

DIPLOMADOLGOZAT

Ócsai Péter Márk

2024



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

Szent István Campus

Növénytermesztéstudományi Intézet

agrármérnök osztatlan szak

SALÁTA TERMESZTÉSE VERTIKÁLIS FARMON

Belső konzulens: dr. Pék Zoltán

egyetemi tanár

Belső konzulens: Budavári Noémi

PhD hallgató

intézete/tanszéke: Kertészettudományi Intézet,

Zöldség- és Gombatermesztési Tanszék

Készítette:

Ócsai Péter Márk

KPK88S

Gödöllő

2024

Tartalomjegyzék

1	BEVEZETÉS.....	4
2	IRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	6
2.1	A vertikális farm jelentősége	6
2.2	A vertikális farmok története.....	7
2.3	A vertikális farm felépítése	9
2.4	A vertikális farm elrendezése (Kozai, 2019)	10
2.5	A vertikális farmok típusai	12
2.6	A vertikális farm kulcsfontosságú elemei	12
2.6.1	Elektromos energia.....	12
2.6.2	Fény	12
2.6.3	Fényszint.....	13
2.6.4	Hőmérséklet	14
2.6.5	Páratartalom.....	15
2.6.6	Szén-dioxid koncentráció.....	16
2.7	A vertikális farmon történő salátatermesztés néhány eddigi eredménye	16
3	ANYAG ÉS MÓDSZER	19
3.1	A kísérlet helyszíne	19
3.2	Kezelések	20
3.3	Mérések.....	21
4	EREDMÉNYEK	22
4.1	A fényforrások összehasonlítása.....	22
4.2	A SPAD értékek	24
4.3	A saláta nyers tömegének eredményei	25
4.4	A levélreflektancia mérések eredményei	26
5	KÖVETKEZTETÉSEK	29
6	ÖSSZEFOGLALÁS	31
7	IRODALOMJEGYZÉK	32
8	ÁBRAJEGYZÉK	37
9	NYILATKOZAT	38

1 BEVEZETÉS

Az energiahatékony zöldségtermesztés egyik sarkalatos mérföldköve a zárt növénytermesztő létesítmények létrejötte volt, melyeknek továbbfejlesztése után a növények számára nélkülözhetetlen fény mesterségesen pótolhatóvá vált, így speciális növénytermesztő létesítmények, úgynevezett "Plant factory"-k, vagy más szóval vertikális farmok jöttek létre.

A téma aktualitását jelzi, hogy az elmúlt években négy angol nyelvű könyv is megjelent, melyek a „Plant factory”-k témáját dolgozzák fel. Az életminőség javulásával és az egészséges életmód népszerűsítésével megnőtt az igény a tápanyagban gazdag, jó minőségű élelmiszerek iránt, egyúttal fontos szemponttá vált az is, hogy az élelmiszer a lehető legkisebb energiabefektetéssel kerüljön előállításra (Nautiyal et al., 2022).

A vertikális farmok rendszere számos előnnyel és benne rejlő lehetőségekkel bír, emellett világszerte egyre jelentősebbé válik a technológia, azonban ezek ellenére a vertikális farmok technológiája nem kiforrott, és a gyakorlati megvalósítás során számos akadályba ütközhetünk. A legjelentősebb gát a bizonytalan gazdasági megvalósíthatóság, mivel magas beruházási- és termelési költségekről szóló esetekről számoltak be (Jan et al., 2020).

A magas beruházási költségek a megemelkedett energiafogyasztás mellett nem versenyképes működést eredményezhetnek (Banerjee & Adenauer, 2014), ezért a vertikális farmokból származó termékeknek magas hozzáadott értékkel kell rendelkezniük ahhoz, hogy a művelet költséghatékony legyen. Az egyik ilyen javasolt megoldás a vertikális növénytermesztő rendszerek integrálása egyéb termelési rendszerek infrastruktúrájába, mint például az akvakultúra és a hidroponikus zöldségtermesztés integrációja, ahol a halak tápanyagot biztosítanak a növények számára, míg a növények a halak számára tisztítják a vizet; vagy az anaerob emésztőberendezések beépítése, amelyek az élelmiszerhulladék felhasználásával képesek áramot és hőt termelni a gazdaság számára (Pimentel et al., 2021).

A vertikális gazdaságok megvalósításának korlátozott technikai és gyakorlati alkalmazási problémái ellenére ezek a rendszerek jelenleg is nagymértékben növekszenek és különböző típusú növényeket termelnek olyan országokban, mint például Kína, Hollandia, Dél-Korea, Japán, Kanada, Olaszország, Egyesült Államok, Szingapúr, Egyesült Államok Arab Emírségek és Anglia (Sivamani et al., 2013).

A témát azért választottam, mert érdekelt a technológia működése, és vonzott a téma újdonsága, ugyanis ez egy perspektivikus új technológia, hazánkban még csak kevés cég foglalkozik vele. Leginkább levélzöldségek és úgynevezett mikrozöldek termesztésére

alkalmazzák a vertikális farmot, termésükért termesztett fajok esetében még nem kifarrott ez a technológia.

Célom az, hogy megvizsgáljam, hogyan lehet saláta növényeket előállítani, napfény nélkül. Dolgozatomban az alábbi kérdésekre keresünk választ: Miből áll, milyen típusai vannak és hogyan is működik a vertikális farm? Lehet-e vertikális farmon salátát termesztetni? Okozhat-e különbséget az eltérő spektrumú megvilágítás a saláták esetén?

2 IRODALMI ÁTTEKINTÉS

A vertikális farmon történő növénytermesztés növekvő jelentősége abban gyökerezik, hogy a népesség növekedés, az urbanizáció és az elsivatagosodás következtében a termőterület folyamatosan csökken. Mivel a vertikális farmok kizárólag mesterséges megvilágítást és talaj nélküli termesztést alkalmaznak, ezért bárhol létesíthetők, ahol a működtetésükhöz szükséges anyagok és energia rendelkezésre állnak. A zöldterületek csökkenése, a környezetszennyezés és a szélsőséges időjárási események (heves esőzések, árvizek, aszály, csapadék kedvezőtlen elosztása, erős szél) növekedése gyakran korlátozzák a szabadföldi növénytermelést. Az alapvető élelmiszerek előállítására szolgáló nagy területek már most is elégtelen öntözővízzel, aszályos és/vagy bizonytalan csapadékkal küzdenek, amíg a háztartási víz iránti igény a növekvő urbanizáció és a jobb életminőség igénye miatt tovább növekszik (Kozai & Niu, 2020).

2.1 A vertikális farm jelentősége

A vertikális gazdálkodás a beltéri növénytermesztés leggyorsabban növekvő szegmensévé vált, amelynek létrejöttét a fenntarthatóság és a jó minőségű élelmiszer megtermelése iránti világméretű kereslet ösztönözte. A vertikális farmok kizárólag mesterséges megvilágítást használnak növénytermesztésre, amelynek nagy lendületet adott, hogy az újabban kifejlesztett világító diódák (LED) környezetkímélőbb és gazdaságilag kedvezőbb megoldást jelentenek, mint a nagy nyomású nátrium lámpák (HPS) használata (Katzin, Marcelis, & van Mourik, 2021; Paucek et al., 2020).

Amint arról (Li et al., 2019) beszámolt, becslések szerint (a 2013-as bázisévhez képest) a globális városi terület 2050-ig nagyjából 40-70%-kal fog növekedni, hogy alkalmazkodjon a növekvő városi lakossághoz, ami fordítottan arányosan a művelhető mezőgazdasági földterületek csökkenéséhez fog vezetni. Az előrejelzések szerint a világ népessége 2050-re 9,3 milliárd főre emelkedik, amelynek 70%-a városi területeken fog élni, ezen felül a városi lakosságnak mintegy 70%-kal több élelmiszerre lesz szüksége, mint a 2009-es népességnek (Banerjee & Adenauer, 2014; Despommier, 2013; Islam & Siwar, 2012; Tilman et al., 2001).

A vertikális farm olyan technikának tekinthető, amely intenzívebbé teszi a kertészeti termékek előállítását azáltal, hogy sokféle alrendszert, például a szabályozott környezetet, a termesztett növényeket, a vizet és a tápanyagokat kis területen képes csoportosítani. Így ez a farm olyan rendszert alkot, amelynek egységnyi területre vetített tömege és energiasűrűsége megemelkedett, és magas a tömörítési tényezője. Emiatt a rendszer nem csak a szükséges földterület megtakarításával jár, hanem a művelet vízfogyasztását és CO₂-kibocsátását is csökkentheti. Ezen túlmenően a vertikális farm ellenőrzött környezete biztosítja a termékek

magasabb minőségét, amelyek mentesek a fertőzésektől, a szennyezett víztől és a növényvédő szerektől. Mindemellett mesterséges fényt lehet alkalmazni a másodlagos anyagcseretermékek termelésének szabályozására és optimalizálására, amelyek növelik az organoleptikus, étrendi vagy funkcionális értéket (SharathKumar et al., 2020).

A vertikális farmokon friss és egészséges zöldségeket tudunk előállítani az év bármely napján, függetlenül a manapság egyre inkább jellemző rendellenes időjárástól. Egy ilyen farmon egy négyzetméternyi területen jóval magasabb hozamot lehet elérni, mint bármely más termesztési technológiával, így a kívánt mennyiségű zöldség megtermesztéséhez kevesebb területre van szükségünk és ezeket a területeket közelebb lehet vinni a fogyasztókhoz, ezzel csökkentve a logisztikai költségeket, ami szintén egyre nehezebb és kiszámíthatatlanabb. Megemlíthetjük még a technológia aktualitását alátámasztva, hogy abban az esetben amikor a városi területekre a friss zöldségeket távoli területekről szállítják, a környezetet nagy mennyiségű CO₂ kibocsátással terhelik. Ez nagy mértékben csökkenthető a szállítások csökkentésével (Kumar et al., 2023).

A vertikális farm esetében a termesztéssel kapcsolatos tapasztalat és a technológiai “know-how” sokkal gyorsabban felhalmozódhat, mint a szabadföldi és üvegházi termesztés esetében. A rendszer egyik legnagyobb előnye, hogy a termesztés során egyszerű kísérleteket végezhetünk úgy, hogy csak egy-egy tényezőt változtatunk meg, legyen az a fényforrás, fajta vagy a tápanyag összetétel. Mindezt úgy, hogy az összes többi tényező változatlan marad ezáltal a termelők könnyebben megérthetik az ok-okozati összefüggéseket. A szántóföldi és üvegházi kísérleteknél jobban reprodukálhatók, mivel az eredményeket az időjárás nem befolyásolja (Kozai, 2018).

2.2 A vertikális farmok története

Kutatási, demonstrációs és termelési célból egyaránt, számos farmot működtetnek szerte a világon. Az első ilyen farmot Kínában 2002-ben építették, elsősorban a hidroponikus technológiákra és azok vezérlőrendszereire összpontosító kutatás céljából (Zhou et al., 2022).

Ezt követően az üzletág gyorsan fejlődött Kínában. Az USA-ban 2017-ben több mint 30 ilyen vertikális farm volt, ami 4x annyi mint 2015-ben. Észak-Amerikában különféle formákban termesztettek salátákat és más leveles zöldeket, mint például a kelkáposztát, rukkolát és egyéb konyhai fűszernövényeket. Továbbá ezen növények csíranövényeit (mikrozöldreket) széles körben termesztik ilyen növénygyárakban, aminek az az oka, hogy nagy az értékük, de korlátozottan lehet őket eltartani, ezért ehhez a rendszerhez kiválóan alkalmazhatók. Az USA-ban és Kanadában elfogyasztott saláta és egyéb leveles növények több

mint 90%-át Kalifornia és Arizona együttesen termeli meg. A postharvest elemek technológiai kritikus fontosságúak egy ilyen országos ellátási lánc számára. Míg egy ilyen ellátási lánc hozzájárulhat a termelési költségek csökkentéséhez, addig egyben hajlamos a nagymértékű élelmiszer eredetű betegségek kitörése. Volt is rá példa 2018-ban, amikor az E. coli baktérium jelent meg a Kaliforniában és Arizónában termelt római salátában és fogyasztók százait fertőzte meg ([http1](#)). A probléma a szennyezett csatornavíz használata volt a kültéri termőterületeken, ez kárt okozott a vertikális farmoknak és az üvegházaknak, ugyanis az összes római salátát visszahívták a piacokról (pedig nyilvánvaló, hogy nem ők okoztak országos járványt). Ezután engedélyt kaptak a termelők, hogy önkéntesen jelöljék a termékeiket az általuk használt termelési módszerrel, mint például üvegházi vagy vertikális farmon történő termesztés. Ez egy szélesebb körű elismeréshez vezetett a vertikális farmok területén és felgyorsította a további terjeszkedést. Európával ellentétben Ázsiában és Amerikában inkább a növénygyár (PFAL - plant factory with artificial lightning) kifejezést használják a vertikális farm helyett. Ezeken kívül még gyakran alkalmazzák a városi farm vagy a beltéri farm kifejezéseket is (Kozai és Niu, 2020).

