fv/FM ADATOK RELATÍV SZÓRÁSA	36
9. TÁBLÁZAT T PRÓBA A KÜLÖNBÖZŐ KEZELÉSEKRE Fv/FM ÉRTÉKEK VONATKOZÁSÁBAN	38
10. TÁBLÁZAT T PRÓBA A KÜLÖNBÖZŐ KEZELÉSEKRE F ₀ ÉRTÉKEK VONATKOZÁSÁBAN	38

Mellékletek

1. sz. melléklet: A fluoreszcencia mérések eredményei

1-es parcella - Gyomosan hagyott								
	1	2	3	4	5			
Time	8:54	9:01	9:09	9:17	9:23	Átlag	Szórás	V%
Fo	59	64	67	65	62	63	3,05	4,8%
Fm	278	330	300	361	333	320	32,07	10,0%
Fv	219	266	233	296	271	257	30,89	12,0%
Fv/Fm	0,79	0,81	0,78	0,82	0,81	0,80	0,02	2,3%
Fs	63	81	74	78	71	73	6,95	9,5%
Fm'	118	152	116	158	116	132	21,12	16,0%
Fo'	56	61	62	63	49	58	5,81	10,0%
Fv'/Fm'	0,53	0,60	0,47	0,60	0,58	0,55	0,06	10,5%

2-es parcella - Mechanikai gyomszabályozás								
	6	7	8	9	10			
Time	9:35	9:42	9:47	9:54	10:01	Átlag	Szórás	V%
Fo	64	76	61	59	63	65	6,66	10,3%
Fm	317	396	368	370	382	367	29,90	8,2%
Fv	253	320	307	311	319	302	27,93	9,2%
Fv/Fm	0,80	0,81	0,83	0,84	0,84	0,82	0,02	2,3%
Fs	71	96	75	72	101	83	14,34	17,3%
Fm'	112	197	168	142	173	158	32,47	20,5%
Fo'	57	71	66	61	62	63	5,32	8,4%
Fv'/Fm'	0,49	0,64	0,61	0,57	0,64	0,59	0,06	10,6%

3-as parcella - Kémiai gyomszabályozás (Casper)

	12	13	14	15	16			
Time	10:39	10:47	10:54	10:59	11:07	Átlag	Szórás	V%
Fo	4	78	63	77	59	69	9,67	14,0%
Fm	7	371	285	369	301	332	44,94	13,6%
Fv	3	293	222	292	242	262	35,87	13,7%
Fv/Fm	0,43	0,79	0,78	0,79	0,80	0,79	0,01	1,3%
Fs	3	92	17	73	62	61	31,84	52,2%
Fm'	6	152	26	119	120	104	54,37	52,2%
Fo'	0	72	10	57	46	46	26,41	57,1%
Fv'/Fm'	1,00	0,53	0,62	0,52	0,62	0,57	0,05	9,4%

4-es parcella - Gyomosan hagyott

	17	18	19	20	21			
Time	11:14	11:20	11:27	11:36	11:43	Átlag	Szórás	V%
Fo	65	65	70	78	90	74	10,60	14,4%
Fm	341	337	335	318	332	333	8,79	2,6%
Fv	276	272	265	240	242	259	16,91	6,5%
Fv/Fm	0,81	0,81	0,79	0,76	0,73	0,78	0,04	4,5%
Fs	74	68	64	71	87	73	8,76	12,0%
Fm'	150	139	145	129	156	144	10,38	7,2%
Fo'	57	55	65	57	76	62	8,72	14,1%
Fv'/Fm'	0,62	0,60	0,55	0,56	0,51	0,57	0,04	7,6%

5-ös parcella - Mechanikai gyomszabályozás

	22	23	24	25	26			
Time	11:51	11:56	12:03	12:24	12:30	Átlag	Szórás	V%
Fo	34	62	66	59	57	56	12,54	22,6%
Fm	199	343	386	342	315	317	70,69	22,3%
Fv	165	281	320	283	258	261	58,29	22,3%
Fv/Fm	0,83	0,82	0,83	0,83	0,82	0,82	0,01	0,6%
Fs	38	67	76	74	65	64	15,25	23,8%
Fm'	82	122	127	176	146	131	34,45	26,4%
Fo'	28	59	61	61	58	53	14,26	26,7%
Fv'/Fm'	0,66	0,52	0,52	0,65	0,60	0,59	0,07	11,8%

