

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
BIOLOĢIJAS FAKULTĀTE
AUGU FIZIOLOĢIJAS KATEDRA

Apgaismojuma intensitātes un spektrālā sastāva ietekme uz āra
bērza (*Betula pendula*) un hibrīdās apses (*Populus
tremuloides* x *Populus tremula*) augšanu augu audu kultūrās

Bakalaura darbs

Autors: Ieva Bērziņa
Stud. apl. Nr. ib19072
Darba vadītājs: Dr. biol. Ineta Samsone

RĪGA 2022

KOPSAVILKUMS

Gaisma ir svarīgs vides faktors visā augu dzīves laikā. Šobrīd arvien biežāk kā vienu no mākslīgā apgaismojuma veidiem izmanto gaismas diodes, tām iespējams pielāgot izstarotās gaismas spektrālo sastāvu un intensitāti. Šī darba mērķis bija noteikt piemērotāko LED gaismekļu intensitāti un spektrālo sastāvu āra bērzu un apšu hibrīdu *in vitro* kultūru audzēšanai.

Darbā izmantoja āra bērza un apšu hibrīda *in vitro* kultūras. Augus apgaismoja ar trīs atšķirīga spektrālā sastāva LED gaismām - sarkanu - zilu (RB), sarkanu – zaļu – zilu (RGB), sarkanu – zaļu – zilu – dzeltenu – oranžu (RGBYO) ar intensitātēm 30 ± 5 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 70 ± 5 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ un 110 ± 5 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Kontrolei izmantoja fluorescentās lampas 60 ± 10 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Augiem noteica dzinuma garumu, sāndzinumu un posmu skaitu, lapu laukumu un skaitu, hlorofila saturu un fluorescences parametrus: F_v/F_o , F_v/F_m , PI abs.

Konstatēja, ka optimāli augšanas apstākļi āra bērzam ir $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ gaismas intensitātē, sarkans – zaļš – zils spektra apgaismojumā. Apšu hibrīdam atbilstošs ir LED apgaismojums ar intensitāti $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, taču LED gaismu varianti neuzrādīja būtiskas atšķirības. Arī hlorofila fluorescences parametrs F_v/F_m šajā gaismas intensitātē ir ap 0,8 līmeni, kas norāda, ka augi nav pakļauti nelabvēlīgiem augšanas apstākļiem. Salīdzinot augu parametrus starp gaismas diodēm un fluorescentajām lampām, redzams, ka lielākā daļa pētījumā noteikto parametru augstākus rezultātus uzrāda LED gaismekļu apgaismojumā.

Atslēgvārdi: augu audu kultūras, *Betula pendula*, gaismas spektrālais sastāvs, intensitāte, LED, *Populus tremuloides* x *Populus tremula*.

SUMMARY

Light is an important environmental factor throughout the life of plants. At present, light emitting diodes are increasingly used as one of the types of artificial lighting, and it is possible to adjust the spectral composition and intensity of the emitted light. The aim of this work was to determine the most suitable intensity and spectrum of LED lights for growing *in vitro* cultures of silver birch and aspen hybrids.

In vitro silver birch and hybrid aspen were used in the study. The plants were illuminated with three LEDs with different spectral compositions - red - blue (RB), red - green - blue (RGB), red - green - blue - yellow - orange (RGBYO) with intensities of $30 \pm 5 \mu\text{mol} / \text{m}^2 / \text{s}$, $70 \pm 5 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ and $110 \pm 5 \mu\text{mol} / \text{m}^2/\text{s}$. As control was used fluorescent lamps $60 \pm 10 \mu\text{mol} / \text{m}^2/\text{s}$. For plants, shoot length, number of shoots and internodes, leaf area and number, chlorophyll content and fluorescence parameters were determined: F_v / F_o , F_v / F_m , PI abs.

It was found that the optimal growth conditions for outdoor birch are $30 \mu\text{mol} / \text{m}^2/\text{s}$ in light intensity, red - green - blue in spectral illumination. Suitable for aspen hybrid and LED lighting with intensity of $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, but LED light variants did not show significant differences. The chlorophyll fluorescence parameter F_v / F_m at this light intensity is also around 0,8, indicating that the plants are not exposed to adverse growth conditions. Comparing the plant parameters between LEDs and fluorescent lamps, it can be seen that most of the parameters determined in the study show higher results in the lighting of LED lights.

Keywords: plant tissue cultures, *Betula pendula*, light spectral composition, intensity, LED, *Populus tremuloides* x *Populus tremula*.

SATURS

Ievads	5
1. LITERATŪTAS APSKATS	7
1.1. Pētījumā izmantoto koku īss raksturojums	7
1.2. <i>In vitro</i> pavairošana	8
1.2.1. Kokaugu mikropavairošana	8
1.2.2. Mikropavairošanas eksplanti un barotnes	9
1.3. Gaismas raksturojums un tā nozīme augos	10
1.3.1. Augu fotoreceptori	11
1.3.2. Augu pigmenti	12
1.3.3. Hlorofila fluorescence	13
1.3.4. Gaismas spektrālais sastāvs un intensitāte	14
1.4. Gaismas diožu (LED) uzbūve	17
2. MATERIĀLI UN METODES	19
2.1. Āra bērza un apšu hibrīda audzēšanas barotņu pagatavošana	19
2.2. Mikrospraudeņu sagatavošana	19
2.3. LED gaismekļu tehniskais raksturojums	19
2.4. <i>In vitro</i> kultūru audzēšana	20
2.5. Morfoloģiskie parametri	21
2.5.1. Kopējais auga garums un galvenā dzinuma pieaugums	21
2.5.2. Kopējais lapu laukums	21
2.5.3. Hlorofila koncentrācija	21
2.5.4. Hlorofila a fluorescence	21
2.6. Datu apstrāde	22
3. REZULTĀTI	23
3.1. Apgaismojuma ietekme uz āra bērza un apšu hibrīda dzinumu augšanu	23
3.2. Apgaismojuma ietekme uz āra bērza un apšu hibrīda lapu attīstību	26
3.3. Apgaismojuma ietekme uz āra bērza un apšu hibrīda hlorofila a fluorescences parametriem 28	
4. DISKUSIJA	31
SECINĀJUMI	38
PATEICĪBAS	40
Literatūras saraksts	41

IEVADS

Gaismas enerģija nepieciešama gan fotosintēzes procesā, gan kā signāls, kas regulē auga augšanu un attīstību visā dzīves ciklā (Singh *et al.* 2015; Higuchi and Hisamatsu 2016). Redzamais gaismas spektrs (400 līdz 700 nm) izstaro gaismu sarkanā, oranžā, dzeltenā, zaļā, zilā, un violetā krāsā, katrai no tām ir atšķirīgs viļņu garums un ietekme uz auga fizioloģiskajiem procesiem (Rehman *et al.* 2017). Fotosintēzei svarīgākais ir zilais un sarkanais gaismas spektrs (Singh *et al.* 2015).

Siltumnīcās un audzēšanas telpās nepieciešams lietot mākslīgo apgaismojumu, lai nodrošinātu augu attīstību visa gada garumā (Singh *et al.* 2015), taču izmantotajam apgaismojuma spektram ir jāatbilst auga fotosintēzes un fotomorfoģenēzes reakciju norisei (Gupta and Jatothu 2013). Pašreiz lietotie apgaismojuma avoti, kā nātrija un citas halogēnīdu spuldzes, nav energoefektīvas, izstaro gaismu visā redzamā spektra daļā un infrasarkanajā spektrā. Tiek radīts arī liels starojuma siltums, tāpēc nepieciešams izstrādāt jaunus ilgtspējīgus risinājumus pašreizējiem apgaismojuma avotiem (Singh *et al.* 2015). Pēdējos gados arvien biežāk, kā vienu no mākslīgā apgaismojuma veidiem izmanto LED gaismekļus (Gupta and Jatothu 2013). Ar tiem iespējams pareizi izpētīt gaismas kvalitātes lomu augu augšanā, ko nodrošina spēja izvēlēties konkrētus gaismas spektrus un intensitātes (Fan *et al.* 2013). Augiem nozīmīgs ir ne tikai gaismas spektrālais sastāvs, bet arī intensitāte (Ivushkin *et al.* 2021). Nepietiekams apgaismojums ir nelabvēlīgs auga augšanai un gāzu apmaiņai, taču pārmērīga gaisma rada negatīvu ietekmi uz fotosintēzes aparātu (Fan *et al.* 2013), tāpēc nepieciešams izstrādāt dažādām augu sugām piemērotāko apgaismojuma sastāvu un intensitāti. Nepieciešams rast risinājumu liekam enerģijas patēriņam, nemazinot augu kvalitāti (Ivushkin *et al.* 2021). Taču šobrīd pētījumi par gaismas diožu ietekmi uz augu fizioloģiskajiem procesiem un morfoloģiskajiem izmaiņām ir nepietiekami un pārsvarā veikti tikai ar lakstaugiem.

Mākslīgo apgaismojumu lieto arī *in vitro* augu pavairošanai, ar kuras palīdzību iespējams iegūt lielu skaitu augu, īsā laika periodā (Gupta and Jatothu 2013). Daļa koku sugu, kas ir komerciāli nozīmīgas, ir grūti pavairojamas ar tradicionālajām metodēm, tāpēc nav iespējama to plaša izmantošana mežsaimniecībā (Bhatt and Todaria 1989). Šādas koku sugas ir iespējams pavairot ar augu audu kultūrām (Ahuja 1993). Kokaugu mikropavairošana nodrošina arī attīstību selekcijas programmām un mežsaimniecības pārvaldībai (Andersone and Ievinsh 2002), ar tās palīdzību iespējams nodrošināt auga ģenētiskā materiāla saglabāšanu, pilnībā nemainot mātes auga ģenētiskās īpašības

(Christiaens *et al.* 2016). Lai veicinātu kokaugu pavairošanu *in vitro*, nepieciešams veikt papildus eksperimentus, lai noteiktu optimālākos LED gaismekļu parametrus dažādu kokaugu sugu augšanai.

Āra bērzs (*Betula pendula*) un apšu hibrīds ir piemērotas Latvijas klimatiskajiem apstākļiem. Viens no abu koku sugu pavairošanas paņēmieniem ir augu audu kultūras. Apšu hibrīds ir plaši pētīts un kultivēts koks un ir visstraujāk augošais cietkoks, piemērots celulozes un enerģētiskās koksnes ražošanai (Tullus *et al.* 2011). Āra bērza koksne ir cieta, ar labām mehāniskajām īpašībām un lielu siltumietilpību (Mauriņš un Zvirgzda 2006). Abu koku koksnes īpašību dēļ, tos plaši izmanto mēbeļu ražošanai, kokmateriālu un celulozes iegūšanai.

Darba mērķis: noteikt piemērotāko LED gaismekļu intensitāti un spektrālo sastāvu āra bērzu un apšu hibrīdu *in vitro* kultūru audzēšanai.

Darba uzdevumi:

1. Noteikt atšķirīgu LED gaismekļu spektrālā sastāva un intensitātes ietekmi (RB, RGB, RGBYO - $30 \pm 5 \mu\text{mol/s/m}^2$, $70 \pm 5 \mu\text{mol/s/m}^2$, $110 \pm 5 \mu\text{mol/s/m}^2$; FL- $60 \pm 10 \mu\text{mol/s/m}^2$) uz apšu hibrīdu un āra bērzu lapu fotosintētiskajiem parametriem: hlorofilu, fluorescenci.
2. Konstatēt atšķirīgu LED gaismekļu spektrālā sastāva un intensitātes ietekmi uz apšu hibrīdu un āra bērzu dzinuma parametriem: kopējo auga garumu, galvenā dzinuma garumu, dzinuma posmu un sāndzinumu skaitu.
3. Noskaidrot atšķirīgu LED gaismekļu spektrālā sastāva un intensitātes ietekmi uz apšu hibrīdu un āra bērzu lapu parametriem: kopējo lapu skaitu, lapu vidējo laukumu.

1. LITERATŪTAS APSKATS

1.1. Pētījumā izmantoto koku īss raksturojums

Viens no darba pētāmajiem objektiem ir āra bērzs (*Betula pendula*), tas pieder bērzu dzimtas kokiem. Āra bērzs sasniedz 15-35 metru garumu. Miza ir balti pelēka, vietām tā ir melna un kraupjaina (Priedītis 2014). Zari ir nokareni, tie veido plašu un lielu vainagu, uz jaunajiem zariem ir redzamas lenticeles (Mauriņš un Zvirgzda 2006). Bērzu lapas ir zaļas, veido smalku vainagu, uz zariem izkārtotas pamīšus (Priedītis 2014). Sakņu sistēma ir plaša un plastiska, mietsakne izveidojas pirmajos gados, kas vēlāk sadalās plaša un iesniedzas dziļi augsnē, kas nodrošina koka vējizturību (Priedītis 2014; Mauriņš un Zvirgzda 2006).

Izplatība un sastopamība gan Eirāzijā, gan Latvijā ir plaša un bieža. Āra bērza raksturīgākie biotopi ir meža tīraudzes vai mistraudzes, arī kultūrainavas, kurās bērzi veido mazas birzis. Aug barības vielām bagātās un irdenās augsnēs, kas var būt gan sausas, gan pārmitras, taču koks ir gaismas prasīgs (Priedītis 2014; Mauriņš un Zvirgzda 2006).

Āra bērza koksne ir cieta ar labām mehāniskajām īpašībām, taču kodols nav iekrāsots. Koksne nav mitruma izturīga, ātri satrūd. Lielākoties izmanto finierrūpniecībā, kurināmais materiāls ar lielu siltumietilpību. No koka mizas iespējams iegūt produktus, ko izmanto linoleja ražošanā (Mauriņš un Zvirgzda 2006).

Otrs darba pētāmais objekts ir Latvijā audzēts apšu hibrīds, tas ir Amerikas apses (*Populus tremuloides*) un parastās apses (*Populus tremula*) krustojums (Zeps 2008), abas sugas ir piemērotākās Latvijas klimatiskajiem apstākļiem, tās brīvi krustojas savā starpā un rada auglīgus pēcnācējus (Gailis 2005). Gan hibrīdā, gan parastā apse augšanas maksimumu sasniedz jūnija vidū, bet apšu hibrīds augšanas maksimumu sasniedz atkārtoti augustā, jo spēj izmantot labvēlīgos augšanas apstākļus arī vasaras beigās. Tas nodrošina apšu hibrīda spēju augt ātrāk, kā parastajai apsei visā koka augšanas laikā. Apšu hibrīdu ilgais augšanas periods rada mazāku salizturību, jo vēlāk tiek pārtraukts aktīvais augšanas periods, kas rada papildus risku uzņēmībai pret dažādiem mikroorganismiem (Gailis 2005).

Parastā apse aug trūdvielām bagātās augsnēs, mēreni mitrās minerālaugsnēs, dūņainās palieņu augsnēs, labi aug arī iesālās augsnēs. Plaši sastopama gan Latvijā, gan Eirāzijā. Parastā apse ir saulmīlis un ar labu izturību pret salnām. Koksne ir viegla un

mīksta ar mazu siltumietilpību, tā tiek izmantota papīra, sērkociņu un celulozes rūpniecībā (Priedītis 2014; Mauriņš un Zvirgzda 2006).

Šādām komerciāli nozīmīgām koku sugām, efektīva pavairošanas metode ir augu audu kultūras, jo īsā laika periodā iespējams iegūt lielu skaitu augu ar noteiktām ģenētiskām īpašībām, tādējādi paplašinot un atjaunojot nepieciešamās meža platības.

1.2. *In vitro* pavairošana

Augu audu kultūras ir zinātne par augu šūnu, audu vai no mātes auga izolētu orgānu audzēšanu mākslīgās barotnēs, kontrolētos apstākļos (George *et al.* 2008). Nereti vispraktiskākais veids kā iegūt un pavairot augus lielā daudzumā, īsā laika periodā ir izmantojot augu mikropavairošanu. Šis zinātnes virziens sniedz ieguldījumu plašā nozaru diapazonā kā gēnu inženierijā, ķīmijā, botānikā, hibrīdu izstrādē, pārtikas zinātnē, ekoloģijā un reto sugu saglabāšanā *in vitro* apstākļos (Kyte *et al.* 2013). Lai augu mikropavairošana varētu notikt, tās pamatā ir šūnu īpašība totipotence, kas nodrošina spēju atsevišķām somatiskajām šūnām reģenerēties jaunā augā, jo tās spēj dalīties un radīt visas augam raksturīgās diferencētās šūnas. Taču vairāki faktori nosaka veiksmīgu augu augšanu un pavairošanu *in vitro* kultūrās, būtiskākais no tiem ir gaisma (Gupta and Jatothu 2013). Izmantotajam apgaismojuma spektram ir jāatbilst auga fotosintēzes un fotomorfoģenēzes reakciju norisei. Audzēšanas telpās tiek izmantots mākslīgais apgaismojums, daudzi no apgaismojuma veidiem izstaro plašu gaismas spektra diapazonu, kas ir lieks enerģijas un resursu patēriņš. Pēdējos gados, arvien biežāk *in vitro* kultūru audzēšanā izmanto LED gaismekļus (Gupta and Jatothu 2013). Lai veiksmīgāk varētu notikt šo gaismekļu izmantošana un nodrošināta efektīva augu augšana, nepieciešams veikt papildus eksperimentus par atbilstošākajiem gaismu spektriem un intensitātēm dažādām augu sugām.