Európában még meglehetősen kicsi a vertikális gazdaságok száma és mérete, de az utóbbi években gyors terjeszkedést tapasztalhattunk. A gyors fejlődésnek számos oka van, mint például a LED világítástechnika árának csökkenése ezzel egyidejűleg a növekvő fogyasztói igény az egészséges friss helyi termékek iránt, továbbá az üresen álló irodaházak a nagyvárosokban. Ha megnézzük itt Európában a kezdeti beruházást egy négyzetméterre, akár 10-szerese lehet egy modern üvegháznak. Ha egy holland üvegháza és egy vertikális farm egységnyi termékre jutó előállítási költségét összehasonlítjuk, akkor azt látjuk, hogy a vertikális farmé hozzávetőlegesen kétszerese az üvegházénak. Ahhoz, hogy a termelés költséghatékony legyen, magasabb értékesítési árra és a termelési költségek csökkentésére van szükség. Cserébe a fogyasztók egy jobb terméket kapnak (jobb/egyenletesebb minőség, frissebb). A vertikális farmot működtető cégek magasabb áron értékesítik a termékeiket, sok esetben a biotermékek áraival megegyező áron (Butturini & Marcelis, 2020). Amerikával ellentétben azonban ezek a talaj nélkül termesztett növények nem kaphatnak ökológiai minősítést az Európai Közösségben. Ezen farmok térhódítása fellendítette az ellenőrzött környezetű mezőgazdasággal kapcsolatos kutatásokat, amiből az üvegházi kertészet is nagyban profitál. A leghatalmasabb (5120 m²) vertikális farm működtetője Európában a Jones Food Company Észak-Lincolnshire-ben ([http2](#)). Évente 420 tonna leveles zöldséget termel és ehhez összesen 12,3 km hosszú LED fényforrást használ. Ezen a farmon a termesztőállványok magassága eléri a 11 métert és a termelés során 90%-kal kevesebb vizet és 50%-kal kevesebb műtrágyát használnak fel, mint az egyéb technológiák esetében.

2.3 A vertikális farm felépítése

A vertikális farm a zárt üzemű termelési rendszer egyik típusa, egy olyan raktárszerű épület, amelyet hőszigeteléssel fednek le, amelyben a szellőzést minimálisra csökkentik és mesterséges fényt használnak egyedüli fényforrásként a növények növekedéséhez, ez által a növény fejlődéséhez szükséges környezetet az időjárástól függetlenül lehet a kívánt pontossággal szabályozni. A vertikális növénytermesztés a növények függőlegesen egymásra helyezett szinteken történő termesztésének gyakorlata. Gyakran magába foglalja a környezeti tényezők folyamatos monitorozását és irányítását (Controlled Environment Agriculture CEA), amelyeknek célja a növények növekedésének optimalizálása (Butturini & Marcelis, 2020; van Delden et al., 2021). Hidropóniás (talaj nélküli) rendszerben a tápoldatot keringtetik, a növények által elpárologtatott víz lecsapódik és a klímaberendezések hűtőpaneljén összegyűlik, amit majd újra hasznosítanak öntözésre (Kozai, Niu, & Takagaki, 2020). A hagyományos mezőgazdaságban nagy mennyiségű peszticid, műtrágya és vegyianyag kerül felhasználásra, amelyek szennyezik a talajt, és súlyos kockázatot jelentenek az emberi egészségre és a környezetre (Chausali & Saxena, 2021). A hagyományos mezőgazdasággal ellentétben a hidropónia növelheti a termelést anélkül, hogy a vegyianyagokat nagymértékben a környezetbe juttatná (Velazquez-Gonzalez et al., 2022). A hidropóniában használt tápoldatok főként oldható szervesetlen sókat tartalmaznak (FAO, 2017).

Ezen farmok mindegyike hat fő szerkezeti elemből áll (Kozai et al., 2020):

1. Egy jól hőszigetelt közel légmentes, átlátszatlan falakkal borított raktárszerű épület.
2. Többszintes termesztési rendszer (többnyire 4-16 szint van és a szintek között 40-60 cm van), amely LED-es világítóberendezésekkel van felszerelve, a művelési asztalok felett.
3. Léghőkécskáló berendezések, amiket elsősorban hűtésre használnak a lámpák által termelt hő kiküszöbölésére, valamint páratlanításra, a növények által elpárologtatott víz visszanyerésére, ventilátorok, amik a levegő keringtetésével elősegítik a fotoszintézist és a párolgást, valamint az egyenletes térbeli levegőeloszlást biztosítják.
4. CO₂-szállító egység, ami fent tartja a növények növekedéséhez szükséges CO₂-koncentrációt (a fotoszintézis fokozása érdekében).
5. Egy tápoldat adagoló egység.
6. Egy környezetszabályzó egység, beleértve az elektromos vezetőképesség (EC)- és pH szabályozókat a tápoldathoz.

2.4 A vertikális farm elrendezése (Kozai, 2019)

A vertikális farm általában egy műveleti helyiségből és egy termesztő helyiségből áll. A légkondicionáló berendezések külső egységeit a külső falakhoz közel és/vagy a tetőn helyezik el. A külső egység közvetlen napfénynek való kitettsége megemeli a hőcserélő hőmérsékletét és növeli a hűtés villamosenergia-költségét, ezért ezt árnyékolással kell elkerülni. A légkondicionáló berendezések belső és külső egységei közötti távolságot a lehető legkisebbre kell csökkenteni a hűtésre vonatkozó magas teljesítménytényező (COP) vagy a légkondicionáló berendezések hűtésre vonatkozó elektromos energiahatékonyságának elérése érdekében. A vészkijárat ajtaját hőszigetelni kell, hogy elkerülhető legyen a víz lecsapódás a belső felületén a hideg évszakokban. A kis rovarok és a por behatolását az ajtó körüli légréseken keresztül szigorúan meg kell akadályozni. A hulladékgyűjtő raktárt legalább 20 m távolságra kell elhelyezni a termesztési és üzemeltetési helyiségektől, hogy megakadályozzák a rovarok és kisállatok mozgását a helyiségek és a raktár között. A pihenőszobát, a teaszobát és az adminisztrációs irodát fizikailag el kell választani a termesztési és az üzemeltetési helyiségektől, hogy fenntartsák e helyiségek magas szintű higiéniáját, még akkor is, ha ez a dolgozók számára kissé kényelmetlen. Mivel a látogatók nem léphetnek be a műveleti és termesztő helyiségekbe, egy üvegablakokkal ellátott folyosót lehet biztosítani, amelyen keresztül betekinthetnek a termesztési helyiségbe.

A műveleti helyiségben vagy melegvizes zuhanyt vagy a légzuhanyt alkalmaznak, ami a vertikális farm üzemeltetőjének kockázatkezelési politikájától függ. A melegvizes zuhany csökkenti a termesztő helyiség biológiai szennyeződésének kockázatát, de sokkal hosszabb ideig tart a használata, mint a légzuhanyzóé, ezért a légzuhany használata ajánlott. A műveleti helyiségbe belépni szándékozónak a tiszta ruházat felvétele előtt és után légzuhanyozniuk kell. Kötelező két külön légzuhanyzó és öltöző a nők és a férfiak számára.

A termesztőhelyiségbe belépni szándékozónak a műveleti helyiségen keresztül tiszta (fertőtlenített) overált, maszkos fejfedőt, maszkot, egy pár kesztyűt és csizmát szükséges felvenniük, majd a termesztőterembe való belépés előtt 15-30 másodpercig ismét légzuhanyt kell venniük. A termesztőhelyiségben használandó készleteket a műveleti helyiségből a passzázs dobozon (higiéniai rendszer/eszköz, amit a keresztszennyeződések elkerülésére alkalmaznak) keresztül szállítják. A műveleti helyiségben a légzuhanyzó helyiség és az átjárószekrény mindkét oldalán ajtókkal van ellátva, hogy megakadályozzák a levegő cseréjét a műveleti és a termesztőhelyiségek között.

A termesztőhelyiségbe tehát teljesen sterilen és steril eszközökkel lépünk be. A vetés, a palántanevelés és a termesztés termesztési területének aránya nagyjából 1:12:50. A szintek minden egyes polca 1-2 m széles, átlagosan körülbelül 1,5 m. Az, hogy az egyes szintek milyen hosszúak, az a termesztőhelyiség méretétől függ. A szintek közötti függőleges távolság 30-100 cm, de átlagosan 50 cm körül van. A közlekedőfolyosó átlagosan 1 m széles, de ez nagymértékben függ az átültetés és betakarítás módjától:

- az átültetés és betakarítás a szintek mindkét végén történik, és a közlekedőfolyosót csak karbantartásra, a termesztő polcok tisztítására stb. használják, vagy
- az átültetés és betakarítás a szintek mindkét végén történik a járda mentén.

Az előbbi esetben a járda keskenyebb. A légkondicionáló berendezésekből és a légkeringtető ventilátorokból kiáramló levegő irányának meg kell egyeznie a szintek irányával. Fontos továbbá a helyiség levegőjének függőleges mozgatása, hogy a levegő hőmérséklete, a páratartalom, a légáramlási sebesség és a CO₂-koncentráció megfelelő legyen minden termesztési szinten. Használhatók mozgatható kocsik akkumulátorral vagy anélkül, melyek a termesztési panelek, a betakarított termények, a növényi maradványok, a csomagoló dobozok stb. szállításában segédkeznek. Vannak továbbá mozgatható, akkumulátorral vagy anélkül felszerelt emelők, amikkel a növényeket tartalmazó paneleket fel- és lerakodják. A nagymértékben légmentes tenyésztőhelyiségek tervezése és építése során a felhasznált anyagok (falakhoz használt panelek és padlók, ragasztó a csővezetékekhez, hűtőfolyadék a légkondicionálókhoz) illékony szerves vegyületeket bocsáthatnak ki, ezek (pl. propilénglikol) kibocsátását szigorúan el kell kerülni vagy minimalizálni kell.

A vertikális farmokat a következő célok figyelembevételével kell megtervezni:

- maximalizálja a felhasználható vagy értékesíthető növényi részek mennyiségét a lehető legkevesebb erőforrás felhasználásával,
- az erőforrásokat a lehető legmagasabb hatékonysággal használja fel,
- minimalizálja a környezetbe kerülő szennyező anyagok mennyiségét,
- minimalizálja a költségeket, az előző három cél megvalósulása mellett.

2.5 A vertikális farmok típusai

Többféle szempont alapján különböztethetjük meg a vertikális farmokat. Egyik szempont, hogy kereskedelmi célú termelésre vagy nem kereskedelmi céllal létesülnek, például a mini- és mikro farmok, amiket otthon kis “dobozokban” láthatunk. Megkülönböztetünk továbbá konténerfarmot, erre példa az Agricoool, ami egy francia vertikális gazdálkodást folytató vállalat (<http3>). Ez a cég konténerfarmokat fejleszt szamócatermesztésre aeroponikával, a tápanyagot tápköd formájában juttatják el a gyökerekhez (Eldridge et al., 2020). Ezenkívül léteznek még “in-store” farmok és készülékfarmok. Az “in-store” farmok üzletekben és éttermekben közvetlenül a helyszínen vannak elhelyezve és ott termelnek fűszernövényeket, levélzöldségeket és mikrozöldségeket folyamatos felhasználásra. A készülék farmokat igazából intelligens beltéri kerteknek lehetne leírni (Zhang & Zha, 2023).

2.6 A vertikális farm kulcsfontosságú elemei

2.6.1 Elektromos energia

Az erőforrások közül a vertikális farmon jelentős mennyiségű elektromos energiát használnak fel, elsősorban a légkondicionálásra és a világításra. Így az elektromos energia és a fényenergia felhasználása a két legfontosabb javítandó erőforrás a farmok hatékonyságának szempontjából. A villamosenergia költség jellemzően a teljes termelési költség 25%-át teszi ki (Katzin et al., 2021). Emiatt ezeken a farmokon történő termelésre azok a növények a legalkalmasabbak, amelyeket nagy ültetési sűrűséggel tudunk termesztetni és alacsony fényintenzitás mellett rövid tenyészidőszak alatt betakarítható állapotba hozhatóak. Ahhoz, hogy az egységnyi alapterületre jutó éves termelékenységet növelni tudjuk, többszintes rendszert kell alkalmazni. Ez azzal jár, hogy a kifejtett növénynek 30 cm-nél kisebbeknek kell lenniük. A felhasznált villamos energiának a 80%-a a megvilágításra megy el. Ahhoz, hogy a termelési költségeket csökkentsük a fény energia felhasználásának hatékonyságát javítanunk kell. Jelenleg az elektromos energia kevesebb mint 1%-a alakul át az értékesíthető növény részévé, a fennmaradó kb. 99% pedig hőenergiává alakul, amit a légkondicionáló berendezések a külvilágba juttatnak. Kutatások azt mutatják hogy ez az átalakítási tényező 3 %-ra vagy még nagyobbra javítható (Kozai & Niu, 2019).