6-os parcella - Kémiai gyomszabályozás (Casper)

	27	28	29	30	31			
Time	12:36	12:40	12:45	12:50	13:14	Átlag	Szórás	V%
Fo	81	73	90	67	91	80	10,48	13,0%
Fm	349	317	347	326	338	335	13,72	4,1%
Fv	268	244	257	259	247	255	9,67	3,8%
Fv/Fm	0,77	0,77	0,74	0,79	0,73	0,76	0,03	3,3%
Fs	56	65	74	59	70	65	7,46	11,5%
Fm'	118	125	121	108	105	115	8,56	7,4%
Fo'	61	55	65	48	60	58	6,53	11,3%
Fv'/Fm'	0,48	0,56	0,46	0,56	0,43	0,50	0,06	11,6%

2. sz. melléklet: A biomassza mérés eredményei

Parcella	Cirok friss tömeg (g)	Gyomok friss tömeg (g)	Összes friss tömeg (g)	Gyom / cirok %
1 (gyomos)	940	455	1395	48,4%
2 (mech.)	1625	0	1625	-
3 (vegysz.)	355	820	1175	231,0%
4 (gyomos)	610	380	990	62,3%
5 (mech.)	285	0	285	-
6 (vegysz.)	305	470	775	154,1%

3. sz. melléklet: A száraztömeg mérés eredményei

	Friss tömeg (g)	Száraz tömeg (g)	Nedvesség (g)	Nedvesség (%)	Száraz tömeg (%)
gyom vegyes	211,56	62,88	148,68	70,3%	29,7%
1 (gyomos)	56,82	15,74	41,08	72,3%	27,7%
2 (mech.) nap	171,88	44,98	126,90	73,8%	26,2%
3 (vegysz.)	56,54	13,22	43,32	76,6%	23,4%
4 (gyomos)	76,45	17,03	59,42	77,7%	22,3%
5 (mech.) árny	61,67	16,15	45,52	73,8%	26,2%
6 (vegysz.)	61,40	14,59	46,81	76,2%	23,8%

4. sz. melléklet: ANOVA eredmények

Anova: Fv/Fm

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
Column 1	10	7,896	0,7896	0,000833378
Column 2	9	6,968	0,774222222	0,000607444
Column 3	10	8,239	0,8239	0,000172322

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	0,012449696	2	0,006224848	11,63451447	0,000246145	3,369016359
Within Groups	0,013910856	26	0,000535033			
Total	0,026360552	28				

Anova: Fo

SUMMARY

<i>Groups</i>	<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
Column 1	10	685	68,5	82,94444444
Column 2	9	679	75,44444444	124,5277778
Column 3	10	601	60,1	112,1

ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	1123,688123	2	561,8440613	5,308848532	0,011659238	3,369016359
Within Groups	2751,622222	26	105,8316239			
Total	3875,310345	28				

NYILATKOZAT

a szakdolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: Gombos Karolin
A Hallgató Neptun kódja: J9F5VZ
A dolgozat címe: A gyomhatás, mint biotikus stressz hatása a fotoszintézisre és a növekedésre szemescirok (Sorghum bicolor) esetében
A megjelenés éve: 2023
A konzulens intézetének neve: Növénytermesztési-tudományok Intézet
A konzulens tanszékének a neve: Növényélettan és Növényökológia Tanszék - Szent István Campus

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

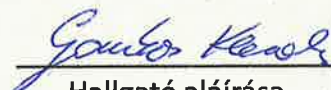
A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

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

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

Kelt: 2023. november 04.


Hallgató aláírása

NYILATKOZAT

__Gombos Karolin__ (név) (hallgató Neptun azonosítója: __J9F5VZ__) 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 védésre javaslom / nem javaslom¹.

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

Kelt: 2023. év november hó 4. nap



belső konzulens

¹ A megfelelő aláhúzendó.

² A megfelelő aláhúzendó.