1.2.1. Kokaugu mikropavairošana

Neskatoties uz nepieciešamību pilnveidot izmantojamo apgaismojumu, *in vitro* pavairošanai ir būtiska nozīme, jo tā sniedz iespēju iegūt lielu skaitu augu, īsā laika periodā (Gupta and Jatothu 2013). Daļa no komerciāli nozīmīgām kokaugu sugām ir grūti pavairojamas, kas nepieļauj to plašu izmantošanu mežsaimniecībā (Bhatt and Todaria 1989), tāpēc koku pavairošana *in vitro* ir īpaši svarīga. Kokaugu mikropavairošana nodrošina arī uzlabošanu mežsaimniecības selekcijas programmās (Andersone and Ievinsh 2002). Nobriedušu koku pavairošana augu audu kultūrās ir svarīga, jo nodrošina iespēju pavairot laukā identificētos genotipus ar augstu kvalitāti

un vēlamajām īpašībām (Andersone and Ievinsh 2002). Lielu meža ražības pieaugumu iespējams panākt stādījumos iekļaujot rūpīgi atlasītus, produktīvus kokaugu klonus (Jones *et al.* 1995). Kokaugu klonālās pavairošanas nolūkam pārsvarā tiek izmantota mikropavairošana, jo somatiskās embriogēneses metodei vēl tiek izstrādāti mehānismi, tās efektīvai pielietošanai. Veicot augu pavairošanu ar kādu no mikropavairošanas metodēm, svarīgi ir pārbaudīt augu morfoloģisko un ģenētisko stabilitāti, īpaši nozīmīgi tas ir mežsaimniecības klonālajā pavairošanā. Ilgstošā materiāla pavairošanā var tikt novērotas somaklonālās variācijas, tās var būt gan fenotipiskas, gan genotipiskas, kas nosaka auga atšķirīgas iezīmes, tās tiek uzskatītas par nevēlamām, taču var tikt izmantotas jauna genotipa iegūšanai (Ahuja 1993). Tā kā kokiem ir garš augšanas cikls, tie nav viegli izmantojami ģenētisko analīžu testiem, tomēr, kad somaklonālās variācijas ir inducētas un fiksētas, tās var tikt nodotas tālāk arī veģetatīvās pavairošanas ceļā (Ahuja 1993).

1.2.2. Mikropavairošanas eksplanti un barotnes

Augstražīgu klonu pavairošanai izmanto eksperimentālās sistēmās, kuru pamatā ir augu šūnu un audu kultūras. Kultūras uzsākšanai izmanto auga eksplantu, kas tiek audzēts uz barotnēm ar atbilstošām barības vielām. Sākotnēji barotnē esošās barības vielas eksplantam nodrošina blakus esošo šūnu un audu aizstāšanu, jo tas ar barotni ir tiešā kontaktā (Neumann *et al.* 2009). Biežāk, kā eksplanti tiek izmantoti embriji, jauni dzinumi, dīglapas, epikotili vai hipokotili. Šīs augu daļas ir vairāk reaģētspējīgas un vieglāk pavairojamas ar mikropavairošanas metodēm. Lai eksplanta augšana *in vitro* būtu pēc iespējas veiksmīgāka, tam jābūt izolētam no tīra mātes auga, kas nesatur kukaiņus, slimības, kā arī svarīgi, lai mātes augs būtu precīzi identificēts un labi augošs. Jāņem vērā arī eksplanta ievākšanas laiks, jo tas var būt būtisks faktors sekmīgai mikropavairošanai (Kyte *et al.* 2013).

Visas mikropavairošanai nepieciešamās darbības ar eksplantu tiek veiktas sterilos un stingri kontrolētos apstākļos, kas iekļauj kontrolētu temperatūru, gaismas daudzumu, relatīvo mitrumu telpā, arī noteiktu barotnes sastāvu (Davey and Anthony 2010). Barotnes sastāvā ietilpst makroelementi, mikroelementi, vitamīni, citi organiskie komponenti, kā, piemēram, aminoskābes, augu augšanas regulatori, saharoze un želejošie aģenti (lieto cietajām barotnēm). Barotņu izvēli ietekmē auga taksons, eksplants un vēlamā eksperimenta iznākums, tāpēc iespējams standarta barotnei veikt modifikācijas, lai sasniegt vēlamu iznākumu. Kā modifikācijas barotnes sastāvā var veikt izmaiņas augšanas regulatoru koncentrācijās vai pievienot specifiskus

komponentus (Davey and Anthony 2010). Fitohormoni jeb augšanas regulatori arī ir vieni no nozīmīgākajām vielām, kas nosaka augu augšanas regulēšanu, diferenciaciju, šūnu un audu kultūru sistēmu (Neumann *et al.* 2009). Tie nav barības vielas, bet gan ķīmiski savienojumi, kas maina auga vai tā daļu augšanu. *In vitro* augošie augi dažkārt paši neražo pietiekamā daudzumā fitohormonus, tāpēc tie ir jāpievieno papildus barotnes sastāvā. Plašāk lietotie augšanas regulatori ir auksīni, citokinīni, giberelīni un abscīzskābe. Starp citokinīniem un auksīniem ir iespējama plaša spektra mijiedarbības, abi fitohormoni un fotoreceptori ietekmē dzinumumu un sakņu augšanu, taču tie spēj mijiedarboties arī ar citām barotnē esošajām ķīmiskajām vielām, kā arī dažādi vides faktori var tos ietekmēt, kā temperatūra, gaissma un tās spektri (Kyte *et al.* 2013). Piemēram, zilās gaismas ietekme ir pētīta uz petūnijas ziediem un to stubra garuma izmaiņām. Zilās gaismas ietekmē notiek kriptohromu ierosināšanas reakcijas, kas izraisa giberelīna veidošanos un stublāja pagarināšanos. Savukārt, augu ziedēšanu ietekmē gan zilā, gan sarkanā gaissma, jo tās rada ietekmi uz firohromu B un kriptohromu darbību (Fukuda *et al.* 2016). Var rasties arī dažādi apstākļi, kas var izmainīt attiecīgā fitohormona ietekmi, tāpēc ir ļoti svarīgi, lai augu audu kultūru barotnēs būtu ievērotas pareizas fitohormonu daudzumu attiecības, konkrētajam kultivējamajam auga taksonam (Kyte *et al.* 2013).

In vitro kultūru izmantošana kokaugu pavairošanai ir nozīmīgs ieguldījums strauji augošajai mežsaimniecības nozarei. Galvenie ieguvumi augu audu kultūru izmantošanai ir iespēja ātri savairot kokaugus lielā daudzumā ar to vēlamajām ģenētiskajām īpašībām. Tā kā kokaugiem ir ilgs dzīves cikls, arī to selekcijas process ir laikietilpīgs, taču izmantojot *in vitro* kultūras, selekcijas procesu iespējams saīsināt par vairākiem gadiem. Nozīmīgs ieguldījums ir arī iespēja pavairot atsevišķas dabiskos apstākļos grūti pavairojamas koku sugas. Lai mikropavairošana notiktu arvien efektīvāk, nepieciešams rast arvien jaunus risinājumus. Šobrīd, kā vieni no mākslīgā apgaismojuma avotiem, tiek izmantoti LED gaismekļi, taču nepietiekamās informācijas dēļ, īpaši par kokaugiem, nepieciešams veikt papildus pētījums, lai noteiktu piemērotākos gaismu spektrus un intensitātes dažādām augu sugām.

1.3. Gaismas raksturojums un tā nozīme augos

Gaissma ir svarīga visā auga augšanas un attīstības periodā. Augi reaģē gan uz gaismas kvalitāti, gan daudzumu un ilgumu. Gaismas kvalitāte ir attiecināma uz radiācijas spektrālo sadalījumu. Fotosintēzei efektīvākie ir zilās un sarkanās gaismas spektri, šos gaismas spektrus vislabāk absorbē hlorofils. No absorbētās gaismas ir

atkarīga fotomorfoģenēze jeb auga attīstība un ziedēšana (Singh *et al.* 2015). Fotosintēzes procesam un bioaktīvo savienojumu sintēzei svarīga ir zilā un sarkanā gaismas spektra attiecība, taču trūkst precīzas informācijas, kā gaismas spektrālais sastāvs ietekmē dažādas augu sugas (Brazaitytė *et al.* 2021). Piemēram, pētījumos ar zemeņu stādiem noteiks, ka zilās un sarkanās gaismas attiecība ir svarīga, lai nodrošinātu optimālu zemeņu augšanu. Sarkanās un zilās gaismas attiecība (3:1) tika atzīta, kā optimālākā zemeņu stādu augšanai. Tā bija efektīvāka, kā augus audzējot tikai zilā vai sarkanā gaismā (Choi *et al.* 2015). Gaismas daudzums nosaka fotosintēzes produktivitāti, bet gaismas ilgums ir attiecināms uz augu fotoperiodu, kas galvenokārt ietekmē auga ziedēšanas procesu. Gaismas kvalitāte un daudzums ietekmē fotoreceptoru bioķīmisko kaskādi, līdz ar to tiek mainīta vairāku gēnu ekspresija (Singh *et al.* 2015).

1.3.1. Augu fotoreceptori

Fotoreceptori ir svarīgi visā auga attīstības laikā, sākot no sēklu dīgšanas līdz auga nobriešanai un reprodukcijas sākumam, tie nedarbojas atsevišķi no citām signālu sistēmām, jo gaismas signālu integrācija ar citiem vides apstākļiem nodrošina augu spēju pielāgoties apkārtējai videi un tās izmaiņām (Franklin *et al.* 2005). Galvenās fotoreceptoru grupas ir fitohromi, kriptohromi, fototropīni un UVR8 (Ouzounis *et al.* 2015).

Fitohromi (phyA, phyB, phyC, phyD, phyE) ir homeodimēriski hromoproteīni, kas absorbē gaismu sarkanajā un tālajā sarkanajā gaismas apgabalā. Katra hromoproteīna subvienība sastāv no polipeptīda monomēra, kas saistīts ar lineāru tetrapirola hromoforu fitohromobilīnu (Batista *et al.* 2018). Fotoreceptors spēj atgriezeniski pārvērst hromoforu aktivā (Pr) stāvoklī, kas ir sarkanās gaismas absorbējoša forma ar absorbcijas maksimumu aptuveni pie 660nm un neaktīvā (Pfr) stāvoklī, kas ir tālās sarkanās gaismas absorbējoša forma ar aptuvenu absorbcija maksimumu pie 730 nm. Šī forma ir aktīva signālu pārneses ceļā, jo regulē gēnu ekspresiju (Franklin *et al.* 2005; Ouzounis *et al.* 2015).

Kriptohromi satur hromoforu kā flavīna adenīna dinukleotīdu (FAD) un pterīnu. Tie uztver UV-A un zilās gaismas spektrus, tiem piemīt homoloģija ar DNS fotoliāzēm, taču bez fotoliāzes aktivitātes (Cashmore *et al.* 1999; Batista *et al.* 2018). Kriptohromiem ir divi domēni N-gala fitoliāze, kas ir homoloģijas reģiona domēns. Tas saista hromoforu un C-gala domēnu, kas nepieciešams signāla pārraidei (Higuchi and Hisamatsu 2016).

Fototropīns ir fotoreceptors, kas absorbē gaismas spektru UV-A un zilajā diapazonā, ar atšķirīgu struktūru kā kriptohromiem. Šie receptori nodrošina fototropismu, atvārsnišu atvēršanos un hloroplastu kustības (Higuchi and Hisamatsu 2016).

UV-B augstā plūsmas ātruma un īsā viļņu garuma dēļ var izraisīt stresa atbildes reakcijas vai auga šūnu nekrozi. UVR8 ir atbildīgi par ultravioletās gaismas diapazona (280- 315 nm) uztveršanu un absorbciju, nodrošinot aizsardzību pret UV starojumu. *Arabidopsis* UVR8 darbojas īpaši, lai veicinātu atbildes reakciju uz UV-B, ko nosaka gēnu ekspresijas reakcijas, kas nodrošina UV aizsardzību (Jenkins 2009).

Ne tikai fotoreceptori uztver un absorbē dažādus gaismas signālus, bet arī augu pigmenti, kas nosaka gan fotosintēzes procesa norisi, gan nodrošina dažādus auga aizsargmehānismus.

1.3.2. Augu pigmenti

Svarīgi vaskulāro augu fotosintēzes pigmenti ir hlorofils a un b, bet bez tiem fotosintēzē ir iesaistīti arī antenas pigmenti, kā karotinoīdi: beta-karotīns, zeaksantīns, likopēns, luteīns u.c., kas arī piedalās gaismas absorbcijā (Singh *et al.* 2015). Karotinoīdi atrodas hloroplastos un hromoplastu mezofilā, tie ir dzeltenie un oranžie pigmenti, kas veic augu aizsargfunkciju, samazinot membrānu bojājumus, jo veic liekās gaismas izkliedi un brīvo radikāļu detoksikāciju. Karotinoīdi veicina arī fotosintēzi, jo nodrošina gaismas enerģijas savākšanu un pārnesi uz hlorofila fotosintētiski aktīvā starojuma (PAR) spektra reģionu, kur hlorofila absorbcija ir zemāka (Ouzounis *et al.* 2015).

Zilā gaisma satur vairāk enerģijas nekā sarkanā, jo tai ir augstāka frekvence un īsāks viļņa garums. Abas gaismas - zilo (420 - 450 nm) un sarkano (600 -700 nm) - absorbē hlorofils a ar absorbcijas spektru no 430 līdz 665 nm, un hlorofils b ar absorbcijas spektru no 453 līdz 642 nm (Ouzounis *et al.* 2015). Atšķirīga daudzuma saules gaismai adaptētiem augiem hlorofila a un b attiecības ir dažādas. Saules gaismai adaptētajiem augiem no 3.5 līdz 4.9, ēnā augošiem augiem no 2.0 līdz 2.8. Šī attiecība ir ar fizioloģisku nozīmi, jo norāda daudzumu atšķirību starp fotosistēmu I (PSI) un fotosistēmu II (PSII) un to gaismas savācošo kompleksu lielumu un daudzumu (Ieviš 2016).

Hlorofilam iespējams noteikt dažādus fizioloģiski nozīmīgus augu rādītājus, viens no tiem ir hlorofila saturs, kas var tikt izmantots kā lapu novecošanās, auga

slāpekļa satura indikators, kā arī tā izmaiņas ir atkarīgas no dažādiem apkārtējās vides faktoriem. Lapu hlorofila satura optiskie mērījumi nodrošina rezultātu iegūšanu bez destruktīvas paraugu iegūšanas, absorbcijas metode ir ātra un viegli lietojama. Ar hlorofilmetru iegūst relatīvās SPAD vienības (Nauš *et al.* 2010). Vēl nozīmīga hlorofila īpašība ir tā fluorescence, kas ir liekā enerģijas izstarošana gaismas veidā, to iespējams noteikt ar dažādiem parametriem.

1.3.3. Hlorofila fluorescence

Hlorofila molekulu absorbētā gaismas enerģija lapā var tik izmantota trīs veidos: to var izmantot fotosintēzes reakcijām, izkliedēt lieko enerģiju siltuma veidā vai kā gaismu - hlorofila fluorescences ceļā. Visi trīs procesi ir konkurējoši savā starpā, tāpēc palielinoties viena efektivitātei pārējie divi samazinās. Hlorofila fluorescences daudzums ir 1% - 2% no kopējās absorbētās gaismas, tas ir sarkanais un tāli sarkanais gaismas spektrs, ko emitē fotosintētiskie auga audi (Maxwell and Johnson 2000; Harbinson and Rosenqvist 2003). Izstarotais fluorescences spektrs ir atšķirīgs no gaismas spektra, kas tiek absorbēts. Fluorescences emisijas maksimums ir ar garāku viļņa garumu nekā absorbētajai gaismai (Maxwell and Johnson 2000).

Augam nonākot no tumsas gaismā, tiek pakāpeniski slēgti PSII centri, izraisot hlorofila fluorescences palielināšanos, taču dažu minūšu laikā, tas sāk kristies jeb notiek fluorescences dzēšanas process. Tas skaidrojams ar to, ka gaismas ietekmē tiek aktivēti enzīmi, kas paātrina elektronu transportu prom no PSII, šo procesu sauc par "fotoķīmisko dzēšanu". Otrs process ir "nefotoķīmiskā dzēšana", kurā tiek palielināta efektivitāte ar kādu enerģiju pārvērš siltumā (Maxwell and Johnson 2000).