2.6.2 Fény

A vertikális farmokon egyre inkább növényközi vagy lombkoronán belüli megvilágítást alkalmaznak, ennek az az oka, hogy így több fény jut az alsó leveleknek, javul a fényeloszlás és fokozódik az egész lombkorona fotoszintézise. A LED fényforrások

használhatók a növények közötti megvilágításhoz, mivel kis méretűek és más fényforrásokhoz képest alacsonyabb a felületi hőmérsékletük (Kanski et al., 2021). A fény rendelkezik két egymásnak ellentmondó tulajdonsággal: hullámjelenségként figyelhető meg, ugyanakkor mégis diszkrét részecskékként, úgynevezett fotonokként is viselkedik. A foton a fény legkisebb részecskéje, vagyis egyetlen fénykvantum. Más környezeti tényezőktől, például a hőmérséklettől, a páratartalomtól és a széndioxid-koncentrációtól eltérően a fény legalább három dimenzióban változik: mennyiségben, minőségben és időtartamban. Ha elektromos fényt használunk a vertikális farmokon, akkor a fényciklus, amely hatással van a növények növekedésére és fejlődésére, gyorsan képes változni (Balázs & Nádas, 2020). A fény alapvetően kétféleképpen befolyásolja a növényeket: energiát vagy kvantumforrást biztosít és úgy működik, mint egy információs közeg. Mint egy energiaforrást, a fényenergiát vagy a fény fotonjait a növények befogják és a növények által befogott fotonok egy részét (akár 10%-át) átalakítják kémiai energiává (szénhidrátokká) a fotoszintézis révén (Lin, Huang, & Xu, 2018). A fény mérésére három rendszer létezik, de alapvetően a használt és előnyben részesített mérési rendszer a kvantum, mivel ez a rendszer kifejezi az egységnyi idő (másodperc) alatt egységnyi területre (m²) eső fény fotonok (vagy kvantumok) számát (Jishi, Ishii, & Shoji, 2022).

A vertikális farmokon fény recepteket alkalmaznak, amely különböző növényfajok számára más és más. A fény recepten belül az alábbi elemeket meghatározása nagyon fontos, annak érdekében, hogy a lehető legjobb minőségű és mennyiségű növényt állítsuk elő a legköltséghatékonyabb módon.

2.6.3 Fényszint

A növényre beeső fény mennyisége ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ -ban). Egyes növények, mint például az uborka, szeretik a magas fényszintet, míg mások az alacsonyabb fényszintet is elviselik (Gavhane et al., 2023).

Spektrum

A spektrum az ultraibolyától az infravörösre terjedő tartomány, amely befolyásolja a növények növekedését. A növények különösen érzékenyek a vörös és kék fény keverékére, és minden fényrecept meghatározza a LED-világítás színét (Y Kong, Nemali, Mitchell, & Nemali, 2019).

Egyenletesség

Az egyenletesség (fényhomogenitás) azt jelenti, hogy a fény mennyire egyenletesen oszlik el az összes növényen, nem csak a fényforrás alatt lévő növényeken. Az egyenletes fény biztosítja a növények egyenletes növekedését és lehetővé teszi az automatikus betakarítást (Balázs, Dombi, Csambalik, & Sipos, 2022).

Időzítés

Egy fej salátának körülbelül 14 óra fényre van szüksége naponta, míg a bazsalikom a napi 20 óra fényt kedveli. És ez az évszakonként változhat. A fényrecept meghatározza, hogy mikor kell be- és kikapcsolni a világítást, hogy a földrajzi elhelyezkedés alapján a legjobb eredményt érjük el (Chen, Wang, Li, Yang, & Guo, 2019; G. Pennisi et al., 2020).

2.6.4 *Hőmérséklet*

A fény mellett számos növényi fiziológiai folyamatokat befolyásol a növény hőmérséklete, amelyet a növényi szövetek és a környezet közötti hőátadás határoz meg. A farmokon a levegő hőmérséklete a legtöbb esetben állandó szinten van tartva, ami állandó növényi hőmérsékletet eredményez és ezáltal állandó fiziológiai aktivitást is. A hőmérséklet az egyik legkritikusabb változó, amelyet a vertikális farmon mérni kell. A levegőhőmérséklet, a levélhőmérséklet, sőt még a táptalaj és a tápoldat hőmérséklete is hatással lehet a növények élettani aktivitására (Carotti et al., 2021). Ezen kívül ha a növény hőmérsékletét és a levegő hőmérsékletét össze hasonlítjuk, akkor abból következtethetünk arra, hogy a növény stresszes-e (Böcs, Pék, Helyes, Neményi, & Komjáthy, 2009). Több termesztési polcra beszélünk, amik egymáshoz közel vannak elhelyezve, függőlegesen és vízszintesen is. A levegő és a levelek hőmérsékletének legnagyobb mértékű ellenőrzése érdekében a legideálisabb az, hogyha a hőmérsékletet több helyen, függőlegesen és vízszintesen is mérjük a termesztő polcok mentén. Ezeket a hőmérséklet-érzékelőket/mérőket úgy kell megválasszuk, hogy megbízható legyen és a hőmérsékletváltozásra érzékeny legyen. Leggyakrabban termisztorokat alkalmaznak a cégek, mert viszonylag olcsók és gyorsan képesek reagálni a hőmérséklet változására (Mitchell, 2022). Egy másik típusú hőmérő, amit még gyakran alkalmaznak, a termoelem. A termoelem két különböző fémből áll, amelyeket úgy kombinálnak, hogy feszültséget termeljenek a hőmérséklet különbség hatására. A leggyakrabban használt típusú termoelem az úgynevezett T típusú hegesztett hőelem. A termoelemek tévesen magas hőmérsékletet jelezhetnek, ha közvetlen napsugárzásnak vagy más közeli tárgy kisugárzásának vannak kitéve. És tévesen alacsony hőmérsékletet is mérhetnek, hogyha ezeken a fémhuzalokon kondenzáció képződik.

Ezért az ilyen termoelemes mérések pontosságának növelése érdekében ezeket a termoelemeket egy zárt dobozba kell szerelni egy kis ventilátorral (Zhu, 2023).

2.6.5 Páratartalom

A levegő magasabb hőmérsékleten több vízgőzt képes megtartani, mint alacsonyabb hőmérsékleten. A relatív páratartalom hőmérséklet függő, és a levegő vízgőz tartalmának kifejezésére szolgál, a levegő maximális vízmennyisége alapján, amit a levegő adott hőmérsékleten és nyomáson képes megtartani. Ezt leggyakrabban százalékban vagy az adott vízgőztartalom és hőmérséklet arányában fejezik ki. Pl. ha levegő hőmérséklete csökken a vízgőz tartalom változatlanul hagyása mellett, akkor a levegő maximális visszatartó képessége csökken, ami majd magasabb relatív páratartalmat eredményez. A farmokon a növények folyamatosan vízgőzt adnak a levegőhöz a transzplantáció által, ami a víz eltávolítását jelenti a növényi felületekről a légkörbe. Az egészséges, aktívan növekvő növények sok vizet tudnak elpárologtatni, ami a vízgőz tartalom és a páratartalom gyors növekedését eredményezi egy zárt rendszerben. Hogyha a légkondicionáló rendszer megfelelően működik, a páratartalom kordában tartható mivel így a vízgőz lecsapódik a hűtőtekercseken, ezzel csökkentve a levegő nedvesség tartalmát és páratartalmát. Alternatív megoldásként önálló páratlanítók is telepíthetők, amelyek nem függenek a légkondicionáló berendezés működésétől. Ezek használhatók arra is, hogy elkerüljük a világítás és a légkondicionálók működtetését az energiafogyasztásai csúcsidőszakokban, ezzel csökkentve az energiaköltségeket. A lecsapódás mennyisége jelentős lehet és a kondenzvíz újra hasznosítása kívánatos a vízmegtakarítás érdekében. Felhasználás előtt meg kell bizonyosodni arról, hogy ez a kondenzvíz biztonságos-e az öntözéshez, a szennyeződések pl. nehéz fémek megléte miatt. Az öntözése történő felhasználás esetén a kondenzvizet szűrni és kezelni kell mielőtt a növényekhez juttatjuk (Graamans, van den Dobbelsteen, Meinen, & Stanghellini, 2017; Giuseppina Pennisi et al., 2019; van Delden et al., 2021).

A valóságban a levegő sohasem teljesen száraz, még a sivatagban sem, ami azt jelenti, hogy a levegő mindig a száraz levegő és vízgőz keveréke. Bár a vízgőztartalom gyakran kevesebb, mint 1%-a a teljes mennyiségnek, mégis nagy hatással van a levegő állapotára és általános viselkedésére. A vízgőz jelentős szerepet játszik a Föld vízkörforgásában, befolyásolja a helyi éghajlati viszonyokat, valamint energiát tárol és ad át érzékelhető és látens hő formájában. Az érzékelhető az az energia, amelyet az ember érez, és amelyet közvetlenül mérhetünk hőmérővel. A látens hő az az energia, amely nem érezhető és vízben található meg, amíg át nem kerül egy olyan anyagba, amely kevesebb energiával rendelkezik. A párolgó hűtés folyamata a látens hőátadást mutatja be. Amikor a folyékony víz elpárolog, hőt vesz fel a

körülötte lévő levegőből, aminek következtében az érzékelhető levegő hőmérséklete csökken és a levegő víztartalma (páratartalma) nő. Ez az energia azonban nem tűnik el. Ezt “felfogja” a vízgőz látens hő formájában. Ezért a kevert levegő energiatartalma nem változik, annak ellenére, hogy a száraz hőmérséklet csökken.

2.6.6 Szén-dioxid koncentráció

A növények a fotoszintézis során CO₂-t vesznek fel, a légzés során pedig CO₂-t bocsátanak ki. A szén-dioxid koncentrációban történő kis változás jelentős hatással lehet a növények fotoszintézisének sebességére. Bár nélkülözhetetlen a növények fotoszintéziséhez és növekedéséhez, a CO₂ koncentráció nehezen szabályozható tényező az üvegházak és a vertikális farmok hagyományosan szabályozott környezetében. Az optimális növény-növekedés érdekében fontos a CO₂ koncentráció folyamatos nyomon követése, ugyanis az alacsony vagy magas koncentrációt nehéz kimutatni mivel a növények ilyen környezetben is abszolút tünetmentesek. Saláta esetén a CO₂ koncentráció optimálisan a légköri szint (400 ppm), ennek emelése maximum 800 ppm-ig hatékony (Jishi, Fujiwara, Nishino, & Yano, 2012).

2.7 A vertikális farmon történő salátatermesztés néhány eddigi eredménye

Az élelmiszer szektorban egy új termékfejlesztési irány alakult ki, a friss, növényi alapú, teljes értékű élelmiszerek csoportjában, amely iránt nő a kereslet a fogyasztók körében. A mikrozöldségek néven ismert termékek egyre népszerűek a beltéri kertészetben. Ezek olyan fiatal, éretlen zöld növények, amelyek kelés után néhány nap vagy hét után betakarítva, nagy mennyiségű bioaktív anyagot tartalmaznak (Michell et al., 2020).

A fenti kategóriába is tartozó saláta (*Lactuca sativa* L.), e mellett a legjelentősebb levélzöldség növény, valamint a vertikális farmokban történő termesztése is egyre nagyobb népszerűségnek örvend fenntarthatósága, és hatékony termesztetőségének potenciális előnyei miatt. Széles körben fogyasztott, amely méltán elismert táplálkozásélettani jelentőségéről és az egészségmegőrzést elősegítő bioaktív vegyületek jelenlétéről (Nicolle et al., 2004).

A vertikális farmon termesztett saláta fajták élettani reakcióját a megvilágítás módja, intenzitása és fény spektrum összetétele eltérő módon befolyásolja. Erre a célra beállított kísérletben azt vizsgálták milyen összetételű és LED megvilágítás mód a legalkalmasabb baby levelű saláta (*Lactuca sativa* L. var. *Acephala*) növekedésének és fitokémiai tulajdonságainak javítására. A növényeket zárt, hidroponikus rendszerben nevelték, ahol az átlagos fotoszintetikus foton áram sűrűség (PPFD) csíranövény szinten 150 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}^1$ volt, és a 16 órás fotoperiódust, 30 napos növekedési ciklus alatt, 1150 növény/ m^2 állomány sűrűség mellett

alkalmazták. A megvilágítás spektrális eloszlása vörös:77,1%; zöld + sárga: 17,9%; kék: 5% volt, folytonos és pulzáló (2Hz frekvenciával) LED megvilágításnál egyaránt. Kimutatták, hogy mindkét LED üzemmód növelte a termést, a levél hosszúságot és levél szélességet az üvegházi kontrollhoz képest (Ali, Santoro, Ferrante, & Cocetta, 2023). A klorofill fluoreszcencia (Fv/Fm), ami meghatározza a fotoszintetikus rendszer (PSII) fotokémiai hatékonyságát, pulzáló LED alatt kissé növekedett, azaz hatékonyabb volt a fotoszintézis ráta növelésében, mint folytonos LED üzemmódban, ahogyan azt további kutatások is igazolták (Ali et al., 2023; Son, Lee, & Oh, 2018).

Más kutatók, a saláta fajták eltérő reakcióját tapasztalták az eltérő megvilágítás mód hatására; folytonos vörös-kék LED fény alatt a rukkola levél szárazanyag-tartalma fokozódott, és csökkent az összes klorofill koncentráció, míg ilyen fényviszonyok alatt a madárbegysaláta (*Valerianella locusta* L.) levelekben a klorofill koncentráció nagyobb volt (Samuolienė et al., 2021; Wojciechowska, Kołton, Długosz-Grochowska, Żupnik, & Grzesiak, 2013).