Fluorescences noteikšanai ir dažādi parametri: F_0 ir minimālās fluorescences līmenis tumsai adaptētiem audiem, visi PSII reakcijas centri ir atvērti, normas vērtība no 0.2 līdz 0.4, bet augam esot stresa apstākļos virs 0.7; F_m ir maksimālās fluorescences līmenis tumsai adaptētajos audos, visi PSII reakcijas centri ir aizvērti, normas vērtības no 1.2 līdz 1.5; F_v ir mainīgais fluorescences līmenis tumsai adaptētajos audos. (Harbinson and Rosenqvist 2003; Kooten and Snel 1990).

F_v/F_m var tik izmantots kā PSII efektivitātes indikators, jo tā izmaiņas vērojamas tikai, ja ir tieša faktoru ietekme uz PSII. Mērot šo parametru mērenajā klimata zonā kokiem, kas ir aktīvā augšanas periodā, saulainā dienā, tad optimāls rādītājs ir no 0.70 līdz 0.83, vidējs no 0.66 līdz 0.69. Ja vērtības ir būtiski zemākas, augs ir pakļauts fotoinhibīcijai vai reakcijas centrs ir neatgriezeniski bojāts vai atgriezeniski

inaktivēts (Xu *et al.* 2020). Optimālās parametra vērtības var samazināties, augstā gaismas intensitātē, kāda vides faktora izraisīta stresa apstākļos un miera perioda sākumā (Thach *et al.* 2007; DeEll and Toivonen 2003).

F_v/F_0 nosaka izmaiņas F_m un F_v parametriem, straujš pieaugums kokaugiem ir vērojams pavasarī, kad samazinās sala ietekme, būtiskākas izmaiņas vērojamas koku lapām, kas ir zemākajos zaros (DeEll and Toivonen 2003).

Vitalitātes indekss (Performance Index) (PI) nosaka galvenos PSII fotoķīmijas posmus, iekļaujot gaismas enerģijas absorbciju, ierosmes enerģijas uztveršanu un tās pārvēršanu elektronu plūsmā. PI tiek aprēķināts no reakcijas centra blīvuma, varbūtības ar kādu absorbētais fotons piedalīsies gaismas reakcijās un elektronu transporta raksturojošā lieluma (Thach *et al.* 2007).

Augiem nozīmīgs ir ne tikai absorbētās gaismas enerģijas daudzums, bet arī gaismas spektrālais sastāvs un intensitāte, jo tas ietekmē dažādus auga augšanas procesus. Svarīgi nodrošināt augiem piemērotākos gaismas apstākļus, lai netiktu traucēts to augšanas un attīstības process.

1.3.4. Gaismas spektrālais sastāvs un intensitāte

Gaismai ir trīs galvenās fotosintētiski aktīvā starojuma zonas: zilā, zaļā un sarkanā. Audzējot augus mākslīgā apgaismojumā, izolētus no apkārtējās vides, šie gaismu spektri atsevišķi nav piemēroti augu audzēšanai. Gaisma, tās spektrālais sastāvs un intensitāte, ir svarīgs auga morfoloģiju ietekmējošais faktors (Ivushkin *et al.* 2021).

Augu augšanai un attīstībai nav nepieciešami visi gaismas spektri, jo tie neabsorbē visus viļņa garumus, kas ir saules starojumā, augi absorbciju veic selektīvi, nepieciešami savām vajadzībām. Vissvarīgākā gaismas spektra daļa ir fotosintētiski aktīvais starojums (PAR), tā spektrālais diapazons ir tuvu cilvēka redzamajam gaismas spektram, tā viļņa garums ir no 400 līdz 700 nm (Singh *et al.* 2015). Saules starojumam ir trīs galvenās daļas: ultravioletā starojuma, redzamās gaismas un infrasarkanā starojuma:

Ultravioletais starojums C (200 - 280 nm), tā spektra daļa ir toksiska augiem, bet tas tiek aizturēts atmosfēras ozona slānī, tāpēc nesasniedz zemes virsmu, nenodarot kaitējumu veģetācijai. Ultravioletais starojums B (280 - 315 nm) nav toksisks augiem, taču rada augu krāsas izbalēšanu. Ultravioletais starojums A (315 - 380 nm) nerada ietekmi uz augu veģetāciju, tas ir neitrāls (Singh *et al.* 2015).

Ultravioletais starojums A/ redzamā gaisma (380 - 400 nm) ir spektra daļa, ko auga pigmenti (hlorofils un karotinoīdi) spēj absorbēt. Redzamā gaisma (400 - 520 nm) satur violetu, zilu un zaļu krāsu spektru, šajā gaismas diapazonā notiek maksimālā gaismas absorbcija hlorofilos, kas nosaka lielu ietekmi uz auga veģetatīvo augšanu un fotosintēzi. Redzamā gaisma (520 - 610 nm) satur zaļu, dzeltenu un oranžu krāsas spektru, šie spektri augos tiek maz absorbēti un rada mazāku ietekmi uz veģetatīvo augšanu un fotosintēzi. Redzamā gaisma (610 - 720 nm) satur sarkanos krāsas spektru, tajā notiek augsts absorbcijas līmenis, kas rada lielu ietekmi uz veģetatīvo augšanu, fotosintēzi un ziedēšanu (Singh *et al.* 2015).

Tālais sarkanais/ infrasarkanais (720- 1000 nm) gaismas diapazons rada ietekmi uz sēklu dīgtspēju un augu ziedēšanu, tā absorbcija ir vāja. Infrasarkanais starojums (41000 nm), kas tiek absorbēts tiek pārvērsts siltumā (Singh *et al.* 2015).

Mūsdienās arvien vairāk tiek pētīta dažādu gaismas spektru ietekme uz augu morfoloģiskajām un fizioloģiskajām īpašībām. Lielākoties par modeļorganismiem izmantojot lakstaugus, kas tiek audzēti zem monohromatiskajām gaismām, atklājot katra gaismas spektra nozīmi uz auga augšanu un attīstību.

Zaļajā gaismas spektrā novērota dārza salātu dzinumu svaigās masas samazināšanās (Liu *et al.* 2018), taču zem šī spektra gaismām pozitīva ietekme uz fotosintēzes aparāta attīstību noteikta tomātiem (Wu *et al.* 2014). Zaļajā gaismā augošajiem gurķiem vērojama augstākas PSII fotoķīmiskās efektivitātes un elektronu plūsmas ātruma vērtības, kā dzeltenās gaismas augiem (Su *et al.* 2014). Zem dzeltenās un zaļās gaismas augošajiem augiem, vērojama spēcīga augšanas inhibēšana, sliktāka augšana samazinātās Rubisco biosintēzes dēļ. Zem šīm spektra gaismām noteikta arī samazināta cietes graudu uzkrāšanās tomātu hloroplastos (Wu *et al.* 2014). Arī N. Su *et al.* (2014) pētījumā iegūti līdzīgi rezultāti, zem zaļās un dzeltenās gaismas augošie gurķi bija mazāki, sliktāk augoši ar samazinātu Rubisco biosintēzi un gēnu ekspresiju, nosakot samazinātu fotosintēzi, novērota arī jauno lapu etiolācija. Taču zem dzeltenā gaismas spektra augošajiem dārza salātiem ir vērojama dzinuma svaigās masas un mitruma daudzuma pieaugums, ar samazinātu dzinumu un sakņu attiecību. Novērota arī ietekme uz šķīstošo cukuru pieaugumu (Liu *et al.* 2018).

Svarīga loma augu fotomorfogēnajos procesos ir zilai gaismai, tā nosaka atvārsnīšu kontroli, ietekmējot ūdens attiecības un CO₂ apmaiņu, stumbra pagarināšanos un fototropismu (Massa *et al.* 2008). Zilajā gaismā augošajiem tomātiem tika novērotas gēnu ekspresijas izmaiņas un uzlabots PSII elektronu transportēšanas ātrums, palielināts

hloroplastos uzkrāto cietes graudu daudzums (Wu *et al.* 2014). Arī N. Su *et al.* (2014) zilās gaismas gurķu stādiem novēroja PSII elektronu plūsmas ātruma pieaugumu, atvārsnīšu vadītspējas un Rubisco sintēzes un to saistīto gēnu ekspresijas uzlabojumus, kas norāda, ka zilais gaismas spektrs ir labvēlīgs fotosintēzes procesam.

Sarkanās gaismas spektrs veicināja sakņu pagarināšanos un paātrināja fotosintēzes ātrumu tomātiem (Wu *et al.* 2014). Gurķiem, kas auga zem sarkanā spektra gaismas bija visaugstākais lapu skaits, novērota arī hloroplastu attīstības un hlorofila satura pieaugums, lapu novecošanās procesa aizkavēšana (Su *et al.* 2014). Sarkanā gaismā audzētiem augiem var novērot “sarkanās gaismas sindromu”, kas ir nefunkcionējošas fotosintēzes iekārtas rezultātā radušās dažādas auga pataloģiskās īpašības. Šādiem augiem novērotas mazāks atvārsnīšu blīvums uz lapu virsmām, pagarināts hipokotils, krokainas lapas, samazināts fotosintēzes ātrums (Izzo *et al.* 2021).

Nozīmīga loma auga attīstībā ir arī gaismas intensitātei. Nepietiekams un vājš apgaismojums negatīvi ietekmē auga augšanu un gāzu apmaiņu, taču paaugstināta gaisma rada ietekmi uz fotosintēzes aparātu. Tas nespēj izkļiedēt paaugstināto gaismas enerģiju, kā rezultātā var tikt samazināta fotosintēzes efektivitāte un izraisīta fotoinhibīcija, var notikt pat fotosintēzes reakcijas centra bojājumi (Fan *et al.* 2013). Svarīgi ir izstrādāt katram augam piemērotāko apgaismojuma sastāvu un intensitāti, rast risinājums liekam enerģijas patēriņam, nesamazinot augu kvalitāti (Ivushkin *et al.* 2021). A. Sæbø *et al.* (1995) pētījumā par optimālu apgaismojuma intensitāti bērzu *in vitro* audzēšanai noteica 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, arī Y. Xu *et al.* (2020) *in vitro* kokaugu (*C. lanceolata*) audzēšanai izmantoja 20 un 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ gaismas intensitāti. Pie augstākas gaismas intensitātes labāk augošanas bija krizantēmas (Kim *et al.* 2004) un vīnogas (Poudel *et al.* 2008), abiem augiem izmantoja 50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitāti. Savukārt, N. A. Miranda *et al.* (2020) kā augšanu veicinošu apgaismojuma intensitāti kokaugam (*Eucalyptus urophylla*) noteica 60 līdz 140 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Taču kokaugu pavairošana *in vitro* kultūrās un tiem atbilstošākā gaismas intensitāte nav plaši pētīta un pieejamā informācija ir nepietiekama. Taču svarīgi ir noskaidrot, katram augam optimālāko apgaismojuma intensitāti, jo tā ietekmē augu augšanu un fotosintēzes procesu visa tā dzīves cikla laikā (Ivushkin *et al.* 2021). Jāņem vērā, ka kokaugu sugām bieži optimālāks ir augstāka apgaismojuma intensitāte nekā lakstaugu sugām (Yae *et al.* 1987). Šajā eksperimentā āra bērza un apšu hibrīda audzēšanai izvēlējās A. Sæbø *et al.* (1995) noteikto bērzu audzēšanas optimālāko intensitāti 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ un pārējās divas intensitātes attiecīgi augstākas - 70 un 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Tieši pielāgotās LED

gaismekļu uzbūves dēļ, iespējams augus nodrošināt ar tiem piemērotāko gaismas spektrālo sastāvu un intensitāti.

1.4. Gaismas diožu (LED) uzbūve

Augu audu kultūru audzēšanas telpās tiek izmantots mākslīgais apgaismojums, kā fluorescentās lampas, augstspiediena nātrija lampas, metālu halogenīdu lampas un kvēlspuldzes (Gupta and Jatothu 2013), taču tās nav energoefektīvas un izstaro augstu siltuma daudzumu (Singh *et al.* 2015), radot papildus izmaksas. Augstspiediena nātrija lampas izstaro gaismu visā redzamā spektra daļā un infrasarkanajā spektrā, zaudējot lielu daļu enerģijas siltuma veidā, neļaujot augus novietot tuvu gaismas avotiem (Bourget 2008). Savukārt, gaismas diodēm (LED) ir vairākas priekšrocības kā tradicionālajiem apgaismojuma veidiem, tām ir iespējams kontrolēt un pielāgot gaismas intensitāti, viļņu garumu un spektrālo sastāvu augu fotoreceptoriem, tādējādi simulēt dienas gaismas intensitātes maiņu un panākt mērķtiecīgu augu reakciju (Singh *et al.* 2015; Yeh and Chung 2009). Gaismas diodes spēj izstarot gaismu viļņu garumā no UV-C līdz infrasarkanajam starojumam (IR). Taču galvenokārt tās tiek ražotas ar sarkano un zilo gaismas spektru, jo tos visefektīvāk absorbē primārie fotosintētiskie augu pigmenti - hlorofili. LED gaismekļi ir ar mazāku izmēru, un tie nesatur dzīvsudrabu, stiklu un elektrodus, tāpēc neizdeg un nav nepieciešama to nomaiņa, kā tas ir ar kvēlspuldzēm vai fluorescentajām lampām. LED gaismekļu patērētā elektroenerģija un izdalītais siltuma daudzums ir zemāks, neradot uzkarstošas virsmas, taču ar augstu izdalītās gaismas daudzumu (Yeh and Chung 2009; Massa *et al.* 2008; Morrow 2008). Radītais siltums tiek aizvadīts atsevišķi no gaismas izstarojošajām virsmām, kas ir īpaši svarīgi augstas intensitātes LED gaismekļiem, jo pieļauj augu novietojumu tuvu gaismas avotam. LED gaismekļi uz vienu elektrisko vatu rada vairāk gaismas nekā kvēlspuldzes (Bourget 2008). Ar gaismas diodēm iespējams atvieglot komplicētas apgaismojuma programmas, kurās nepieciešams nodrošināt mainīgu gaismas intensitāti vai spektrālo sastāvu, jo tās ir viegli integrējamas digitālajās vadības sistēmās (Yeh and Chung 2009).

Ņemot vērā gaismas nozīmīgo lomu visā augu dzīves ciklā, tās spektrālajam sastāvam un intensitātei jābūt atbilstošam gan fotosintēzes procesam, gan fotomorfoģenēzes reakcijām (Gupta and Jatothu 2013). Īpaši svarīgs mākslīgais apgaismojums ir kontrolētos apstākļos audzētajiem augiem. Līdz šim izmantotie apgaismojuma veidi nav energoefektīvi un rada lieku starojuma siltumu, kas nav piemērots optimālai augu augšanai. LED gaismekļiem izdalītais siltuma daudzums ir

zemāks, iespējams pielāgot gan gaismas spektrālo sastāvu, gan intensitāti, atbilstoši augu vajadzībām, šo īpašību dēļ, tie kļūst arvien plašāk izmantoti (Singh et al. 2015). Tā kā iepriekš pielietotie apgaismojuma avoti gaismu izstaroja visā redzamajā spektra daļā un LED gaismekļi šobrīd tikai tiek ieviesti, tad pieejamā informācija par atbilstošāko gaismas spektrālo sastāvu un intensitāti nav pietiekama un nepieciešams veikt papildus pētījumus. Jāņem vērā, ka lakstaugu audzēšana komerciālam vajadzībām ir vairāk izplatīta un augu attīstības cikls arī ir īsāks, kā kokaugiem, līdz ar to pētījumi par atbilstošāko gaismas diožu spektrālo sastāvu un intensitāti, pieejami vairāk. Lai panāktu pēc iespējas efektīvāku kokaugu audzēšanu mākslīgos apstākļos, nepieciešams pielāgot izmantojamo apgaismojumu.

2. MATERIĀLI UN METODES

Eksperimentu veica Latvijas Valsts mežzinātnes institūtā “Silava”, augu fizioloģijas laboratorijā no 2021. gada maija līdz 2022. gada martam. Pētījumā izmantotas divu koku sugu *in vitro* kultūras. Tās iegūtas no Valsts mežzinātnes institūta “Silava” bērzu selekcijas materiāla, 20 gadus veciem A selekcijas materiāla grupas izlases āra bērzu *Betula pendula Roth* klonā 55-880 un apšu hibrīda *Populus tremuloides* x *Populus tremula* klonā 4, bērzi aug Rembatas pagastā, bet apšu hibrīds Aucē.

2.1. Āra bērza un apšu hibrīda audzēšanas barotņu pagatavošana

Āra bērza audzēšanai *in vitro* kultūrās tika izvēlēta kokaugu barotne ar zeatīna koncentrāciju $0,2 \text{ mg l}^{-1}$ (McCown and Lloyd 1981). Bet apšu hibrīda audzēšanai izvēlēja modificētu MS (Murashige and Skoog's 1962) barotni ar indole-3-sviestskābes koncentrāciju $0,1 \text{ mg l}^{-1}$. Barotnes pH vērtība ir 5,8. Iepriekš sagatavotos augu audu kultūru traukos - stikla burciņās (300 ml) ieleja 30 ml barotnes, izmantoja folija vākus. Sagatavotās barotnes autoklāvēja (LaM-4-20-ECZ-J, SANOclav, Vācija) 15 min 210 kPa spiedienā, $+121 \text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrā.

2.2. Mikrospraudeņu sagatavošana

Mikrospraudeņu sagatavošana un apstrāde notika laminārajā boksā BioWizard Standart 130 (*Kojair Tech*, Somija). Laminārā boksa dezinfekciju nodrošināja 30W UV staru lampa (OSRAM), to veica 20 min. Pirms eksperimenta uzsākšanas *in vitro* kultūrās tika pavairoti 960 āra bērzi un apšu hibrīdi, ko tālāk izmantoja eksperimenta vajadzībām. Katru no pavairojamajiem augiem sadalīja aptuveni 1,5 cm garos posmos, tā lai tiktu iekļauts sānu pumpurs. Iegūtos posmus ievietoja svaigā barotnē. Katrai eksperimentā izmantotajai koku sugai sagatavoja 120 burciņas, katrā ievietoja astoņus augus, audzēšana notika 30 dienas. Augi tika audzēti $+25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrā ar nodrošinātu telpas ventilāciju un fotoperiodu 16h gaisma, 8h tumsa.

2.3. LED gaismekļu tehniskais raksturojums

Atbilstošākā gaismas spektrālā sastāva noteikšanai abām koku sugām, pētījumā izmantoja četrus gaismekļu veidus:

1. RB - sarkanais – zilais jeb “red - blue”;
2. RGB – sarkanais- zilais- zaļais jeb “red – blue - green”;

3. RGBYO – sarkanais – zilais – zaļais – dzeltenais - oranžais jeb “red – green – blue – yellow - orange”;
4. FL – fluorescentās lampas jeb kontroles spektrs (PHILIPS MASTER TL-D 36W/830 REFLEX fluorescentās spuldzes).

Darbā LED gaismekļu izstarotās gaismas fotosintētisko fotonu plūsmas blīvumu apzīmē ar terminu intensitāte. Eksperimentā izmantoto gaismu intensitātes: RB, RGB, RGBYO - $30 \pm 5 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, $70 \pm 5 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ $110 \pm 5 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, FL- $60 \pm 10 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Atšķirīgs ir arī gaismekļu spektrālais sadalījums, kas redzams 1.tabulā.

1.tabula.

Gaismas diožu (RB, RGB, RGBYO) un fluorescento lampu (FL) spektrālais sadalījums pēc gaismas viļņu garumiem.

Table 1

Spectral distribution of light emitting diodes (RGB, RGB, RGB) and fluorescent lamps (FL) by wavelengths of light.

	RB	RGB	RGBYO	FL
400-500 nm (zils)	23%	18%	17%	17%
500-570 nm (zaļš)	0%	22%	17%	25%
570-590 nm (dzeltens +oranžs)	2%	1%	8%	43%
625-700 nm (sarkanais)	73%	57%	56%	4%
700-750 nm (sarkanais, tālais)	2%	2%	2%	11%

2.4. *In vitro* kultūru audzēšana

Audzēšanas telpā starp gaismas diožu un fluorescentās gaismas plauktiem izvietoja sienas, nodrošinot gaismas spektru nesajaukšanos. Katram plauktam pievienoja piecpadsmi LED gaismekļus ar vienu no spektra gaismām (RB, RGB, RGBYO), bet fluorescences lampas sastāvēja no sešām fluorescences spuldzēm. Temperatūras regulācijai, fluorescentās gaismas plauktiem, izmantoja ventilatorus. Lai nodrošinātu vienlīdzīgu augšanas apstākļus, burkas uz augšanas plauktiem izvietoja nejauši izvēlētā secībā.

2.5. Morfoloģiskie parametri

2.5.1. Kopējais auga garums un galvenā dzinuma pieaugums

No katra gaismas varianta izmantoja 36 augus, visu mērījumu noteikšanai, burkas un tajās esošie augi tika izvēlēti pēc nejaušības principa. Sāka ar galvenā dzinuma garuma noteikšanu, augus izņēma no burciņām un ar bīdmēru nomērīja galvenā dzinuma garumu, no iegūtās vērtības atņēma sākotnēji iestādītā spraudņa garumu. Par galveno dzinumu tika uzskatīts garākais un veselīgākais dzinums, neatkarīgi no tā izcelsmes (galotnes vai sānpumpura). Augiem ar sāndzinumiem noteica to skaitu, tad tos atdalīja un nomērīja, atdalīšanai izmantoja pinceti un šķēres. Augiem saskaitīja dzinumu posmu skaitu. Kopējo auga garumu ieguva saskaitot galvenā dzinuma pieaugumu ar sāndzinuma garumu.

2.5.2. Kopējais lapu laukums

No katra gaismas varianta izmantoja 36 augus. Katram augam atdalīja visas lapas, arī sāndzinumu un novietoja uz skenēšanas virsmas. Lapas uz tās nostiprināja, pārklājot tās ar caurspīdīgu līmlenti, lai nodrošinātu to vertikālās pozīcijas saglabāšanu un novērstu lapu izkustēšanos un deformāciju skenēšanas laikā. Kopējā lapu laukuma noteikšanai izmantoja skeneri un *Regent instruments Winfolia pro 2019a* programmatūru.

2.5.3. Hlorofila koncentrācija

Hlorofila koncentrācijas mērīšanai (SPAD) izmantoja portatīvo hlorofila satura mērītāju (Konica Minolta, Japāna). Mērījumus veica no katras burkas najauši izvēlētiem pieciem augiem, izmantojot trešo vai ceturto jauno auga lapu, katrai lapai veica 5 mērījums no kuriem izteica vidējās vērtības.

2.5.4. Hlorofila a fluorescences

Hlorofila a fluorescences noteikšanai izmantoja piecas burkas no katra gaismas varianta, kopā izmantoja 15 augus. Fotosistēmas II aktivitāti noteica, izmantoja Handy-PEA+ (Hansatech Instruments Ltd., UK) portatīvo fluorescences mērītāju. Lai veiktu mērījumus, katram augam no dzinuma galotnes atdalīja otro vai trešo lapu. Tad piestiprināja lapai specializētus klipšus, aptumšojot to uz 20 min., veica mērījumus. Fotosintēzes raksturošanai izmantoja Fv/Fm, Performance Index (PI) un Fv/Fo parametrus.

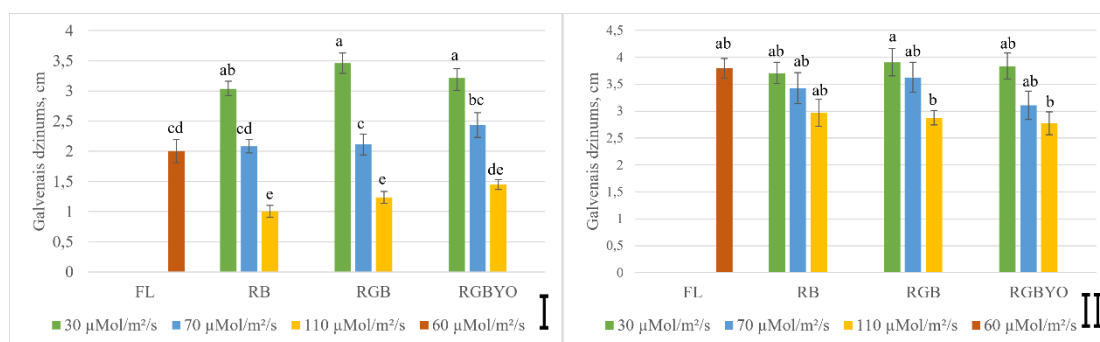
2.6.Datu apstrāde

Datu statistiskā apstrāde veikta izmantojot RStudio 1.4.1106 brīvpieejas programmu un Microsoft Office Excel programmu. Datu ievadīšanai, vidējo vērtību un standartnoviržu aprēķināšanai, arī datu grafiskai attēlošanai izmantoja MS Excel programmu. RStudio 1.4.1106 programmā veica būtiskuma līmeņu noteikšanu starp gaismas intensitātēm izmantojot TukeyHSD un ANOVA testus ar būtiskuma līmeni $\alpha=0,05$.

3. REZULTĀTI

3.1. Apgaismojuma ietekme uz āra bērza un apšu hibrīda dzinumu augšanu

Āra bērzu un apšu hibrīdu audzēja zem trīs LED gaismekļiem ar atšķirīgu spektrālo sastāvu (RB; RGB; RGBYO) un intensitāti (30, 70, 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), par kontroli izmantojot fluorescentās lampas. Augiem noteica galvenā dzinuma garumu, sāndzinumu skaitu un kopējo garumu.

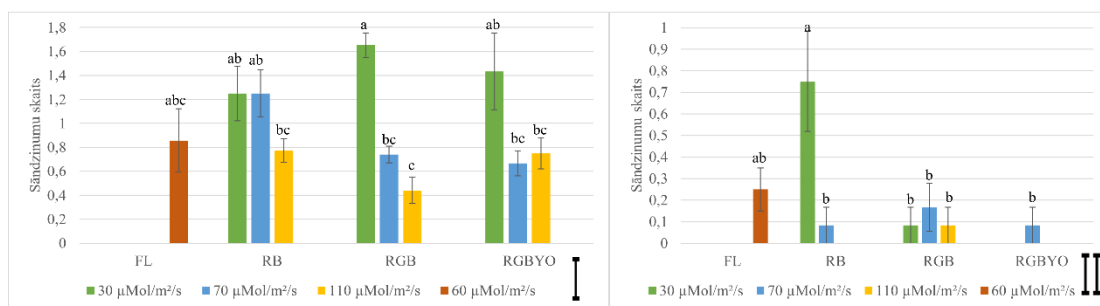


1. attēls. *Betula pendula* (I) un *Populus tremuloides* x *Populus tremula* (II) galvenā dzinuma garums dažādos gaismas spektrālajos variantos un intensitātēs. FL- fluorescentās gaisma (kontrolē); RB- sarkanais- zilais spektrs; RGB- sarkanais- zaļais- zilais spektrs; RGBYO- sarkanais- zaļais- zilais- dzeltenais- oranžais spektrs. Gaismas intensitātes- 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Nogriežņi norāda datu standartnovirzes, burti virs stabiņiem norāda post-hoc testa rezultātus.

Figure 1. Main shoot length of *Betula pendula* (I) and *Populus tremuloides* x *Populus tremula* (II) plants in different light spectral variants and intensities. FL- fluorescent light (control); RB-red-blue spectrum; RGB-red-green-blue spectrum; RGBYO- red- green- blue- yellow- orange spectrum. Light intensities - 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Sections indicate data standard deviations, letters above bars indicate post-hoc test results.

1.1. attēlā redzams, ka āra bērza galvenā dzinuma garums starp visiem gaismu variantiem vienā intensitātē bija bez būtiskām atšķirībām, kā to norāda post-hoc testa rezultāti. Būtiskas atšķirības bija novērotas katrā gaismas variantā starp izmantotajām intensitātēm. Visos gaismu variantos augiem garākie galvenie dzinumi bija 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē salīdzinot ar kontroles spektru. 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē dzinuma garumi bija bez būtiskām atšķirībām ar kontroles spektru, 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē augi bija būtiski īsāki kā kontroles spektrā.

Apšu hibrīda galvenā dzinuma garums neuzrādīja būtiskas atšķirības starp dažādiem gaismu spektrālajiem variantiem vai intensitātēm, tie atbilda arī kontroles spektrā sasniegtajiem rezultātiem (1.2. attēls). Arī apšu hibrīdam bija novērojama tendence, ka garāki augi bija 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē, bet īsākie 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, taču tie neuzrādīja būtiskas atšķirības.

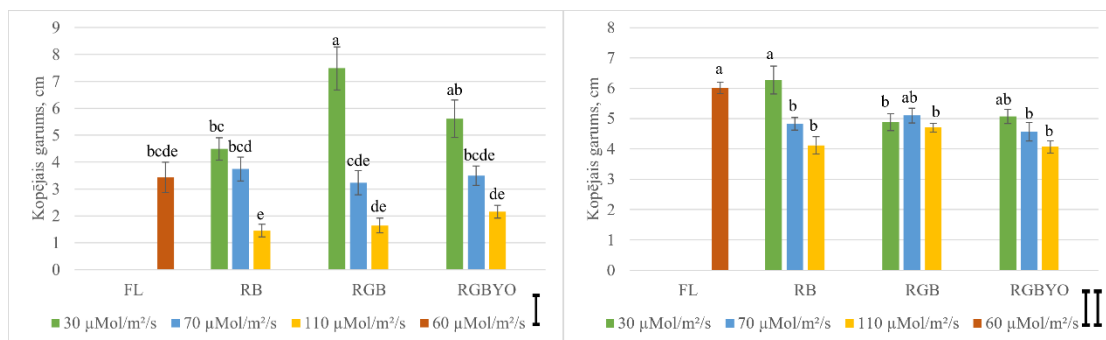


2. attēls. *Betula pendula* (I) un *Populus tremuloides* x *Populus tremula* (II) sāndzinumu skaits dažādos gaismas spektrālajos variantos un intensitātēs. FL- fluorescentās gaisma (kontrolē); RB- sarkanais- zilais spektrs; RGB- sarkanais- zaļais- zilais spektrs; RGBYO- sarkanais- zaļais- zilais- dzeltenais- oranžais spektrs. Gaismas intensitātes- 30 μmol/m²/s, 70 μmol/m²/s, 110 μmol/m²/s, 60 μmol/m²/s. Nogriežņi norāda datu standartnovirzes, burti virs stabiņiem norāda post-hoc testa rezultātus.

Figure 2. The number of plant side shoots of *Betula pendula* (I) and *Populus tremuloides* x *Populus tremula* (II) plants in different light spectral variants and intensities. FL- fluorescent light (control); RB-red-blue spectrum; RGB-red-green-blue spectrum; RGBYO- red- green- blue- yellow- orange spectrum. Light intensities - 30 μmol/m²/s, 70 μmol/m²/s, 110 μmol/m²/s, 60 μmol/m²/s. Sections indicate data standard deviations, letters above bars indicate post-hoc test results.

Āra bērzs (2.1. attēls) lielāko sāndzinumu skaitu sasniedza visu apgaismojumu 30 μmol/m²/s intensitātē. Būtiski zemāks sāndzinumu skaits bija RGB apgaismojumā starp 30 un 110 μmol/m²/s intensitātēm. Ar kontroles augiem nevienā no apgaismojumiem nebija novērotas būtiskas sāndzinumu skaita atšķirības.

Apšu hibrīdam (2.2. attēls) lielāko sāndzinumu skaitu, novēroja RB apgaismojuma 30 μmol/m²/s intensitātē un kontroles spektrā. Sāndzinumu bija būtiski vairāk kā visos pārējos apgaismojumos. 70 μmol/m²/s intensitātē ir vienīgā, kur apšu hibrīdiem visos apgaismojumos bija novēroti dažī sāndzinumi. RGBYO gaismā 30 un 110 μmol/m²/s intensitātēs nebija sāndzinumu.

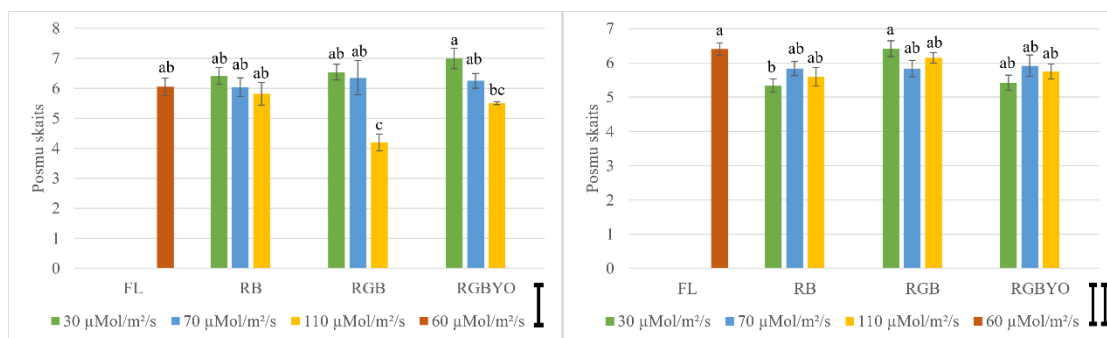


3. attēls. *Betula pendula* (I) un *Populus tremuloides* x *Populus tremula* (II) galvenā dzinuma un sāndzinumu kopējais garums dažādos gaismas spektrālajos variantos un intensitātēs. FL- fluorescentās gaisma (kontrolē); RB- sarkanais- zilais spektrs; RGB- sarkanais- zaļais- zilais spektrs; RGBYO- sarkanais- zaļais- zilais- dzeltenais- oranžais spektrs. Gaismas intensitātes- 30 μmol/m²/s, 70 μmol/m²/s, 110 μmol/m²/s, 60 μmol/m²/s. Nogriežņi norāda datu standartnovirzes, burti virs stabiņiem norāda post-hoc testa rezultātus.