Nagyobb arányú kék fény alkalmazása esetén nagyobb Fv/Fm érték mutatható ki, mint a monokromatikus vörös megvilágítás alatt (Son & Oh, 2013) ezáltal nő a növények fotoszintetikus kapacitása, fotoszintetikus rátája és sztóma sűrűsége (Wang, Lu, Tong, & Yang, 2016). Más kutatók szerint a LED intenzitása több növekedési paraméter változékonyságát okozza; nagyobb LED intenzitás csökkenti a levélfelületet, levélszámot és a növény magasságát vörös salátában, emellett a mérsékelt LED intenzitás hozzájárult a friss súly növeléséhez (Viršilė et al., 2019).

A vörös levelű salátánál a biomassa felhalmozódásra és az antocianin szintézisre a legoptimálisabb az impulzusos megvilágítási mód, míg a hagyományosnak mondható zöld levelű salátánál nem volt szignifikáns különbség a biomasszában különböző besugárzási módok mellett. A vörös levelű saláta esetében azt találták, hogy a karotinoidok legmagasabb koncentrációja a levélben állandó (24 órás) és pásztázó besugárzás mellett volt megfigyelhető, ami a fotoszintetikus rendszer aktívabb reakciójával függ össze az elhúzódó besugárzással és a szkennelés során megnövekedett intenzitással. sugárzás. Emellett mindkét salátafajtánál megnövekedett fotoszintetikus aktivitást tapasztaltak a LED lámpák 16 órás működése mellett, ami azonban nem befolyásolta a végső termelékenységüket (Smirnov et al., 2022).

A vertikális farmokon termesztett saláta fajták kísérletei rámutattak a LED fényforrások egyedülálló előnyeire a növényi növekedés és fejlődés tekintetében. A különböző fényminőségek, intenzitások és megvilágítási módok egyedi hatással vannak a növények fotoszintetikus teljesítményére és fitokémiai profiljára, amely jelentős potenciált jelent a

precíziós mezőgazdaság és a táplálkozástudomány területén. Ezek a kísérletek hozzájárulnak a megértéshez, hogy miként optimalizálható a növények növekedése és a tápanyagtartalom a környezeti feltételek szabályozásával.

Különös figyelmet érdemel a pulzáló LED világítás, amely kimutathatóan növeli a fotoszintetikus hatékonyságot és az antociánok, valamint egyéb bioaktív vegyületek termelését. Az ilyen jellegű világítási módszerek alkalmazása, különösen a vörös levelű saláta esetében, szignifikáns előrelépést jelenthet a zöldségtermesztés terén.

3 ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1 A kísérlet helyszíne

A vertikális farm kísérletet 2022-ben állítottuk be a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Genetika és Biotechnológia Intézetének kísérleti terén, Gödöllőn (N47°34'51.4", E19°22'39.0").

A berendezés egy fényszigetelt helyiségben került megvalósításra, amely egy 4 szintes fém állvány polcokkal, mélyvízi kultúra rendszert alkalmazva, körülbelül 3 cm mély műanyag tálcákkal, amelyeket a BedRock Kft. (Budapest) épített. A zárt rendszerű hidropóniás rendszerben a Floramicro® 5-0-1 és a Floragro® (General Hydroponics Company, Santa Rosa, CA, USA) 2-1-6 folyékony műtrágyából hígított, $1,0 \text{ mS/cm}^1$ elektromos vezetőképességű és 6,5 pH-jú komplex tápoldat volt folyamatosan keringtetve (**1. ábra**).



1. ábra A vertikális farm termesztő polcai, a különböző spektrumú bekapcsolt fényforrásokkal

A klímát állandó 16°C -os hőmérsékleten és 70%-os relatív páratartalomon tartottuk, amelyet különböző európai beszállítók eszközei tettek lehetővé, többek között egy Sanyo légkondicionáló, Trotec páramentesítő és Westinghouse ventilátor.

Egy zöld batávia típusú salátafajta, a 'Bassari' magjai, (Nunhems, Hollandia), szeptember 7-én kerültek elvetésre 40 cellás fém tálcákra, O1 típusú Growfoam (GrowFoam Ag, Groningen, Hollandia) palántanevelő szubsztrátba, ami biológiailag lebomló, tőzegmentes anyag. A

tálcákat a csíráztatásra kifejlesztett propagátorba (2. ábra) helyeztük, amely a vertikális farm részét képezi és folyamatosan egyenletes 20 °C-os hőmérsékletet és 100%-os relatív páratartalmat biztosított a keléshez.



2. ábra A vertikális farm csíráztató szekrénye, az elvetett saláta magokkal

3.2 Kezelések

A csírázás után a palántákat áthelyeztük a műanyag tálcákra. A saláta világítása napi 12 órás időtartamú volt a széles spektrumú fehér LED-ekkel, UV-A ultraibolya és infravörös LED chipekkel kiegészítve. Ezeket hasonlítottuk össze a piros-kék lineáris LED modulokkal, ahol a piros és kék chipek aránya 4R:1B volt, amelyet korábbi tanulmányok kedvezőnek találtak a saláta növekedésére (Yuyao Kong & Nemali, 2021). Az összes fényforrást a LED Lightning Kft. szállította Budapestről, Magyarországról. A kísérletben, a fotonáramsűrűséget (PPFD) a

tálcákban növekvő növények lombkorona magasságában azonos szintre állítottuk be (270 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$).

3.3 Mérések

A lámpák fénykibocsátásának mérését, 325–1075 nm tartományban, az ASD FieldSpec HandHeld 2™ (Analytical Spectral Devices Inc., Colorado, USA) hordozható spektrométerrel végeztük. Az eszköz radiancia mérési módban, 1 nanométeres pontossággal rögzített adatokat, amellyel egységesen 40 cm távolságból végeztük a méréseket.

A saláta betakarításának idején a SPAD-indexet egy SPAD-502 klorofillmérővel (Konica Minolta, Warrington, Egyesült Királyság) határoztuk meg minden kezelésnél öt levélen. Az eszköz a növényi levél relatív klorofilltartalmát méri a klorofill 650 nm hullámhosszúságú fény elnyelődése alapján, referenciaértékként használva a 940 nm hullámhosszúságú infravörös fény áteresztését (Parry, Blonquist, & Bugbee, 2014). A mérés során a készülék kiszámítja a SPAD-értéket, amely egy közismert vegetációs index, a levélen áthaladó infravörös és vörös fény intenzitásából, amely szorosan korrelál a pontos analitikai módszerrel mért klorofill tartalommal (Monje & Bugbee, 1992; Xu & Mou, 2015). Mintaként minden blokkból véletlenszerűen négy növényt választottunk ki, és minden növényen négy levelet mértünk. Így összesen tizenhat levelet mértünk minden kezelésből. A SPAD-502 klorofillmérőt minden növény mérés előtt kalibráltuk.

Spektrális méréseket végeztünk a saláta leveleken közvetlenül a betakarítás előtt. A spektrális adatgyűjtéshez in vivo leveleket használtunk. A spektrális méréseket szintén az ASD FieldSpec HandHeld 2™ hordozható spektrométerrel végeztük, abszorbancia módra állítva az eszközt. A spektrális mintákat közvetlenül felvételeztük 325–1075 nm tartományban négy különböző fénykezelés növényeinek levéléről, az ASD spektrométer levélcipeszével. Az eszköz fényforrása halogén izzó volt 2900 K színhőmérséklettel, kalibráláshoz a Zenith Polymer® referencia panelt használtuk, amely préselt polietilén-tetrafluoroetilénből készült (SphereOptics GmbH, Uhldingen, Németország). A spektrális szkennelés 20 ismétlésben történt, így a mérések összes száma 80 volt. Az eszköznek <3.0 nm spektrális felbontása van 700 nm-en, és a hullámhossz pontossága ± 1 nm.

A növények mért adatait MicroSoft Excel™ szoftverrel dolgoztuk fel, átlagokat és boxplot analízist alkalmazva. A nyers spektrális adatokat az Unscrambler 11.0 szoftverrel (CAMO Analytics AS., Oslo, Norvégia) konvertáltuk és elemeztük. Az összefüggések megállapításához szintén a MicroSoft Excel™ szoftvert használtuk.

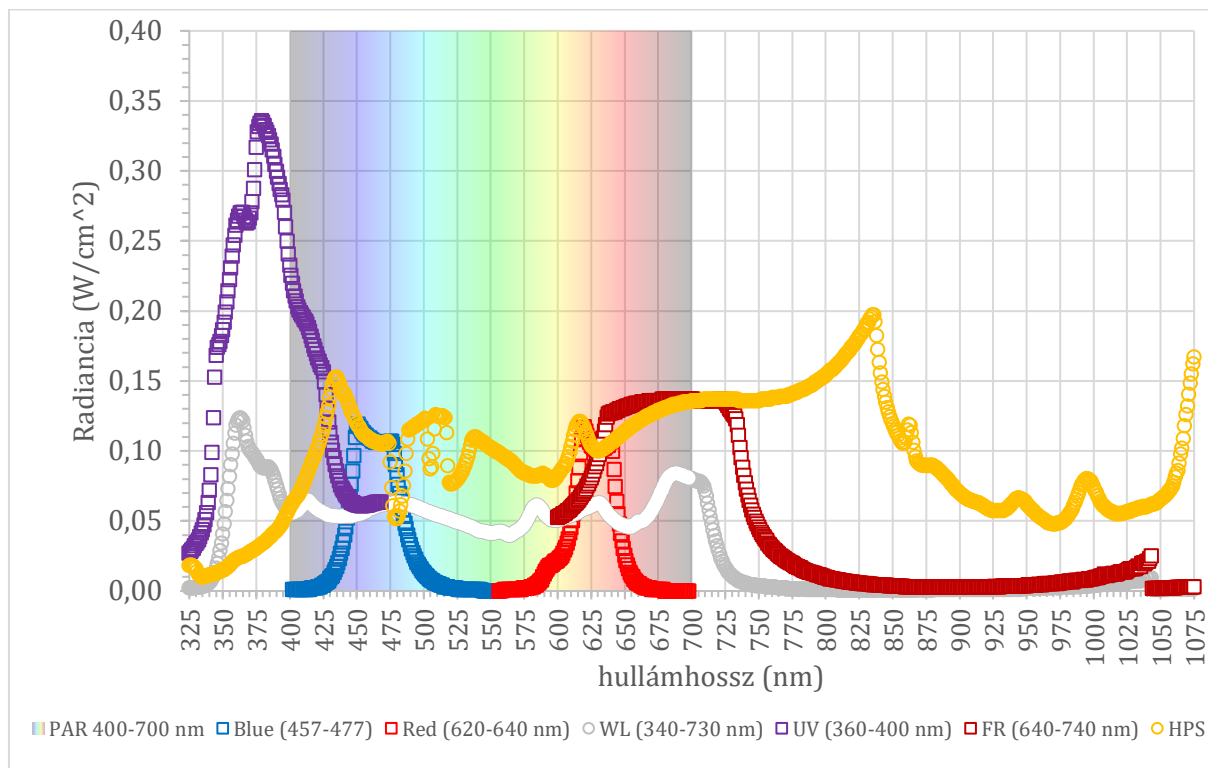
4 EREDMÉNYEK

A mesterséges világítás szerepe az agrár- és kertészeti gyakorlatokban az idők során sokat fejlődött a technológiai fejlesztéseknek köszönhetően, különösen a fénykibocsátó diódák (LED-ek) megjelenésével. A kutatások igazolták, hogy a fehér LED-ek, amelyek piros, zöld és kék monokróm chipeket kombinálnak, képesek utánozni a napfény spektrumát, így megfelelő alternatívát nyújtanak a napfényhez kontrollált környezetű mezőgazdaságban. A kompakt fehér LED lámpák megjelenésével pedig még kedvezőbb fénykörnyezet hozható létre a növények számára (Hooks, Sun, Kong, Masabni, & Niu, 2022; Yang et al., 2018).

4.1 A fényforrások összehasonlítása

A méréseink alapján, a fehér LED-ek által kibocsátott fény hasonló a napfény spektrumához a PAR spektrumban. A LED lámpákat a korábban használatos HPS, valamint a régebben használatos kék-vörös LED lámpákkal hasonlítottuk össze, melyeknek sugárzási spektrumait a következő ábra szemlélteti (**3. ábra**). Az ábrán látható, hogy a hagyományosnak nevezhető HPS lámpa az infravörös tartományban (700 nm felett) hasonló intenzitású kibocsátást produkál, mint a PAR (400-700 nm közötti) hullámhosszokon. Emiatt a tulajdonsága miatt, minimum 1,5 méter távolságra szükséges elhelyezni a növényektől, mert a lombzat felületén perzselést okozhat. Ebből következően szükséges gondoskodni a lámpák hőelvezetéséről, amely jelentősen befolyásolhatja a berendezés mikroklímáját. Vertikális farmokon, polcos mikroöldségek termesztésében sokkal rosszabb helykihasználást eredményezne, ezért többszintes termesztés esetén szinte kizárólag LED-eket alkalmaznak (Dannehl, Schwend, Veit, & Schmidt, 2021; Fujiwara, 2020; Katzin et al., 2021). A hagyományosnak nevezhető, egyszínű LED lámpák (kék: 457-477 nm; vörös: 620-640 nm) kifejezetten csak a klorofill két elnyelési spektrumát célozzák, az ultraibolya, vagy az infravörös tartományt érzékelő, fotomorfogenetikus hatást kiváltó molekulákra hatástalanok (Ahlman, Bänkestad, & Wik, 2016; Piovene et al., 2015).