Figure 3. Total shoot length and side shoots of *Betula pendula* (I) and *Populus tremuloides* x *Populus tremula* (II) plants in different light spectral variants and intensities. FL-fluorescent light (control); RB-red-blue spectrum; RGB-red-green-blue spectrum; RGBYO-red- green- blue- yellow- orange spectrum. Light intensities - 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Sections indicate data standard deviations, letters above bars indicate post-hoc test results.

Galvenā dzinuma un sāndzinumu kopējais garums nosaka auga pavairošanas koeficientu – cik augus iespējams iegūt no mātes auga. Āra bērzam (3.1. attēls) garākie augi bija RGB un RGBYO apgaismojuma 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē. Pārējos apgaismojumos un intensitātēs augošo augu iegūtie rezultāti būtiski neatšķiras no kontroles spektra. Visu gaismu 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē augi bija īsāki, kā kontrole, bet ar nebūtisku atšķirību.

Apšu hibrīdam (3.2. attēls) visos apgaismojuma variantos, vienā no intensitātēm augošie kokaugi sasnieguši kontroles spektra līmeni, bet garuma atšķirības bija nebūtiskas. RB un RGBYO apgaismojumā tie ir 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē augošie augi, bet RGB apgaismojumā 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē, pārējie augi bija būtiski īsāki.



4. attēls. *Betula pendula* (I) un *Populus tremuloides* x *Populus tremula* (II) dzinuma posmu skaits dažādos gaismas spektrālajos variantos un intensitātēs. FL - fluorescentās gaisma (kontrolē); RB – sarkanais - zilais spektrs; RGB- sarkanais – zaļais - zilais spektrs; RGBYO – sarkanais – zaļais – zilais – dzeltenais - oranžais spektrs. Gaismas intensitātes - 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Nogriežņi norāda datu standartnovirzes, burti virs stabiņiem norāda post-hoc testa rezultātus.

Figure 4. *Betula pendula* (I) and *Populus tremuloides* x *Populus tremula* (II) number of shoot internodes in different spectral variants and intensities of light. FL-fluorescent light (control); RB-red-blue spectrum; RGB-red-green-blue spectrum; RGBYO- red- green- blue- yellow- orange spectrum. Light intensities - 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Sections indicate data standard deviations, letters above bars indicate post-hoc test results.

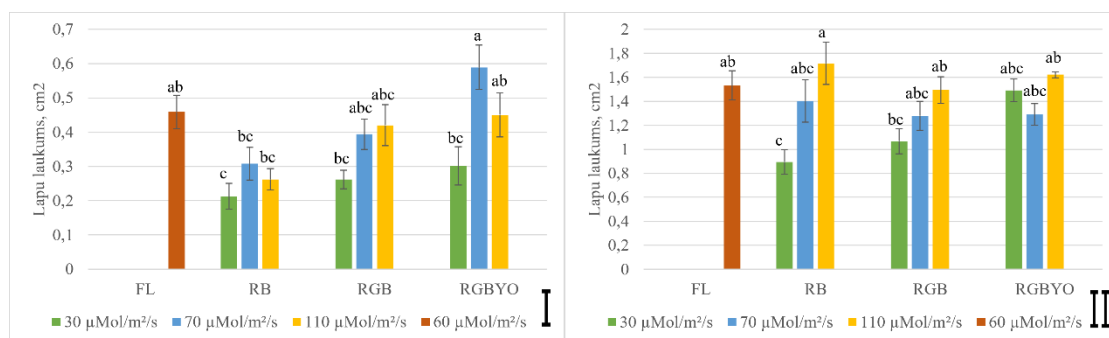
Āra bērzam (4.1. attēls) lielākais dzinuma posmu skaits visu apgaismojumu 30 un 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātēs ir bez būtiskām atšķirībām ar kontroles spektru. Būtiskas

atšķirības bija RGB un RGBYO apgaismojumos starp 30 un 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātēm.

Apšu hibrīdam (4.2. attēls) dzinuma posmu skaitam visos apgaismojumos un to intensitātēs nav vērojama būtiskas atšķirības ar kontroles spektru. Būtiskas atšķirības bija tikai RB gaismas 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātei un kontroles spektram.

3.2. Apgaismojuma ietekme uz āra bērza un apšu hibrīda lapu attīstību

Abām kokaugu sugām noteica trīs lapu attīstības parametrus: lapu laukumu, lapu skaitu un hlorofila saturu (SPAD).

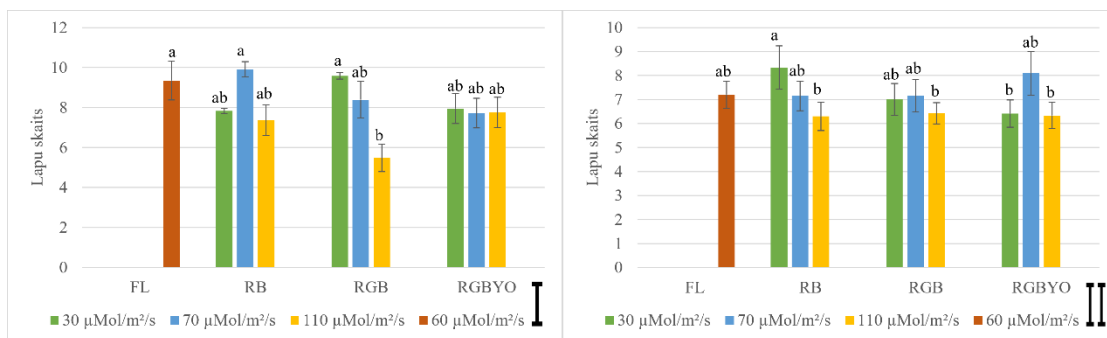


5. attēls. *Betula pendula* (I) un *Populus tremuloides* x *Populus tremula* (II) vienas lapas laukums dažādos gaismas spektrālajos variantos un intensitātēs. FL - fluorescentās gaismas (kontrolē); RB – sarkanais - zilais spektrs; RGB- sarkanais – zaļais - zilais spektrs; RGBYO – sarkanais – zaļais – zilais – dzeltenais - oranžais spektrs. Gaismas intensitātes - 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Nogriežņi norāda datu standartnovirzes, burti virs stabiņiem norāda post-hoc testa rezultātus.

Figure 5. One leaf area of *Betula pendula* (I) and *Populus tremuloides* x *Populus tremula* (II) plants in different spectral variants and intensities of light. FL- fluorescent light (control); RB-red-blue spectrum; RGB-red-green-blue spectrum; RGBYO- red- green- blue-yellow- orange spectrum. Light intensities - 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Sections indicate data standard deviations, letters above bars indicate post-hoc test results.

Āra bērza (5.1. attēls) lielākais lapu laukums bija RGBYO apgaismojuma 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē, bet bez būtiskām atšķirībām ar kontroles spektru. Par kontroles spektru būtiski mazākas lapas bija RB apgaismojuma 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātes augiem.

Apšu hibrīdam (5.2. attēls) starp visiem apgaismojumiem un to intensitātēm nebija vērojamas lapu laukuma atšķirības. Izņemot RB apgaismojuma 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātes augus, kuriem lapu laukums bija būtiski mazāks, kā kontroles spektra. Šāda tendence vērojama arī āra bērza lapu laukuma.

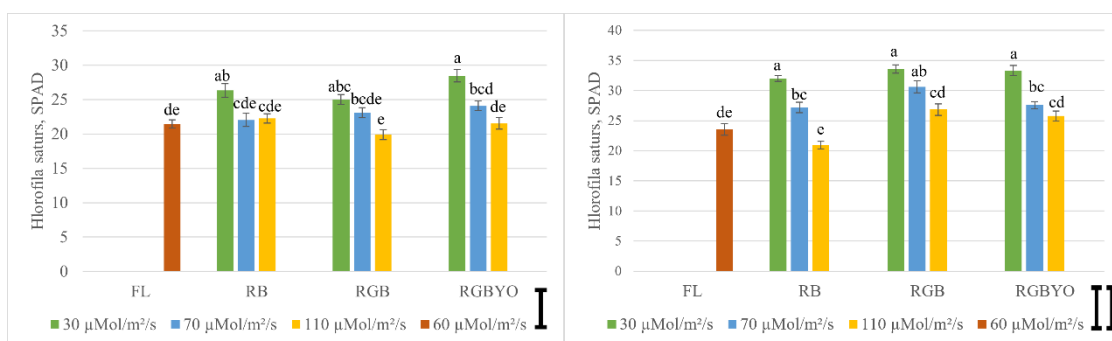


6. attēls. *Betula pendula* (I) un *Populus tremuloides* x *Populus tremula* (II) lapu skaits dažādos gaismas spektrālajos variantos un intensitātēs. FL- fluorescentās gaisma (kontrolē); RB- sarkanais- zilais spektrs; RGB- sarkanais- zaļais- zilais spektrs; RGBYO- sarkanais- zaļais- dzeltenais- oranžais spektrs. Gaismas intensitātes- 30 μmol/m²/s, 70 μmol/m²/s, 110 μmol/m²/s, 60 μmol/m²/s. Nogriežņi norāda datu standartnovirzes, burti virs stabiņiem norāda post-hoc testa rezultātus.

Figure 6. *Betula pendula* (I) and *Populus tremuloides* x *Populus tremula* (II) number of leaves in different light spectral variants and intensities. FL- fluorescent light (control); RB - red-blue spectrum; RGB -red-green-blue spectrum; RGBYO - red- green- blue- yellow- orange spectrum. Light intensities - 30 μmol/m²/s, 70 μmol/m²/s, 110 μmol/m²/s, 60 μmol/m²/s. Sections indicate data standard deviations, letters above bars indicate post-hoc test results.

Āra bērza (6.1. attēls) *in vitro* dzinumiem visvairāk lapu bija RB apgaismojuma 70 μmol/m²/s intensitātē, RGB 30 μmol/m²/s un kontroles spektrā. Būtiski zemāku lapu skaitu novēroja tikai RGB apgaismojuma 110 μmol/m²/s intensitātē.

Apšu hibrīdam (6.2. attēls) visvairāk lapas bija RB apgaismojuma 30 μmol/m²/s intensitātē, kontroles augiem lapu bija mazāk, bet bez būtiskām atšķirībām. Būtiskas atšķirības bija vērojamas starp RB apgaismojuma 30 un 110 μmol/m²/s intensitātēm.



7. attēls. *Betula pendula* (I) un *Populus tremuloides* x *Populus tremula* (II) hlorofila saturs lapās dažādos gaismas spektrālajos variantos un intensitātēs. FL- fluorescentās gaisma (kontrolē); RB- sarkanais- zilais spektrs; RGB- sarkanais- zaļais- zilais spektrs; RGBYO- sarkanais- zaļais- zilais- dzeltenais- oranžais spektrs. Gaismas intensitātes- 30 μmol/m²/s, 70 μmol/m²/s, 110 μmol/m²/s, 60 μmol/m²/s. Nogriežņi norāda datu standartnovirzes, burti virs stabiņiem norāda post-hoc testa rezultātus.

Figure 7. Chlorophyll content of *Betula pendula* (I) and *Populus tremuloides* x *Populus tremula* (II) in leaves in different light spectral variants and intensities. FL- fluorescent light (control); RB -red-blue spectrum; RGB -red-green-blue spectrum; RGBYO - red- green- blue- yellow- orange spectrum. Light intensities - 30 μmol/m²/s, 70 μmol/m²/s, 110 μmol/m²/s, 60 μmol/m²/s.

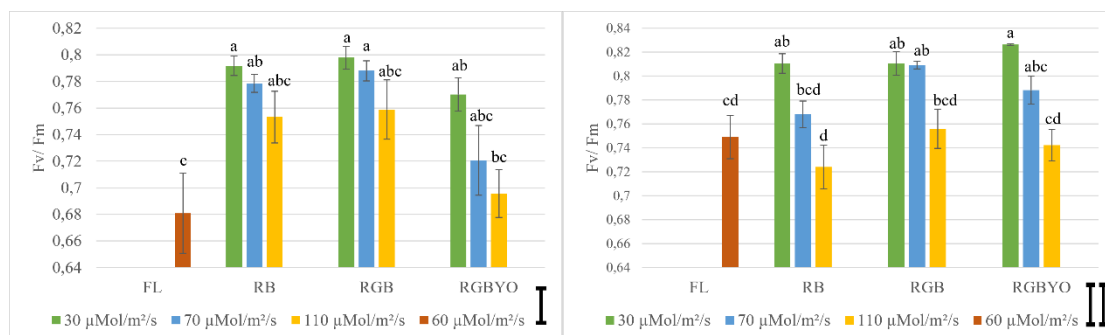
$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Sections indicate data standard deviations, letters above bars indicate post-hoc test results.

Āra bērza lapās augstākais hlorofila saturs (7.1. attēls) tika sasniegts visu apgaismojumu $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē, kas ir būtiski augstāks, kā kontroles spektrā. $70 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ un $110 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē augošajiem augiem, hlorofila saturs bija bez būtiskām atšķirībām gan savstarpēji visos apgaismojuma variantos, gan salīdzinot ar kontroles spektru.

Nedaudz augstāks hlorofila saturs apšu hibrīda lapās (7.2. attēls) tika uzrādīti pie RGB apgaismojuma, taču bez būtiskām atšķirībām ar pārējām gaismām šajā intensitātē. Redzams, ka visos apgaismojuma veidos hlorofila saturs bijis lielāks pie $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātes, kas būtiski atšķiras ar pārējām intensitātēm. Zemākais hlorofila saturs visās gaismās bija $110 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē. Par kontroles spektru lielāks hlorofila saturs bija visu apgaismojumu $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ un $70 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātēs, bet kontroles līmeni konstatēja visu apgaismojumu $110 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē augošajiem augiem.

3.3. Apgaismojuma ietekme uz āra bērza un apšu hibrīda hlorofila a fluorescences parametriem

Āra bērzam un apšu hibrīdam noteica trīs hlorofila a fluorescences parametrus: F_v/F_m , F_v/F_v , PI abs., no kuriem iespējams noteikt augu fotosintēzes aktivitāti un gaismas spektrālā sastāva, intensitātes atbilstību augu optimālai augšanai.

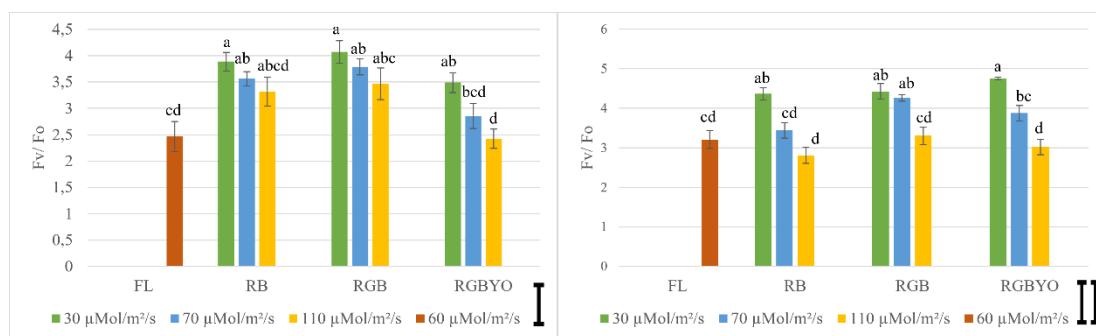


8. attēls. *Betula pendula* (I) un *Populus tremuloides* x *Populus tremula* (II) fluorescences rādītājs F_v/F_m dažādos gaismas spektrālajos variantos un intensitātēs. FL- fluorescentās gaismas (kontrolē); RB- sarkanais- zilais spektrs; RGB- sarkanais- zaļais- zilais spektrs; RGBYO- sarkanais- zaļais- zilais- dzeltenais- oranžais spektrs. Gaismas intensitātes- $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, $70 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, $110 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, $60 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Nogriežņi norāda datu standartnovirzes, burti virs stabiņiem norāda post-hoc testa rezultātus.

Figure 8. Fluorescence index F_v/F_m of *Betula pendula* (I) and *Populus tremuloides* x *Populus tremula* in different light spectral variants and intensities. FL- fluorescent light (control); RB-red-blue spectrum; RGB-red-green-blue spectrum; RGBYO- red- green- blue-yellow- orange spectrum. Light intensities - $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, $70 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, $110 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, $60 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Sections indicate data standard deviations, letters above bars indicate post-hoc test results

Āra bērza fluorescences rādītājs Fv/Fm (8.1. attēls) bija ar vienmērīgu sadalījumu visos apgaismojuma veidos un intensitātēs, savstarpēji apgaismojuma veidiem nebija būtisku atšķirību. Būtiski lielākas Fv/Fm vērtības, kā kontroles spektram bija visu gaismu 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē, arī RB un RGB gaismu 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē. Kontroles spektram konstatēja zemākās fluorescences Fv/Fm vērtības, taču tām nebija būtiskas atšķirības ar visu gaismu 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē augošajiem augiem. Neviena apgaismojuma Fv/ Fm vērtības āra bērziem nerasniedza 0,8 atzīmi.

Apšu hibrīdam lielākās fluorescences parametra Fv/Fm vērtības (8.2. attēls) bija visu apgaismojumu 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē un RGB, RGBYO 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē. Parametra vērtības virs kontroles spektra bija visu gaismu 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātēs. Visu apgaismojumu 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātēs un arī RGB 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātes augi bija sasnieguši Fv/ Fm parametra optimālo līmeni 0,8.

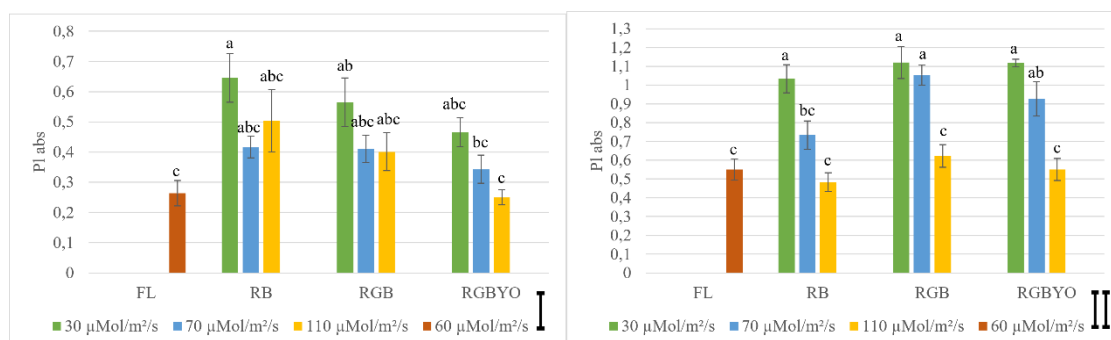


9. attēls. *Betula pendula* (I) un *Populus tremuloides* x *Populus tremula* (II) fluorescences rādītājs Fv/Fo dažādos gaismas spektrālajos variantos un intensitātēs. FL- fluorescentās gaisma (kontrolē); RB- sarkanais- zilais spektrs; RGB- sarkanais- zaļais- zilais spektrs; RGBYO- sarkanais- zaļais- zilais- dzeltenais- oranžais spektrs. Gaismas intensitātes- 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Nogriežņi norāda datu standartnovirzes, burti virs stabiņiem norāda post-hoc testa rezultātus.

Figure 9. Fluorescence index Fv / Fo of *Betula pendula* (I) and *Populus tremuloides* x *Populus tremula* in different light spectral variants and intensities. FL- fluorescent light (control); RB-red-blue spectrum; RGB-red-green-blue spectrum; RGBYO- red- green- blue-yellow- orange spectrum. Light intensities - 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Sections indicate data standard deviations, letters above bars indicate post-hoc test results.

Āra bērzam fluorescences parametra Fv/Fo (9.1. attēls) vērtības bija visos apgaismojumos bez būtiskām atšķirībām. Visos apgaismojumos lielākās vērtības bija 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē, bet zemākās 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē. Nebūtiskas atšķirības ar kontroles spektru visu apgaismojumu 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātes augošajiem augiem un RGBYO 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātes augiem.

Apšu hibrīdam lielākās fluorescences Fv/Fo parametra vērtības (9.2. attēls) bija visu apgaismojumu 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē. Aplūkojot intensitātes, redzams, ka visos apgaismojuma variantos lielākās parametra vērtības bija 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, bet zemākās 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē.



10. attēls. *Betula pendula* (I) un *Populus tremuloides* x *Populus tremula* (II) fluorescences rādītājs PI abs dažādos gaismas spektrālajos variantos un intensitātēs. FL- fluorescentās gaismas (kontrolē); RB- sarkanais- zilais spektrs; RGB- sarkanais- zaļais- zilais spektrs; RGBYO- sarkanais- zaļais- zilais- dzeltenais- oranžais spektrs. Gaismas intensitātes- 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Nogriežņi norāda datu standartnovirzes, burti virs stabiņiem norāda post-hoc testa rezultātus.

Figure 10. Fluorescence index PI abs of *Betula pendula* (I) and *Populus tremuloides* x *Populus tremula* in different light spectral variants and intensities. FL- fluorescent light (control); RB-red-blue spectrum; RGB-red-green-blue spectrum; RGBYO- red- green- blue-yellow- orange spectrum. Light intensities - 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Sections indicate data standard deviations, letters above bars indicate post-hoc test results.

Āra bērzam fluorescences parametra PI abs (10.1. attēls) vērtības bija bez būtiskām atšķirībām gan starp gaismu spektriem, gan to intensitātēm.

Apšu hibrīdam lielākās fluorescences parametra PI abs (10.2. attēls) vērtības bija visu apgaismojumu 30 un 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātēs. Par kontroles spektru būtiski lielāks augu vitalitātes rādītājs bija visu apgaismojumu 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ un RGB, RGBYO 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātēs augošajiem augiem. 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātes augi bija kontroles spektra līmenī.

4. DISKUSIJA

Audzējot augus augu audu kultūrās īpaši svarīga ir gaisma (Hung *et al.* 2016). Eksperimentā izmantotas gaismas diodes ar atšķirīgu spektrālo sastāvu (1. tabula). Sarkanās gaismas sastāvs tajās ir no 56 % līdz 73 %, bet zilās gaismas sastāva atšķirības nav ļoti izteiktas, tā sastāda 17 % līdz 23 % no kopējā gaismas spektra. Savukārt fluorescentajās lampās sarkanais gaismas spektrs sastāda tikai 4 %, bet zilais, līdzīgi kā LED gaismās, 17 %. D.S. Ivushkin *et al.* (2021) pētījumā ar kokaugiem konstatēja, ka augu garums palielinās sarkanā diapazona starojumā. P. R. Poudel *et al.* (2008) arī noteicis, ka garākie vīnogu dzinumi un to posmi ir sarkanā diapazona LED gaismās, taču tiek atzīmēts, ka stublāja un posmu pagarināšanos var veicināt arī dažādas sarkanas un zilās gaismas fotoreceptoru mijiedarbības. Eksperimentā ar LED gaismekļiem lielākais sarkanās gaismas saturs ir RB apgaismojumā - 73 %, savukārt RGB - 57 %, bet RGBYO - 56 %. Ja salīdzina zem LED gaismekļiem augu dzinuma garumus ar kontroles spektru, redzams, ka āra bērzam (1.1. attēls) visu apgaismojumu 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātēs, tie ir bez būtiskām atšķirībām, kā kontroles spektrā. Turpretī, apšu hibrīdam (1.2. attēls) nav vērojamas būtiskas galvenā dzinuma atšķirības starp kontroles un LED gaismām. Līdz ar to sarkanā gaismas spektra ietekme uz āra bērza un apšu hibrīda dzinumu pagarināšanos neapstiprinās. Savukārt, savstarpēji salīdzinot tikai LED gaismu augu garumus (1. attēls), redzams, ka abiem kokaugiem nav vērojama būtiska atšķirība starp atšķirīgajiem apgaismojumiem. Āra bērzam konstatēts, ka pieaugot gaismas intensitātei augu garums samazinās, jo dzinuma posmi ir īsāki. Arī apšu hibrīdam vērojama šī tendence, ka gaismas intensitātei pieaugot, dzinumu garums samazinās, taču bez būtiskām atšķirībām, līdz ar to gaismas intensitātei pieaugot nav novērota izteikta posmu garuma saīsināšanās, kā āra bērzam.

Taču jāņem vērā, ka FL apgaismojumā dzeltenais un oranžais gaismas spektrs sastāda 43%, bet LED gaismās, tas nepārsniedz 10%. Iespējams apšu hibrīdu FL apgaismojuma garos augu dzinumus var saistīt ar augstu oranžā spektra daudzumu, jo pētījumā ar rozēm konstatēts, ka oranžā apgaismojumā augu dzinumi ir garāki, nekā baltā gaismā (Maas and Bakx 1995). Arī citi pētījumi norāda, ka oranžais gaismas spektrs izraisa dzinuma posmu pagarināšanos, taču ir veikti arī eksperimenti ar gurķiem, kur konstatēts, ka zem oranžās gaismas augu attīstība ir lēna (Brazaitytė *et al.* 2009). Līdz ar to pieejamie dati par oranžās gaismas ietekmi ir pretrunīgi un maz pētīti.

Eksperimentā izmantotie LED gaismekļi gaismu izstaro trīs intensitātēs - 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ -, bet FL 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē. Kā jau

iepriekš minēts, A. Sæbø *et al.* (1995) noteicis, ka optimāla apgaismojuma intensitāte bērzu *in vitro* audzēšanai ir 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, arī Y. Xu *et al.* (2020) *in vitro* Ķīnas kaningēmijas audzēšanai izmantoja apgaismojumu ar 20 un 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitāti. Šāda gaismas intensitātes izmantošana, optimālas augšanas nodrošināšanai, apstiprinās arī šajā pētījumā ar āra bērza un apšu hibrīda audzēšanu augu audu kultūrās, jo labākie augšanas rādītāji sasniegti 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ gaismas intensitātē.

Kā zināms, auga kopējais garums nosaka augu pavairošanas koeficientu, kas ir svarīgs parametrs, lai iegūtu pēc iespējas lielāku stādāmā materiāla daudzumu. Āra bērzam kopējais garums (3.1. attēls) RGB apgaismojuma 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē būtiski pārsniedz kontroles spektra augu garumu. Arī šeit saglabājas iepriekš minētā tendence, ka apgaismojuma intensitātei pieaugot, augu garums samazinās. Apšu hibrīdam lielāks kopējais augu garums konstatēts RB apgaismojuma 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē, būtiski neatšķiroties ar kontroles spektru. Savukārt, garākie kokaugi D.S. Ivushkin *et al.* (2021) pētījumā tikai iegūti zem RB un RGB apgaismojuma, līdzīgi, kā apšu hibrīdam (3.2. attēls). RGB variantā bez sarkanā un zilā spektra ir 22 % zaļais. S. Astolfi *et al.* (2012) apgalvo, ka zaļais gaismas spektrs ir efektīvs agrīnai stumbra pagarināšanai, kas, iespējams, nosaka augu dzinuma pagarināšanos zem LED gaismām mūsu eksperimentā. Šim apgalvojumam atbilst āra bērza iegūtie rezultāti, jo garākie augi novēroti zem RGB un RGBYO apgaismojuma, pievienots zaļais gaismas spektrs. Ir veikti arī daži pētījumi, kas nosaka, ka zaļais spektrs darbojas līdzīgi zilai gaismai. Tas piedalās fotosintēzes procesā, izmantojot fotoreceptoru proteīnus, tā ietekmējot zilā un sarkanā spektra iedarbību uz augiem (Murad *et al.* 2021). Tā kā zaļais gaismas spektrs lapās tiek absorbēts vājāk (par 16 – 23 %), kā zilais un sarkanais spektrs, tas tiek uzskatīts par mazāk efektīvu fotosintēzes procesa veicināšanā. Gaismas zilo un sarkano spektru absorbē lapu virsējā daļa, bet zaļais spektrs spēj iekļūt dziļāk auga lapā, kur to absorbē lapas apakšējā daļā esošie hloroplasti, līdz ar to tiek palielināta fotosintēzes efektivitāte (Park and Runkle 2018).

Svarīga auga daļa ir lapa, jo tās funkcionālās izmaiņas var ietekmēt aklimatizācijas procesu (Rosa *et al.* 2018). Salīdzinot RB un RGB apgaismojumos augošo augu lapu laukumus, redzams, ka apšu hibrīdiem (5.2. attēls) šajos gaismu spektros nav novērotas būtiskas atšķirības. Āra bērzam (5.1. attēls) RGB apgaismojumā, kuram ir pievienots zaļais spektrs, visās intensitātēs augu lapu laukumi ir bez būtiskām atšķirībām ar RB gaismu. M. Murad *et al.* (2021) ieguvījis rezultātus ar salātiem, kas audzēti RGB apgaismojumā, tiem lapu laukums ir lielāks, kā zilā vai sarkanā gaismā.

Iespējams lapu laukuma palielināšanos var skaidrot ar zaļo gaismas spektru, kas RGB apgaismojumā papildina sarkano un zilo. Arī šajā pētījumā atzīmēta zaļā spektra spēja nokļūt dziļāk auga audos, tādējādi palielinot oglekļa fiksāciju (Murad *et al.* 2021).

Lapu laukums ietekmē fotosintezējošas virsmas lielumu un fotosintētiskā augu pigmenta – hlorofila daudzumu (Fu *et al.* 2012). Augstākais hlorofila saturs (7.2. attēls) apšu hibrīdam visos apgaismojumos ir 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē, tas samazinās, palielinot intensitāti. Tas skaidrojams ar hloroplastu veidošanās inhibēšanu, pārāk augstas intensitātes apgaismojumā, tādējādi samazinot hlorofila saturu (Fu *et al.* 2012). Turpretī, vājas intensitātes apgaismojumā hloroplastu skaits uz lapas laukuma vienību samazinās, taču hlorofila saturs lapās pieaug, ko nodrošina lielāks hloroplastu laukums (Fu *et al.* 2012). Attiecīgi vidējais lapu laukums apšu hibrīdam (5.2. attēls) RB un RGB apgaismojumā ir pretējs, - augiem ar augstāko hlorofila saturu, lapu izmērs ir mazāks, tātad arī fotosintezējošā virsma ir maza. RB apgaismojumā ir vērojama būtiska rezultātu atšķirība starp zemāko un augstāko intensitāti, taču RGB un RGBYO apgaismojumā šo abu intensitāšu rezultāti ir līdzīgi, bez būtiskām atšķirībām. Arī āra bērzam lielākais hlorofila saturs (7.1. attēls) un mazākais lapu laukums (5.1. attēls) ir sasniegts visu gaismu 30 $\mu\text{Mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē. Būtiski lielāks lapu vidējais laukums ir RGBYO apgaismojuma 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē, kā RB apgaismojumā šajā intensitātē, taču hlorofila satura ziņā, abas augu grupas ir bez būtiskām atšķirībām. Attiecīgi RGBYO apgaismojumā papildus sarkanam, zaļam un zilam gaismas spektram pievienots arī oranžais un dzeltenais gaismas diapazons. Literatūras avoti norāda, ka augiem, kas auguši dzeltenā gaismas spektrā, ir novērotas mazas lapas, smalks stublājs un samazināta svaigā masa, taču ir arī pētījumi, kas ieguvuši pretējus rezultātus un norāda, ka dzeltenās gaismas ietekmē augiem novērots palielināts lapu laukums (Brazaitytė *et al.* 2009). Salīdzinot LED gaismās augošo āra bērza un apšu hibrīda lapu laukumus (5. attēls), redzams, ka oranžā spektra ietekmē nav novēroti būtiski lielāki lapu laukumi. Ņemot vērā, ka FL apgaismojumā oranžā un dzeltenā spektra daudzums ir lielāks, nekā RGBYO apgaismojumā, redzams, ka lapu laukuma palielināšanās pilnībā neapstiprinās arī šajā spektrā. Savukārt, S. Astolfi *et al.* (2012) pētījumā ar Eiropas dižskābardī, akmens ozolu un saldo ķirsi, tika konstatēts hlorofila satura samazinājums, ko skaidro ar sarkanās gaismas klātbūtni, jo tā izraisa hlorofila samazinājumu. Arī vīnogām ir novēroti līdzīgi rezultāti ar hlorofila samazinājumu zem sarkanās gaismas (Paudel *et al.* 2008). Šī apgalvojums pilnībā neapstiprinās ne apšu hibrīdam, ne āra bērzam. Taču tiek

atzīmēts, ka fotosintēzes efektivitāte var nebūt atkarīga no zemāka hlorofila satura (Astolfi *et al.* 2012).