Az ábrán látható kompakt fehér LED lámpák kibocsátási spektruma, nagyon hasonlít a HPS-hez, azzal a különbséggel, hogy az infravörös tartomány nagy része hiányzik, ezért nagyon közel helyezhető a levelekhez, nem okoz károsodást. Ez a tulajdonsága kompenzálja az alacsonyabb sugárzás intenzitást, valamint a mikroklímára gyakorolt kisebb hatása is könnyebb beilleszthetőséget jelent (Bugbee, 2017; Jishi, Matsuda, & Fujiwara, 2015).



3. ábra A megvilágításra használt LED lámpák és a HPS lámpák átlagos radianciája (n=4)

A fehér LED-ek úgy vannak kialakítva, hogy szorosan megközelítsék a napfény spektrumát, különösen a fotoszintetikusan aktív sugárzás (PAR) tartományban. Ez a tartomány létfontosságú a növényi fotoszintézishez és növekedéshez. A tanulmányok szerint a fehér LED-ek növelhetik a növények növekedését azáltal, hogy hatékonyan illeszkednek a PAR spektrumhoz, ami növeli a fotoszintézis arányt és jobb terméshozamot eredményez a hagyományos világítási rendszerekhez, mint a nagynyomású nátrium-, vagy fluoreszcens lámpákhoz képest (Dannehl et al., 2021).

A kísérletben, a fotonáramsűrűséget (PPFD) a tálcákban növekvő növények lombkorona magasságában azonos szintre állítottuk be ($270 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$). Általában elmondható, hogy a kék-vörös lineáris LED modulok (téglalap alapvetületű) fénykibocsátásának térbeli egyenletessége jobb volt, mint a pontforrásos (kör) kompakt fehér LED-es fényforrásoké, különböző formájukból adódóan (Balázs et al., 2022). Az ábrán látható fényforrások közül csak a kompakt fehér (WL), az ezt kiegészítő ultraibolya (UV) és infravörös (FR) fényforrások kerültek összehasonlításra a hagyományosnak mondható kék-vörös (Blue-Red) lineáris LED modulokkal, mint kontroll fényforrással.

A fehér LED-ek hatékonysága a növénytermesztésben nem csak a napfényhez hasonló spektrális jellemzőiknek köszönhető, hanem képességüknek az intenzív és célzott fény biztosítására is. Ez jelentősen csökkentheti az energiafogyasztást, miközben maximalizálja a

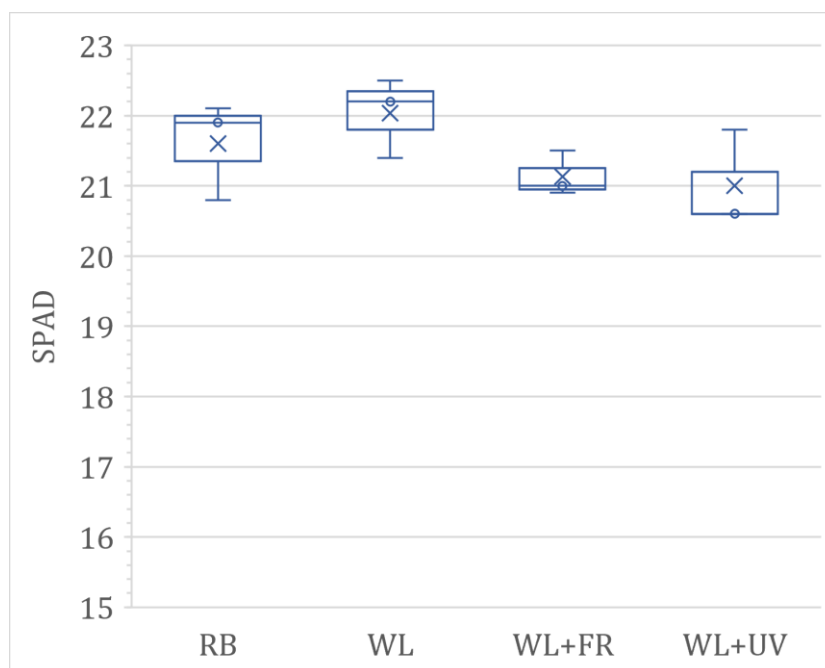
fotoszintetikus tevékenységet. A fehér LED-ek lehetővé teszik a fényintenzitás és időtartam szabályozását, amelyek alapvető paraméterek a növényi metabolikus folyamatok és növekedési ciklusok optimalizálásához (Kitazaki et al., 2018).

Bár az LED-ek számos előnnyel rendelkeznek, vannak kihívások is, mint például a fénykibocsátás változékonysága a hőmérséklet és a fényforrás öregedése miatt. Ezek a változások befolyásolhatják a LED világítás színének pontosságát és stabilitását, amelyek fontosak a következetes növényi növekedéshez (Hegedűs et al., 2022, 2023). Az LED technológia fejlődése, beleértve a visszacsatolási szabályozó rendszerek fejlesztését, kezeli ezeket a kihívásokat, biztosítva a fénykibocsátás stabilitását és megbízhatóságát az idő múlásával (Muthu, Schuurmans, & Pashley, 2002).

4.2 A SPAD értékek

A gyakorlatban olyan roncsolásmentes relatív klorofill mérőeszközöket használnak, amelyek azonnali jelzést adnak a növény állapotáról (Monje & Bugbee, 1992; Parry et al., 2014). A SPAD-502 klorofillmérő, egy roncsolásmentesen mérő eszköz, a levelek zöldességének meghatározásához (Xu & Mou, 2015). A kapott dimenzió nélküli értékek és a tényleges klorofilltartalom korrelációja azonban a fajon belül fajtánként változhat egy tanulmány szerint (Monje & Bugbee, 1992). A salátalevelek spektrális jellemzőinek mérésével *in vivo* nyomon követhetők a növényi abiotikus stresszre utaló dinamikus levélbiokémiai reakciói, valamint a relatív táplálkozási minőség javulása vertikális gazdálkodásban (Cammarisano, Graefe, & Körner, 2022).

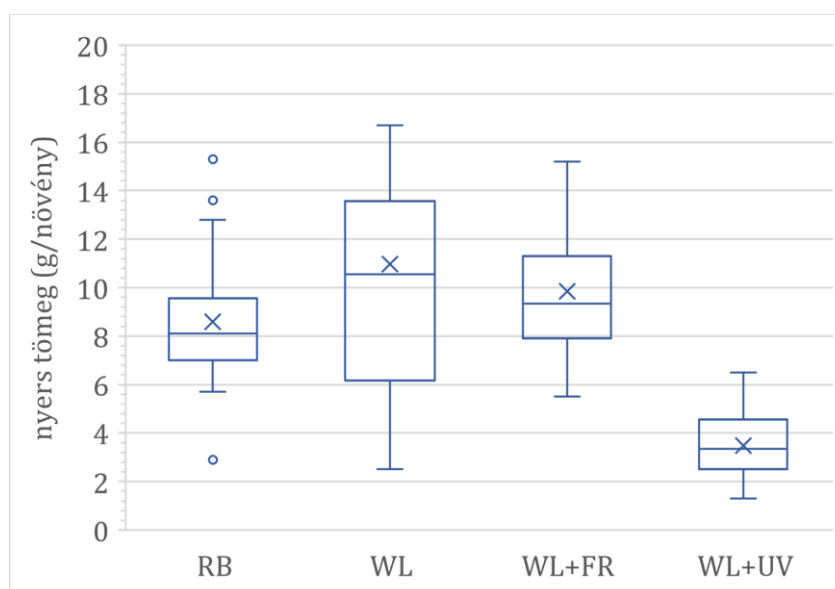
A négy különböző fényforrás szignifikáns különbségeket eredményezett a kezelések SPAD-értékei között (**4. ábra**). A fehér LED (WL) produkálta a legmagasabb SPAD értéket, míg ugyanez infravörös- (WL+FR) és ultraibolya kiegészítéssel (WL+UV) szignifikánsan alacsonyabb SPAD értéket eredményezett. A korábbi tanulmányok általában magasabb SPAD értékeket találtak kiegészítő UV-sugárzás mellett, bár a használt fényintenzitás is magasabb volt (Kelly & Runkle, 2023; Kim & Lee, 2016). A kutatók általában a saláta SPAD-értékeire hivatkoznak klorofilltartalomként (Kasim & Kasim, 2017), beidézve olyan korábbi tudományos eredményeket, amelyeknek a saláta nem képezte a vizsgálat tárgyát (Liu, Yang, & Yang, 2012; Parry et al., 2014).



4. ábra A salátalevelek SPAD-értékeinek Boxplot diagramja különböző fényspektrumok szerint (n=15)

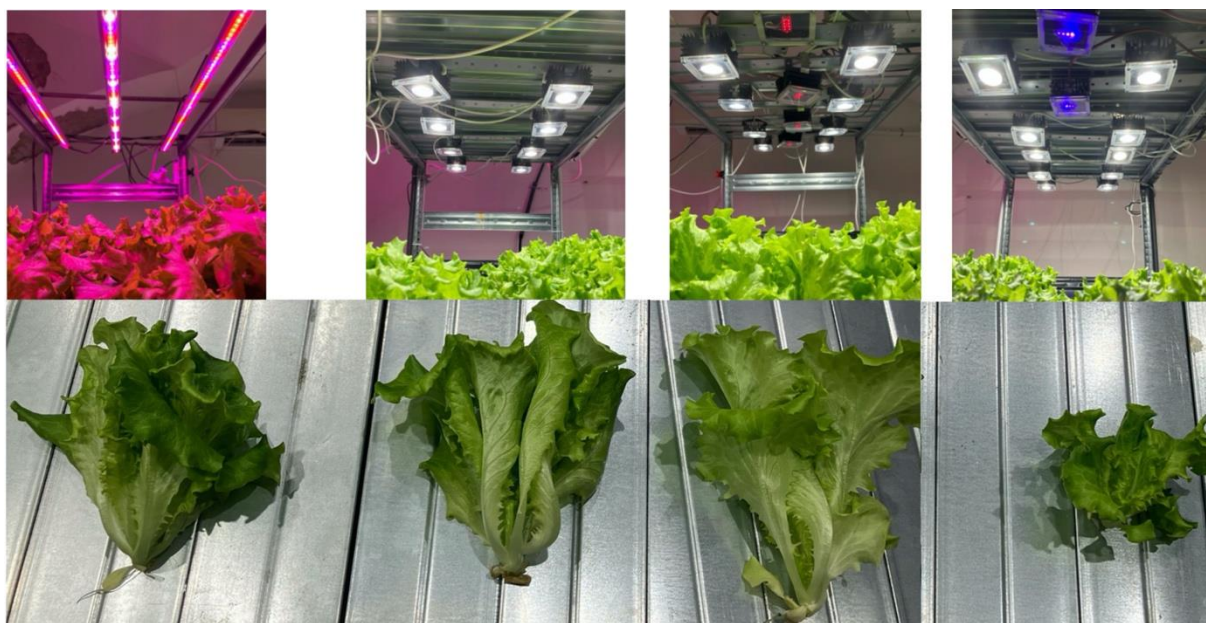
4.3 A saláta nyers tömegének eredményei

A betakarítás után mért eredmények alapján, a kompakt fehér LED (WL) világítás nyerstömeg eredménye volt a legmagasabb, de nem tért el szignifikánsan a WL+FR és BR kezelésektől (5. ábra). A WL+UV kezelés több mint 50%-kal csökkentette a növények átlagos tömegét, mely hatásról mások is beszámoltak (He et al., 2021). A fényeloszlás nagyobb inhomogenitása a kompakt fehér LED lámpák pontszerű sugárzása miatt nagyobb szórást eredményezett az kék-vörös lineáris LED modulokéhoz képest.



5. ábra A betakarított saláta növények nyers tömegének alakulása Boxplot diagramon, a különböző fényspektrumok hatására (n=20)

Az előbbieken igazolt különbségek a növényeken szabad szemmel is jól érzékelhetők voltak, amit a következő ábra szemléltet (**6. ábra**). Mivel a fotoszintézisen túlmenően a fény más növényi folyamatokat is befolyásol, mint például a fotomorfogenezis, amely magában foglalja a növények fényre adott növekedési és fejlődési válaszait és nem feltétlenül kapcsolódik közvetlenül a fotoszintézishez. Különösen szembetűnő az ultraibolya spektrum törpésítő hatása, amely a kriptokróm nevű fotoreceptorokon keresztül fejti ki hatását (Naznin & Lefsrud, 2017).



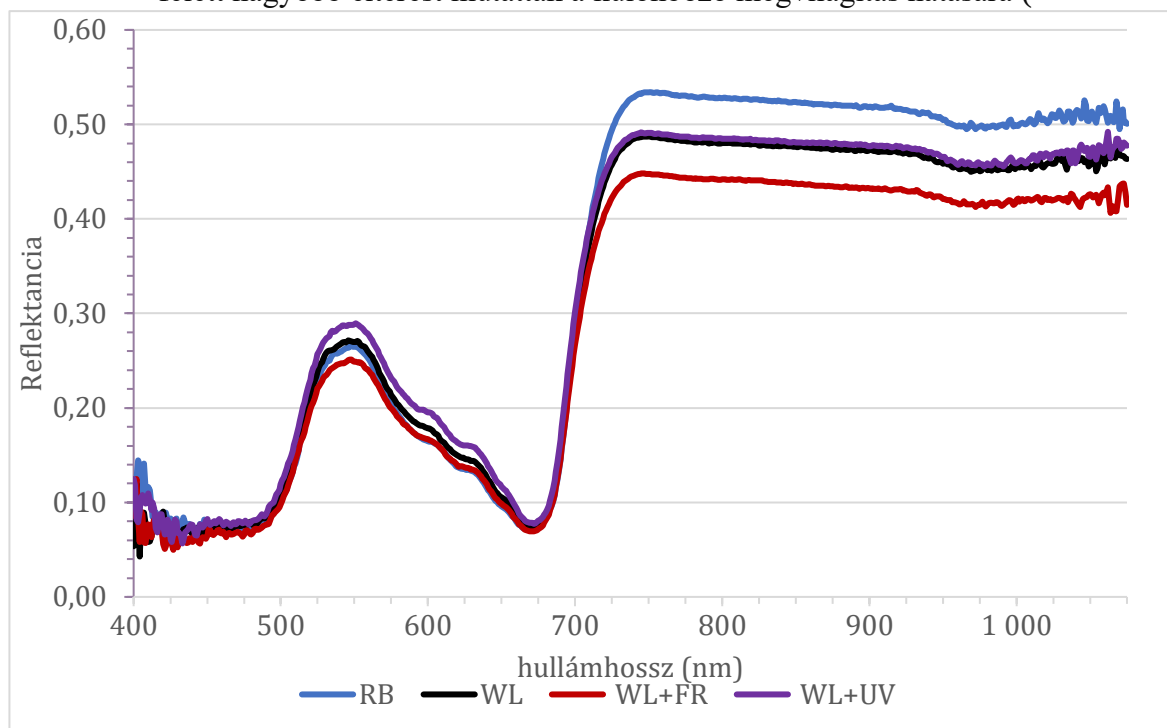
6. ábra A betakarított saláta növények, a különböző fényspektrumok hatására (kék-vörös, kompakt fehér, infravörös- és ultraibolya kiegészítéssel)

4.4 A levélreflektancia mérések eredményei

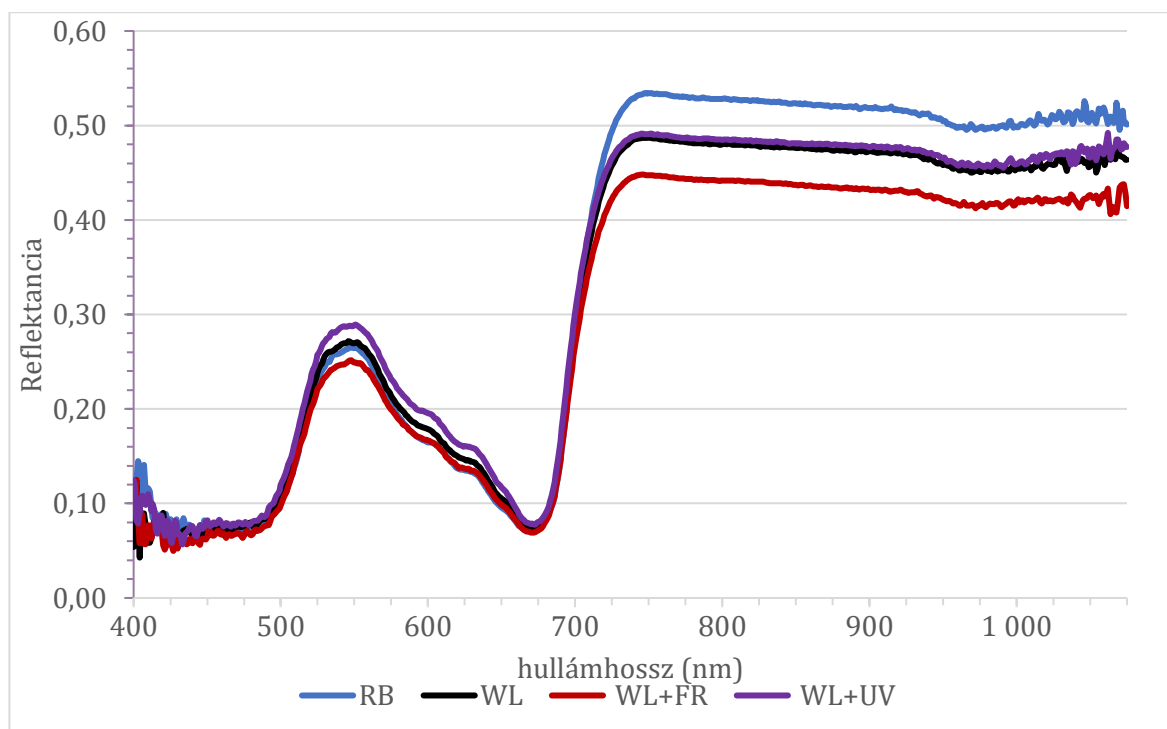
A vegetációs indexek (VI) felbecsülhetetlen értékű eszközökké váltak a precíziós mezőgazdaságban a növények egészségi és élettani állapotának nyomon követésére. A távérzékelésben legelterjedtebben használt vegetációs index a normalizált vegetációs index (NDVI), amelyet műholdak is szolgáltatnak és gyors, roncsolásmentes becsléseket adhatnak a levelek víz- és klorofilltartalmáról, amelyek a növény egészségének és életerejének kritikus mutatói (Maselli et al., 2020). A levél fényvisszaverő képessége fontos jellemző, amely a növény vízellátottságáról, tápanyagellátásáról és egészségi állapotáról is tájékoztat (Katsoulas et al., 2016).

A mérések alapja a levelek reflektanciája, amelyet az ASD spektrométerrel mértünk. A kísérletben vizsgált saláta levelek átlagos reflektancia értékei 520-660 nm között és 720 nm

felett nagyobb eltérést mutattak a különböző megvilágítás hatására (



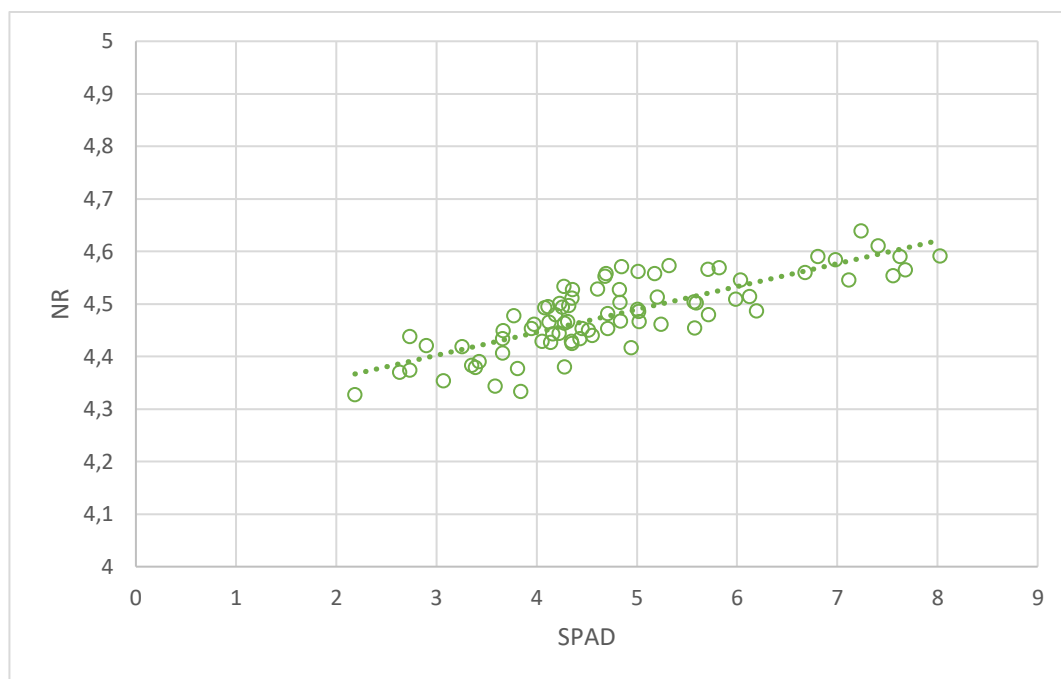
7. ábra). Az 550 nm körüli spektrális reflexió csúcs a levelek látható zöld színét eredményezi, amit a klorofill okoz. Ez összefüggésben lehet a SPAD-értékekkel, de ezt összefüggés vizsgálattal nem tudtuk megerősíteni.



7. ábra A saláta levelek átlagos levélreflexiója különböző LED-es fényforrások hatására (n=20).

A klorofill *a* és *b* meghatározására kifejlesztett újabb vegetációs index, a normalizált belső reflektancia (NR), amely a klorofill *a* esetén a 706 nm-en mért, klorofill *b* esetén pedig az 556

nm-en mért reflektanciát használja (Maccioni, Agati, & Mazzinghi, 2001). Ez alapján, a saláta levelek reflektancia adataiból összesítve, független változóként a SPAD, függő változóként az NR index értékeit felhasználva, szorosabb lineáris összefüggést ($y = 0,0436x + 4,2714$; $R^2 = 0,6332$) találtunk a SPAD index értékeivel (Hunt & Daughtry, 2014), melyet a következő ábra szemléltet (**8. ábra**). Ebből arra következtethetünk, hogy az NR vegetációs index szintén alkalmas a levelek klorofilltartalmának becslésére.



8. ábra A SPAD és az NR vegetációs index lineáris összefüggése ($y = 0,0436x + 4,2714$; $R^2 = 0,6332$; $n=80$) .

5 KÖVETKEZTETÉSEK

A LED-ek jelentős előrelépést képviselnek a mezőgazdasági világítástechnológiában. Képességük a napfény spektrumának szoros utánzására és célzott, hatékony és egyenletes világítás biztosítására előnyösebbé teszi őket a korábban alkalmazott fényforrásokkal összehasonlítva. Az LED technológia folyamatos fejlesztései várhatóan tovább növelik alkalmazásukat, fenntartható és hatékony megoldást nyújtva a globális élelmiszertermeléshez.

A kompakt fehér LED lámpák korszerű megoldást kínálnak a precíziós növénytermesztésre. A hagyományos (HPS) lámpákhoz képest jelentősen alacsonyabb hőkibocsátásuk lehetővé teszi, hogy közelebb helyezték a növényekhez, ezzel csökkentve a potenciális káros hatásokat és javítva a fénykihasználást. Bár a kék és vörös LED-ek főként a klorofill abszorpciós sávját célozzák, a fehér LED-ek szélesebb spektrális tartományt nyújtanak, elősegítve a fotomorfogenezist, ami összességében kedvezőbb a növényi növekedésre és fejlődésre.

A növényekre gyakorolt hatásukat tekintve a fehér LED-ek javítják a fotoszintézis hatékonyságát és növelik a biomassa produkciót. Azok a kísérletek, melyek különböző LED világítási módokat használnak, például folytonos vagy pulzáló fényt alkalmaznak, rámutatnak a különböző növényfajták fényre adott eltérő válaszáira, és ezáltal hozzájárulnak az optimális növénytermesztési körülmények kialakításához.

A roncsolásmentes SPAD-502 klorofillmérő használata elterjedt a növényállapot gyors és hatékony felmérésére. A fehér LED (WL) fényforrások magasabb SPAD-értékeket produkáltak, ami a klorofilltartalom növekedését jelezheti, míg az infravörös (WL+FR) és az ultraibolya (WL+UV) kiegészítések alacsonyabb értékeket mutattak, amely ellentmondhat korábbi kutatásoknak, ahol az UV-sugárzás növelte a SPAD-értékeket. A SPAD-mérővel kapott adatokat gondosan kell értelmezni, figyelembe véve a különböző fajták közötti változékonyságot és a környezeti tényezők hatásait. Az ilyen típusú mérések fontosak lehetnek a vertikális farmok tápanyagmenedzsmentjében és a növények egészségének monitorozásában.

A fényforrások közötti különbségek nyilvánvaló hatást gyakorolnak a növények növekedésére és fejlődésére. Kísérletünkben a kompakt fehér LED (WL) jó eredményt hozott a növények tömegének növelésében, hasonlóan az infravörös kiegészítést kapó (WL+FR) kezeléshez, míg az UV-t tartalmazó (WL+UV) világítás jelentős csökkenést okozott. Az ultraibolya fény a fotoreceptorokra gyakorolt hatása révén befolyásolja a növények morfológiáját, ami a törpítő hatáshoz vezet. Ezek az eredmények rávilágítanak a különböző fényspektrumok alkalmazásának fontosságára a növénytermesztésben, hangsúlyozva, hogy a

fényminőség optimalizálása nélkülözhetetlen a növényi teljesítmény és a végtermék minőségének maximalizálásához.

A vegetációs indexek, mint az NDVI, SPAD és az NR, alapvető eszközök a precíziós mezőgazdaságban, lehetővé téve a növények víz- és klorofilltartalmának, valamint egészségi állapotának gyors és roncsolásmentes értékelését. A reflektancia mérések alapján a különböző LED fényforrások hatásait vizsgálva kimutattuk, hogy az eltérések a levelek reflektanciájában jelentős információt szolgáltatnak a növény állapotáról. Az NR index használata a saláta levelek klorofilltartalmának becslésére szoros összefüggést mutatott a SPAD értékekkel, ami a precíziós mezőgazdasági gyakorlatban a növények monitorozásának és menedzselésének továbbfejlesztéséhez járulhat hozzá.

6 ÖSSZEFOGLALÁS

Különböző spektrumban fényt kibocsátó LED-ek felhasználásával az volt a célom, hogy megvizsgáljam, hogyan lehet saláta növényeket előállítani, napfény nélkül. Dolgozatomban a következő kérdésekre kerestünk választ: Miből áll, milyen típusai vannak és hogyan is működik a vertikális farm? Lehet-e vertikális farmon salátát termesztetni? Okozhat-e különbséget az eltérő spektrumú megvilágítás a saláták esetén?

A vertikális farm kísérletet 2022-ben állítottuk be MATE, GBI kísérleti terén, Gödöllőn, batávia típusú salátafajtával. Az automata zárt rendszerű hidropóniás növénynevelő berendezésben 4 különböző fényreceptet próbáltunk ki, amelyeket LED lámpák szolgáltattak. A salátákat napi 12 órában világítottuk széles spektrumú fehér LED-ekkel (WL), UV-A ultraibolya és infravörös (FR) LED chipekkel kiegészítve, kontrollként piros-kék lineáris LED modulokat használva, melyekben a piros és kék chipek aránya 4R:1B volt. A kísérlet végén mértük a levelek SPAD értékét, levélreflektanciáját és betakarított nyers levéltömegét 4 ismételtsben.

A négy különböző fényforrás szignifikáns különbségeket eredményezett a kezelések SPAD-értékei között. A fehér LED (WL) produkálta a legmagasabb SPAD értéket, míg ugyanez infravörös- (WL+FR) és ultraibolya kiegészítéssel (WL+UV) szignifikánsan alacsonyabb SPAD értéket eredményezett.

A betakarítás utáni nyerstömeg mérések eredmények alapján, a kompakt fehér LED (WL) eredménye volt a legjobb, de nem tért el szignifikánsan a WL+FR és BR kezelésektől. A WL+UV kezelés viszont, több mint 50%-kal csökkentette a növények átlagos tömegét.

A saláta levelek reflektancia értékei 520-660 nm között és 720 nm felett nagyobb eltérést mutattak a kezelések hatására, de a SPAD értékekkel összefüggést nem tudtunk kimutatni. Összefüggést találtunk viszont a SPAD és a normalizált belső reflektancia (NR) értékei között, mely lineáris függvényvel leírva ($y = 0,0436x + 4,2714$; $R^2 = 0,6332$) alkalmas lehet a saláta levelek klorofilltartalmának becslésére.

Összefoglalva, az LED világítási rendszerek alkalmazása a mezőgazdaságban lehetővé teszi, hogy a termelők részletesen szabályozhassák a növények fényviszonyait, elősegítve a növények egészségesebb növekedését, a jobb tápanyagprofil kialakulását, és végül, de nem utolsósorban, a környezetbarát és fenntartható termesztést. A további kutatások feltárhatják ezeknek a technológiáknak az új alkalmazási lehetőségeit, valamint mélyebb betekintést nyújthatnak a fény és növényi fiziológia kapcsolatába.

7 IRODALOMJEGYZÉK

- 1 Ahlman, L., Bånkestad, D., & Wik, T. (2016). LED spectrum optimisation using steady-state fluorescence gains. *Acta Horticulturae*, 1134, 367–374. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.48>
- 2 Ali, A., Santoro, P., Ferrante, A., & Cocetta, G. (2023). Investigating pulsed LED effectiveness as an alternative to continuous LED through morpho-physiological evaluation of baby leaf lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *Acephala*). *South African Journal of Botany*, 160, 560–570. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.07.052>
- 3 Balázs, L., Dombi, Z., Csambalik, L., & Sipos, L. (2022). Characterizing the Spatial Uniformity of Light Intensity and Spectrum for Indoor Crop Production. *Horticulturae*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/horticulturae8070644>
- 4 Balázs, L., & Nádas, J. (2020). Spatial distribution of photon flux density created by LED grow lights. CANDO-EPE 2020 - Proceedings, IEEE 3rd International Conference and Workshop in Obuda on Electrical and Power Engineering, 147–150. <https://doi.org/10.1109/CANDO-EPE51100.2020.9337774>
- 5 Banerjee, C., & Adenauer, L. (2014). Up, Up and Away! The Economics of Vertical Farming. *Journal of Agricultural Studies*, 2(1), 40. <https://doi.org/10.5296/jas.v2i1.4526>
- 6 Bócs, A., Pék, Z., Helyes, L., Neményi, A., & Komjáthy, L. (2009). Effect of water supply on canopy temperature and yield of processing tomato. *Cereal Research Communications*, 37(SUPPL.1), 113–116.
- 7 Bugbee, B. (2017). Economics of LED lighting. In S. Dutta Gupta (Ed.), *Light Emitting Diodes for Agriculture: Smart Lighting* (pp. 81–99). https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3_5
- 8 Butturini, M., & Marcelis, L. F. M. (2020). Vertical farming in Europe: Present status and outlook. In T. Kozai, G. Niu, & M. Takagaki (Eds.), *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production* (2nd ed., pp. 77–91). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00004-2>
- 9 Cammarisano, L., Graefe, J., & Körner, O. (2022). Using leaf spectroscopy and pigment estimation to monitor indoor grown lettuce dynamic response to spectral light intensity. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1044976. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1044976>
- 10 Carotti, L., Graamans, L., Puksic, F., Butturini, M., Meinen, E., Heuvelink, E., & Stanghellini, C. (2021). Plant Factories Are Heating Up: Hunting for the Best Combination of Light Intensity, Air Temperature and Root-Zone Temperature in Lettuce Production. *Frontiers in Plant Science*, 11, 592171. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.592171>
- 11 Chausali, N., & Saxena, J. (2021). Conventional versus organic farming: Nutrient status. *Advances in Organic Farming: Agronomic Soil Management Practices*, February, 241–254. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822358-1.00003-1>
- 12 Chen, X. li, Wang, L. chun, Li, T., Yang, Q. chang, & Guo, W. zhong. (2019). Sugar accumulation and growth of lettuce exposed to different lighting modes of red and blue LED light. *Scientific Reports*, 9, 6926. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43498-8>
- 13 Dannehl, D., Schwend, T., Veit, D., & Schmidt, U. (2021). Increase of Yield, Lycopene, and Lutein Content in Tomatoes Grown Under Continuous PAR Spectrum LED Lighting. *Frontiers in Plant Science*, 12(February), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.611236>
- 14 Despommier, D. (2013). Farming up the city: The rise of urban vertical farms. *Trends in Biotechnology*, 31(7), 388–389. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.03.008>
- 15 Eldridge, B. M., Manzoni, L. R., Graham, C. A., Rodgers, B., Farmer, J. R., & Dodd, A. N. (2020). Getting to the roots of aeroponic indoor farming. *New Phytologist*, 228(4), 1183–1192. <https://doi.org/10.1111/nph.16780>
- 16 FAO. (2017). Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable production in the South East European countries. In *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable production in the South East European countries*. <http://www.fao.org/3/a-i6787e.pdf>

- 17 Fujiwara, K. (2020). Light Sources. In T. Kozai, G. Niu, & M. Takagaki (Eds.), *Plant Factory An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production* (pp. 139–151). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00008-X>
- 18 Gayhane, K. P., Hasan, M., Singh, D. K., Kumar, S. N., Sahoo, R. N., & Alam, W. (2023). Determination of optimal daily light integral (DLI) for indoor cultivation of iceberg lettuce in an indigenous vertical hydroponic system. *Scientific Reports*, 13(10923), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36997-2>
- 19 Graamans, L., van den Dobbelsteen, A., Meinen, E., & Stanghellini, C. (2017). Plant factories; crop transpiration and energy balance. *Agricultural Systems*, 153, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.003>
- 20 He, R., Zhang, Y., Song, S., Su, W., Hao, Y., & Liu, H. (2021). UV-A and FR irradiation improves growth and nutritional properties of lettuce grown in an artificial light plant factory. *Food Chemistry*, 345, 128727. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128727>
- 21 Hegedűs, J., Hantos, G., Lukács, M., Bodnár, B., Lipák, G., & Poppe, A. (2022). Thermal characterization issues of LEDs during reliability testing. THERMINIC 2022 - 28th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems, Proceedings, 1–5. <https://doi.org/10.1109/THERMINIC57263.2022.9950652>
- 22 Hegedűs, J., Hantos, G., Lukács, M., Bodnár, B., Lipák, G., & Poppe, A. (2023). Lifetime Test of Pulsewidth Modulated LEDs Supplemented with Thermal Investigations. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 13(8), 1121–1129. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2023.3278101>
- 23 Hooks, T., Sun, L., Kong, Y., Masabni, J., & Niu, G. (2022). Adding UVA and Far-Red Light to White LED Affects Growth, Morphology, and Phytochemicals of Indoor-Grown Microgreens. *Sustainability* (Switzerland), 14(14). <https://doi.org/10.3390/su14148552>
- 24 Hunt, R. E., & Daughtry, C. S. T. (2014). Chlorophyll meter calibrations for chlorophyll content using measured and simulated leaf transmittances. *Agronomy Journal*, 106(3), 931–939. <https://doi.org/10.2134/agronj13.0322>
- 25 Islam, R., & Siwar, C. (2012). The analysis of urban agriculture development in Malaysia. *Advances in Environmental Biology*, 6(3), 1068–1078.
- 26 Jan, S., Rashid, Z., Ahngar, T. A., Iqbal, S., Naikoo, M. A., Majeed, S., Bhat, T. A., Gul, R., & Nazir, I. (2020). Hydroponics – A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(8), 1779–1787. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.908.206>
- 27 Jishi, T., Fujiwara, K., Nishino, K., & Yano, A. (2012). Pulsed light at lower duty ratios with lower frequencies is less advantageous than continuous light for CO₂ uptake in cos lettuce. *Journal of Light and Visual Environment*, 36(3), 88–93. <https://doi.org/10.2150/jlve.IEIJ120000482>
- 28 Jishi, T., Ishii, T., & Shoji, K. (2022). Cultivation of cos lettuce using blue LED and quantum dot wavelength conversion sheets. *Scientia Horticulturae*, 295(August 2021), 110772. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110772>
- 29 Jishi, T., Matsuda, R., & Fujiwara, K. (2015). A kinetic model for estimating net photosynthetic rates of cos lettuce leaves under pulsed light. *Photosynthesis Research*, 124(1), 107–116. <https://doi.org/10.1007/s11120-015-0107-z>
- 30 Kanski, L., Kahle, H., Naumann, M., Hagenguth, J., Ulbrich, A., & Pawelzik, E. (2021). Cultivation systems, light intensity, and their influence on yield and fruit quality parameters of tomatoes. *Agronomy*, 11(6), 1–19. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061203>
- 31 Kasim, M. U., & Kasim, R. (2017). While continuous white LED lighting increases chlorophyll content (SPAD), green LED light reduces the infection rate of lettuce during storage and shelf-life conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(6), e13266. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13266>
- 32 Katsoulas, N., Elvanidi, A., Ferentinos, K. P., Kacira, M., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2016). Crop reflectance monitoring as a tool for water stress detection in greenhouses: A review. *Biosystems Engineering*, 151, 374–398. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.10.003>
- 33 Katzin, D., Marcelis, L. F. M., & van Mourik, S. (2021). Energy savings in greenhouses by transition from high-pressure sodium to LED lighting. *Applied Energy*, 281(July 2020), 116019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116019>

- 34 Kelly, N., & Runkle, E. S. (2023). End-of-production Ultraviolet A and Blue Light Similarly Increase Lettuce Coloration and Phytochemical Concentrations. *HortScience*, 58(5), 525–531. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI17108-23>
- 35 Kim, Y. H., & Lee, J. S. (2016). Growth and contents of anthocyanins and ascorbic acid in lettuce as affected by supplemental UV-A LED irradiation with different light quality and photoperiod. *Horticultural Science and Technology*, 34(4), 596–606. <https://doi.org/10.12972/kjst.20160061>
- 36 Kitazaki, K., Fukushima, A., Nakabayashi, R., Okazaki, Y., Kobayashi, M., Mori, T., ... Kusano, M. (2018). Metabolic Reprogramming in Leaf Lettuce Grown under Different Light Quality and Intensity Conditions Using Narrow-Band LEDs. *Scientific Reports*, 8(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25686-0>
- 37 Kong, Y, Nemali, A., Mitchell, C., & Nemali, K. (2019). Spectral quality of light can affect energy consumption and energy-use efficiency of electrical lighting in indoor lettuce farming. *HortScience*, 54(5), 865–872. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13834-18>
- 38 Kong, Yuyao, & Nemali, K. (2021). Blue and Far-Red Light Affect Area and Number of Individual Leaves to Influence Vegetative Growth and Pigment Synthesis in Lettuce. *Frontiers in Plant Science*, 12(July), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.667407>
- 39 Kozai, T. (2018). Benefits, problems and challenges of plant factories with artificial lighting (PFALs): A short review. *Acta Horticulturae*, 1227, 25–30. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1227.3>
- 40 Kozai, T. (2019). Plant production process, floor plan, and layout of PFAL. In *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production: Second Edition* (pp. 261–271). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00019-4>
- 41 Kozai, T., & Niu, G. (2019). Conclusions: Resource-saving and resource-consuming characteristics of PFALs. In *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production: Second Edition* (pp. 471–475). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00033-9>
- 42 Kozai, T., & Niu, G. (2020). Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban areas. In T. Kozai, G. Niu, & M. Takagaki (Eds.), *Plant Factory An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production* (2nd ed., pp. 7–34). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00002-9>
- 43 Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (Eds.). (2020). *Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production* (2nd ed.). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8>
- 44 Kumar, R., Fayaz, A., & Kaundal, M. (2023). Vertical Farming: The Future of Controlled-environment Agriculture and Food-production System. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 42(48), 74–86. <https://doi.org/10.9734/cjast/2023/v42i484334>
- 45 Li, X., Zhou, Y., Eom, J., Yu, S., & Asrar, G. R. (2019). Projecting Global Urban Area Growth Through 2100 Based on Historical Time Series Data and Future Shared Socioeconomic Pathways. *Earth's Future*, 7(4), 351–362. <https://doi.org/10.1029/2019EF001152>
- 46 Lin, K., Huang, Z., & Xu, Y. (2018). Influence of light quality and intensity on biomass and biochemical contents of hydroponically grown lettuce. *HortScience*, 53(8), 1157–1163. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12796-17>
- 47 Liu, Z. A., Yang, J. P., & Yang, Z. C. (2012). Using a chlorophyll meter to estimate tea leaf chlorophyll and nitrogen contents. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(2), 339–348. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162012000200013>
- 48 Maccioni, A., Agati, G., & Mazzinghi, P. (2001). New vegetation indices for remote measurement of chlorophylls based on leaf directional reflectance spectra. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 61(1–2), 52–61. [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(01\)00145-2](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(01)00145-2)
- 49 Maselli, F., Chiesi, M., Angeli, L., Fibbi, L., Rapi, B., Romani, M., ... Battista, P. (2020). An improved NDVI-based method to predict actual evapotranspiration of irrigated grasses and crops. *Agricultural Water Management*, 233. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106077>
- 50 Michell, K. A., Isweiri, H., Newman, S. E., Bunning, M., Bellows, L. L., Dinges, M. M., ... Johnson, S. A. (2020). Microgreens: Consumer sensory perception and acceptance of an emerging functional food crop. *Journal of Food Science*, 85(4), 926–935. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15075>

- 51 Mitchell, C. A. (2022). History of Controlled Environment Horticulture: Indoor Farming and Its Key Technologies. *HortScience*, 57(2), 247–256. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI16159-21>
- 52 Monje, O. A., & Bugbee, B. (1992). Inherent limitations of nondestructive chlorophyll meters: a comparison of two types of meters. *HortScience*, 27(1), 69–71. <https://doi.org/10.21273/hortsci.27.1.69>
- 53 Muthu, S., Schuurmans, F. J. P., & Pashley, M. D. (2002). Red, green, and blue LEDs for white light illumination. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 8(2), 333–338. <https://doi.org/10.1109/2944.999188>
- 54 Nautiyal, S., Nautiyal, P., Shree, S., & Padiyar, A. (2022). Microgreens: The influence on Sustenance. *Food and Scientific Reports*, 3(2), 32–34.
- 55 Naznin, M. T., & Lefsrud, M. G. (2017). An Overview of LED Lighting and Spectral Quality on Plant Photosynthesis. In S Dutta Gupta (Ed.), *Light Emitting Diodes for Agriculture: Smart Lighting* (pp. 101–111). <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3>
- 56 Nicolle, C., Cardinault, N., Gueux, E., Jaffrelo, L., Rock, E., Mazur, A., ... Rémésy, C. (2004). Health effect of vegetable-based diet: Lettuce consumption improves cholesterol metabolism and antioxidant status in the rat. *Clinical Nutrition*, 23(4), 605–614. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2003.10.009>
- 57 Parry, C., Blonquist, M. J., & Bugbee, B. (2014). In situ measurement of leaf chlorophyll concentration: Analysis of the optical/absolute relationship. *Plant Cell and Environment*, 37(11), 2508–2520. <https://doi.org/10.1111/pce.12324>
- 58 Paucek, I., Appolloni, E., Pennisi, G., Quaini, S., Gianquinto, G., & Orsini, F. (2020). LED lighting systems for horticulture: Business growth and global distribution. *Sustainability* (Switzerland), 12(18), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su12187516>
- 59 Pennisi, G., Orsini, F., Landolfo, M., Pistillo, A., Crepaldi, A., Nicola, S., ... Gianquinto, G. (2020). Optimal photoperiod for indoor cultivation of leafy vegetables and herbs. *European Journal of Horticultural Science*, 85(5), 329–338. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.5.4>
- 60 Pennisi, Giuseppina, Orsini, F., Blasioli, S., Cellini, A., Crepaldi, A., Braschi, I., ... Marcelis, L. F. M. (2019). Resource use efficiency of indoor lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation as affected by red:blue ratio provided by LED lighting. *Scientific Reports*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50783-z>
- 61 Pimentel, J., Pongrácz, F., Sejpes, Z., Bukodi, Z., Ágoston, G., Kenyeres, I., & Friedler, F. (2021). Energy Integration of Vertical Farms for Higher Efficiency and Sustainability. *Chemical Engineering Transactions*, 88(April), 727–732. <https://doi.org/10.3303/CET2188121>
- 62 Piovene, C., Orsini, F., Bosi, S., Sanoubar, R., Bregola, V., Dinelli, G., & Gianquinto, G. (2015). Optimal red: Blue ratio in led lighting for nutraceutical indoor horticulture. *Scientia Horticulturae*, 193, 202–208. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.015>
- 63 Samuolienė, G., Viršilė, A., Miliauskienė, J., Haimi, P. J., Laužikė, K., Brazaitytė, A., & Duchovskis, P. (2021). The Physiological Response of Lettuce to Red and Blue Light Dynamics Over Different Photoperiods. *Frontiers in Plant Science*, 11(February), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.610174>
- 64 SharathKumar, M., Heuvelink, E., & Marcelis, L. F. M. (2020). Vertical Farming: Moving from Genetic to Environmental Modification. *Trends in Plant Science*, 25(8), 724–727. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.05.012>
- 65 Sivamani, S., Bae, N., & Cho, Y. (2013). A Smart Service Model Based on Ubiquitous Sensor Networks Using Vertical Farm Ontology. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 9. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:32205223>
- 66 Smirnov, A. A., Semenova, N. A., Dorokhov, A. S., Proshkin, Y. A., Godyaeva, M. M., Vodeneev, V., ... Chilingaryan, N. O. (2022). Influence of Pulsed, Scanning and Constant (16- and 24-h) Modes of LED Irradiation on the Physiological, Biochemical and Morphometric Parameters of Lettuce Plants (*Lactuca sativa* L.) while Cultivated in Vertical Farms. *Agriculture* (Switzerland), 12(12). <https://doi.org/10.3390/agriculture12121988>
- 67 Son, K. H., Lee, S. R., & Oh, M. M. (2018). Comparison of lettuce growth under continuous and pulsed irradiation using light-emitting diodes. *Horticultural Science and Technology*, 36(4), 542–551. <https://doi.org/10.12972/kjhst.20180054>

- 68 Son, K. H., & Oh, M. M. (2013). Leaf shape, growth, and antioxidant phenolic compounds of two lettuce cultivars grown under various combinations of blue and red light-emitting diodes. *HortScience*, 48(8), 988–995. <https://doi.org/10.21273/hortsci.48.8.988>
- 69 Tilman, D., Fargione, J., Wolff, B., D'Antonio, C., Dobson, A., Howarth, R., Schindler, D., Schlesinger, W. H., Simberloff, D., & Swackhamer, D. (2001). Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science*, 292(5515), 281–284. <https://doi.org/10.1126/science.1057544>
- 70 van Delden, S. H., SharathKumar, M., Butturini, M., Graamans, L. J. A., Heuvelink, E., Kacira, M., ... Marcelis, L. F. M. (2021). Current status and future challenges in implementing and upscaling vertical farming systems. *Nature Food*, 2(12), 944–956. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00402-w>
- 71 Velazquez-Gonzalez, R. S., Garcia-Garcia, A. L., Ventura-Zapata, E., Barceinas-Sanchez, J. D. O., & Sosa-Savedra, J. C. (2022). A Review on Hydroponics and the Technologies Associated for Medium-and Small-Scale Operations. *Agriculture (Switzerland)*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/agriculture12050646>
- 72 Viršilė, A., Brazaitytė, A., Vaštakaitė-Kairienė, V., Miliauskienė, J., Jankauskienė, J., Noviškova, A., & Samuolienė, G. (2019). Lighting intensity and photoperiod serves tailoring nitrate assimilation indices in red and green baby leaf lettuce. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(14), 6608–6619. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9948>
- 73 Wang, J., Lu, W., Tong, Y., & Yang, Q. (2016). Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to different ratios of red light to blue light. *Frontiers in Plant Science*, 7(MAR2016). <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00250>
- 74 Wojciechowska, R., Kołton, A., Długosz-Grochowska, O., Żupnik, M., & Grzesiak, W. (2013). The effect of LED lighting on photosynthetic parameters and weight of lamb's lettuce (*Valerianella locusta*). *Folia Horticulturae*, 25(1), 41–47. <https://doi.org/10.2478/fhort-2013-0005>
- 75 Xu, C., & Mou, B. (2015). Evaluation of lettuce genotypes for salinity tolerance. *HortScience*, 50(10), 1441–1446. <https://doi.org/10.21273/hortsci.50.10.1441>
- 76 Yang, X., Xu, H., Shao, L., Li, T., Wang, Y., & Wang, R. (2018). Response of photosynthetic capacity of tomato leaves to different LED light wavelength. *Environmental and Experimental Botany*, 150, 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.03.013>
- 77 Zhang, J., & Zha, L. (2023). Plant Factory and Soilless Culture. In Zhang Qin (Ed.), *Encyclopedia of Digital Agricultural Technologies* (pp. 952–965). Springer Nature Switzerland AG.
- 78 Zhou, H., Specht, K., & Kirby, C. K. (2022). Consumers' and Stakeholders' Acceptance of Indoor Agritecture in Shanghai (China). *Sustainability (Switzerland)*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/su14052771>
- 79 Zhu, Q. (2023). Integrated Environment Monitoring and Data Management in Agriculture. In Q. Zhang (Ed.), *Encyclopedia of Digital Agricultural Technologies* (pp. 700–712). Springer Nature Switzerland AG.

http

http1: <https://www.igrowpreowned.com/igrownnews/california-farm-linked-to-romaine-lettuce-ecoli-outbreak-recalls-additional-produce>

http2: <https://www.businesswire.com/news/home/20180607005249/en/Current-powered-by-GE-and-Jones-Food-Company-Partner-to-Launch-Europe%E2%80%99s-Largest-Indoor-Farm>

http3: <https://www.agritecture.com/agricool>

8 ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra A vertikális farm termesztő polcai, a különböző spektrumú bekapcsolt fényforrásokkal	19
2. ábra A vertikális farm csíráztató szekrénye, az elvetett saláta magokkal.....	20
3. ábra A megvilágításra használt LED lámpák és a HPS lámpák átlagos radianciája (n=4)	23
4. ábra A salátalevelek SPAD-értékeinek Boxplot diagramja különböző fényspektrumok szerint (n=15)	25
5. ábra A betakarított saláta növények nyers tömegének alakulása Boxplot diagramon, a különböző fényspektrumok hatására (n=20).....	25
6. ábra A betakarított saláta növények, a különböző fényspektrumok hatására (kék-vörös, kompakt fehér, infravörös- és ultraibolya kiegészítéssel	26
7. ábra A saláta levelek átlagos levélreflexiója különböző LED-es fényforrások hatására (n=20).	27
8. ábra A SPAD és az NR vegetációs index lineáris összefüggése ($y = 0,0436x + 4,2714$; $R^2 = 0,6332$; $n=80$)	28

9 NYILATKOZAT

a diplomadolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: ÓCSAI PÉTER MÁRK
A Hallgató Neptun kódja: KPK885
A dolgozat címe: Saláta termesztése vertikális farmon
A megjelenés éve: 2024
A konzulens intézetének neve: Kertészettudományi Intézet
A konzulens tanszékének a neve: Zöldség- és Gombatermesztési Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott diplomadolgozat 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 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 mindenkori szellemitulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

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

Kelt: 2024 év április hó 26 nap


Hallgató aláírása

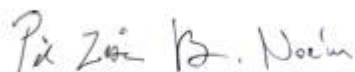
NYILATKOZAT

Ócsai Péter Márk (hallgató Neptun azonosítója: KPK88S) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a diplomadolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A diplomadolgozatot a záróvizsgán történő védeésre javaslom / nem javaslom.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem

Kelt: Gödöllő, 2024 év április hó 26. nap



belső konzulens