Zināms, ka augu fotosintēzes procesam nozīmīgākās spektra daļas ir zilais un sarkanais gaismas diapazons (Pennisi *et al.* 2019), tāpēc tie ir iekļauti visās āra bērzam un apšu hibrīdam, izmantotajās gaismas diodēs. Zilā gaisma ir svarīga dažādiem fotosintēzes parametriem, kā auga hlorofila sintēze, hloroplastu nobriešana un atvārsnīšu kustību regulācija (Hung *et al.* 2016). Arī hlorofila saturs (7. attēls) starp atšķirīgajiem apgaismojuma veidiem savstarpēji ir bez būtiskām atšķirībām, abiem eksperimentā izmantotajiem kokiem. Attiecīgi sarkanā gaisma ir svarīga augu lapu augšanai un attīstībai, ogļhidrātu uzkrāšanai, anatomiskajām izmaiņām, kā auga garuma palielināšanās un svaigās masas izmaiņas (Hung *et al.* 2016). Zināms, ka sarkanās gaismas spektrs ir viens no svarīgākajiem augu fotosintēzes procesā, līdz ar to katra sarkanā vai tāli sarkanā spektra izmaiņas uztver fitohromi (Murad *et al.* 2021). Jāņem vērā, ka augiem ir svarīgs ir ne tikai zilais un sarkanais gaismas spektrs, bet arī to savstarpējā attiecība. Pētījumos ar garšaugiem noteiks, ka to augšanu samazina augsta zilās un sarkanās gaismas attiecība. Piemēram, sinepju un kāpostu mikrozaļumiem, kas auguši zem LED diodēm, kas izstaro sarkano gaismu no 95% līdz 85% un zilo no 15% līdz 5% ir konstatēta optimāla dīgļlapu laukuma un hipokotila garuma attīstība, taču palielinoties zilā gaismas spektra daudzumam, šis auga morfoloģiskās īpašības samazinās (Ying *et al.* 2021). Novērota arī mikrozaļumu lapu krāsas maiņa. Tie iegūst sarkanīgu nokrāsu, ja zilais gaismas spektrs tiek palielināts līdz 30% (Ying *et al.* 2021). Gaismas spektrālais sastāvs ietekmē arī augu hlorofila daudzumu, noteikts, ka vairākām augu sugām tieši zilās gaismas proporcija apgaismojumā nosaka šo vielu līmeni (Ying *et al.* 2021). S.W Hogewoning *et al.* (2010) konstatējis, ka gurķu lapās hlorofila saturs palielinās, ja zilās gaismas daudzums RB LED lampās tiek paaugstināts no 0% līdz 50%. Savukārt, hlorofila satura izmaiņas nav konstatētas tomātu, salviju un balzamīnu stādos, kur apgaismojuma zilais gaismas diapazons sastādīja 6 % līdz 50% (Wollaeger un Runkle 2015). Āra bērza un apšu hibrīda audzēšanai izmantotajiem LED gaismekļiem sarkanās un zilās gaismas attiecība (1.tabula) ir bez būtiskām atšķirībām. Sarkanā gaisma ir no 56% līdz 73%, zilā no 17% līdz 23%. Nevienā no šīm augu grupām hlorofila satura (7. attēls) vērtības nav iztikti samazinātas vai ar būtiskām atšķirībām.

Salīdzinot sarkano un tāli sarkano gaismas spektru, augiem efektīvāka ir sarkanā gaisma, jo tā palielina augu ražu (Lu *et al.* 2012) un C vitamīna koncentrāciju (Bliznikas *et al.* 2012). Attiecīgi tāli sarkanā gaisma nosaka pigmentu koncentrācijas

samazināšanos, bet palielina augu kopējo biomasu un nosaka auga pagarināšanos (Murad *et al.* 2021). Kubota *et al.* (2012) noteicis, ka tāli sarkanais gaismas spektrs palielinājis salātu lapu laukumu, kas tādējādi uzlabojis arī augu gaismas uztveršanu. Āra bērza un apšu hibrīda apgaismojumā, augstākais tāli sarkanās gaismas daudzums ir ietverts fluorescentajās lampās, kas ir 11%, bet LED gaismekļos tas sastāda tikai 2 % (1. tabula). Abām koku sugām vislielākais lapu laukums (5. attēls) nav novērots FL apgaismojumā. Jāņem vērā, ka augiem ir attīstīti arī mehānismi, kas uztver gaismas kvalitātes izmaiņas, tās izmantojot, kā signālus, lai uztvertu blakus esošo augu klātbūtni un to radīto noēnojumu (Franklin and Whitelam 2005). Taču mainot apgaismojumā zilās gaismas plūsmas ātrumu, tiek izraisītas vairākas fenotipiskas izmaiņas augā, ko regulē kriptohroma un fototropīna fotoreceptori, augā tiek novērotas morfoloģiskas izmaiņas, kā dzinuma un posmu pagarināšanās, apikālās dominances palielināšanās, hlorofila satura samazināšanās, lapu kātiņu pagarināšanās un lapu novietojuma maiņa. Šo procesu sauc par ēnas izvairīšanās reakcijām (Keuskamp *et al.* 2011). Taču zilās gaismas ietekme uz šīm reakcijām ir maz pētīta, tādas pašas atbildes reakcijas augos var izraisīt arī sarkanās un tāli sarkanās (R:FR) gaismas attiecības samazināšanās. Fotosintēzes reakcijām augi absorbē zilo un sarkano gaismas spektru, savukārt tāli sarkanā gaisma pārsvarā tiek atstarota vai ļoti vāji absorbēta, līdz ar to noēnojumā R:FR attiecība ir zemāka, jo absorbcijas rezultātā ir samazināts sarkanās gaismas viļņu daudzums (Franklin and Whitelam 2005). Arī D. J. Tucker (1976) pētījumā ar tomātu stādiem, apstiprina apikālās dominances pastiprināšanos, jo augus apstarojot 5 min. ar tāli sarkano gaismu, tiek novērota sāndzinumu augšanas inhibēšana. Eksperimentā ar āra bērzu un apšu hibrīdu, LED gaismekļiem R:FR gaismu attiecība ir augsta. RB apgaismojumā sarkanais gaismas spektrs sastāda 73%, bet tāli sarkanais 2%, RGB apgaismojumā 57% pret 2%, bet RGBYO 56% pret 2%, savukārt FL apgaismojumā šī attiecība ir izteikti zemāka, sarkanais gaismas spektrs sastāda tikai 4%, bet tāli sarkanais 11%. Līdz ar to LED apgaismojumu R:FR spektra attiecība nav atbilstoša, lai augos radītu noēnojuma izvairīšanās reakcijas. Savukārt, kontroles spektrā šo gaismu attiecība ir pretēja, jo tāli sarkanā gaisma ir vairāk kā sarkanā, līdz ar to arī attiecība ir zemāka. Taču āra bērzam nav vērojamas izteiktas morfoloģiskas ēnas izvairīšanās reakcijas, izteikta apikālā dominance netiek novērota, jo sāndzinumu skaits (2.1. attēls) būtiski neatšķiras no LED gaismu augiem un kopējais augu garums (3.1. attēls) būtiski atšķiras tikai ar RGB apgaismojuma 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātes augiem. Arī apšu hibrīdam sāndzinumu skaits (2.2. attēls) ir bez būtiskām atšķirībām ar LED gaismās augošajiem

augiem un kopējais augu garums (3.2. attēls) nav izteikti lielāks. Arī dzinuma posmu skaits (4.2. attēls) ir bez būtiskām atšķirībām ar pārējām apgaismojumu augu grupām.

Apšu hibrīdam tikai kontroles spektra un RB apgaismojuma 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē, sāndzinumu skaits ir lielāks, pārējos gaismu veidos sāndzinumi ir maz vai nav vispār (2.2. attēls). Citokinīni ietekmē augu sāndzinumu attīstību, noteikts, ka gan sarkanās, gan zilās gaismas spektrs izraisa tādas pašas augu atbildes reakcijas, kā citokinīni (Köhler *et al.* 1980). Piemēram, īslaicīga auga apgaismošana ar sarkano gaismu izraisa citokinīnu līmeņa pieaugumu, taču tas pēc ilgstošas sarkanās gaismas ietekmes atkal samazinās (Köhler *et al.* 1980). Arī melleņu stādiem, vairāk sāndzinumu novēroti zem sarkanās gaismas diodēm, kā citiem gaismu spektriem (Hung *et al.* 2016). Taču Köhler *et al.* (1980) atzīst, ka ilgtermiņā zilā gaisma ir vairāk efektīva, lai palielinātu augu citokinīnu līmeni, nekā sarkanā. Turpretī, āra bērzam sāndzinumu skaits (2.1. attēls) visos gaismu veidos ir lielāks, kā apšu hibrīdam.

Fotosintēzes aparāta un lapu fotoķīmiskās efektivitātes un traucējumu noteikšanai, ir izmantojama hlorofila a fluorescences metode. Tā ir ātra, nedestruktīva un īsā laika periodā iespējams iegūt un analizēt lielu skaitu datu (Rosa *et al.* 2018). Fv/Fm fluorescences parametrs parāda PSII aktīvā centra maksimāli fotoķīmisko efektivitāti tumsā (Fu *et al.* 2012). Apšu hibrīdam visu gaismu 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē rādītāji sasniedz 0,8 atzīmi, kas atbilst optimuma līmenim. Savukārt, āra bērzam Fv/Fm parametra vērtības 30 un 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē ir bez būtiskām atšķirībām, bet neviens no tiem nerasniedz 0,8 atzīmi. Jo augstāka ir šī vērtība, jo efektīvāk augs izmantoto gaismu un spēj pielāgoties vāja un nepietiekama apgaismojuma apstākļiem (Fu *et al.* 2012). Ja Fv/Fm ir zem optimālā 0,8 līmeņa, tas liecina par kādu vides apstākļa nelabvēlīgu ietekmi (Fu *et al.* 2012). Noteikts, ka pazeminoties gaismas intensitātei, Fv/Fm vērtības pieaug (Fu *et al.* 2012), kas novērojams gan āra bērzam, gan apšu hibrīdam (8. attēls). Lai gan āra bērzs nerasniedz 0,8 līmeni, taču 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātes augiem rādītāji ir tuvi šim līmenim, līdz ar to tas norāda, ka augs atrodas optimālos augšanas apstākļos. Attiecīgi apšu hibrīdam ir vērojamas izteiktākas šī parametra atšķirības (8.2. attēls). Būtiskas atšķirības vērojamas starp 30 un 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ RB un RGBYO apgaismojumu intensitātēm, kas varētu liecināt par augstas gaismas intensitātes negatīvu ietekmi. Taču jāņem vērā, ka šis parametra optimums -

0,8 ir noteikts augiem, kas aug ārā, dabiskos apstākļos, līdz ar to *in vitro* augiem tas var būt atšķirīgs, arī sugu kontekstā var būt vērojams atšķirības.

Fv/Fo ir hlorofila fluorescences parametrs, kas apzīmē PSII fotoķīmisko aktivitāti, tas ir jutīgāks, kā Fv/ Fm parametrs (Lichtenthaler *et al.* 2005). Ja augs ir pakļauts nelabvēlīgu vides faktoru ietekmei, tā lapās var notikt fotoinhibīcija vai reakcijas centru neatgriezeniska bojāšana vai atgriezeniska inaktivācija (Xu *et al.* 2020). Līdz ar šādu procesu norisi, samazinās gan Fv/ Fm, gan Fv/ Fo parametra vērtības, taču Fv/ Fo izteiktāka jutīguma dēļ, uzrāda lielākas vērtību atšķirības, kas norāda, ka augs ir pakļauts stresa apstākļiem (Lichtenthaler *et al.* 2005). Āra bērzam Fv/ Fo vērtības (9.1.attēls) saglabājušas tādu pašu tendenci, kā Fv/ Fm parametrā. Nebūtiskas atšķirības ar kontroles spektru ir visu apgaismojumu 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē. Apšu hibrīdam lielākās Fv/ Fo (9.2. attēls) vērtības konstatētas visu apgaismojumu 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē, augi būtiski pārsniedz kontroles līmeni. Tā kā pieaugot apgaismojuma intensitātei, Fv/ Fo vērtības samazinās, tas norāda, ka augstākās intensitātes nav atbilstošākās āra bērza un apšu hibrīda augu audu kultūru audzēšanai.

Augu vitalitātes indekss (PI) raksturo fotosistēmas I un II darbību (Živčák *et al.* 2008). Jo zemākas ir šī parametra vērtības, jo lielākam stresam augs ir pakļauts. Āra bērzam PI vērtības (10.1. attēls) visos apgaismojumos savstarpēji un to intensitātēs ir bez būtiskam atšķirībām. Apšu hibrīdam PI vērtības (10.2. attēls), tāpat kā pārējos divos hlorofila fluorescences parametros, ir zemākas palielinoties gaismas intensitātei. Kontroles spektra un 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātes augiem parametra vērtības ir būtiski zemākas, kā 30 un 70 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē augošajiem augiem. Redzams, ka augstākajās intensitātēs fotosistēmu darbība tiek traucēta.

Gaismas spektrālajam sastāvam ir liela ietekme uz augu augšanas un attīstības procesu (Hogewoning *et al.* 2010). Āra bērza *in vitro* kultūru audzēšanai, kā atbilstošākie augšanas apstākļi tika konstatēti sarkana – zaļa – zila (RGB) spektra apgaismojuma 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē. Savukārt, hibrīdai apsei starp LED gaimām nebija vērojamas būtiskas rezultātu atšķirības, kā optimāla gaismas intensitāte noteikta 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Abiem eksperimentā izmantotajiem kokaugiem augstākās gaismas intensitātēs, tika novērots hlorofila satura un hlorofila fluorescences parametra Fv/ Fm samazinājums, kas norāda uz 70 un 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ gaismas intensitāšu nelabvēlīgu ietekmi uz augu fotosintēzes procesu.

SECINĀJUMI

1. *In vitro* apstākļos audzētam āra bērzam intensīvāk augošie galvenie dzinumi konstatēti visu LED apgaismojumu 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē. Apgaismojuma intensitātei palielinoties, dzinuma garums būtiski samazinās. Apšu hibrīdiem galvenā dzinuma garums visos apgaismojumos ir bez būtiskām atšķirībām.
2. Lielākais galvenā dzinuma un sāndzinumu kopējais garums audu kultūrās audzētam āra bērzam konstatēts sarkana – zaļa – zila spektra (RGB) un sarkana – zaļa – zila – dzeltena – oranža (RGBYO) spektra apgaismojumā 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē. Apšu hibrīdam garākie augi sarkana – zila spektra (RB) un FL apgaismojumā, intensitātes ietekme vērojama tikai RB apgaismojumā.
3. *In vitro* kultūrās audzētiem āra bērziem un apšu hibrīdiem RB apgaismojuma 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē vērojams būtisks lapu laukuma samazinājums.
4. Āra bērzam un apšu hibrīdam visos LED apgaismojumos augstākais hlorofila saturs ir 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē.
5. *In vitro* apstākļos audzētam āra bērzam un apšu hibrīdam nav novērojamas būtiskas hlorofila fluorescences F_v/F_m parametra atšķirības starp LED apgaismojumiem. FL apgaismojumā konstatētas būtiski zemākas vērtības, kas norāda uz nepiemērotu lampu spektrālo sastāvu āra bērza audzēšanai. Apšu hibrīds visu apgaismojumu (RB, RGB, RGBYO) 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē sasniedzis 0,8 līmeni. Palielinoties apgaismojuma intensitātei, āra bērzam un apšu hibrīdam, F_v/F_m vērtības samazinās.
6. Hlorofila fluorescences F_v/F_o parametrs *in vitro* āra bērzam un apšu hibrīdam samazinās, pieaugot apgaismojuma intensitātei, starp apgaismojuma variantiem nav vērojamas būtiskas atšķirības.
7. Hlorofila fluorescences parametra PI abs būtiskas vērtību atšķirības starp apgaismojuma spektrālo sastāvu un intensitātēm *in vitro* kultūrās audzētam āra bērzam nav novērotas, bet apšu hibrīdam visos spektra apgaismojumos 110 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē PI ir zemāks.
8. Augu audu kultūrās audzētam āra bērzam un apšu hibrīdam apgaismojuma spektrālais sastāvs nerada ietekmi uz augu galvenā dzinuma garumu,

hlorofila saturu un hlorofila fluorescences parametru F_v/F_m , iegūtie rezultāti ir bez būtiskām atšķirībām. Āra bērzam apgaismojuma spektrālais sastāvs nerada ietekmi arī uz lapu laukumu, bet apšu hibrīdam uz lapu skaitu un hlorofila fluorescences parametru PI abs.

9. Optimāls LED apgaismojums āra bērza audzēšanai *in vitro* apstākļos ir RGB spektrālais sastāvs $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē. Apšu hibrīdiem piemērots ir LED apgaismojums $30 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ intensitātē, bet neviens no LED variantiem neuzrādīja būtiski labākus rezultātus.

PATEICĪBAS

Darba autore izsaka pateicību darba vadītājai Dr. biol. Inetai Samsonai par ieguldīto laiku, ieteikumiem un konsultēšanu darba izstrādē. Paldies Mg. biol. Tomam Kondratovičam par palīdzību datu ieguvē.

Bakalaura darbs izstrādāts Eiropas Reģionālās attīstības fonda projekta “Īpaši pielāgotu LED gaismekļu izstrāde efektīva un energoefektīva kokaugu pavairošanas un apsākšanas procesa nodrošināšanai” ietvaros.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Ahuja M. R. 1993. Micropropagation of woody plants. Springer, 501 pp.
2. Andersone U., Ievish G. 2002. Changes of Morphogenic Competence in Mature *Pinus sylvestris* L. Buds *in vitro*. - Annals of Botany, 90 (2):293-298.
3. Astolfi S., Marianello C., Grego S., Bellarosa R. 2012. Preliminary Investigation of LED Lighting as Growth Light for Seedlings from Different Tree Species in Growth Chambers. - Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 40(2): 31-38.
4. Batista S. D., Felipe S. H. S., Silva T. D., Castro K. M., Mamedes-Rodrigues T. C., Miranda N. A., Ríos-Ríos A. M., Faria D. V., Fortini E. A., Chagas K., Torres- Silva G., Xavier A., Arencibia A. D., Otoni W. C. 2018. Light quality in plant tissue culture: does it matter? -In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant, 54: 195–215.
5. Bhatt B. P., Todaria N. P. 1989. Vegetative propagation of tree species of social forestry value in Garhwal Himalaya. - Journal of Tropical Forest Science, 2(3): 195 – 210.
6. Bliznikas Z., Zukauskas A., Samuolienė G., Viršilė A., Brazaitytė A., Jankauskienė J., ... Novičkovas A. 2012. Effect of Supplementary Pre-Harvest LED Lighting on the Antioxidant and Nutritional Properties of Green Vegetables. - Acta Horticulturae, 939: 85–91.
7. Bourget M. 2008. An Introduction to Light-emitting Diodes. – HortScience, 43 (7): 1944- 1946.
8. Brazaitytė A., Duchovskis P., Urbonavičiūtė A., Samuolienė G., Jankauskienė J., Kasiulevičiūtė - Bonakėrė A., Bliznikas Z., Novičkovas A., Breivė K., Žukauskas A. 2009. The effect of light-emitting diodes lighting on cucumber transplants and after-effect on yield. – Zemdirbyste - Agriculture, 96 (3): 102 – 118.
9. Brazaitytė A., Miliauskienė J., Vaštakaitė-Kairienė V., Sutulienė R., Laužikė K., Duchovskis P., & Małek S. 2021. Effect of Different Ratios of Blue and Red LED Light on Brassicaceae Microgreens under a Controlled Environment. - Plants, 10(4): 801.
10. Cashmore A. R., Jarillo J. A., Wu Y. J., Liu D. 1999. Cryptochromes: blue light receptors for plants and animals. - Science, 284 (5415), 760–765.
11. Choi H. G., Moon B. Y., Kang N. J. 2015. Effects of LED light on the production of strawberry during cultivation in a plastic greenhouse and in a growth chamber. - Scientia Horticulturae, 189:22 - 31.
12. Christiaens A., Gobin B., Van Labeke M.C. 2016. Light quality and adventitious rooting: a mini- review. - Acta Horticulturae, 1134: 385–394.

13. Davey M.R., Anthony P. 2010. Plant cell culture: essential methods. John Wiley & Sons, 341 pp.
14. DeEll J. R., Toivonen P. M. A. 2003. Practical Applications of Chlorophyll Fluorescence in Plant Biology. Springer, 259 pp.
15. Fan X. X., Xu Z. G., Liu X. Y., Tang C. M., Wang L. W., Han X. 2013. Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. - *Scientia Horticulturae*, 153: 50–55.
16. Franklin K. A., Lerner V. S., Whitelam G. C. 2005. The signal transducing photoreceptors of plants. - *The International Journal of Developmental Biology*, 49(5-6): 653–664.
17. Fu W., Li P., Wu Y. 2012. Effects of different light intensities on chlorophyll fluorescence characteristics and yield in lettuce. - *Scientia Horticulturae*, 135: 45–51.
18. Fukuda N., Ajima C., Yukawa T., Olsen E. J. 2016. Antagonistic action of blue and red light on shoot elongation in petunia depends on gibberellin, but the effects on flowering are not generally linked to gibberellin. - *Environmental and Experimental Botany*, 121: 102 - 111.
19. Gailis A. 2005. Apses selekcijas pētījumi kvalitatīvas koksnes izaudzēšanai. – Pārskats par zinātniski pētnieciskā līgumdarba izpildi, Latvijas Valsts Mežzinātnes institūts “Silava”, meža selekcijas, sēklkopības un ģenētikas darba grupa, 27 lpp.
20. George E.F., Hall M.A., Klerk-Jan D. K. 2008. Plant propagation by tissue culture 3rd edition Volume 1. The Background. Springer, 501 pp.
21. Gupta D. S., Jatothu B. 2013. Fundamentals and applications of light-emitting diodes (LEDs) in in vitro plant growth and morphogenesis. -*Plant Biotechnology Reports*, 7: 211-220.
22. Harbinson J., Rosenqvist E., 2003. Practical Applications of Chlorophyll Fluorescence in Plant Biology. US: Springer, 259 pp.
23. Higuchi Y., Hisamatsu T. 2016. LED Lighting for Urban Agriculture, Springer, 57-73.
24. Hogewoning S. W., Trouwborst G., Maljaars H., Poorter H., Ieperen W., Harbinson J. 2010. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. - *Journal of Experimental Botany*, 61(11): 3107–3117.
25. Hung C. D., Hong C.-H., Kim S.-K., Lee K.-H., Park J.-Y., Nam M.-W., Choi D.-H., Lee H.-I. 2016. LED light for in vitro and ex vitro efficient growth of economically important highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). - *Acta Physiologiae Plantarum* volume, 38: 152.

26. Ieviņš Ģ. 2016. Augu fizioloģija. Funkcijas un mijiedarbība ar vidi. Rīga: LU Akadēmiskais centrs, 608 lpp.
27. Ivushkin D. S., Petrukhin V. A., Volobuev V. S., Feklistov S. A., Prokofiev P. V. 2021. Woody plants seedlings irradiation lighting parameters by using LED transmitters in small-sized irradiation installations. - *Earth and Environmental Science*, 786.
28. Izzo L. G., Mickens M. A., Aronne G., Gómez C. 2021. Spectral effects of blue and red light on growth, anatomy, and physiology of lettuce. - *Physiologia Plantarum*, 172(4): 2191 – 2202.
29. Jenkins G. I. 2009. Signal Transduction in Responses to UV-B Radiation. - *Annual Review of Plant Biology*, 60(1): 407–431.
30. Jones O. P., Welander M., Waller B. J., Ridout M. S. 1995. Micropropagation of adult birch trees: production and field performance. - *Tree Physiology*, 16:521 – 525.
31. Keuskamp D. H., Sasidharan R., Vos I., Peeters A. J. M., Voesenek L. A. C. J., Pierik R. 2011. Blue-light-mediated shade avoidance requires combined auxin and brassinosteroid action in *Arabidopsis* seedlings. - *The Plant Journal*, 67 (2): 208–217.
32. Kim S.-J., Hahn E.-J., Heo J.-W., Paek K.-Y. 2004. Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets in vitro. - *Scientia Horticulturae*, 101(1-2): 143–151.
33. Köhler K. H., Dörfler M., Göring H. 1980. The Influence of Light on the Cytokinin Content of *Amaranthus* Seedlings. – *Biologia plantarum*, 22 (2): 128 – 134.
34. Kooten O., Snel J. F. H. 1990. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology. - *Photosynthesis Research*, 25(3):147–150.
35. Kubota C., Chia P., Yang Z., Li Q. 2012. Applications of Far-Red Light Emitting Diodes in Plant Production under Controlled Environments. - *Acta Horticulturae*, 952: 59–66.
36. Kyte L., Kleyn J., Scoggins H., Bridgen M. 2013. From test tubes: an introduction to micropropagation. Fourth edition. Portland: Timber Press, 276 pp.
37. Lichtenthaler H. K., Buschmann C., Knapp M. 2005. How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio Rfd of leaves with the PAM fluorometer. - *Photosynthetica*, 43 (3), 379–393.
38. Liu H., Fu Y., Hu D., Yu J., Liu H. 2018. Effect of green, yellow and purple radiation on biomass, photosynthesis, morphology and soluble sugar content of leafy lettuce via spectral wavebands “knock out”. - *Scientia Horticulturae*, 236: 10-17.
39. Lu N., Maruo T., Johkan M., Hohjo M., Tsukagoshi S., Ito Y., ... Shinohara Y. 2012. Effects of Supplemental Lighting with Light-Emitting Diodes (LEDs) on Tomato Yield

- and Quality of Single-Truss Tomato Plants Grown at High Planting Density. - *Environment Control in Biology*, 50(1): 63–74.
40. Maas F. M., Bakx E. J. 1995. Effects of Light on Growth and Flowering of *Rosa hybrids* 'Mercedes'. - *J. AMER. SOC. HORT. SCI.*, 120(4):571–576.
 41. Massa G. D., Kim H. H., Wheeler M. R., Mitchell C. A. 2008. Plant Productivity in Response to LED Lighting. -*HortScience*, 43(7): 1951–1956.
 42. masYeh N., Chung J. P. 2009. High-brightness LEDs-Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. - *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13: 2175- 2180.
 43. Mauriņš A., Zvirgzda A. 2006. *Dendroloģija*. Jelgava: Jelgavas tipogrāfija, 447 lpp.
 44. Maxwell K., Johnson G. N. 2000. Chlorophyll fluorescence- a practical guide.- *Journal of Experimental Botany*, 51 (345): 659-668.
 45. McCown B., H. Lloyd G. 1981. Woody Plant Medium (WPM) - A Mineral Nutrient Formulation for Microculture of Woody Plant Species. - *HortScience*, 16: 453-453.
 46. Miranda N. A., Xavier A., Otoni W. C., Gallo R., Gatti K. C., Moura L. C. de, ... Santos, S. S. O. 2020. Quality and Intensity of Light in the In Vitro Development of Microstumps of *Eucalyptus urophylla* in a Photoautotrophic System. - *Forest Science*, 20 (20): 1-7.
 47. Morrow R. C. 2008. LED Lighting in Horticulture. - *HortScience* , 43 (7): 1947–1950.
 48. Murad M., Razi K., Jeong B. R., Samy P. M. A., Muneer S. 2021. Light Emitting Diodes (LEDs) as Agricultural Lighting: Impact and Its Potential on Improving Physiology, Flowering, and Secondary Metabolites of Crops. - *Sustainability*, 13(4):1985.
 49. Murashige T., Skoog F. 1962. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. - *Biologia plantarum*, 15: 473 - 497.
 50. Nauš J., Prokopová J., Řebíček J., Špundová M. 2010. SPAD chlorophyll meter reading can be pronouncedly affected by chloroplast movement. - *Photosynthesis Research*, 105: 265- 271.
 51. Neumann K. H., Kumar A., Imani J. 2009. *Plant cell and tissue culture. - a tool in biotechnology: basics and application*. Springer, 322 pp.
 52. Ouzounis T., Rosenqvist E., Ottosen C. O. 2015. Spectral Effects of Artificial Light on Plant Physiology and Secondary Metabolism. - *HortScience*, 50(8): 1128–1135.
 53. Park Y., Runkle E. S. 2018. Spectral effects of light-emitting diodes on plant growth, visual color quality, and photosynthetic photon efficacy: White versus blue plus red radiation. - *PLOS ONE*, 13(8).

54. Pennisi G., Blasioli S., Cellini A., Maia L., Crepaldi A., Braschi I., ...Gianquinto G. 2019. Unraveling the Role of Red:Blue LED Lights on Resource Use Efficiency and Nutritional Properties of Indoor Grown Sweet Basil. - *Frontiers in Plant Science*, 10.
55. Poudel P. R., Kataoka I., Mochioka R. 2008. Effect of red- and blue-light-emitting diodes on growth and morphogenesis of grapes. - *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 92(2):147–153.
56. Priedītis N. 2014. *Latvijas augi*. Rīga: Gandrs, 888 lpp.
57. Rehman M., Ullah S., Bao Y., Wang B., Peng D., Liu L. 2017. Light-emitting diodes: whether an efficient source of light for indoor plants? - *Environmental Science and Pollution Research*, 24(32): 24743–24752.
58. Rosa W. S., Martins J. P. R., Rodrigues E. S., Almeida Rodrigues L. C., Gontijo A. B. P. L., Falqueto A. R. 2018. Photosynthetic apparatus performance in function of the cytokinins used during the in vitro multiplication of *Aechmea blanchetiana* (*Bromeliaceae*). - *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 133(3): 339–350.
59. Sæbø A., Krekling T., Appelgren M., 1995. Light quality affects photosynthesis and leaf anatomy of birch plantlets in vitro, - *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 41:177-185.
60. Singh D., Basu C., Meinhardt- Wollweber M., Roth B. 2015. LEDs for energy efficient greenhouse lighting. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49: 139-147.
61. Su N., Wu Q., Shen Z., Xia K., Cui J. 2013. Effects of light quality on the chloroplastic ultrastructure and photosynthetic characteristics of cucumber seedlings. - *Plant Growth Regulation*, 73: 227- 235.
62. Thach L. B., Shapcott A., Schmidt S., Critchley C. 2007. The OJIP fast fluorescence rise characterizes Graptophyllum species and their stress responses. - *Photosynthesis Research*, 94: 423-436.
63. Tucker D. J. 1976. Effects of Far-red Light on the Hormonal Control of Side Shoot Growth in the Tomato. - *Annals of Botany*, 40 (5): 1033 – 1042.
64. Tullus A., Rytter L., Tullus T., Weih M., Tullus H. 2011. Short-rotation forestry with hybrid aspen (*Populus tremula* L.×*P. tremuloides* Michx.) in Northern Europe. - *Scandinavian Journal of Forest Research*, 27 (1): 10 – 29.
65. Wollaeger H. M., Runkle E. S. 2015. Growth and Acclimation of Impatiens, Salvia, Petunia, and Tomato Seedlings to Blue and Red Light. - *HortScience*, 50 (4): 522-529.
66. Wu Q., Su N., Shen W., Cui J. 2014. Analyzing photosynthetic activity and growth of *Solanum lycopersicum* seedlings exposed to different light qualities. - *Acta Physiologiae Plantarum*, 36: 1411-1420.

67. Xu Y., Yang M., Cheng F., Liu S., Liang Y. 2020. Effects of LED photoperiods and light qualities on in vitro growth and chlorophyll fluorescence of *Cunninghamia lanceolata*. - BMC Plant Biology, 20:269.
68. Yae B.W., Zimmerman R. H., Fordhami., Ko K. C. 1987. Influence of photoperiod, apical meristem and explant orientation on axillary shoot proliferation of apple cultivars in vitro. - Journal of the American Society for Horticultural Science, 112: 588-592.
69. Ying Q., Jones – Baumgardt C., Zheng Y., Bozzo G. 2021. The Proportion of Blue Light from Light-emitting Diodes Alters Microgreen Phytochemical Profiles in a Species-specific Manner. – HortScience, 56 (1): 1 – 8.
70. Zeps M. 2008. Kas ir hibrīda apse. Informatīvs materiāls. Latvijas Valsts Mežzinātnes institūts "Silava".
71. Živčák M., Brestič M., Olšovská K., Slamka P. 2008. Performance index as a sensitive indicator of water stress in *Triticum aestivum* L. - Plant, Soil and Environment, 54 (4):133-139.

Bakalaura darbs „Apgaismojuma intensitātes un spektrālā sastāva ietekme uz āra bērza (*Betula pendula*) un hibrīdās apses (*Populus tremuloides* x *Populus tremula*) augšanu augu audu kultūrās” izstrādāts LVMI ”Silava”.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētījums veikts patstāvīgi, izmantoti tikai tajā norādītie informācijas avoti un iesniegtā darba elektroniskā kopija atbilst izdrukai.

Autors: Ieva Bērziņa *paraksts* 26.05.2022.

Rekomendēju darbu aizstāvēšanai

Vadītājs: Dr. biol. Ineta Samsone *paraksts* 26.05.2022.

Recenzents: *paraksts* Dr. biol. Jevgenija Nečajeva

Darbs iesniegts LU Bioloģijas fakultātē 26.05.2022.

Lietvede: *paraksts*

Darbs aizstāvēts Bioloģijas bakalaura gala pārbaudījuma komisijas sēdē

prot. Nr. , vērtējums

Komisijas sekretārs/e: