



ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΕΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

**ΔΠΜΣ «ΑΓΡΟΧΗΜΕΙΑ – ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ ΖΩΙΚΗ ΚΑΙ ΦΥΤΙΚΗ
ΠΑΡΑΓΩΓΗ/ΦΑΡΜΑΚΕΥΤΙΚΑ ΦΥΤΑ»**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«Η σημασία της εφαρμογής Τεχνητού Φωτισμού στις καλλιέργειες. Η περίπτωση των διόδων εκπομπής φωτός (LED).»



Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια

Αθηνά Σουκουβέλου

Επιβλέπων Καθηγητής

Χαράλαμπος Καριπίδης
Καθηγητής Τμήματος Γεωπονίας

Ιωάννινα, Σεπτέμβριος 2022

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Χαράλαμπο Καριπίδη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε εξ' αρχής, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, την επιστημονική του καθοδήγηση, τις υποδείξεις του, την επιμονή του, το αμείωτο ενδιαφέρον του και τη συμπαράσταση που έδειξε από την αρχή μέχρι το τέλος.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου και κυρίως στον σύζυγό μου για όλη την υποστήριξη, τη συμπαράσταση και την κατανόησή τους, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να αναδείξει την επίδραση του τεχνητού φωτισμού στην ανάπτυξη και την καλλιέργεια των φυτών.

Αρχικά γίνεται λόγος για τα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας και τις πτυχές της Φωτοβιολογίας. Αναφέρεται η επίδραση του φωτός στη βιωσιμότητα των φυτών και παρουσιάζεται το φωτομετρικό σύστημα των φυτών με τις διάφορες εξισώσεις υπολογισμού και την καμπύλη σχετικής κβαντικής απόδοσης. Οι φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών που επηρεάζονται από τη δέσμευση φωτός είναι η φωτοσύνθεση και η φωτομορφογένεση. Η λειτουργία της φωτοσύνθεσης πραγματοποιείται σε μήκη κύματος που κυμαίνονται μεταξύ των 400-700nm και το τμήμα αυτό αναφέρεται ως φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία ή PAR. Με τον όρο φωτομορφογένεση εννοούμε τις βιολογικές λειτουργίες των φυτών που επηρεάζονται από το φως και σχετίζονται με την ανάπτυξη των μορφολογικών χαρακτηριστικών τους.

Ακολουθεί αναφορά στα διάφορα είδη τεχνητού φωτισμού, που βρίσκουν εφαρμογή στις καλλιέργειες φυτών, όπως είναι οι λαμπτήρες πυρακτώσεως, οι λαμπτήρες εκκένωσης αερίου, οι λαμπτήρες φθορισμού κ.α. Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως έχουν μικρή ενεργειακή απόδοση, ενώ οι λαμπτήρες εκκένωσης αερίου εκπέμπουν μεγάλη ένταση PAR. Οι λαμπτήρες εκκένωσης νατρίου υψηλής πίεσης είναι οι πιο διαδεδομένοι στην καλλιέργεια και παραγωγή κηπευτικών προϊόντων, ενώ οι λαμπτήρες φθορισμού (FL) διατίθενται στο εμπόριο σε μεγάλη ποικιλία φασματικών συνθέσεων και έχουν σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής. Αναδεικνύεται η περίπτωση των διόδων εκπομπής φωτός (LED), μέσα από την ανεπτυγμένη τεχνολογία τους, τον τρόπο λειτουργίας τους και τα διάφορα είδη που υπάρχουν. Παρουσιάζεται η μεγάλη ποικιλία των μηκών κύματος που διαθέτουν και η υψηλή φασματική ποιότητά τους. Τα μήκη κύματος των LED δεν παρουσιάζουν ετερογένεια ακόμη και μετά από μεγάλης διάρκειας χρήση, ενώ τα χαρακτηρίζει η εκπομπή στενής φασματικής ζώνης φωτός, γι' αυτό και με τη χρήση τους μεγιστοποιείται η απορρόφηση των φωτοσυνθετικών χρωστικών. Η αξιολόγηση αυτών των φωτιστικών πηγών πραγματοποιείται βάση της ηλεκτρικής τους απόδοσης και της φωτοσυνθετικής τους απόδοσης. Δείκτες όπως ο «CRI» μετρούν την απόδοση των χρωμάτων των φωτιστικών. Η μεγάλη διάρκεια ζωής και η εξοικονόμηση ενέργειας είναι δύο από τα κύρια πλεονεκτήματά τους, τα οποία τα προσδιορίζουν ως σημαντικές πηγές φωτισμού στην καλλιέργεια των φυτών. Ο χρήστης που θα χρησιμοποιήσει τους λαμπτήρες LED στην καλλιέργεια των φυτών, θα πρέπει, όμως, να λάβει υπόψη του και τα μειονεκτήματά τους. Τα πιο βασικά είναι το υψηλό κόστος αγοράς και το γεγονός ότι η απόδοση τους επηρεάζεται ιδιαίτερα από τις εξωτερικές συνθήκες περιβάλλοντος.

Στη συνέχεια της εργασίας γίνεται ανάλυση της επίδρασης του φωτός στην ανάπτυξη και σε μορφολογικά χαρακτηριστικά των φυτών όπως είναι το φύλλωμα, ο βλαστός και το ριζικό τους σύστημα, σε ιδιότητες των φυτών όπως είναι το ύψος και το νωπό και ξηρό βάρος των επιμέρους τμημάτων τους, στις φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών όπως ο φθορισμός της χλωροφύλλης, η φωτοσυνθετική απόδοση, το δυναμικό

ανάπτυξης των ριζών και η αντιοξειδωτική ικανότητα των φυτών και στον δευτερογενή μεταβολισμό των φυτών, δηλαδή την περιεκτικότητά τους σε φυτοχημικές ενώσεις, όπως οι ολικές και απλές φαινολικές ενώσεις, τα φλαβονοειδή και οι ανθοκυανίνες, οι χλωροφύλλες a,b και τα καροτενοειδή.

Σε γενικές γραμμές, τα μέγιστα αποτελέσματα στη φωτοσύνθεση επιτυγχάνονται όταν τα φυτά αναπτύσσονται κάτω από το ηλιακό φως με συμπληρωματικό LED φως, το οποίο διαθέτει ποικίλα φάσματα φωτός. Μελέτες των τελευταίων ετών, έδειξαν πως οι περιοχές του μπλε και του κόκκινου φωτός είναι αυτές, όπου τα φυτά παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη απόκριση, με αποτέλεσμα να προκαλούν μορφολογικές και αναπτυξιακές μεταβολές στα φυτά και να επηρεάζουν σημαντικές βιολογικές λειτουργίες τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, οι τρεις κύριες ομάδες φωτοϋποδοχέων των φύλλων των φυτών απορροφούν ακτινοβολία σε αυτές τις περιοχές. Πιο συγκεκριμένα, το φυτόχρωμα αντιλαμβάνεται το ερυθρό (R) και υπέρυθρο (FR), τα κρυπτοχρώματα αντιλαμβάνονται το μπλε (B) και το υπεριώδες-A (UV-A) και οι φωτοτροπίνες αντιλαμβάνονται το μπλε (B) χρώμα φωτός.

Τέλος, πραγματοποιείται μια ανασκόπηση πειραματικών μελετών που αφορούν την επίδραση της εκπομπής τεχνητού φωτισμού σε διάφορα είδη φυτών, όπως είναι τα δένδρα, τα αρωματικά φυτά, τα κηπευτικά προϊόντα, τα βιομηχανικά φυτά και τα καλλωπιστικά φυτά. Οι λαμπτήρες φθορισμού FL και οι δίοδοι εκπομπής φωτός (LED) είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται περισσότερο στις έρευνες των τελευταίων ετών. Στη ροδιά, οι διάφορες μεταχειρίσεις φωτός LED έφεραν θετικά αποτελέσματα στην ανάπτυξη των φυτών και στη βελτίωση των φυσιολογικών λειτουργιών τους, ενώ οι λαμπτήρες φθορισμού είχαν μεγαλύτερη απόδοση στην περιεκτικότητα των φυτών σε χλωροφύλλες a,b και καροτενοειδή. Στην κερασιά, η επίδραση του τεχνητού φωτισμού ήταν ασήμαντη. Το ύψος και το νωπό και ξηρό βάρος της οξιάς και της δρυός αυξήθηκαν με την επίδραση του LED φωτισμού, ενώ η περιεκτικότητα των φυτών σε χλωροφύλλες a,b αυξήθηκε με τη χρήση λαμπτήρων φθορισμού. Η φωτοσυνθετική απόδοση των φυτών του μελισσόχορτου βελτιώθηκε με τον φωτισμό τους με λαμπτήρες φθορισμού που εξέπεμπαν υψηλό ποσοστό κόκκινης ακτινοβολίας, ενώ η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλες a,b του βασιλικού αυξήθηκε με ακτινοβολία μπλε φάσματος φωτός που προέρχονταν και πάλι από λαμπτήρες φθορισμού. Οι μεταχειρίσεις φωτός LED, οι οποίες εξέπεμπαν κόκκινη ή μπλε ή συνδυασμό κόκκινης και μπλε ακτινοβολίας, έδωσαν τις υψηλότερες τιμές στην επιφάνεια του φυλλώματος, στο ριζικό σύστημα, στο ύψος, στο νωπό και ξηρό βάρος, στη φωτοσυνθετική απόδοση και στην περιεκτικότητα των φυτοχημικών ενώσεων διάφορων κηπευτικών, όπως η ντομάτα, το μαρούλι, ο αρακάς, το αγγούρι, το λάχανο και η καρπουζιά. Οι κόκκινοι και μπλε λαμπτήρες LED αυξάνουν σημαντικά το ριζικό σύστημα και την ξηρή βιομάζα των φυτών της ελαιοκράμβης. Το νωπό βάρος των χρυσάνθεμων και των τριανταφυλλιών αυξήθηκε με τη χρήση τεχνητού φωτισμού LED. Στην περίπτωση της καμπανούλας, η ελεγχόμενη αύξηση της έντασης του φωτός δίνει υψηλότερα φυτά. Η περιεκτικότητα και των τριών προαναφερθέντων

καλλωπιστικών φυτών σε φλαβονοειδή και ανθοκυανίνες αυξάνεται σημαντικά με τη χρήση λαμπτήρων LED που εκπέμπουν φως μπλε χρώματος.

Επομένως τα LED, σίγουρα αποτελούν μια πηγή φωτός με ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη φυτική παραγωγή, αφού δίνουν αυξημένες τιμές στα χαρακτηριστικά των φυτών, σε σύγκριση με τα συμβατικά είδη φωτισμού.

Λέξεις Κλειδιά

Τεχνητό φως, ανάπτυξη φυτών, LED, μήκη κύματος, φάσμα, φωτοβιολογία, είδη φωτισμού, FL

Abstract

The aim of this study is to present the effect of artificial lighting on the growth and the cultivation of plants.

Initially, the wavelengths of solar radiation and the aspects of Photobiology are discussed. The effect of light on plant viability is reported and the photometric system of plants is presented with the various calculation equations and the relative quantum yield curve. Physiological plant function affected by light absorption are photosynthesis and photomorphogenesis. The operation of photosynthesis takes place at wavelengths ranging between 400-700 nm and this part is referred to as photosynthetically active radiation or PAR. By the term photomorphogenesis we mean the biological functions of plants that are affected by light and are related to the development of their morphological characteristics.

The following is a reference to the different types of artificial lighting, which find application in plant crops, such as incandescent lamps, gas discharge lamps, fluorescent lamps, etc. Incandescent lamps have low energy efficiency, while gas discharge lamps emit high PAR intensity. High-pressure sodium discharge lamps are the most common in horticultural cultivation and production, while fluorescent lamps (FL) are commercially available in a wide variety of spectral compositions and have relatively long lifetimes. The case of light-emitting diodes (LEDs) is highlighted, through their developed technology, how they work and the different types that exist. The wide variety of wavelengths which is available and their high spectral quality are presented. The wavelengths of LEDs do not show heterogeneity even after long-term use, while they are characterized by the emission of a narrow spectral band of light, which is why their use maximizes the absorption of photosynthetic pigments. The evaluation of these light sources is based on their electrical efficiency and their photosynthetic efficiency. Indicators such as "CRI" measure the color rendering of lamps. Long life and energy saving are two of their main advantages, which identify them as important lighting sources in plant cultivation. The user who will use LED lamps in the cultivation of plants, should, however, take into account their disadvantages. The most basic ones are the high purchase cost and the fact that their performance is highly affected by external environmental conditions.

In the continuation of the work, an analysis is made of the effect of light on the growth and morphological characteristics of the plants such as the foliage, the stem and their root system, on plant properties such as the height and the fresh and dry weight of their individual parts, in the physiological functions of plants such as chlorophyll fluorescence, photosynthetic efficiency, root growth potential and plant antioxidant capacity and in the secondary metabolism of plants, which means their content of phytochemical compounds, such as total and simple phenolic compounds, flavonoids and anthocyanins, chlorophylls a, b and carotenoids.

In general, maximum results in photosynthesis are achieved when plants are grown under sunlight with supplemental LED light, which has a variety of light spectrums.

Studies in recent years have shown that the areas of blue and red light are the ones where plants show the greatest response, causing morphological and developmental changes in plants and affecting their important biological functions. This is due to the fact that the three main photoreceptor groups of plants leaves absorb radiation in these areas. More specifically, phytochrome perceives red (R) and infrared (FR), cryptochromes perceive blue (B) and ultraviolet-A (UV-A) and phototropins perceive blue (B) color of light.

Finally, a review of experimental studies concerning the effect of artificial lighting emission on various types of plants, such as trees, aromatic plants, horticultural products, industrial plants and ornamental plants, is carried out. Fluorescent lights (FL) and light emitting diodes (LED) are the most used in research in recent years. In pomegranate, the various LED light treatments had positive effects on plant growth and improvement of their physiological functions, while fluorescent lamps had a greater effect on plant chlorophyll a, b and carotenoid content. In cherry, the effect of artificial lighting was insignificant. The height and fresh and dry weight of beech and oak increased with the effect of LED lighting, while the plant chlorophyll a, b content increased with the use of fluorescent lamps. The photosynthetic performance of lemon balm plants was improved by lighting them with fluorescent lamps emitting a high proportion of red radiation, while the chlorophyll a, b content of basil was increased by blue light irradiation again from fluorescent lamps. The LED light treatments, which emitted red or blue or a combination of red and blue radiation, gave the highest values of leaf area, root system, height, fresh and dry weight, photosynthetic efficiency and content of phytochemical compounds of various horticultural crops, such as tomato, lettuce, pea, cucumber, cabbage and watermelon. Red and blue LED lamps significantly increase the root system and dry biomass of canola plants. The fresh weight of chrysanthemums and roses was increased by using artificial LED lighting. In case of harebell, a controlled increase in light intensity gives taller plants. The flavonoid and anthocyanin content of all three of above-mentioned ornamental plants is significantly increased by the use of LED lamps that emit blue light.

Therefore, LEDs are definitely a light source of particular interest in plant production, since they give increased values to plant characteristics, compared to conventional types of lighting.

Keywords

Artificial light, plant growth, LED, wavelengths, spectrum, photobiology, types of lighting, FL

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	1
Περίληψη.....	2
Abstract.....	5
1. Συνοτομογραφίες.....	9
2. Εισαγωγή.....	12
2.1 Τα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας	12
2.2 Οι πτυχές της φωτοβιολογίας.....	13
2.3 Το φωτομετρικό σύστημα.....	14
3. Η σημασία εφαρμογής τεχνητού φωτισμού στις καλλιέργειες	17
3.1 Παραδοσιακοί τύποι λαμπτήρων που χρησιμοποιούνται στις καλλιέργειες φυτών..	17
3.1.1 Λαμπτήρες Πυρακτώσεως (IL)	18
3.1.2 Λαμπτήρες εκκένωσης αερίου (GDL)	18
3.2 Η περίπτωση των διόδων εκπομπής φωτός (LED).....	22
4. Η τεχνολογία και λειτουργία των LED.....	23
4.1 Τα είδη των LED	25
4.2 Η μέτρηση του φωτός των LED	26
4.3 Τα μήκη κύματος φωτός των LED	27
4.4 Το φάσμα φωτός των LED	29
4.5 Η μέτρηση της απόδοσης των LED.....	30
4.6 Η διάρκεια ζωής των LED	33
4.7 Τα πλεονεκτήματα των λαμπτήρων LED	35
4.8 Τα μειονεκτήματα των λαμπτήρων LED	37
5. Η επίδραση του φωτός στην ανάπτυξη των φυτών	40
5.1 Η επίδραση του φωτός στην ανάπτυξη και στα μορφολογικά χαρακτηριστικά των φυτών	40
5.1.1 Η επίδραση του τεχνητού φωτισμού LED στην ανάπτυξη και στα μορφολογικά χαρακτηριστικά των φυτών.....	41
5.2 Η επίδραση του φωτός στις φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών.....	43
5.2.1 Φως και φωτοϋποδοχείς	43
5.2.2 Ο φθορισμός της χλωροφύλλης - Φωτοσυνθετική απόδοση του φωτοσυστήματος II (PSII).....	45
5.2.3 Εκτίμηση του δυναμικού ανάπτυξης ριζών	46
5.2.4 Η αντιοξειδωτική ικανότητα των φυτών.....	47

5.3	Η επίδραση του φωτός στον δευτερογενή μεταβολισμό των φυτών-περιεκτικότητα των φυτοχημικών ενώσεων.....	47
5.3.1	Ολικές και απλές φαινολικές ενώσεις.....	47
5.3.2	Φλαβονοειδή και ανθοκυανίνες	48
5.3.3	Χλωροφύλλες a,b και καροτενοειδή	49
6.	Ανασκόπηση πειραματικών μελετών που αφορούν την επίδραση της εκπομπής του τεχνητού φωτισμού σε διάφορα είδη φυτών	51
6.1	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στα Δένδρα	51
6.1.1	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στη Ροδιά (<i>Punica granatum</i>)	51
6.1.2	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στην Κερασιά (<i>Prunus avium</i>)	56
6.1.3	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στην Οξιά (<i>Fagus sylvatica</i>)	57
6.1.4	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στη Δρυ (<i>Quercus suber</i>)	58
6.2	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στα Αρωματικά Φυτά.....	59
6.2.1	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στον Βασιλικό (<i>Ocimum basilicum</i>)	59
6.2.2	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στο Μελισσόχορτο ή Μέλισσα η φαρμακευτική (<i>Melissa officinalis</i>).....	60
6.3	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στα Κηπευτικά.....	61
6.3.1	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στην Ντομάτα (<i>Solanum lycopersicum</i>)	62
6.3.2	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στο Μαρούλι (<i>Lactuca sativa</i>)	63
6.3.3	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στον Αρακά (<i>Pisum sativum</i>)	65
6.3.4	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στην Αγγουριά (<i>Cucumis sativus</i>)	66
6.3.5	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στο Λάχανο (<i>Brassica oleracea</i>).....	67
6.3.6	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στην Καρπουζιά (<i>Citrullus lanatus</i>)	69
6.4	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στα Βιομηχανικά Φυτά	70
6.4.1	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στην Ελαιοκράμβη (<i>Brassica napus</i>)	70
6.5	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στα Καλλωπιστικά Φυτά.....	71
6.5.1	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στο Χρυσάνθεμο (<i>Chrysanthemum indicum</i>)..	72
6.5.2	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στην Τριανταφυλλιά (<i>Rosa sp.</i>).....	73
6.5.3	Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στην Καμπανούλα (<i>Campanula cochleariifolia</i>)	73
7.	Συμπεράσματα	75
8.	Βιβλιογραφία.....	79

1. Συντομογραφίες

<i>AllinGap</i>	τεχνολογία LED
<i>AlGaAs</i>	τεχνολογία LED
<i>B</i>	μπλε/κυανό
<i>Chl a, b</i>	χλωροφύλλη α, β
<i>CRI</i>	δείκτης μέτρησης της απόδοσης των χρωμάτων στα LED
<i>DW/L</i>	ξηρό βάρος προς μήκος
<i>FL</i>	φωτιστικά φθορισμού
<i>F_V</i>	μεταβλητός φθορισμός
<i>F_M</i>	μέγιστος φθορισμός
<i>FR</i>	μακρινό ερυθρό/υπέρυθρο
<i>G</i>	πράσινο
<i>GDL</i>	λαμπτήρες εκκένωσης αερίου
<i>HIDL</i>	λαμπτήρες εκκένωσης υψηλής πίεσης
<i>HPML</i>	λαμπτήρες εκκένωσης υδραργύρου υψηλής πίεσης
<i>HPS</i>	λαμπτήρες εκκένωσης νατρίου υψηλής πίεσης
<i>IL</i>	λαμπτήρες πυρακτώσεως
<i>K</i>	Kelvin – μονάδα μέτρησης θερμοκρασίας
<i>LED</i>	δίοδοι εκπομπής φωτός
<i>LED bartype</i>	είδος φωτιστικού LED
<i>LED strip</i>	είδος φωτιστικού LED
<i>LED 1 W</i>	μεταχείριση φωτός LED
<i>LM/W</i>	lumens/watt
<i>Lumens</i>	φωτομετρική μονάδα μέτρησης
<i>L50</i>	ποσοστό 50% σε τεχνικά χαρακτηριστικά συσκευασίας

<i>L70</i>	ποσοστό 70% σε τεχνικά χαρακτηριστικά συσκευασίας
<i>mcd</i>	φωτεινή ένταση
<i>MHL</i>	λαμπτήρας μεταλλικών αλογονιδίων
<i>NAR</i>	καθαρό ποσοστό αφομοίωσης ενέργειας
<i>n</i>	ηλεκτρόνιο
<i>nm</i>	μονάδα μέτρησης του μήκους κύματος
<i>p</i>	οπή
<i>PAR</i>	ενεργή ακτινοβολία
<i>PWM</i>	διαμόρφωση παλμικού πλάτους
<i>PUE</i>	απόδοση φωτοσυνθετικής χρήσης
<i>PPF</i>	φωτοσυνθετική ροή φωτονίων
<i>Pmax</i>	μέγιστος φωτοσυνθετικός ρυθμός
<i>R</i>	κόκκινο/ερυθρό
<i>R/FR</i>	αναλογία ερυθρού προς υπέρυθρο φως
<i>R/S</i>	λόγος ξηρού βάρους ρίζας προς βλαστού
<i>RGP</i>	δυνητικότητα ανάπτυξης ριζών
<i>ROS</i>	ενεργή μορφή οξυγόνου
<i>S/R</i>	λόγος ξηρού βάρους βλαστού προς ρίζας
<i>SPC</i>	απλές φαινολικές ενώσεις
<i>TPC</i>	ολικές φαινολικές ενώσεις
<i>UV/A - UV</i>	υπεριώδης ακτινοβολία
<i>W</i>	λευκό
<i>Y</i>	κίτρινο
<i>YPF</i>	ροή φωτονίων
<i>λ</i>	μήκος κύματος
$\mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$	μέτρηση της απόδοσης των φωτιστικών

$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ υπολογισμός της φωτοσυνθετικής ροής φωτονίων

12B LED μεταχείριση φωτός LED (κόκκινη ακτινοβολία φωτός με 12% επιπρόσθετη μπλε ακτινοβολία)

24B LED μεταχείριση φωτός LED (κόκκινη ακτινοβολία φωτός με 24% επιπρόσθετη μπλε ακτινοβολία)

2. Εισαγωγή

Η ανάπτυξη και η διατήρηση όλων των φυτών του πλανήτη, καθώς και του ανθρώπου, εξαρτώνται άμεσα από δύο βασικούς παράγοντες που είναι ο ήλιος και το νερό. Η αναγκαιότητα για το νερό είναι εμφανέστατη, η επίδρασή του σε όλους τους οργανισμούς ουσιαστική και η έλλειψή του καταλυτική. Η επίδραση του ηλιακού φωτός, όμως, δεν αποκαλύπτεται τόσο άμεσα και με τόσο αποτελεσματικό τρόπο στη διαδικασία της αναπαραγωγής και ανάπτυξης των φυτών. Παρόλα αυτά είναι ολοφάνερη στους παρατηρητικούς γνώστες της φύσης. Ξεκινώντας από τους θάμνους και τα δένδρα, ο ήλιος είναι πηγή ζωής για αυτά και τα βοηθά να επιβιώνουν και να εξελίσσονται. Τα κηπευτικά προϊόντα, μέχρι και το τελευταίο στάδιο ανάπτυξης, απαιτούν ηλιοφάνεια αρκετές ώρες την ημέρα για να ολοκληρώσουν τον κύκλο τους. Ακόμα και στα τροπικά φυτά, που έχουν ανάγκη ελάχιστου φωτισμού, κυρίως έμμεσου, ο ήλιος είναι το ουσιωδέστερο συστατικό της επιβίωσής τους.

Βέβαια, οι δύο αυτοί παράγοντες, όταν βρισκόμαστε στο εξωτερικό περιβάλλον δεν είναι πλήρως ελεγχόμενοι και αποτελεσματικά προβλέψιμοι, αλλά σε έναν περιορισμένο και κλειστό χώρο (π.χ. θερμοκήπιο), τα πράγματα αποδεικνύονται πιο εύκολα. Είναι φανερό λοιπόν, πως σε ένα θερμοκήπιο, η φροντίδα για καθημερινό και άφθονο φωτισμό και για τη σωστή θερμοκρασία του χώρου, είναι απολύτως επιβεβλημένη για όλα τα φυτά και αποτελεί το άλφα και το ωμέγα της σωστής και ολοκληρωμένης ανάπτυξής τους. Στην εποχή μας, εφαρμόζονται πολλές τεχνικές και τρόποι για την εξασφάλιση ενός απόλυτα υγιούς περιβάλλοντος για την ανάπτυξη των φυτών σε κλειστούς χώρους. Ο τεχνητός φωτισμός είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για τη σωστή ανάπτυξη μιας καλλιέργειας σε εσωτερικό χώρο. Η χρήση συμπληρωματικού τεχνητού φωτισμού έχει ως στόχο κυρίως την αύξηση της φωτοσύνθεσης και θα πρέπει να γίνεται με τους κατάλληλους τύπους λαμπτήρων. Οι πιο σύγχρονοι λαμπτήρες τεχνητού φωτισμού είναι οι δύοδοι εκπομπής φωτός (LED) και η σημασία της εφαρμογής τους στη φυτική παραγωγή είναι μεγάλη, αφού παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα και η τεχνολογία τους εξελίσσεται διαρκώς.

2.1 Τα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή ενέργεια που φτάνει στη Γη περιλαμβάνει τόσο την άμεση όσο και τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί μέρος του φάσματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και περιλαμβάνει μήκη κύματος μεταξύ 280-50.000nm (Σχήμα 1). Υπενθυμίζεται ότι, καθώς αυξάνει το μήκος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, μειώνεται η ποσότητα ενέργειας που περιέχει.

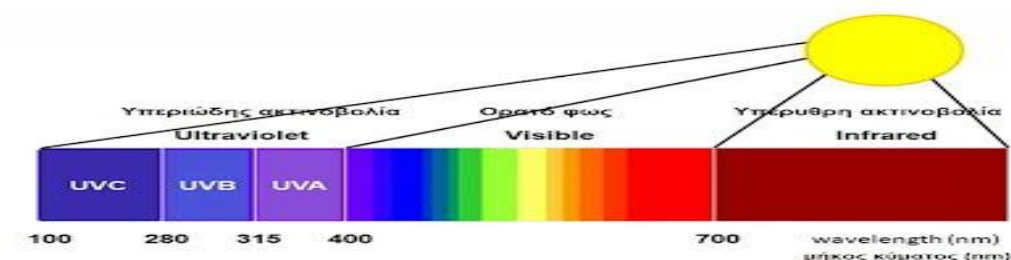
Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη Γη και έχει μήκος μικρότερο από αυτό που διακρίνει το ανθρώπινο μάτι (280-380nm) καλείται υπεριώδης ακτινοβολία. Η υπεριώδης ακτινοβολία εκτείνεται και σε μήκη κύματος κάτω από 280nm, η οποία όμως δε φτάνει στην επιφάνεια της Γης, δεδομένου ότι απορροφάται από τα συστατικά των

ανώτερων στρωμάτων της ατμόσφαιρας και ιδιαίτερα από το όζον (O₃). Η υπεριώδης ακτινοβολία είναι βλαβερή, τόσο για τους ζωικούς οργανισμούς όσο και για τα φυτά.

Τα μήκη κύματος μεταξύ 380 και 780nm γίνονται αντιληπτά από το ανθρώπινο μάτι ως φως, γι' αυτό η συγκεκριμένη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος καλείται ορατό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, το τμήμα του ορατού φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας με το χαμηλότερο μήκος κύματος είναι το ιώδες (περίπου 380-440nm) και ακολουθούν το γαλάζιο (περίπου 440-480nm), το γαλαζοπράσινο (περίπου 480-510nm), το πράσινο (περίπου 510-540nm), το πρασινοκίτρινο (περίπου 540-575nm), το κίτρινο (περίπου 575-600nm), το πορτοκαλί (περίπου 600-630nm) και το κόκκινο/ερυθρό (περίπου 630-700nm).

Το τμήμα του φάσματος με μήκη κύματος μεταξύ 700-780nm, το οποίο βρίσκεται αμέσως μετά το ερυθρό φως, καλείται μακρινό ερυθρό (FR-far red).

Τα αμέσως μεγαλύτερα μήκη κύματος από αυτά που συλλαμβάνει το ανθρώπινο μάτι (780-2.500nm) είναι γνωστά ως υπέρυθρη ακτινοβολία (Σάββας, 2016)



Σχήμα 1: Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που εκτείνεται από την υπεριώδη ακτινοβολία έως την υπέρυθρη (Πηγή: altereclass/eliako-phasma)

2.2 Οι πτυχές της φωτοβιολογίας

Φωτοβιολογία είναι ο κλάδος της Βιολογίας, ο οποίος αναλύει την επίδραση του φωτός στη βιωσιμότητα των οργανισμών. Όσον αφορά τα φυτά, ο τρόπος με τον οποίο αντλούν το φως βασίζεται στους νόμους της φωτοχημείας. Κύριος νόμος της φωτοχημείας αναφέρει πως το φως διαδίδεται με κύματα και με την ύλη αλληλεπιδρά ως σωματίδιο. Όταν ένα κβάντα φωτός δεσμεύεται από έναν φωτοϋποδοχέα ή φωτοδέκτη, τότε στα φυτά συμβαίνουν φωτοβιολογικές μεταβολές. (McCree K.J., 1972)

Οι φυσιολογικές λειτουργίες που συμβαίνουν στο φυτό και σχετίζονται με τη δέσμευση του φωτός είναι η φωτοσύνθεση και η φωτομορφογένεση.

Η φωτοσύνθεση των φυτών είναι ένα από τα μεγαλύτερα κεφάλαια της φωτοβιολογίας. Τα φύλλα των φυτών, μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης, μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε χημική ενέργεια. Η ενέργεια που παρέχεται από το φως χρησιμοποιείται κατά την αναγωγή του CO₂, το οποίο διαχέεται στα φύλλα μέσω των στομάτων με αποτέλεσμα τη σύνθεση υδατανθράκων. Κατά την ίδια διαδικασία διασπάται το H₂O (φωτόλυση) και ελευθερώνεται οξυγόνο στην ατμόσφαιρα. Στη

συνέχεια, οι αφομοιωμένοι υδατάνθρακες χρησιμοποιούνται για τη δόμηση πολλών βιομορίων. (Μπαντής, 2015)

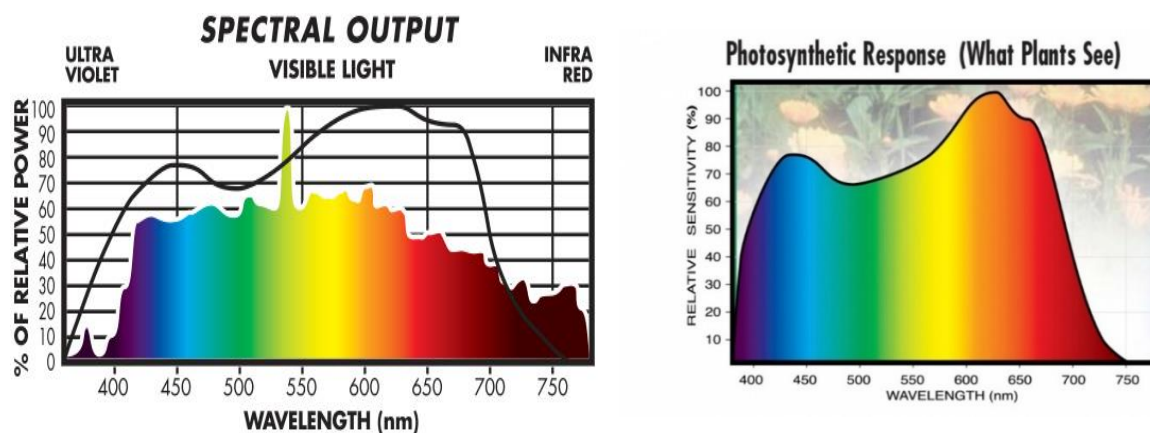
Πλήθος βιοτικών και αβιοτικών παραγόντων επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα κατά την οποία η φωτοσύνθεση αξιοποιεί το CO₂. Ορισμένοι από αυτούς είναι η ένταση και η ποιότητα της εκπεμπόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμοκρασία, η ατμοσφαιρική πίεση και σύσταση, καθώς και οι περιβαλλοντικοί ρύποι. Εκτός όμως από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, σημαντικό ρόλο στη φωτοσύνθεση παίζουν και διάφοροι άλλοι παράγοντες, όπως για παράδειγμα η διαθεσιμότητα νερού και θρεπτικών συστατικών, όπως είναι τα σάκχαρα. (Rolland et al., 2002)

Ο ρυθμός φωτοσύνθεσης επηρεάζει τον κύκλο ζωής των φυτών. Ως διαδικασία απεικονίζεται απλή, αλλά πρακτικά είναι μια περίπλοκη φωτοχημική διαδικασία με ένα μεγάλο εύρος αντιδράσεων. (McCree K.J., 1972)

Ο όρος φωτομορφογένεση χρησιμοποιείται για κάποιες σημαντικές βιολογικές λειτουργίες των φυτών, εκτός της φωτοσύνθεσης και σχετίζεται με την ανάπτυξη των μορφολογικών χαρακτηριστικών του φυτού (π.χ. επίδραση στο φύτρωμα των σπόρων, φωτοτροπισμός, αύξηση του φυλλώματος, έλεγχος άνθισης κ.α.). Εξαρτάται περισσότερο από τη φασματική κατανομή και ποιότητα του προσφερόμενου φωτός και λιγότερο από την ένταση του φωτός. (Pinho et al., 2005)

2.3 Το φωτομετρικό σύστημα

Η αποτελεσματικότητα με την οποία αντλούν τα φυτά φωτόνια από διαφορετικά μήκη κύματος και συμμετέχουν στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, μας δίνεται από την καμπύλη σχετικής κβαντικής απόδοσης. Στην ουσία, το σύστημα μέτρησης του φωτός για τα φυτά βασίζεται στην καμπύλη σχετικής κβαντικής απόδοσης έναντι του μήκους κύματος και ονομάζεται φωτοσυνθετική καμπύλη απόκρισης των φυτών (Σχήμα 2). (McCree K.J., 1972)



Σχήμα 2: Η φωτοσυνθετική καμπύλη απόκρισης των φυτών (Πηγή: Par Watts, Lumens, Photons and Watts-Horticulture Growshop) www.horticulture.com

Τα παραπάνω διαγράμματα δείχνουν την καμπύλη απόκρισης του ανθρώπινου ματιού και την καμπύλη απόκρισης των φυτών. Τα φυτά διαφέρουν από τους ανθρώπους στη φασματική απόκριση του φωτός. Αυτή η διαφορά εξηγεί γιατί οι πηγές φωτός οι οποίες αποδίδουν καλά στην όραση του ανθρώπου, δεν αποδίδουν εξίσου καλά και στην παραγωγή και ανάπτυξη των φυτών. Το ανθρώπινο μάτι έχει μια ευαισθησία στην κίτρινη-πράσινη περιοχή, περίπου στα 550nm. Τα φυτά ανταποκρίνονται πιο αποτελεσματικά στο κόκκινο και στο μπλε φως. Η κορυφή απόκρισης για τα φυτά είναι στην περιοχή του κόκκινου, περίπου στα 630nm. (Pinho et al., 2005)

Βάση αυτής της καμπύλης, η μέση φωτοσυνθετική κβαντική απόδοση των φυτών κυμαίνεται περίπου μεταξύ των 300-800nm. (Sager et al., 1982) Το εύρος αυτό μεταβάλλεται ανάλογα με το είδος των φυτών και τα μήκη κύματος παίζουν μεγάλο ρόλο στην ανάπτυξη των φυτών. Έρευνα που έγινε, έδειξε πως τα μήκη κύματος μεταξύ των 320-780nm συνέβαλαν θετικά στην ανάπτυξη των φυτών. (Costa et al., 2004)

Πιο συγκεκριμένα, από το ορατό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας (380-780nm), χρήσιμο για τη φωτοσύνθεση των φυτών είναι το τμήμα μεταξύ 400-700nm, το οποίο ονομάζεται φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (photosynthetic active radiation-PAR). Το τμήμα αυτό του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος αντιστοιχεί στο 45% περίπου της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης. (Costa et al., 2004)

Όσον αφορά την ποσότητα του φωτός που απαιτείται για την υγιή ανάπτυξη των φυτών μπορεί επίσης να μετρηθεί.

Υπάρχουν δυο βασικές προσεγγίσεις για την αξιολόγηση και τη μέτρηση του φωτός που είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη των φυτών. Αυτές είναι η μέτρηση της ενέργειας και η καταμέτρηση φωτονίων.

Αρχικά, το Watt είναι ένα αντικειμενικό μέτρο της ενέργειας που χρησιμοποιείται ή εκπέμπεται από μια λάμπα ανά δευτερόλεπτο. Η ενέργεια αυτή μετριέται σε Joule και 1 Joule ανά δευτερόλεπτο ονομάζεται Watt. Δεδομένου ότι τα φυτά χρησιμοποιούν την ενέργεια μεταξύ 400-700nm και το φως στην περιοχή αυτή ονομάζεται φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία ή PAR, θα μπορούσαμε να μετρήσουμε τη συνολική ποσότητα ενέργειας που εκπέμπεται σε αυτή την περιοχή και να την ονομάσουμε PAR Watts. Αυτό είναι ένα αντικειμενικό μέτρο, που δείχνει πόση ενέργεια του φωτός είναι διαθέσιμη για να τη χρησιμοποιήσουν τα φυτά για τη φωτοσύνθεσή τους. (Pinho et al., 2005)

Όμως, η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μονάδα μέτρησης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, δηλαδή της ποσότητας ενέργειας που φτάνει στη Γη μέσω του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου, είναι το $W \cdot m^{-2}$ ($J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$).

Στην πράξη, αντί για τις παραπάνω μονάδες ενέργειας, ορισμένες φορές χρησιμοποιούνται φωτομετρικές μονάδες. Οι μονάδες αυτές, όμως, μετρούν μόνο την ένταση του ορατού φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας, επομένως η εικόνα που δίνουν είναι ελλιπής.

Βάση αυτού, η βαθμολόγηση του συνολικού ποσού του φωτός που εκπέμπεται από μια πηγή μετριέται σε lumens. Το φως που εκπέμπεται από την πηγή, στη συνέχεια κατανέμεται πάνω στην επιφάνεια της περιοχής που φωτίζει και μετριέται με τις φωτομετρικές μονάδες "Lux" ή "Foot-candle" (Ft-c). Το 1 Lux ορίζεται ως $1 \text{ lumen} \cdot \text{m}^{-2}$ και ισούται με το ομοιόμορφο φως που πέφτει σε μια επιφάνεια ίση με 1 m^2 από μια φωτεινή πηγή ενός «διεθνούς κηρίου» (1 lumen) η οποία απέχει 1 m από τη φωτιζόμενη επιφάνεια. Το Ft-c είναι μονάδα ($\text{lumen} \cdot \text{ft}^{-2}$) αντίστοιχη με το Lux. Το 1 Ft-c ισούται με το ομοιόμορφο φως που πέφτει σε μια επιφάνεια ίση με 1 τετραγωνικό πόδι ($0,33\text{m} \times 0,33\text{m}$) από μια φωτεινή πηγή ενός «διεθνούς κηρίου» (1 lumen) η οποία απέχει 1 πόδι ($0,33\text{m}$) από τη φωτιζόμενη επιφάνεια. Οι φωτομετρικές τιμές σε Lux μετατρέπονται εύκολα σε Ft-c και αντίστροφα, μέσω των σχέσεων:

$$1 \text{ Ft-c} = 10,76 \text{ Lux}, \quad 1 \text{ Lux} = 0,093 \text{ Ft-c}$$

Γενικά, η μετατροπή φωτομετρικών μονάδων (Lux) σε μονάδες έντασης της ολικής ακτινοβολίας (συμπεριλαμβανομένης της μη ορατής), δηλαδή σε μονάδες ρυθμού πρόσπτωσης της ηλιακής ενέργειας οι οποίες έχουν διαστάσεις ισχύος ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), εξαρτάται από τα μήκη κύματος που συνιστούν την ακτινοβολία. Συνεπώς, δεν υπάρχει μια γενικής εφαρμογής σχέση μετατροπής των Lux σε $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ για κάθε είδους φωτεινή ακτινοβολία. Ειδικά όμως για την ηλιακή ακτινοβολία, η μετατροπή μπορεί να γίνει κατά προσέγγιση μέσω των εμπειρικών σχέσεων:

$$1 \text{ Lux} = 0,0039 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad \text{ή} \quad 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} = 258 \text{ Lux}$$

Ένας άλλος τρόπος μέτρησης της έντασης της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας που φτάνει σε μια επιφάνεια είναι η έκφρασή της σε ποσότητα φωτοσυνθετικά ενεργών φωτονίων (quanta) ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας. Ο αριθμός των φωτοσυνθετικά ενεργών φωτονίων που φτάνουν σε μια επιφάνεια καλείται ροή φωτοσυνθετικών φωτονίων (photosynthetic photon flux-PPF).

Ένα άλλο μέτρο απόδοσης σε νούμερα της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας PAR, ονομάζεται YPF και λαμβάνει υπόψη όχι μόνο τον αριθμό των φωτοσυνθετικά ενεργών φωτονίων, αλλά και το πόσο αποτελεσματικά χρησιμοποιούνται από τα φυτά. Αξίζει να αναφερθεί ότι, τα φωτόνια που χρησιμοποιούνται πιο αποτελεσματικά στην αντίδραση της φωτοσύνθεσης προέρχονται από το κόκκινο φάσμα.

Δεδομένου ότι τα φωτόνια είναι πολύ μικρά "πακέτα" ενέργειας, οι επιστήμονες αντί να αναφέρονται σε 1.000.000.000.000.000.000 φωτόνια, χρησιμοποιούν συμβατικά τον αριθμό "1,7 μικρογραμμομόρια φωτόνια" που ορίζεται από το σύμβολο "μmol". Ένα μmol συμβολίζει $6,022 \times 10^{17}$ φωτόνια. Ένα mol συμβολίζει $6,022 \times 10^{23}$ φωτόνια. Έτσι η «PPF» και η «YPF» υπολογίζονται από τη σχέση μmol φωτονίων ανά τετραγωνικό μέτρο ανά δευτερόλεπτο ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).

Επειδή η ενέργεια που περιέχει ένα φωτόνιο εξαρτάται από το μήκος κύματος, για τη μετατροπή της παραπάνω μονάδας σε Lux ή $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ πρέπει να ληφθεί υπόψη η σύνθεση του φάσματος της συγκεκριμένης ακτινοβολίας. Ειδικά για την ηλιακή ακτινοβολία, ισχύουν οι εμπειρικές σχέσεις:

$$1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \text{ PAR} = 4,6 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} \text{ ή } 1 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} = 0,217 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \text{ PAR}$$

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η PAR αντιστοιχεί στο 45% περίπου της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Συνεπώς, η σχέση που συνδέει την ολική ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας με τη ροή φωτοσυνθετικών φωτονίων είναι κατά προσέγγιση:

$$1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} = 2 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} \text{ (Σάββας, 2016)}$$

3. Η σημασία εφαρμογής τεχνητού φωτισμού στις καλλιέργειες

Σε γενικές γραμμές, ο τεχνητός φωτισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη των φυτών με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Καταρχάς παρέχοντας εξ' ολοκλήρου το φως που χρειάζεται ένα φυτό για την ανάπτυξή του. Δεύτερον ως συμπληρωματικό φως με τον ήλιο, ειδικά κατά τους χειμερινούς μήνες, όπου το φως του ήλιου είναι μειωμένο και τρίτον για την αύξηση της διάρκειας της «ημέρας», προκειμένου να προκληθεί ανάπτυξη συγκεκριμένων χαρακτηριστικών και ανθοφορία. Ο αντίκτυπος των συστημάτων ηλεκτρικού φωτισμού στα φυτά είναι μεγάλος όσον αφορά τη φυσιολογία και την ανάπτυξη των φυτών. (Jones, 2018)

Ανάλογα με το είδος του φυτού και τη μεταχείριση φωτός που χρησιμοποιείται κατά περίπτωση, διαφοροποιούνται και τα αποτελέσματα στην ανάπτυξη των φυτών. Η επίδραση του ηλεκτρικού φωτισμού στη φωτοβιολογία των φυτών είναι σημαντική και προϋποθέτει να κατανοεί ο χρήστης πώς επιδρά το φως στα φυτά και με ποιον τρόπο τα βοηθάει στην ανάπτυξή τους. Εφόσον αντιληφθεί αυτήν τη συνύπαρξη φωτός και φυτών, θα μπορέσει να υπάρξει πρόοδος στην παραγωγική διαδικασία. Η παραγωγική διαδικασία με τη βοήθεια του φωτισμού θα πρέπει να γίνεται σε ελεγχόμενο περιβάλλον, σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή επιθυμεί ο χρήστης. (Wu et al, 2020)

3.1 Παραδοσιακοί τύποι λαμπτήρων που χρησιμοποιούνται στις καλλιέργειες φυτών

Στη φυτική παραγωγή χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι λαμπτήρων με σκοπό την αύξηση της φωτοπεριόδου, αλλά και της έντασης του φωτός. Παραδοσιακά, φωτισμός στα θερμοκήπια πραγματοποιείται με λαμπτήρες πυρακτώσεως (IL), υψηλής πίεσης νατρίου (HPS), μεταλλικών αλογονιδίων (MHL) ή φθορισμού (FL). Αρχικά αυτοί οι

τύποι λαμπτήρων είχαν παρασκευαστεί για άλλες χρήσεις κι όχι για την παραγωγή φυτών. Η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR) και η ποιότητα του φωτός ποικίλουν μεταξύ αυτών των λαμπτήρων, προκαλώντας αλλαγές στη φωτοσυνθετική απόδοση, τη φωτομορφογένεση, την ενεργειακή απόδοση και το θερμικό φορτίο που παρέχουν στις καλλιέργειες. (Μπαντής, 2015)

3.1.1 Λαμπτήρες Πυρακτώσεως (IL)

Οι λαμπτήρες αυτοί βασίζονται στην αρχή λειτουργίας της πυρακτώσεως. Δηλαδή στο φαινόμενο, κατά το οποίο, όταν ένα στερεό θερμαίνεται ξεκινάει και εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο ορατό εύρος φωτός.

Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως είναι ο τύπος λαμπτήρα με τη μικρότερη ενεργειακή απόδοση. Έχουν χαμηλή ένταση, εκπέμπουν μεγάλη ποσότητα θερμότητας και έχουν μικρή διάρκεια ζωής (1000-2000h). Ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας εκπέμπεται στην περιοχή του υπέρυθρου χρώματος. Επειδή όμως η χλωροφύλλη δεν απορροφά υπέρυθρη ακτινοβολία, μόνο το 6-7% της ενέργειας που καταναλώνουν αποδίδεται ως φωτοσυνθετικά ενεργή μορφή φωτός. (Kitsinelis, 2011)

Οι πρώτες προσπάθειες εισαγωγής των λαμπτήρων πυρακτώσεως στις καλλιέργειες των φυτών έγιναν για να ελεγχθεί η δυνατότητά τους να χρησιμοποιηθούν σε καλλιέργειες εσωτερικού χώρου, κατά τη διάρκεια που οι θερμοκρασίες του εξωτερικού περιβάλλοντος βρίσκονται σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα. Τα αποτελέσματα αυτών των εφαρμογών έδειξαν πως οι λαμπτήρες πυρακτώσεως παράγουν εκπομπές ευρέος φάσματος φωτός και παρέχουν θερμότητα στα φυτά, αλλά η θερμότητα αυτή δεν αρκεί για να ενισχύσει την ανάπτυξη των φυτών σε μεγάλο βαθμό. Η θερμότητα που παράγεται απλά συμβάλλει στη διατήρηση της θερμοκρασίας (δημιουργεί ζεστασιά). Έτσι κρίθηκε πως οι εφαρμογές αυτές δεν ήταν οικονομικά συμφέρουσες για την καλλιέργεια των φυτών, μιας και παρείχαν χαμηλές φωτεινές αποδόσεις με υψηλό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. Λόγω της μικρής απόδοσής τους, αυτοί οι λαμπτήρες σταδιακά καταργούνται από την παραγωγή σε πολλές χώρες, ακόμα και για γενική χρήση. Παρόλα αυτά, οι λαμπτήρες πυρακτώσεως χρησιμοποιούνται συχνά στα θερμοκήπια για μικρής έντασης φωτοπεριοδικό φωτισμό. (Gupta, Agarwal, 2017)

3.1.2 Λαμπτήρες εκκένωσης αερίου (GDL)

Στις μέρες μας, στις καλλιέργειες των φυτών σε εσωτερικούς χώρους, οι λαμπτήρες πυρακτώσεως (IL) σταδιακά αντικαθίστανται από τους λαμπτήρες εκκένωσης αερίου (GDL), οι οποίοι είναι ενεργειακά αποδοτικότεροι και με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Αυτοί διακρίνονται σε λαμπτήρες εκκένωσης αερίου υψηλής πίεσης και λαμπτήρες εκκένωσης αερίου χαμηλής πίεσης. (Gupta, Agarwal, 2017)

3.1.2.1 Λαμπτήρες εκκένωσης αερίου υψηλής πίεσης (HIDL)

Οι λαμπτήρες εκκένωσης υψηλής πίεσης, γνωστοί και ως HIDL, βασίζονται στην αρχή της ηλεκτρικής εκκένωσης μέσω ενός αερίου, ατμού μετάλλων ή μίγματος αερίων και ατμών και λειτουργούν σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα θερμοκρασίας και πίεσης. Έτσι εξασφαλίζεται σημαντική βελτίωση στη φασματική απόδοση, καθώς και στη φωτεινή αποτελεσματικότητά τους.

Από τους λαμπτήρες που είναι διαθέσιμοι για φωτισμό των φυτών οι λαμπτήρες εκκένωσης υψηλής πίεσης είναι οι περισσότερο αποδοτικοί ενεργειακά, με απόδοση μέχρι 31%. Παρόλο που οι λαμπτήρες εκκένωσης εκπέμπουν μεγάλη ένταση PAR, παράλληλα εκλύουν και μεγάλες ποσότητες θερμότητας. Συνεπώς, μπορούν να αυξήσουν τη θερμοκρασία των φυτών ή να προκαλέσουν βλάβες σε αυτά εάν τοποθετηθούν πολύ κοντά τους. (Simpson, 2003)

Οι λαμπτήρες HIDL μπορούν να χωριστούν σε τρία είδη, βάση του «αερίου πλήρωσης» ή του ατμού που χρησιμοποιείται. Αυτά τα τρία είδη είναι οι λαμπτήρες εκκένωσης υδραργύρου, οι λαμπτήρες εκκένωσης νατρίου και οι λαμπτήρες εκκένωσης μεταλλικών αλογονιδίων. Θα πρέπει να τονιστεί πως ο υδράργυρος εμπεριέχεται σε όλους τους λαμπτήρες υψηλής έντασης, σε συνδυασμό με άλλα αέρια πλήρωσης ή με άλλους ατμούς.

3.1.2.1.1 Λαμπτήρες εκκένωσης υδραργύρου υψηλής πίεσης (high pressure mercury light - HPML)

Όπως συμβαίνει και στους λαμπτήρες φθορισμού, οι λαμπτήρες εκκένωσης υδραργύρου υψηλής έντασης (HPML) εμπεριέχουν ένα μίγμα ατμών που αποτελείται από τα χημικά στοιχεία του υδραργύρου και του αργού, με τη διαφορά ότι η πίεση που δημιουργείται στο μίγμα είναι σχεδόν 200.000 φορές μεγαλύτερη από όσο σε μία λάμπα φθορισμού. Το φως παράγεται από ηλεκτρική εκκένωση μέσα σε αυτούς τους ατμούς.

Έχουν μεγάλη φωτιστική απόδοση, αλλά το φως που δίνουν παραμορφώνει έντονα τα χρώματα, αφού λείπει το κόκκινο χρώμα από το φάσμα της ακτινοβολίας τους. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται κυρίως για τον φωτισμό δρόμων, εργοστασίων, αποθηκών, υπαίθριων βιομηχανικών εγκαταστάσεων κλπ. (Kitsinelis, 2011)

3.1.2.1.2 Λαμπτήρες εκκένωσης νατρίου υψηλής πίεσης (high pressure sodium-HPS)

Οι λαμπτήρες εκκένωσης νατρίου υψηλής πίεσης έχουν μεγαλύτερη απόδοση (περίπου διπλάσια) και καλύπτουν μεγαλύτερο εύρος του ορατού φάσματος φωτός από τους λαμπτήρες ατμών υδραργύρου. Αυτό συμβαίνει γιατί χρησιμοποιούν ατμούς νατρίου μαζί με υδράργυρο στον σωλήνα. Επίσης ο σωλήνας συμπιέζεται με ξένο αντί για αργό. Γι' αυτό και τους αντικαθιστούμε όταν θέλουμε υψηλότερες αποδόσεις. (Kitsinelis, 2011)

Στις αρχές του 2000, ένας λαμπτήρας HPS 400W, είχε τη δυνατότητα να παράγει περίπου 120 Watt ακτινοβολίας PAR, γι' αυτό και στα πρώτα χρόνια της δεκαετίας αυτής,

ο ιδανικότερος φωτισμός για την καλλιέργεια φυτών ήταν οι λαμπτήρες HPS. (Krames et al., 2002)

Στις μέρες μας, στη βιομηχανία κηπευτικών προϊόντων, σε διάφορα είδη καλλιιεργειών, οι πηγές τεχνητού φωτισμού με τη μεγαλύτερη προτίμηση είναι οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης (HPS), γιατί η ηλεκτρική τους απόδοση προσεγγίζει περίπου το 30%. (Tibbitts et al., 1983)

Μπορεί να έχουν έναν αξιόλογο μηχανισμό εκπομπής φωτός και να αντέχουν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, όμως η φασματική τους απόδοση δεν είναι και η καλύτερη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται η ικανότητα των χλωροφυλλών a,b, του b-καροτένιου και των φυτοχρωμάτων να απορροφούν φως και τελικά να μειώνεται ο ρυθμός της φωτοσύνθεσης. (Wheeler et al., 1991)

Επίσης, σε εγκαταστάσεις θερμοκηπίου μεγάλης έκτασης, είναι δύσκολο να τοποθετηθούν πολλά φωτιστικά από το συγκεκριμένο είδος. Απαιτείται λογισμικό, με το οποίο ο χρήστης θα πρέπει να σχεδιάσει και να οργανώσει την τοποθέτηση, την εφαρμογή και τη σωστή λειτουργία των φωτιστικών, για τη μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας της καλλιέργειας. (Ciolkosz et al., 2001)

Σε σύγκριση, όμως, με τα υπόλοιπα είδη τεχνητού φωτισμού, τα φωτιστικά HPS είναι πιο αποδοτικές ενεργειακές πηγές φωτός για την ανάπτυξη των φυτών. (McCree K.J., 1972a)

3.1.2.1.3 Λαμπτήρες εκκένωσης μεταλλικών αλογονιδίων υψηλής πίεσης (MHL)

Είναι μια εξελιγμένη έκδοση των λαμπτήρων εκκένωσης ατμών υδραργύρου υψηλής πίεσης. Ο συνδυασμός των μεταλλικών αλογονιδίων μαζί με τους ατμούς υδραργύρου και το αδρανές αέριο, επιτρέπει στα MHL την παραγωγή μιας μεγάλης φασματικής ποικιλίας. Έχουν ελαφρώς ευρύτερο φάσμα εκπομπής από τους HPS. Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται είναι το νάτριο, το σκάνδιο, το ίνδιο, το θάλλιο και το δυσπρόσιο. Γενικά, επιλέγονται ενώσεις μετάλλων, όπως τα ιωδίδια και τα βρωμίδια, γιατί είναι πιο εύκολα να εξατμιστούν και να ιονιστούν σε σχέση με πιο καθαρά είδη μετάλλων.

Οι λαμπτήρες εκκένωσης μεταλλικών αλογονιδίων υψηλής πίεσης (MHL) είναι το τρίτο και κυριότερο είδος, ως προς την ανάπτυξη των φυτών. Είναι κατάλληλοι για εφαρμογή στην ανάπτυξη των φυτών, γιατί εκπέμπουν υψηλά επίπεδα ενεργής ακτινοβολίας (PAR). Πρακτικά εκπέμπουν με σχετικά υψηλό ποσοστό μπλε ακτινοβολίας με ενεργειακή απόδοση περίπου στο 25%. (Simpson, 2003)

3.1.2.2 Λαμπτήρες εκκένωσης αερίου χαμηλής πίεσης

Στην εσωτερική κοιλότητα τέτοιων συσκευών υπάρχει αέριο υπό πίεση, η οποία είναι χαμηλότερη από την εξωτερική πίεση. Πηγές χαμηλής πίεσης φωτός είναι οι λαμπτήρες εκκένωσης νατρίου χαμηλής πίεσης και οι λαμπτήρες φθορισμού. (Kitsinelis, 2011)

3.1.2.2.1 Λαμπτήρες εκκένωσης νατρίου χαμηλής πίεσης

Οι λαμπτήρες ατμών νατρίου χαμηλής πίεσης έχουν τη μεγαλύτερη απόδοση από όλα τα είδη λαμπτήρων εκκένωσης αερίου. Δίνουν περίπου τριπλάσια απόδοση από τους λαμπτήρες ατμών υδραργύρου. Επειδή, όμως, εκπέμπουν μονοχρωματικό κίτρινο φως χρησιμοποιούνται μόνο για τον φωτισμό αυτοκινητόδρομων, διασταυρώσεων ή σε μέρη όπου δεν ενδιαφέρει η σωστή απόδοση των χρωμάτων. (Kitsinelis, 2011)

3.1.2.2.2 Λαμπτήρες φθορισμού (FL-fluorescent)

Οι λαμπτήρες φθορισμού είναι διαδεδομένα ως φωτιστικά εκκένωσης αερίου, γιατί εκπέμπουν φως μέσω του ιονισμού ατμών υδραργύρου, σε χαμηλή πίεση. Εκπέμπουν ορατό φως μέσω του φθορισμού, σε μήκος κύματος 253,7nm. Η ενεργειακή τους απόδοση είναι κοντά στο 25% και έχουν μέση διάρκεια ζωής 9.000 ώρες. (Karlicek et al., 2017)

Ανάλογα με το είδος του λαμπτήρα φθορισμού και με τον κατασκευαστή διατίθεται ιδιαίτερα μεγάλη ποικιλία φασματικών συνθέσεων. Οι διαφορετικές φασματικές συνθέσεις εξαρτώνται κυρίως από τις διαφορετικές επιστρώσεις φωσφόρου. Παρόλα αυτά οι λαμπτήρες φθορισμού παρουσιάζονται κυρίως ως λαμπτήρες λευκών αποχρώσεων. Οι ψυχροί-λευκοί λαμπτήρες φθορισμού εκπέμπουν 35% κόκκινο φως, ενώ οι θερμοί-λευκοί λαμπτήρες φθορισμού εκπέμπουν 44% κόκκινο φως. Οι θερμοί-λευκοί λαμπτήρες φθορισμού εκπέμπουν μεν περισσότερο κόκκινο φως, αλλά λιγότερο μπλε και πράσινο.

Οι λαμπτήρες φθορισμού εκπέμπουν περισσότερη ακτινοβολία στην μπλε (B) και πράσινη (G) περιοχή του φάσματος (21% και 52% της PAR αντιστοίχως) και πολύ λιγότερη στην υπέρυθρη σε σχέση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως. Με την κατανάλωση της ίδιας ηλεκτρικής ενέργειας, οι λαμπτήρες φθορισμού εκπέμπουν τέσσερις φορές περισσότερη PAR συγκριτικά με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως. (Stutte G.W., 2009)

Όσον αφορά τις καλλιέργειες, οι λαμπτήρες φθορισμού αποτελούν τον ιδανικό συμπληρωματικό φωτισμό για την ανάπτυξη των φυτών, γιατί μπορούν να παρέχουν την ιδανική ένταση φωτός και να αυξάνουν τον ρυθμό της φωτοσύνθεσης σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα. Γενικά, είναι πολύ κοινό είδος φωτισμού, σε ελεγχόμενο περιβάλλον καλλιέργειας όπως είναι τα θερμοκήπια. (Wu et al., 2020)

Οι λαμπτήρες φθορισμού λευκού χρώματος χρησιμοποιούνται κυρίως στους θαλάμους ανάπτυξης, για τη βλάστηση των σπόρων και την αναπαραγωγή μικρών δένδρων. Είναι οι πιο διαδεδομένοι και αποδοτικοί λαμπτήρες φθορισμού, διότι αποδίδουν την κατάλληλη ένταση φωτός για τα φυτά και αυξάνουν τη θερμοκρασία του θερμοκηπίου. (Nelson, Bugbee, 2014)

3.2 Η περίπτωση των διόδων εκπομπής φωτός (LED)

Οι επιστήμονες, κατά την αναζήτηση φωτεινών πηγών με μεγαλύτερη ενεργειακή και φωτοσυνθετική απόδοση στράφηκαν στην πολλά υποσχόμενη τεχνολογία των λαμπτήρων LED (βραβείο Nobel φυσικής 2014 στους Ισάμου Ακασάκι, Χιρόσι Αμάνο και Σούτζι Νακαμούρα). Η τεχνολογία αυτή έκανε την εμφάνισή της στις αρχές του 1990, και τότε πρωτοπαρουσιάστηκαν και οι δυνατότητες της ως φωτοσυνθετική πηγή ακτινοβολίας για τα φυτά. Μέχρι το 1999, η πρόοδος στην τεχνολογία των LED αύξησε σημαντικά την ένταση του φωτός των λαμπτήρων, οδηγώντας στην παραγωγή λαμπτήρων μεγάλης ισχύος που ήταν ικανοί για παραγωγή αρκετών φωτονίων, επιτρέποντας τη χρήση τους για φωτοσύνθεση. Την τελευταία δεκαετία, έχει αυξηθεί η ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας καθώς και η απόδοση των LED και πλέον αποτελούν πιθανούς αντικαταστάτες των συμβατικών πηγών φωτισμού στη φυτική παραγωγή. (Nhut et al., 2003)

Αυτή η καινοτόμα τεχνολογία βρίσκεται σε συνεχή εξέλιξη και στην εποχή μας αναδεικνύεται το εύρος της εφαρμογής των LED στα διάφορα είδη καλλιεργειών, αφού συμβάλλει σημαντικά στην ανάπτυξη των φυτών και στη βελτίωση των μορφολογικών και φυτοχημικών χαρακτηριστικών τους. (Wu et al., 2020) Εκτός από τις καλλιέργειες έχει δοκιμαστεί και σε διάφορα άλλα είδη περιβάλλοντος, όπως σε αποστολές στο διάστημα. (Pinho et al., 2004)

Τα φωτιστικά LED, παρουσιάζουν μια μεγάλη ποικιλία μηκών κύματος και αποδίδουν αξιόλογη φασματική ποιότητα φωτός, οπότε επιδρούν ιδιαίτερα στη φωτοσύνθεση και στη φωτομορφογένεση των φυτών. Μέσα από τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους γίνεται αντιληπτή η επίδραση που έχουν στις διάφορες καλλιέργειες φυτών. (Kim et al., 2005)

Στα πλεονεκτήματα αυτών φωτιστικών πηγών συμπεριλαμβάνονται η δυναμική μετατροπής της ενέργειας, η μεγάλη διάρκεια ζωής, η χαμηλότερη εκπομπή θερμότητας και το ελεγχόμενο φάσμα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Αυτά τα χαρακτηριστικά σίγουρα καθορίζουν την επέκταση της χρήσης των LED και μελλοντικά. Με την πάροδο του χρόνου, όμως, θα πρέπει να μειώνεται το κόστος κατασκευής και λειτουργίας των φωτοδίοδων, ώστε να μπορούν να ανταγωνίζονται τα συμβατικά είδη φωτισμού με τον αποτελεσματικότερο δυνατό τρόπο, καθώς τα τελευταία είναι χαμηλότερου κόστους. (Pinho et al., 2005)

Ο ερχομός της τεχνολογίας των LED στην καλλιέργεια των φυτών λειτούργησε λες και ανακαλύφθηκε ξανά το φαινόμενο της φωτοσύνθεσης. Ιδιαίτερα στον κλάδο της Γεωπονίας, που ασχολείται με την παραγωγή κηπευτικών προϊόντων, η τεχνολογία αυτή φέρει ευεργετικά αποτελέσματα, όπως την ανταπόκριση των φυτών στο «στρες». (Pinho et al., 2004) Οι δίοδοι εκπομπής φωτός LED, χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή κηπευτικών προϊόντων, γιατί υπερτερούν λόγω των ηλεκτρονικών και οπτικών χαρακτηριστικών τους. Στις κηπευτικές καλλιέργειες, η χρήση των διόδων εκπομπής φωτός LED, είναι μια τεχνολογία πολλά υποσχόμενη. (Pinho et al., 2005) Επίσης, στα

καλλωπιστικά φυτά εμφανίζονται ιδιαίτερα αποτελέσματα στα μορφολογικά χαρακτηριστικά και στους συντελεστές ανάπτυξης των φυτών. (Bian et al., 2017)

Στον **Πίνακα 1** γίνεται συνοπτική περιγραφή των κυριότερων χαρακτηριστικών των λαμπτήρων πυρακτώσεως, φθορισμού (FL), μεταλλικών αλογονιδίων (MHL), υψηλής πίεσης νατρίου (HPS) και διόδων εκπομπής φωτεινής ακτινοβολίας (LED) που χρησιμοποιούνται στη φυτική παραγωγή.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά των πηγών τεχνητού φωτισμού

Χαρακτηριστικά	Τύποι Λαμπτήρων				
	Πυρακτώσεως	FL	MHL	HPS	LED
Ενεργειακή απόδοση	5-10%	25%	25%	30%	90%
Ενεργειακή κατανάλωση	Πολύ υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Χαμηλή
Φωτεινή απόδοση	12 lm/W*	80 lm/W	65-115 lm/W	50-90 lm/W	65-160 lm/W
Μέση διάρκεια ζωής	1000-2000 h	7000-15000 h	6000-20000 h	≤ 24000 h	50000 h
Μέγιστη εκπεμπόμενη ακτινοβολία	1000-1500 nm	546nm, 611nm	583 nm	568 nm	Ρυθμιζόμενη
Μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας	90%	40%	90%	90%	5%
Αναλαμπή	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι
UV ακτινοβολία	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Κατ' επιλογήν
Περιεκτικότητα σε μόλυβδο	Ναι	Όχι	Κατ' επιλογήν	Ναι	Όχι
Περιεκτικότητα σε υδράργυρο	Όχι	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι
Κόστος συντήρησης	Υψηλό	Υψηλό	Υψηλό	Υψηλό	Χαμηλό
Κόστος εγκατάστασης	Χαμηλό	Χαμηλό	Χαμηλό	Χαμηλό	Υψηλό

*Το Lumen (lm κατά SI) είναι η μονάδα μέτρησης της φωτεινής ροής. Μετρά τη δύναμη του φωτός όπως γίνεται αντιληπτό από το ανθρώπινο μάτι. (Μπαντής, 2015) (Πηγές: www.leoindustries.com, www.digikey.com)

4. Η τεχνολογία και λειτουργία των LED

Τα LED ως κατασκευή, αποτελούνται από διάφορα πολυμερή πλαστικά υλικά. Τα υλικά αυτά διασφαλίζουν την προστασία της λάμπας και βοηθούν τον λαμπτήρα να αντέχει τη μεγάλη πίεση που δέχεται παρέχοντάς του μηχανική υποστήριξη. (Khalilullah et al., 2017) Δυστυχώς, αυτά τα υλικά, ενώ αντέχουν στις υψηλές επιδόσεις της λάμπας, δεν είναι ανθεκτικά σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως είναι για παράδειγμα η υγρασία. Έτσι, με την απορρόφηση υγρασίας από το εξωτερικό περιβάλλον, έχουμε τη

διόγκωση των πολυμερών υλικών, με αποτέλεσμα την αποκόλληση και τελικά την υποβάθμιση του φωτιστικού. Σε υψηλές θερμοκρασίες δε, επέρχεται και θερμική καταπόνηση της συσκευής. (Lu et al., 2015) Επίσης, όλα αυτά τα υλικά καθώς και τα επιμέρους στοιχεία της κατασκευής καθιστούν την κατασκευή των LED πιο περίπλοκη σε σχέση με φωτιστικά διαφορετικής τεχνολογίας. (Casamayor et al., 2015)

Τα φωτιστικά LED είναι συσκευές οπτικές και ηλεκτρονικές μαζί. Αποτελούνται από 2 εξαρτήματα, τη μήτρα και το κέλυφος. Περιέχουν χημικά στοιχεία με διασύνδεση p-n (p: έλλειμμα ηλεκτρονίων «οπές» και n: πλεόνασμα ηλεκτρονίων), όπου με τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος δημιουργούν φως στενού φάσματος. (Lafont et al., 2012) Η διασταύρωση ενός ελλείμματος ηλεκτρονίων όταν συγκρούεται με το πλεόνασμα των ηλεκτρονίων, στην περιοχή εξάντλησης, διέρχεται μέσω της ζώνης αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους και έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή φωτονίων ζώνης στενού εύρους. Η ζώνη αγωγιμότητας είναι η ενέργεια των ελεύθερων ηλεκτρονίων, που προέρχονται από το πλεόνασμα και η ζώνη σθένους είναι η ενέργεια σθένους του ελλείμματος ηλεκτρονίων, που εμφανίζεται στη σύγκρουση αυτή. Τα φωτόνια που δημιουργούνται από τα LED φώτα, είναι η διαφορά της ενέργειας μεταξύ των δύο αυτών ζωνών. Η διαφορά αυτή ονομάζεται διάκενο ζώνης. (Kasap, 2001)

Η τεχνολογία των LED στις μέρες μας αποτελείται από προηγμένη τεχνολογία των νιτριδίων του γαλλίου και νιτριδίων του ινδίου και χάρη σε αυτό έχουν τη δυνατότητα να εκπέμπουν σε φάσματα που κυμαίνονται στην περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας UV και της πράσινης περιοχής του ορατού φωτός. (Pinho et al., 2005)

Στον κλάδο της Γεωπονίας, η τεχνολογία των LED, μπορεί να χρησιμοποιήσει πλήρως τις φασματικές ιδιότητες των πηγών φωτός και εν συνεχεία, ο χρήστης μπορεί μέσω εφαρμογών που υποστηρίζονται από συγκεκριμένο λογισμικό σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, να διαχειρίζεται, κάποιες λειτουργίες των συσκευών LED, ώστε να έχει το επιθυμητό αποτέλεσμα στην παραγωγή του. (Dougher et al., 2001) Η ευελιξία των LED, επιτρέπει τη διαχείριση της απόδοσης της φωτοσύνθεσης των φυτών, των μηκών κύματος, του φάσματος φωτός, της φωτοσυνθετικής ροής των φωτονίων (PPF), της φωτοπεριόδου, της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του άνθρακα. (Pinho et al., 2004) Μέσω αυτών των λειτουργιών ο χρήστης μπορεί ελέγχει τη φωτομορφογένεση των φυτών, καθώς και να παρεμβαίνει στην ανάπτυξη παθογόνων ασθενειών. (McCree, Loomis, 1969)

Η συνεχής τεχνολογική ανάπτυξη των φωτιστικών LED έχει εντείνει την ανάγκη για χρήση τεχνητών πηγών φωτισμού στην παραγωγή των φυτών. Μελλοντικά λοιπόν, θα πρέπει η ενεργειακή απόδοση να κυμαίνεται στα υψηλότερα επίπεδα και η τεχνολογία που θα χρησιμοποιείται να είναι χαμηλή σε κόστος. Επίσης, τα φωτιστικά δε θα πρέπει να είναι πολύπλοκα στη χρήση. (Pinho et al., 2005)

4.1 Τα είδη των LED

Τα φώτα LED διακρίνονται ανάλογα με το χρώμα των λαμπτήρων που φέρουν. Υπάρχουν τα μονόχρωμα και αυτά που αποτελούνται από διαφορετικές σειρές χρωμάτων. Τα φώτα LED που διατίθενται στο εμπόριο χρησιμοποιούν κυρίως μπλε χρώμα που αποτελείται από τα χημικά στοιχεία ίνδιο, γάλλιο και άζωτο. Όταν το άζωτο εμπεριέχει στρώση φωσφόρου, τότε σχηματίζει το λευκό φως ευρέος φάσματος. (Wu et al., 2020) (Xie, Hirotsaki, 2007)

Τα λευκά LED, έχουν περίπου τους ίδιους μηχανισμούς εκπομπής φωτός με αυτούς των μονόχρωμων λαμπτήρων. Αυτό συμβαίνει διότι παράγουν το λευκό φως με εναλλακτικό τρόπο και όχι μέσω του συνδυασμού του μπλε, πράσινου και κόκκινου χρώματος φωτός. (Xie, Hirotsaki, 2007)

Ένα άλλο είδος LED, είναι τα μπλε LED 1 W και βάση μετρήσεων που έχουν γίνει, είναι δυνατόν να μετατρέψουν περίπου το 20% της ισχύος εισόδου της ηλεκτρικής ενέργειας σε ισχύ φωτεινής ακτινοβολίας. Τα κόκκινα LED 1W, μπορούν αντίστοιχα να μετατρέψουν το 19% της ισχύος εισόδου της ηλεκτρικής ενέργειας σε ισχύ φωτεινής ακτινοβολίας. (Krames et al., 2002)

Ιδιαίτερα σημαντικό είδος LED, για την εφαρμογή του στη φυτική παραγωγή, είναι αυτό που χαρακτηρίζεται από την τεχνολογία «AlinGaP». Αυτή η τεχνολογία εμπεριέχει τα χημικά στοιχεία του φωσφιδίου, του αλουμινίου και του γαλλίου και τα φωτιστικά της είναι υψηλής ισχύος. Κατά βάση, στηρίζονται στην προηγμένη τεχνολογία υλικών και παρέχουν υψηλή οπτική και ηλεκτρική απόδοση. Η τεχνολογία «AlinGaP» διακρίνεται σε διάφορα είδη ανάλογα με τις χρωματικές συνθέσεις που παρέχει. Το κυριότερο είδος της είναι τα κόκκινα LED AlinGaP, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να εκπέμπουν φως σε περιοχές που απορροφά η χλωροφύλλη b (chl b), δηλαδή σε περιοχές που το μήκος κύματος κυμαίνεται περίπου στα 625nm. Αυτό το είδος παρέχει ιδανικές συνθήκες στο φυτό για φωτοσύνθεση. (Pinho et al., 2005)

Επίσης, τα φωτιστικά LED με την ονομασία «Algaas», τα οποία είναι υψηλής αντοχής και αποτελούνται από τα χημικά στοιχεία του γαλλίου και του αλουμινίου, παρέχουν ικανοποιητικό έλεγχο στη λειτουργία των φυτοχρωμάτων και αυτά με τη σειρά τους ρυθμίζουν πολλά βασικά μορφολογικά χαρακτηριστικά των φυτών, όπως είναι η βλάστηση, η ανάπτυξη του στελέχους και η ανάπτυξη των φύλλων. (He Raut-Bron et al., 2001) Το μειονέκτημά τους είναι πως πωλούνται στην αγορά σε πολύ υψηλές τιμές, με αποτέλεσμα να έχουν χαμηλή καταναλωτική ζήτηση. Συγκεκριμένα, αυτά τα φωτιστικά LED, είναι πιο ακριβά και από τα LED που αποτελούνται από χημικά στοιχεία, όπως τα φωσφίδια και τα νιτρίδια. Έτσι, οι ενδιαφερόμενοι στρέφονται σε φωτιστικά παλαιότερης τεχνολογίας με γνώμονα το κόστος αγοράς. (Pinho et al., 2005)

Η ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας στον τομέα των LED φωτιστικών είναι ο καταλυτικός παράγοντας για την παραγωγή ακόμη πιο αποδοτικών φωτιστικών. Η τεχνολογία αυτή εξελίσσεται διαρκώς με την πάροδο του χρόνου και είναι σχεδόν βέβαιο πως τα ποσοστά μετατροπής της ισχύος εισόδου της ηλεκτρικής ενέργειας σε

ισχύ φωτεινής ακτινοβολίας, θα αυξάνονται σημαντικά με την παραγωγή νέων λαμπτήρων. (Steigerwald et al., 2002)

4.2 Η μέτρηση του φωτός των LED

Στην περίπτωση της χρήσης τεχνητού φωτισμού, η μέτρηση του φωτός πραγματοποιείται με τη χρήση της καμπύλης σχετικής κβαντικής απόδοσης και βάση του αποτελέσματος που ορίζεται από την καμπύλη αυτή, ο χρήστης μπορεί να υπολογίσει την ποσότητα των φωτιστικών που θα χρησιμοποιήσει στην καλλιέργεια των φυτών του, για να έχει βέλτιστη αποτελεσματικότητα και καλύτερη φωτοσυνθετική απόδοση. (Niangoran et al., 2016) Με τη χρήση διαφόρων εργαλείων φωτομετρικής απόδοσης γίνεται αντιληπτή η επίδραση των διαφόρων φωτιστικών στη φωτοσύνθεση των φυτών. (Kim et.al., 2005)

Γενικά, η ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια επιφάνεια εξαρτάται από τον προσανατολισμό της επιφάνειας σε σχέση με την προσπίπτουσα δέσμη ακτινοβολίας. Η εξάρτηση αυτή περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση, σύμφωνα με την οποία υπολογίζεται ιδανικά και η ένταση ακτινοβολίας για την κατασκευή ενός πομπού LED:

$$I_e(\alpha) = I_{eo} \times \cos \alpha$$

όπου $I_e(\alpha)$ είναι ροή ακτινοβολίας του LED, σε γωνία (α) που ορίζεται από τη θέση υπολογισμού του σημείου που βρίσκεται το LED. I_{eo} είναι η ροή ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια κάθετη στη δέσμη της ακτινοβολίας των LED και (α) η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στη διεύθυνση της διάδοσης των ακτινών της δέσμης του LED και μιας κάθετης ευθείας στην επιφάνεια της πρόσπτωσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στη δέσμη ακτινοβολίας και στην επιφάνεια στην οποία αυτή προσπίπτει, τόσο αυξάνεται η επιφάνεια που δέχεται την ακτινοβολία, ενώ η ακτινοβολός πυκνότητα ροής μειώνεται.

Εάν εφαρμοστεί ο νόμος του αντίστροφου τετραγώνου, τότε μπορεί να υπολογιστεί και το επίπεδο της ακτινοβολίας στο σημείο αυτό. Αυτός ο υπολογισμός δίνεται από την εξίσωση:

$$E_e(\alpha) = \frac{I_{eo}}{d^2} \times \cos \alpha$$

Ο τελικός υπολογισμός της φωτοσυνθετικής ροής των φωτονίων γίνεται από την εξίσωση:

$$E_p(\alpha) = \frac{\lambda_{peak} \times I_{eo}}{0,1197 \times d^2} \times \cos \alpha$$

Όσον αφορά την ομοιομορφία με την οποία είναι κατανεμημένο το φως πάνω στην επιφάνεια του φυτού υπολογίζεται από την αναλογία του ποσοστού της ελάχιστης φωτοσυνθετικής ροής φωτονίων (PPF) προς το μέσο ποσοστό της φωτοσυνθετικής ροής φωτονίων (PPF). Στην περίπτωση που έχουμε φωτιστικά LED ως βασική πηγή τεχνητού φωτισμού, το επίπεδο της φωτοσυνθετικής ροής των φωτονίων (PPF) προσδιορίζεται από το κάθε LED ξεχωριστά που συνθέτει τη συστοιχία τους. (Pinho et al., 2005)

4.3 Τα μήκη κύματος φωτός των LED

Η μέτρηση του μήκους κύματος φωτός είναι μία λεπτομερής και ακριβής διαδικασία. Για να γίνει σωστά θα πρέπει να εστιάσουμε μόνο σε ένα σημείο. (Wallace, Both, 2016)

Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας (λ) συνδέεται με τη συχνότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και παρουσιάζεται με την εξίσωση:

$$v = \frac{c}{\lambda}$$

όπου «c» είναι η ταχύτητα του φωτός και ισούται με 3×10^8 m/sec, «v» η συχνότητα μετρημένη σε Hertz και «λ» το μήκος κύματος του φωτός μετρημένο σε μέτρα.

Από την παραπάνω εξίσωση φαίνεται πως το μήκος κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας. Η αύξηση του ενός προκαλεί μείωση του άλλου και αντιστρόφως. Όμως, όταν το φως συναντήσει κάποιο υλικό στην πορεία του, θα μειωθεί η ταχύτητά του και το μήκος κύματός του, ενώ η συχνότητα θα παραμείνει σταθερή.

Η ενέργεια του φωτονίου συνδέεται με τη συχνότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την εξίσωση του Planck και είναι η εξής:

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda}$$

Όπου «E» είναι η ενέργεια του φωτονίου μετρημένη σε kilojoules ανά mol και «h» είναι η σταθερά του Planck ίση με 6.626×10^{-34} Joule-second. Συνεπώς, η ενέργεια του φωτονίου είναι ανάλογη με τη συχνότητα και αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος του φωτός. Με τη βοήθεια της παραπάνω σχέσης είναι δυνατόν να υπολογιστεί η ενέργεια που θα έχει ένα φωτόνιο σε οποιοδήποτε μήκος κύματος κι αν εκπέμπεται. (Wu et al, 2020)

Στην περίπτωση των LED, το μήκος κύματος, όπως και η παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ενέργεια των φωτονίων, εξαρτώνται κι από το διάκενο ζώνης που έγινε η διασταύρωση p-n. (Yeh, Chung, 2009)

Σε αριθμούς, τα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται στα LED κι είναι τα πιο δημοφιλή τα τελευταία χρόνια στη βιομηχανία φωτισμού LED, κυμαίνονται μεταξύ των 460nm και 650nm (± 10 nm). (Naznin et al., 2016) Τα μονόχρωμα LED παρουσιάζουν μήκη κύματος μεταξύ των 440nm, 500nm, 520nm, 640nm, 680nm, 720nm, με μία διακύμανση

της τάξεως $\pm 10\text{nm}$. (Johkan et al., 2012) Τα μήκη κύματος μεταξύ των 500-600nm προκαλούνται από φάσματα ψυχρών-λευκών, θερμών-λευκών και ουδέτερων-λευκών λαμπτήρων LED. Είναι αποτέλεσμα διαφορετικών συνθέσεων από λαμπτήρες με επικάλυψη φωσφόρου. (Swan, Bugbee, 2017)

Γενικά η τεχνολογία των LED παρουσιάζει πολύ μεγάλη διακύμανση στα μήκη κύματος του φωτός. (McCree, 1972b) Υπάρχουν έως και 100 διαφορετικά μήκη κύματος, ενώ τα 10 μόνο από αυτά εκπέμπουν στην περιοχή της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας PAR (400-700nm) και είναι κατάλληλα για καλλιέργειες και πειράματα σε φυτά. Στα διάφορα πειράματα που γίνονται στην ανάπτυξη των φυτών χρησιμοποιούνται διάφορες αναλογίες στα μήκη κύματος φωτός και ποικίλουν και ως προς το είδος των φυτών και ως προς το είδος της φωτοβιολογικής έρευνας. (Naznin et al., 2016)

Εξετάζοντας τα μήκη κύματος της τεχνολογίας LED, σε φωτοβιολογικές έρευνες που γίνονται σε καλλιέργειες φυτών, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ως προς το ποιο είναι το περιβάλλον αναπαραγωγής των φυτών που γίνονται οι ανωτέρω έρευνες. Τα μήκη κύματος φωτός διαφέρουν όταν έχουμε ένα κλειστό σύστημα αναπαραγωγής και ανάπτυξης των φυτών όπως είναι το θερμοκήπιο, σε σχέση με ένα ανοικτό μέρος όπου τα φυτά αναπτύσσονται ελεύθερα, σε συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος, σε μέρη ανεξαρτήτως γεωγραφικής θέσεως και σε ανεξάρτητο χρόνο. (Yeh, Chung, 2009)

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι, βασικός παράγοντας που επηρεάζει τα μήκη κύματος των LED είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Με την αύξηση της θερμοκρασίας έχουμε αύξηση στα μήκη κύματος φωτός της τάξεως των 10-15nm. (Gu, Narendran, 2004)

Στα κόκκινα LED, η μεταβολή που προκαλείται από την αλλαγή θερμοκρασίας, μπορεί να αγγίξει τα 20nm, ενώ στα μπλε LED, η μεταβολή κυμαίνεται γύρω στα 10nm. Στα λευκά LED, έχει αναφερθεί η ύπαρξη μεταβολής, αλλά σε μικρότερο βαθμό. Τέλος, στα LED που εκπέμπουν σε στενό φάσμα φωτός, οι μεταβολές που έχουν παρατηρηθεί, είναι λιγότερες. (Schanda et al., 2014)

Επίσης τα μήκη κύματος των LED φωτιστικών εξαρτώνται κι από τις ώρες λειτουργίας των φωτιστικών. Έτσι, σε έρευνα που έγινε, σε καλλιέργεια κηπευτικών, τα μήκη κύματος των μπλε και κόκκινων λαμπτήρων LED, είχαν μεταβολή περίπου 2nm μετά από 3.000 ώρες λειτουργίας, σε συνθήκες περιβάλλοντος πειράματος. Η ίδια έρευνα έδειξε ότι, όταν οι συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία και υγρασία) έγιναν ακραίες, τότε η ένταση των φωτιστικών μειώθηκε κατά 10-20% και έχασαν τη χρωματική τους απόδοση, σε σχέση με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Όσο μεγαλύτερη ήταν η αύξηση της θερμοκρασίας, τόσο μειωνόταν η ένταση του φωτός. (Davis et al., 2018)

Η τεχνολογία των LED σε σχέση με τις τεχνολογίες συμβατικών φωτιστικών, παρέχει το βέλτιστο μήκος κύματος φωτός, με αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγικότητας σε καλλιέργειες φυτών. Όμως, πολλές φορές μεταξύ των διαφορετικών μαρκών ή κατασκευαστών αυτών των λαμπτήρων, συναντώνται φωτιστικά με ανόμοια μήκη κύματος και σημαντικές διαφορές στα επίπεδα φωτός. (Stutte G.W., 2009)

Πολλές φορές, επίσης, παρατηρείται και απόκλιση (της τάξεως $\pm 10\text{nm}$) στα μήκη κύματος πανομοιότυπων συσκευών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, σε δύο ίδιες έρευνες που χρησιμοποιούν πανομοιότυπα φωτιστικά, οι αποδόσεις τους να αποκλίνουν. Αυτό οφείλεται κυρίως στα εξαρτήματα των LED, τα οποία ποικίλουν μεταξύ τους. Για να μετρηθούν ακριβώς οι αποκλίσεις αυτές χρησιμοποιείται το φασματοραδιόμετρο. (Lafont et al., 2012)

4.4 Το φάσμα φωτός των LED

Η συνεχώς αυξανόμενη χρήση του τεχνητού φωτισμού στις καλλιέργειες δημιούργησε την ανάγκη του ελέγχου του φάσματος του φωτός που εκπέμπεται στα φυτά. Έτσι ο χρήστης θα έχει τη δυνατότητα να ρυθμίζει την ποιότητα του φωτός που παρέχεται στα φυτά και να επιτυγχάνει τον έλεγχο και τη βελτίωση των φυσιολογικών λειτουργιών των φυτών, όπως τη φωτοσύνθεση και τη φωτομορφογένεση των φυτών.

Για να μεγιστοποιηθεί η παραγωγικότητα των καλλιεργειών με βάση τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας, το φάσμα του φωτός που εκπέμπεται θα πρέπει να ταυτίζεται με το φάσμα φωτός, στο οποίο έχουμε τη βέλτιστη απορρόφηση των φωτοσυνθετικών χρωστικών και κυρίως της χλωροφύλλης. Τα LED, είναι ικανά να ελέγχουν αυτή την κατάσταση, μιας και κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η φασματική εκπομπή στενής ζώνης φωτός. (Pinho et al., 2005)

Είτε πρόκειται για συμβατικά είδη φωτισμού, είτε για φωτιστικά LED, το φάσμα φωτός παρουσιάζει διακυμάνσεις, ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο χρησιμοποιούνται.

Στα συμβατικά είδη φωτισμού, η τεχνολογία του φάσματος δεν είναι ακόμα ιδιαίτερα ανεπτυγμένη, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ανομοιογένειες και κατά τη διάρκεια της προθέρμανσης και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Η διατήρηση της φασματικής απόδοσης σε υψηλά επίπεδα είναι δύσκολη, στην περίπτωση χρήσης τεχνητού φωτισμού για την ανάπτυξη φυτών, γιατί, όπως προαναφέρθηκε, παίζουν σημαντικό ρόλο οι συνθήκες ανάπτυξης των φυτών, δηλαδή οι τιμές της υγρασίας και θερμοκρασίας του κλειστού ή ανοικτού χώρου αντίστοιχα. Άρα, όπως στα μήκη κύματος, έτσι και στο φάσμα, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη σημασία στον τρόπο καλλιέργειας των φυτών. (Wu et al., 2020)

Στην τεχνολογία των LED, το φάσμα φωτός επηρεάζεται ακόμα περισσότερο από τις εξωτερικές συνθήκες και κυρίως από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Βέβαια, ο βαθμός επιρροής εξαρτάται κι από το χρώμα εκπομπής των LED. Ο λόγος είναι πως τα ίδια τα φωτιστικά λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες. (McCartney, Lefsrud, 2018)

Η φασματική ποιότητα του φωτός των φωτιστικών LED, βρίσκεται σε συνεχή αναζήτηση γνώσεων και παρατηρήσεων. Όσον αφορά τις καλλιέργειες φυτών, οι φασματικές ιδιότητες, θα πρέπει να εξετάζονται εκτενώς, ώστε να μην υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στις διάφορες μελέτες. Θα πρέπει λοιπόν να γίνονται συνεχείς μετρήσεις του φάσματος φωτός σε όλη τη περίοδο ανάπτυξης των φυτών. (Wu et al., 2020)

4.5 Η μέτρηση της απόδοσης των LED

Οι κατασκευαστές των LED, κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας των λαμπτήρων, οι οποίοι προορίζονται να χρησιμοποιηθούν σε καλλιέργεια φυτών, πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους διάφορες παραμέτρους, έτσι ώστε τα φωτιστικά αυτά να έχουν συγκεκριμένα τεχνικά χαρακτηριστικά. Θα πρέπει να υπολογίζονται όλες οι παράμετροι οι οποίες βοηθούν στη φωτοσύνθεση και φωτομορφογένεση των φυτών. Επίσης, θα πρέπει να μπορούν να υπολογίζουν την αναλογία φωτός που εκπέμπεται προς τα φυτά και την αναλογία φωτός που αντλούν τα φυτά. (Pinho et al., 2005)

Σε γενικά πλαίσια, η αξιολόγηση των φωτιστικών των LED, που χρησιμοποιούνται σε καλλιέργειες φυτών, μπορεί να γίνει αξιολογώντας την ηλεκτρική και φωτοσυνθετική απόδοσή τους.

Η ηλεκτρική απόδοση δίνεται από την αναλογία της ισχύος εισόδου της ηλεκτρικής ενέργειας και της ισχύος εξόδου της ακτινοβολίας φωτός εντός της περιοχής της ενεργής ακτινοβολίας (PAR) και υπολογίζεται σε $\mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$.

Για να διατηρείται σε υψηλά επίπεδα η συνολική απόδοση των φωτιστικών LED, θα πρέπει η απόδοση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων οδήγησης (Led drivers) να είναι η βέλτιστη. Τα κυκλώματα οδήγησης LED (σταθερού ρεύματος) έχουν απόδοση που κυμαίνεται μεταξύ του 70% και 95%. Αυτές οι αποδόσεις, βέβαια, εξαρτώνται και από την ισχύ εξόδου των φωτιστικών και από το είδος του κυκλώματος οδήγησης¹. Το βασικό πλεονέκτημα των κυκλωμάτων οδήγησης LED (σταθερού ρεύματος) είναι η εξάλειψη της ανάγκης χρήσης περιοριστικών αντιστάσεων στις συστοιχίες LED και η απλοποίηση των διαδικασιών σχεδιασμού. Επίσης, επιτρέπουν στον χρήστη να μπορεί να ελέγχει τη μείωση της έντασης, βάση της λειτουργίας «PWM» (διαμόρφωση παλμικού πλάτους). Βέβαια, θα πρέπει να διατηρείται η λειτουργία των συσκευών στα επίπεδα των προδιαγραφών του κατασκευαστή, ώστε να υπάρχει μια καλή ηλεκτρική απόδοση των κυκλωμάτων οδήγησης. (Pinho et al., 2005)

Τις τελευταίες δεκαετίες, η απόδοση και η αποτελεσματικότητα των LED ολοένα και αυξάνεται. Εκτιμάται πως η μέγιστη ηλεκτρική απόδοση των λαμπτήρων LED μπορεί να φθάσει μεταξύ 4,6-5,1 $\mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$. Ιδίως τα φωτιστικά LED που έχουν ως βάση την απόχρωση του μπλε ή του κόκκινου παρουσιάζουν απόδοση μεταξύ 2,55-3 $\mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$, η οποία υπερτερεί σε σχέση με αντίστοιχα φωτιστικά ευρέος φάσματος, η απόδοση των οποίων κυμαίνεται γύρω στα 1,99 $\mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$. (Johnson, Bugbee, 2017)

Τα LED, που έχουν ως βάση το φωσφίδιο ή το νιτρίδιο είναι εξαιρετικά αποδοτικά. Όταν εκπέμπουν κόκκινο ή μπλε φως η απόδοσή τους φτάνει στο 30-50%. (Craford, 2007) Η τεχνολογία LED «InGaN», η οποία αποτελείται από πράσινα και μπλε LED, καθώς και λευκές λυχνίες φωσφόρου LED, φέρει αποτελέσματα μέχρι και 100 lumens ανά Watt (lm/W). Η τεχνολογία LED «AlInGaP», η οποία αποτελείται από κόκκινα και

¹ Led driver: Ηλεκτρονική διάταξη παροχής συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος με σταθερή τάση και σταθερή ένταση, συνθήκες απαραίτητες για την λειτουργία των λαμπτήρων LED

πορτοκαλί LED, φέρει αποτελέσματα άνω των 100 lumens ανά Watt (lm/W). (Moisio et al., 2005)

Η φωτοσυνθετική απόδοση αξιολογείται βάση δύο παραγόντων. Ο πρώτος παράγοντας είναι η απόδοση της φωτοσυνθετικής χρήσης (PUE). Αυτή η απόδοση εξαρτάται από το φάσμα της εκπομπής της φωτεινής πηγής και συγκρίνεται με τη φωτεινή απόδοση στο φωτομετρικό σύστημα. Η απόδοση της φωτοσυνθετικής χρήσης (PUE), προκύπτει από την αναλογία της φωτοσυνθετικής ροής φωτονίων «PPF» και της ροής φωτονίων «YPF». Το «PUE» ορίζει την αποτελεσματικότητα με την οποία η ακτινοβολούμενη ενέργεια μετατρέπεται σε χημική ενέργεια.

Η χημική ενέργεια ορίζεται ως το καθαρό ποσοστό αφομοίωσης ενέργειας «NAR» και εξαρτάται από τον ρυθμό φωτοσύνθεσης. Για να προσδιοριστεί το καθαρό ποσοστό αφομοίωσης ενέργειας «NAR» θα πρέπει να υπολογιστεί η μέση επιφάνεια των φύλλων των φυτών και το ξηρό βάρος των φύλλων σε διαφορετικούς χρόνους. Αυτοί οι υπολογισμοί πρέπει να γίνουν κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των φυτών. Ο υπολογισμός της «NAR» δίνεται από την εξής εξίσωση:

$$NAR = \frac{(W_2 - W_1)(A_2 - A_1)}{(t_2 - t_1)(LA_2 - LA_1)}$$

Τα A_1 και A_2 είναι η φυλλική επιφάνεια και αντιπροσωπεύουν την επιφάνεια της μιας πλευράς των φύλλων. Οι δείκτες φυλλικής επιφάνειας LA_1 και LA_2 (leaf area index) εκφράζουν το συνολικό άθροισμα της επιφάνειας της μιας πλευράς των φύλλων της φυτικής κόμης ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους (m^2 φυλλικής επιφάνειας/ m^2 επιφάνειας εδάφους). Θα πρέπει να σημειωθεί, πως φυτική κόμη ορίζεται ως το υπέργειο τμήμα φυτού που καλύπτει μια συγκεκριμένη επιφάνεια εδάφους. W_1 και W_2 είναι το ξηρό βάρος των φύλλων των φυτών και t_1 και t_2 είναι οι διαφορετικοί χρόνοι που έγιναν οι μετρήσεις.

Ο δείκτης NAR, συνήθως μειώνεται κατά τη διάρκεια ανάπτυξης της καλλιέργειας, καθώς συσχετίζεται αρνητικά το δείκτη φυλλικής επιφάνειας και κατά συνέπεια με όλους τους παράγοντες που συντελούν στην αύξησή του (παροχή αζώτου, πυκνότητα φύτευσης, σκίαση, υψηλά επίπεδα παροχής νερού κ.α.).

Ο συνδυασμός των δύο παραγόντων «PUE» και «NAR» καθορίζει την αποτελεσματικότητα της φωτοσύνθεσης. Η φωτοσυνθετική αποτελεσματικότητα ορίζεται ως η ικανότητα της πηγής φωτός, μέσω της παροχής ανάλογης φασματικής ακτινοβολίας, να ενισχύει τον ρυθμό φωτοσύνθεσης και ακολούθως της φωτομορφογένεσης του φυτού. Η καλύτερη πηγή φωτός είναι αυτή η οποία μπορεί να δώσει το προϊόν με τα καλύτερα χαρακτηριστικά. (Sager et al., 1988)

Σημαντικό κομμάτι στην αποτελεσματική χρήση του φωτός και στη βελτίωση της απόδοσης αποτελεί κι η επιλογή χρώματος φωτός. Κάθε χρώμα εκπέμπει σε διαφορετική θερμοκρασία και καλύπτει διαφορετικές ανάγκες του χρήστη. Άρα, η διαφορά στα

διάφορα χρώματα φωτός που εκπέμπονται από τα φωτιστικά είναι ανάλογη των μεταβολών της θερμοκρασίας. (Simeoneva et al., 2003)

Ο δείκτης με τον οποίο μετρείται η απόδοση των χρωμάτων είναι ο δείκτης «CRI» (color rendering index). Κυμαίνεται από το 0 έως το 100 και είναι η ποσοτική μέτρηση της ικανότητας μιας πηγής φωτός να εμφανίζει τα χρώματα, σε σύγκριση με μια πρότυπη πηγή φωτός. Είναι ένα μέτρο το οποίο δείχνει την ικανότητα που έχει μια πηγή φωτός να απεικονίζει ρεαλιστικά ή φυσικά τα χρώματα φωτός που αποδίδει. Όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης χρωματικής απόδοσης, τόσο μικρότερη είναι η χρωματική απόκλιση των χρωμάτων. (Tunde et al., 2001)

Στο παρελθόν ήταν διαδεδομένος για τα πιο παραδοσιακά είδη φωτισμού και το μειονέκτημά του είναι πως δεν είναι απολύτως επαρκής, γιατί μέσω της χρήσης αυτού του δείκτη έχουμε μια ευρύτερη μέτρηση της απόδοσης χρωμάτων σε σχέση με τις ιδιότητες του φωτός.

Ο δείκτης απόδοσης «CRI» μεταβάλλεται στα διαφορετικά χρώματα και στους συνδυασμούς χρωμάτων που εκπέμπουν οι συσκευές και μπορεί να φέρει διάφορες τιμές. (Simeoneva et al, 2003)

Υπάρχουν ειδικές λειτουργίες στα συστήματα φωτισμού, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η εκπομπή περισσότερων του ενός χρωμάτων. Η χρήση συστημάτων φωτισμού με τρία διαφορετικά χρώματα, έχει άριστη χρωματική απόδοση και ιδανικές τιμές «CRI» σε συγκεκριμένα επίπεδα θερμοκρασίας, ενώ η χρήση συστημάτων φωτισμού με πέντε διαφορετικές αποχρώσεις χρωμάτων, μπορεί να δώσει καλή χρωματική απόδοση σε ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες. Εάν ο χρήστης επιθυμεί να αλλάξει τη θερμοκρασία θέλοντας να διατηρήσει ιδανικά επίπεδα «CRI», θα πρέπει να διαλέξει διαφορετικές αποχρώσεις χρωμάτων. (Zhao et al, 2002)

Όσον αφορά τα φυτά, ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας και τις ανάγκες του χρήστη κάθε φορά, οι τιμές του δείκτη «CRI» θα πρέπει να ποικίλουν. Κάποιες φορές αποδίδουν καλύτερα αποτελέσματα οι χαμηλές τιμές του δείκτη και κάποιες φορές χρειάζονται υψηλές τιμές του δείκτη «CRI» για την ανάπτυξη των φυτών. Έτσι ο χρήστης δεν θα πρέπει να δείχνει απαραίτητα προτίμηση σε χρώματα με υψηλή τιμή του δείκτη «CRI», προσδοκώντας ότι θα επιτύχει και καλύτερο αποτέλεσμα στην παραγωγή του. (Narendran, Deng, 2002)

Στα φωτιστικά LED, λόγω του στενού φάσματος εκπομπής φωτός, είναι πολύ δύσκολη η επίτευξη καλής χρωματικής απόδοσης. Σε έρευνα που έγινε έδειξε πως τρία διαφορετικά χρώματα LED, δίνουν τιμή «CRI» μεγαλύτερη του «80». Τέσσερα διαφορετικά χρώματα LED, δίνουν τιμή «CRI» μεγαλύτερη του «95». Όμως, ο συνδυασμός των πέντε και περισσότερων διαφορετικών χρωμάτων δε βελτιώνει τις τιμές του δείκτη «CRI», παρά μόνο σε ειδικές περιπτώσεις έρευνας. (Zukauskas et al., 2002)

Στην περίπτωση των LED, η ανάμειξη πολλών και διαφορετικών χρωμάτων είναι εξαιρετικά δύσκολη, γιατί επηρεάζεται η ένταση του φωτός και η διατήρηση της ομοιομορφίας των χρωμάτων και του φωτός. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερες αποδόσεις φωτός. Τα φωτιστικά LED, για να είναι πιο αποδοτικά, θα πρέπει

να συνδυάζονται με τον ιδανικό τρόπο. Αποτέλεσμα αυτών των συνδυασμών, είναι συνήθως το λευκό φως, το οποίο δίνει καλή χρωματική απόδοση. (Zhao et al., 2002)

Άλλοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση των LED είναι οι εξής:

Επειδή μακροχρόνια συσσωρεύεται σκόνη στις συσκευές των LED, η οποία προέρχεται από το έδαφος ή τον αέρα, επέρχεται μείωση της έντασης και αποδοτικότητας των συσκευών. (Gomez et al., 2013) Υπάρχει τεχνολογία η οποία μπορεί να δουλέψει συμπληρωματικά με τα φωτιστικά, ώστε να τα προστατεύει και να τα βοηθά να λειτουργούν βάση των προδιαγραφών του κατασκευαστή. Μερικές από αυτές τις βοηθητικές συσκευές, που χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση της σκόνης, είναι οι ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές και οι κυκλώνες. (Massa et al., 2008)

Επίσης, είναι γνωστό ότι, στα φωτιστικά LED, ο χρήστης, έχει τη δυνατότητα να προσδιορίσει την κατεύθυνση που θα εκπέμπουν, πράγμα που τα υποδηλώνει ως κατευθυντήριους πομπούς. Όταν, όμως, τα φωτόνια που εκπέμπονται ορίζονται από μεγάλες γωνίες διασποράς και το ύψος τοποθέτησης των φωτιστικών δεν είναι το κατάλληλο, τότε το σύνολο του φωτός που εκπέμπεται χάνεται στο περιβάλλον και υποβαθμίζεται η λειτουργία των LED. Σε αυτή την περίπτωση, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης δευτερευόντων οπτικών μέσων LED, με μικρότερη γωνία εκπομπής της δέσμης φωτός, με τα οποία μπορεί ο χρήστης να κατευθύνει το επιθυμητό φως στην περιοχή που ο ίδιος θέλει να ενισχύσει. Τέτοιες συσκευές είναι οι φακοί ευθυγράμμισης (Collimator), οι οποίοι έχουν υψηλή οπτική απόδοση, με ποσοστά που φτάνουν το 85-90%. Αν και δεν είναι τέλειες κατασκευές, η χρήση τους μπορεί να μειώσει τον αριθμό των LED φωτιστικών που απαιτούνται για να επιτευχθεί η επιθυμητή φωτοσυνθετική ροή φωτονίων (PPF). Επίσης, μπορεί ο αριθμός των LED να παραμείνει ο ίδιος, αλλά να αυξηθεί το ύψος τοποθέτησης των φωτιστικών. (Pinho et al., 2005)

Το μειονέκτημα της χρήσης των συμπληρωματικών συσκευών που προαναφέρθηκαν είναι ότι αυξάνουν το λειτουργικό κόστος εγκατάστασης, παρόλο που σε βάθος χρόνου, προσφέρουν βέλτιστη αποδοτικότητα. (Both et al., 2017)

Τα LED φέρουν πολλά καινοτόμα στοιχεία τα οποία δεν έχουν ερευνηθεί ακόμη εις βάθος από τους ερευνητές. Η απόδοση των χρωμάτων και η ποικιλία των θερμοκρασιών είναι θέματα που ακόμη ερευνώνται και μελετώνται. Ο χρήστης θα πρέπει να κατανοήσει την ιδιομορφία των φωτιστικών LED και να είναι προσεκτικός, για να μπορεί να ελέγχει δυναμικά παραμέτρους, όπως είναι το χρώμα και η θερμοκρασία. (Moio et al., 2004)

4.6 Η διάρκεια ζωής των LED

Το πιο γνωστό χαρακτηριστικό για τους λαμπτήρες LED, είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής. Αυτό είναι το δυνατότερο χαρακτηριστικό των φωτιστικών LED, που τα κάνει να ξεχωρίζουν από τα υπόλοιπα συμβατικά είδη φωτισμού. Η διάρκεια ζωής των LED δεν

ελαττώνεται με τις εναλλαγές ανοίγματος και κλεισίματος τους όπως συμβαίνει με τους λαμπτήρες FL, HPS και MHL. (Li X. et al., 2011)

Ειδικά σε έρευνα που έχει γίνει για τη διάρκεια ζωής των LED, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η διάρκεια ζωής τους υπολογίζεται σε 30.000-50.000 ώρες. Περίπου το 80% των φωτιστικών LED που εξετάστηκαν, δεν άντεξαν όμως για πάνω από ένα έτος, για διαφορετικούς λόγους. (Casamayor et al., 2015)

Στα χαρακτηριστικά των λυχνιών LED εμπεριέχεται το σύνολο των ωρών που περνούν ώστε να υποβαθμιστεί το αρχικό επίπεδο έντασης φωτός που είχε η λάμπα πριν από την πρώτη λειτουργία της. Όταν η υποβάθμιση αυτή είναι σε ποσοστά 50% ή 70%, στα τεχνικά χαρακτηριστικά του λαμπτήρα, ο συμβολισμός είναι L50 ή L70 αντίστοιχα. (Li X. et al., 2011) Σε αριθμούς, ο συμβολισμός L70, για παράδειγμα, αντιστοιχεί σε 30.000-50.000 ώρες λειτουργίας της λάμπας πριν την υποβάθμιση της έντασης φωτός κατά 70%. (Pecht et al., 2014)

Γενικά, η διάρκεια ζωής των φωτιστικών LED εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Ένας από αυτούς είναι η σωστή συντήρηση των επιμέρους μερών που περιλαμβάνονται στο φωτιστικό, δηλαδή των διαφόρων εξαρτημάτων του, όπως το κύκλωμα οδήγησης του φωτιστικού, οι πυκνωτές που εξοπλίζουν το φωτιστικό κ.α. Για παράδειγμα, το κύκλωμα οδήγησης ενός LED φωτιστικού, χωρίς τη σωστή συντήρηση, έχει διάρκεια ζωής που κυμαίνεται μεταξύ των 5.000-10.000 ωρών, η οποία είναι σχετικά μικρή. Βάση συγκεκριμένης έρευνας, έχει πλέον γίνει αντιληπτό στον κόσμο της μηχανικής, πως θα πρέπει να σχεδιάζουν και να δημιουργούν καλύτερα συστήματα συντήρησης των συσκευών LED μελλοντικά.

Όμως, ακόμα πιο σημαντικοί παράγοντες για τη διάρκεια ζωής των φωτιστικών LED, είναι η θερμοκρασία της λάμπας όταν αυτή βρίσκεται σε λειτουργία και κυρίως η θερμοκρασία που υπάρχει στο εξωτερικό περιβάλλον λειτουργίας του φωτιστικού. (Casamayor et al., 2015)

Τα επίπεδα θερμοκρασίας που αποκτούν οι δίοδοι κατά τη χρήση επηρεάζουν σημαντικά τις ώρες λειτουργίας τους. Γι' αυτό, κατά την κατασκευή τους, οι λαμπτήρες δοκιμάζονται ενώ λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, βάση της μεθόδου Arrhenius. Ο λόγος που χρησιμοποιείται αυτή η μέθοδος είναι πως, σε διαφορετική περίπτωση, οι ερευνητές θα έπρεπε να έχουν στη διάθεσή τους από 3 έως και 5 χρόνια χρήσης για τις δοκιμές τους. (Pecht et al., 2014) Δυστυχώς όμως κι αυτή η μέθοδος είναι ανεπαρκής, γιατί κατά τη λειτουργία της λάμπας LED (ανεξαρτήτως χρήσης) η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μεταβάλλεται. (Van Driel, Fan, 2012)

Όσον αφορά την εξωτερική θερμοκρασία, η λειτουργία των φωτιστικών, βάση των τεχνικών προδιαγραφών του κατασκευαστή, θα πρέπει να πραγματοποιείται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος που κυμαίνεται στους 25°C. Στην πραγματικότητα, όμως, στις περισσότερες περιπτώσεις, η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη των 25°C και δεν ταυτίζεται με την προτεινόμενη θερμοκρασία. Αυτή η διαφορά, μεταξύ τεχνικών προδιαγραφών και πραγματικότητας, είναι ο λόγος για τον οποίο υπάρχει μείωση της απόδοσης και του χρόνου ζωής του φωτιστικού. (Pinho et al., 2005)

Επομένως, είναι πρωταρχικής σημασίας, για τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των φωτιστικών LED, να γίνεται σωστή θερμική διαχείριση των συσκευών. (Christensen, Graham, 2009)

Αυτή η διαχείριση της θερμοκρασίας και των φασματικών ιδιοτήτων, σε ελεγχόμενο περιβάλλον καλλιέργειας, μπορεί να γίνει με συστήματα όπως είναι οι παθητικές ψήκτρες και οι ανεμιστήρες ψύξεως. Η θερμική αντίσταση της ψήκτρας προσδιορίζεται ανάλογα με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Με αυτά τα συστήματα, ο παραγωγός μιας καλλιέργειας, μπορεί να διαχειριστεί θερμικά τις συσκευές LED και αντίστοιχα, ο ερευνητής, να διαχειριστεί τις παραμέτρους στη φωτοβιολογική έρευνα. Μέσω αυτών των συστημάτων, μπορούν να εξασφαλιστούν σταθερά επίπεδα θερμοκρασίας, λειτουργικές μέθοδοι καλλιέργειας, σταθερές φασματικές ιδιότητες, καλύτερη απόδοση του φωτός και μακροπρόθεσμα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των φωτιστικών ενός κλειστού περιβάλλοντος καλλιέργειας (π.χ. θερμοκήπιο). (McCartney, Lefsrud, 2018)

Κατά τα άλλα, οι λαμπτήρες LED δεν καταπονούνται εύκολα από αιτίες που οφείλονται στην αλλοίωση των τεχνικών χαρακτηριστικών του φωτιστικού, λόγω της προηγμένης κατασκευής τους. Αιτίες που σε διαφορετικές τεχνολογίες φωτός επιφέρουν σημαντική μείωση στη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων. (Van Driel, Fan, 2012)

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως τα τελευταία χρόνια, με την εμφάνιση της τεχνολογίας των LED, υπάρχει μια συνεχή αναζήτηση για την κατασκευή φωτιστικών με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και σε διαφορετικά περιβάλλοντα εφαρμογής. Ένα τέτοιο περιβάλλον είναι το διάστημα, όπου η διάρκεια ζωής των φωτιστικών είναι μεγίστης σημασίας, αφού χρησιμοποιούνται για τη συντήρηση τροφίμων. (Pinho et al., 2004)

4.7 Τα πλεονεκτήματα των λαμπτήρων LED

Οι απαιτήσεις της σύγχρονης εποχής, έχουν δημιουργήσει την ανάγκη για την αύξηση της παραγωγικότητας στην καλλιέργεια φυτών. Για να επιτύχουμε τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα παραγωγής, σε ελεγχόμενο περιβάλλον, συχνά είναι αναγκαία η παροχή ηλεκτρικού φωτισμού. Αυτός ο φωτισμός, μπορεί να είναι συμπληρωματικός και ελεγχόμενος, αλλά δημιουργεί και υψηλά κόστη ηλεκτρικής ενέργειας. Δημιουργείται λοιπόν η ανάγκη εύρεσης ενός είδους φωτισμού, ο οποίος να παρέχει την καλύτερη ισχύ φωτισμού, αλλά σε λογικά κόστη. (Singh et al., 2015)

Ο ιδανικός φωτισμός επιτυγχάνεται με τα φωτιστικά LED, τα οποία βασίζονται σε καινοτόμα τεχνολογία, η οποία συνεχώς εξελίσσεται και σε συνδυασμό με την απόκτηση νέων γνώσεων στη φωτοβιολογία και στη φυσιολογία των φυτών, αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για τον οποίο η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την παραγωγή φυτών σε θερμοκήπια. (Dougher et al., 2001)

Η εξοικονόμηση ενέργειας, λόγω της υψηλής απόδοσης μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε φωτεινή ακτινοβολία, είναι το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτών των πηγών φωτισμού έναντι άλλων συμβατικών ειδών φωτισμού. (Singh et al., 2015) Η τεχνολογία των LED δείχνει πως μία λάμπα μπορεί να εξοικονομήσει ηλεκτρική ενέργεια

περίπου στο 17-47%, σε σύγκριση με λοιπά φωτιστικά όπως είναι τα φώτα νατρίου υψηλής πίεσης HPS. Επίσης, σε σχέση με τα HPS, δεν είναι μόνο πιο οικονομικά, αλλά παρέχουν και καλύτερο έλεγχο φάσματος και έντασης του φωτός. (Pecht et al., 2014)

Θα πρέπει να σημειωθεί, πως η αποδοτικότητα του φωτισμού, όσον αφορά την ανάπτυξη των φυτών, κατά την παραγωγική διαδικασία, εξαρτάται από το φως που αντλεί από τη λάμπα αποκλειστικά το φυτό και όχι γενικά ο χώρος, γιατί στοχεύουμε κυρίως στην αύξηση του ρυθμού φωτοσύνθεσης του φυτού. Το φάσμα φωτός, που δίνουν τα φώτα LED, μας αποδεικνύει πως είναι ικανά να επικεντρωθούν αποκλειστικά στο φυτό, με αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγής με τα χαμηλότερα κόστη ηλεκτρικής ενέργειας. (Van Lersel M.W., 2017) Οπότε, το στενό φάσμα εκπομπής του φωτός, θεωρείται βασικό πλεονέκτημα των LED και αυτό το πλεονέκτημα είναι ο κύριος παράγοντας ανάπτυξης της τεχνολογίας αυτών των φωτιστικών, με εφαρμογή στην καλλιέργεια και παραγωγή των φυτών. (Pinho et al., 2005)

Βασικό πλεονέκτημα των λαμπτήρων LED είναι και το μήκος κύματος που αποδίδουν οι συγκεκριμένοι λαμπτήρες. Δίνουν το βέλτιστο επίπεδο φωτός, με αποτέλεσμα να αποδίδεται η μέγιστη παραγωγικότητα των φυτών. (Stutte G.W., 2009) Εκπέμπουν σε πολλαπλά μήκη κύματος και μπορούν να τα διατηρούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα. (Chang et al., 2012) Δεν υπάρχει χρωματική μεταβολή ή αλλοίωση, όπως υπάρχει, για παράδειγμα, στα φωτιστικά φθορισμού. Ιδίως τα εμπορικά LED υψηλής ισχύος, παρουσιάζουν πολύ σπάνια ετερογένεια. (Wallace, Both, 2016)

Η υψηλή απόδοση που χαρακτηρίζει τα φωτιστικά LED, μπορεί να μειώσει και τον αριθμό των φωτιστικών που θα χρησιμοποιηθούν σε μια καλλιέργεια. Η μείωση του αριθμού των φωτιστικών LED, θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του αρχικού κόστους εγκατάστασης των φωτιστικών και του κόστους ως προς τον χρόνο λειτουργίας τους. Για την επίτευξη της μείωσης του αριθμού των φωτιστικών LED, θα πρέπει όμως, να εφαρμοστεί κι η σωστή στρατηγική φωτισμού ανά συσκευή. Για παράδειγμα, θα μπορούσε η καλλιέργεια να φωτιστεί με φωτιστικά μικρότερου μεγέθους, αλλά σε πιο κοντινή απόσταση από τα φυτά. (Pinho et al., 2005) Τα LED, σε σχέση με συμβατικά φωτιστικά, μπορούν να βρίσκονται σε πολύ κοντινή απόσταση από το φυτό, γιατί δεν αυξάνουν εκτός ορίων την ενέργεια που αντλούν τα φυτά και δεν τους προκαλούν καψίματα. Με τη σωστή χρήση και ορθή διαχείριση μπορεί ο χρήστης να προσδιορίσει την ακριβή απόσταση του φωτιστικού και να έχει θετικά αποτελέσματα στην καλλιέργειά του. Οι ερευνητές τη συγκεκριμένη απόσταση την υπολογίζουν σε εκατοστά (cm). (Massa et al., 2008)

Επίσης, με τα LED, λόγω της άρτιας σχεδίασης που τα διακρίνει και του μικρού τους μεγέθους, επιτυγχάνεται κι η ορθή ανακατανομή της ακτινοβολίας. (Pinho et al., 2004) Αυτή η ανακατανομή της ακτινοβολίας προς τα φυτά είναι ικανή να αυξήσει έως και 22% την ετήσια παραγωγικότητα των φυτών. Η αύξηση αυτή μπορεί να επιτευχθεί ακόμη κι αν οι εντάσεις του φωτός πάνω από το φύλλο είναι χαμηλές. (Aikman D.P., 1989)

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό του φωτισμού με LED είναι η υψηλή φωτοσυνθετική απόδοση, σε σύγκριση με παραδοσιακούς λαμπτήρες. Τα φυτά που φωτίζονται με LED εμφανίζουν μεγαλύτερο συντελεστή αφομοίωσης CO₂ σε σύγκριση με άλλους

λαμπτήρες, κάτω από την επίδραση παρόμοιας έντασης ακτινοβολίας. Το κόκκινο και μπλε φως που εκπέμπουν τα φωτιστικά LED ευνοεί τη μέγιστη απορρόφηση της χλωροφύλλης. Σε σύγκριση με τους συμβατικούς λαμπτήρες φωτισμού οι κόκκινοι, μπλε και οι λευκοί LED παράγουν σημαντικά λιγότερη μη-φωτοσυνθετική ακτινοβολία. (Barta et al., 1992)

Πολύ θετικό γεγονός, όσον αφορά τα φωτιστικά LED, είναι πως, σε ένα θερμοκήπιο, όταν δεν επαρκούν τα κεντρικά φωτιστικά να καλύψουν τα φυτά που βρίσκονται περιμετρικά της καλλιέργειας, τότε υπάρχει η δυνατότητα χρήσης δευτερευόντων, συμπληρωματικών οπτικών μέσων, με τα οποία ο χρήστης μπορεί να στοχεύσει στα συγκεκριμένα φυτά που έχουν άμεση ανάγκη, και μέσω της εκπομπής φωτονίων, να επιτύχει την ένταση της φωτεινής ισχύος που επιθυμεί και να βελτιώσει την ανάπτυξη των φυτών και την αποδοτικότητα των φωτιστικών στο μέγιστο. (Poulet et al., 2014)

4.8 Τα μειονεκτήματα των λαμπτήρων LED

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματά τους, υπάρχουν ορισμένοι προβληματισμοί σχετικά με τη χρήση των LED ως πηγή φωτισμού στη φυτική παραγωγή. Το υψηλό κόστος των LED είναι ένα σημαντικό εμπόδιο για τη χρήση τους τόσο στη φυτική παραγωγή όσο και σε άλλους κλάδους. (Chang et al., 2012) Επομένως, η χρήση των LED στη φυτική παραγωγή είναι περιορισμένη σε μικρής κλίμακας ερευνητικές εφαρμογές, όπως είναι η ιστοκαλλιέργεια (*in vitro* πολλαπλασιασμός), ο φωτισμός σε θαλάμους ανάπτυξης και τα συστήματα μηχανικής υποστήριξης σε αποστολές στο διάστημα. (Massa et al., 2008)

Άλλο ένα βασικό μειονέκτημα των λαμπτήρων LED και γενικά της τεχνολογίας ηλεκτρικού φωτισμού, είναι ότι εξαρτάται από τον τόπο ή τον χώρο, στον οποίο γίνεται η καλλιέργεια. Έτσι, αν η καλλιέργεια είναι σε κλειστό χώρο, όπως σε κάποιο θερμοκήπιο, τότε τα αποτελέσματα στην ανάπτυξη των φυτών είναι θετικά. Σε περίπτωση που ο χώρος είναι ανοικτός, ο βαθμός επιρροής του τεχνητού φωτισμού στην ανάπτυξη των φυτών δεν μπορεί να προσδιοριστεί, γιατί εξαρτάται από τις εξωτερικές συνθήκες, όπως θερμοκρασία, υγρασία και γεωγραφική θέση. Το σύνολο της τεχνολογίας φωτισμού που θα χρησιμοποιηθεί μεταβάλλεται ως προς αυτούς τους εξωτερικούς παράγοντες και δεν προσφέρει το βέλτιστο στην απόδοση της ανάπτυξης των φυτών. Για παράδειγμα, αν η θερμοκρασία είναι υψηλή, το αποτέλεσμα είναι να μειώνεται η ένταση του φωτός που εκπέμπεται και σε πολλές περιπτώσεις να ελαττώνεται κι η διάρκεια ζωής του φωτιστικού. (Wu et al., 2020)

Οι εξωτερικές συνθήκες περιβάλλοντος επιδρούν σε μεγαλύτερο βαθμό στα φωτιστικά LED, καθώς έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία (ανάλογα βέβαια και με την τάση του ρεύματος). (Wu et al., 2020) Σε σύγκριση με τα κοινά συστήματα φωτισμού, τα LED έχουν πιο ψυχρές επιφάνειες εκπομπής φωτός και μικρότερο θερμικό φορτίο. Έτσι η θερμότητα που παράγεται αναλογεί σε μικρά ποσοστά ισχύος. (Gu, Narendran, 2004) Σε περίπτωση που εμφανιστεί κάποιο υψηλό θερμικό φορτίο, θα προκαλέσει μηχανική

βλάβη στο σύνολο του φωτιστικού LED, με αποτέλεσμα να μειωθεί η διάρκεια ζωής του και να προκληθεί μόνιμη υποβάθμιση της συσκευής. (Li et al., 2014)

Εντός του θερμοκηπίου, εάν οι συνθήκες περιβάλλοντος είναι ακραίες, για παράδειγμα έχουμε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, τότε τα φωτιστικά LED (ιδίως των μπλε και κόκκινων αποχρώσεων), χάνουν την απόδοση των χρωμάτων τους και η ένταση του φωτός μειώνεται σημαντικά. (Davis et al., 2018)

Επίσης, όταν στην καλλιέργεια χρησιμοποιείται αποκλειστικά μία συσκευή LED, τότε παρατηρείται ετερογένεια στα μήκη κύματος, με την ένταση του φωτός να υφίσταται μείωση άνω του 60%. Αυτό οδηγεί σε μειωμένους ρυθμούς ανάπτυξης και διαφορετική μορφολογία των φυτών που καλλιεργούνται αποκλειστικά με μία μόνο συσκευή, σε σχέση με τα φυτά που καλλιεργούνται με πολύ περισσότερα μέσα φωτισμού. Ο συνδυασμός πολλών φωτιστικών LED, δημιουργεί ελεγχόμενο περιβάλλον στη φυτική παραγωγή. (Wallace, Both, 2016)

Είναι σημαντικό να ελέγχεται η απόσταση που έχουν μεταξύ τους οι συσκευές, η απόσταση των κυρίων φωτιστικών στην οροφή του θερμοκηπίου και κυρίως η απόσταση των φωτιστικών από τα φυτά. (Hogewoning et al., 2010b) Πολλές φορές, γίνεται το λάθος να τοποθετούνται τα φωτιστικά πολύ κοντά στα φυτά, με σκοπό την αύξηση της έντασης φωτός που λαμβάνει το φυτό. Αυτό, όμως, έχει ως αποτέλεσμα την ανομοιομορφία του φωτός και τελικά τη μείωση της έντασης. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν τα φωτιστικά εκπέμπουν σε διάφορα μήκη κύματος, τότε τα φυτά που είναι τοποθετημένα σε κοντινή απόσταση λαμβάνουν διαφορετική αναλογία μήκους κύματος του κόκκινου και μπλε φάσματος φωτός. Κάποια φωτιστικά ακατάλληλα για τοποθέτηση σε κοντινή απόσταση από τα φυτά είναι τα LED bar type ή strip. Αυτά εκπέμπουν σε μικτά μήκη κύματος κι αυτό οφείλεται στη γραμμική σχεδίαση των διόδων φωτός. Στα φωτιστικά αυτά, η αναλογία κόκκινου και μπλε φωτός που εκπέμπεται από τις διόδους είναι 3 προς 1. (Hogewoning et al., 2010)

Επίσης, σε μια καλλιέργεια θερμοκηπίου, εάν κάποιο εξάρτημα του φωτιστικού LED έχει μικρή διάρκεια ζωής ή υποστεί ζημιά και δεν μπορεί να αντικατασταθεί, τότε θα πρέπει να αντικατασταθεί ολόκληρο το φωτιστικό, με σημαντικά κόστη για τον προϋπολογισμό του εγχειρήματος. (Casamayor et al., 2015) Για παράδειγμα, γνωρίζουμε ότι ένα φωτιστικό LED αποτελείται από δεκάδες ή εκατοντάδες μικρότερες λάμπες. Εάν, σε κάποια λάμπα, γίνει μια μεταβολή στο εκπεμπόμενο μήκος κύματος ή φάσμα, τότε επέρχεται η αστοχία του φωτισμού και θα πρέπει να αντικατασταθεί ολόκληρη η συσκευή. (Pecht et al., 2014) Γενικά, η διάρκεια ζωής των επιμέρους εξαρτημάτων του φωτιστικού είναι μεν πρόβλημα, αλλά δεν έχει ιδιαίτερη σημασία μπροστά στη διάρκεια ζωής ολόκληρης της συσκευής. (Casamayor et al., 2015)

Θα πρέπει η απόδοση των φωτιστικών να παρακολουθείται διαρκώς, γιατί τα θερμικά φορτία που μπορεί να παραχθούν, πιθανόν να οδηγήσουν και στην εμφάνιση κάποιας επιβλαβούς ακτινοβολίας. Απαιτείται από τον χρήστη να δαπανήσει χρόνο ώστε να μπορεί να παρακολουθεί κάθε μεταβολή του θερμικού φορτίου έγκαιρα. (McCartney, Lefsrud, 2018) Η ακτινοβολία αυτή, η οποία τα τελευταία χρόνια αυξάνεται συστηματικά στη

βιομηχανία του φωτισμού, οδηγεί σε ανησυχία, για την υγεία των ματιών των χρηστών των LED. (Lau, 2013) Συχνά παρατηρείται το φαινόμενο, σε ένα κλειστό χώρο, όπως είναι το θερμοκήπιο, με μοναδική πηγή φωτός τα φωτιστικά LED, να παραμελείται η υγεία του παραγωγού ή των εργατών της καλλιέργειας, γιατί δίνεται έμφαση κυρίως στη μελέτη των φυτών. (Takao, 2016) Γι' αυτό, είναι αναγκαίο, οι κατασκευαστές των φωτιστικών να παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για τη σύνθεση της ακτινοβολίας και τον μέγιστο χρόνο έκθεσης του ατόμου στο φως. (Both et al., 2017)

Μειονέκτημα αποτελεί και το γεγονός ότι, κατά τη διάρκεια της χρήσης, τα LED μπορεί να απελευθερώσουν απόβλητα όπως είναι οι μεγάλες ποσότητες χαλκού, σιδήρου, αλουμινίου, αντιμονίου, χρυσού, φωσφόρου, αργύρου, μόλυβδου και ψευδάργυρου. (Kumar et al., 2019)

Επίσης, κάποιες φορές, με τη χρήση μονοχρωματικών LED, τα οποία εκπέμπουν σε συγκεκριμένα μήκη κύματος που βρίσκονται στην περιοχή της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR), τα αποτελέσματα στην ανάπτυξη των φυτών είναι απροσδιόριστα και οι επιπτώσεις άγνωστες. Αυτή η περίπτωση είναι υπό διερεύνηση σε μελλοντικές μελέτες. (Mickens et al., 2019)

Θα πρέπει, επίσης, να σημειωθεί πως η πολυπλοκότητα της τεχνολογίας των LED, με όλα τα μηχανήματα και εργαλεία που διαθέτει και πρέπει να χρησιμοποιηθούν, απαιτεί από τον χρήστη γνώσεις, που θα πρέπει να έχει αφομοιώσει πριν την εγκατάσταση και εφαρμογή των φωτιστικών. Καταρχάς, θα πρέπει ο χρήστης να αντιλαμβάνεται τα μέγιστα και ελάχιστα όρια που απαιτούνται στα μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται, με αποτέλεσμα την επίτευξη της φυσιολογικής ανάπτυξης των φυτών. Επίσης, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των λαμπτήρων, ο χρήστης θα πρέπει να ελέγχει τα μηχανήματα, να τα συντηρεί και να σχεδιάζει λύσεις για προβλήματα που πιθανόν να προκύψουν. Απαιτείται λοιπόν, χρόνος από τον παραγωγό, ο οποίος χρόνος, θα μπορούσε να αφιερώνεται στην φροντίδα των φυτών. (Wu et al., 2020) Επίσης, θα πρέπει να γνωρίζει τις αρνητικές επιπτώσεις της τεχνολογίας αυτής. (Nelson, Bugbee, 2014)

5. Η επίδραση του φωτός στην ανάπτυξη των φυτών

Η επίδραση του φωτός στην ανάπτυξη των φυτών υπάρχει και είναι σημαντική. Η επίδραση παρατηρείται στην ανάπτυξη και σε διάφορα μορφολογικά χαρακτηριστικά των φυτών, όπως είναι το φύλλωμα, το μήκος των βλαστών, το ριζικό σύστημα των φυτών, το ύψος και το νωπό και ξηρό βάρος των φυτών. Εξετάζεται κι η επίδραση σε διάφορες φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών, όπως στον φθορισμό της χλωροφύλλης, στη φωτοσυνθετική απόδοση, στο δυναμικό ανάπτυξης των ριζών και στην αντιοξειδωτική ικανότητα των φυτών. Σημαντική είναι και η επίδραση του φωτός στον δευτερογενή μεταβολισμό των φυτών, δηλαδή στην περιεκτικότητα σε φυτοχημικές ενώσεις, όπως οι ολικές και απλές φαινολικές ενώσεις, τα φλαβονοειδή, οι ανθοκυανίνες, οι χλωροφύλλες a,b και τα καροτενοειδή.

Στον **Πίνακα 2** αναφέρονται συνοπτικά τα φυτικά χαρακτηριστικά και οι παράμετροι, στις οποίες επιδρά ο τεχνητός φωτισμός και εξετάζονται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Πίνακας 2: Συνοπτική περιγραφή των χαρακτηριστικών των φυτών που επηρεάζονται από τον τεχνητό φωτισμό

Χαρακτηριστικά Φυτών		
Μορφολογικά	Φυσιολογικά	Φυτοχημικά
Επιφάνεια φυλλώματος Αριθμός φύλλων Χρώμα φύλλων	Φθορισμός χλωροφύλλης- Φωτοσυνθετική απόδοση	Ολικές φαινολικές ενώσεις
Μήκος ριζών Βάρος ριζών		Απλές φαινολικές ενώσεις
Ύψος φυτού Ύψος βλαστών	Δυναμικό ανάπτυξης των ριζών	Φλαβονοειδή
Νωπό και ξηρό βάρος φύλλων, βλαστών και ριζών	Αντιοξειδωτική ικανότητα	Ανθοκυανίνες
Λόγος ρίζας/βλαστού (R/S)		Χλωροφύλλες a,b
Ανθοφορία		Καροτενοειδή

5.1 Η επίδραση του φωτός στην ανάπτυξη και στα μορφολογικά χαρακτηριστικά των φυτών

Σε γενικές γραμμές, οι περιοχές του μπλε και του κόκκινου φωτός είναι αυτές, όπου τα φυτά παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη απόκριση και επιδρούν περισσότερο στην ανάπτυξή τους.

Η ύπαρξη μπλε φωτός (400-500nm) είναι αυτή που επηρεάζει τις αντιδράσεις της φωτομορφογένεσης και τελικά τον σχηματισμό των μορφολογικών χαρακτηριστικών των φυτών. (de Carbonnel et al., 1991) Μερικά από αυτά είναι οι ενδογενείς ρυθμοί ανάπτυξης, ο προσανατολισμός των οργάνων, η ανάπτυξη του βλαστού και η αύξηση των στομάτων του φυτού. Μελέτες δείχνουν πως απαιτείται χρήση της μπλε ακτινοβολίας για να λειτουργήσει σωστά και ο φωτοσυνθετικός μηχανισμός. (Hogewoning et al., 2010)

Από παρατηρήσεις και σχετικά πειράματα έχει διαπιστωθεί ότι το ορατό κόκκινο φως (625-700nm) δημιουργεί φυτά μικρότερα σε ύψος, με σκούρα πράσινα φύλλα και έντονη τάση για ανάπτυξη πλάγιων βλαστών.

Αντίθετα, όταν στην ακτινοβολία που δέχεται ένας φυτικός ιστός κυριαρχεί το μακρινό ερυθρό (FR) φως (700-780nm), το μήκος των μεσογονάτιων διαστημάτων και των μίσχων των φύλλων αυξάνεται, ενώ η ένταση των χρωμάτων στα άνθη και στα φύλλα και ο αριθμός των σχηματιζόμενων πλάγιων βλαστών μειώνονται.

Σε μήκη κύματος από 780-880nm, στην περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας ασκείται θετική επίδραση στην ανάπτυξη των φυτών, δεδομένου ότι επηρεάζει συγκεκριμένες φυσιολογικές λειτουργίες και στάδια ανάπτυξής τους, όπως είναι μεταξύ άλλων, το φύτευμα των σπόρων, ο φωτοτροπισμός, η άνθιση κ.α.

Η υπέρυθρη ακτινοβολία υψηλότερου μήκους κύματος από 880nm, βιολογικά δρα κυρίως ως θερμική ενέργεια, προκαλώντας αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα, του εδάφους, των φυτών και γενικά του περιβάλλοντος. (Σάββας, 2016)

5.1.1 Η επίδραση του τεχνητού φωτισμού LED στην ανάπτυξη και στα μορφολογικά χαρακτηριστικά των φυτών

Η χρήση των LED, όσον αφορά την ανάπτυξη των φυτών, δίνει τη δυνατότητα να βελτιστοποιηθούν ο φθορισμός της χλωροφύλλης, η φωτοσύνθεση, η πρόσληψη θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά και τελικά η φωτομορφογένεση. Τα μέγιστα αποτελέσματα στη φωτοσύνθεση επιτυγχάνονται όταν τα φυτά αναπτύσσονται κάτω από το ηλιακό φως ευρέος φάσματος με συμπληρωματικό LED φως, το οποίο διαθέτει ποικίλα φάσματα φωτός. (Park, Runkle, 2018)

Οι διάφορες φασματικές εκπομπές και μήκη κύματος των φωτιστικών LED επιδρούν διαφορετικά στα φυτά.

Καταρχάς, όταν η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα φωτιστικά LED, κυμαίνεται σε μήκη κύματος κάτω των 300nm (UV-A ακτινοβολία) μπορεί να είναι επιβλαβής για τους χημικούς δεσμούς των μορίων κατά τη φωτοσύνθεση. Αξίζει να αναφερθεί ότι, τα φυτά που καλλιεργούνται σε θαλάμους (θερμοκήπια) τείνουν να απορροφούν μεγαλύτερο ποσοστό φωτονίων UV-A, σε σχέση με τα φυτά τα οποία καλλιεργούνται σε εξωτερικούς χώρους (π.χ. αγρός). (Hart J.W., 1998)

Το ιώδες ή βιολετί LED φως (400-430nm) δε βελτιώνει σημαντικά την παραγωγικότητα των φυτών, όπως τη βελτιώνουν τα φωτιστικά ευρέος φάσματος. (Leonardos et al., 2019)

Η απόχρωση του μπλε φωτός LED (430-500nm) επηρεάζει τη βλάστηση και το άνοιγμα των στομάτων των φυτών. Αντίθετα, η απώλεια του μπλε φωτός μπορεί να προκαλέσει μειωμένη στοματική αγωγιμότητα, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ελαττωμένο ρυθμό διαπνοής και αύξηση της θερμοκρασίας των φύλλων. (Mitchell, 2015) Σύμφωνα με έρευνα που έχει γίνει για την αποτελεσματικότητα του τεχνητού φωτισμού, η απόχρωση του μπλε φωτός (430-500nm) επηρεάζει τα τελικά μορφολογικά χαρακτηριστικά σε καλλιέργειες μαρουλιού και πιπεριάς. Εάν ο χρήστης αυξήσει την εκπομπή μπλε φωτονίων, τότε καταφέρνει να μειώσει τον βλαστό (στέλεχος) του μαρουλιού και της πιπεριάς και να αυξήσει το πάχος του φυλλώματος. (Schuerger et al., 1997a)

Τα πράσινα LED με μήκος κύματος στα 520nm (± 10 nm), εξασφαλίζουν μεγαλύτερη παραγωγή βιομάζας με ελεγχόμενη ανθοφορία όταν χρησιμοποιούνται μόνα τους ή ως συμπληρωματικά. (Kaiser et al., 2019) Όταν χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικά, τότε έχουμε βελτίωση στο χρώμα των φυτών και στα ποιοτικά τους χαρακτηριστικά. Όμως, σε μια περίπτωση έρευνας που διεξήχθη, όπου έγινε χρήση φωτιστικών με πράσινες αποχρώσεις με μήκος κύματος φωτός να κυμαίνεται μεταξύ των 520-590nm, δεν κατέστη δυνατό να προσδιοριστούν οι ακριβείς επιπτώσεις τους στα φυτά. Σίγουρα, όταν κάποιος κάνει χρήση μεταξύ αυτών των μηκών κύματος, θα πρέπει να μπορεί να βρει λύση για να αυξήσει τα επίπεδα της έντασης του φωτός που εκπέμπεται, όπου απαιτείται. (Lafont et al., 2012)

Το κίτρινο φως LED που κυμαίνεται στην περιοχή μεταξύ των 580-600nm, είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη των φυτών στις περισσότερες καλλιέργειες. (Dougher et al., 2001)

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου φωτιστικά LED, όταν εκπέμπουν πορτοκαλί φως (600-630nm), αποδίδουν καλύτερα στην παραγωγή βιομάζας των φυτών, από τον συνδυασμό του μπλε και κόκκινου φωτός. (Martineau et al., 2012)

Το κόκκινο LED φως (630-700nm) θεωρητικά προκαλεί μεγάλους ρυθμούς φωτοσύνθεσης με υψηλή παραγωγή βιομάζας. (Leonardos et al., 2019) Επιδρά στα θρεπτικά συστατικά των φύλλων, την ανάπτυξη των βλαστών και τη σύνθεση της χλωροφύλλης. (Mitchell, 2015)

Μελέτες των τελευταίων ετών έδειξαν πως στο μεγαλύτερο ποσοστό φυτών, η ανάπτυξη των φύλλων και οι ρυθμοί της φωτοσύνθεσης αυξάνονται περισσότερο με λευκά φώτα ευρέος φάσματος, παρά με το μπλε και κόκκινο φως. Τα λευκά LED είναι αυτά που χρησιμοποιούνται περισσότερο στην αναπαραγωγή φυτών και θεωρούνται ευρέος φάσματος. (Metallo et al., 2018) Στην πραγματικότητα, όμως, στα λευκά LED, τα φάσματα που προκαλούνται από διαφορετικά είδη χρωμάτων, δηλαδή του λευκού ή του μπλε φωτός με επικάλυψη από φώσφορο, διαφοροποιούνται μεταξύ τους. (Swan, Bugbee, 2017) Γενικά, θα πρέπει να γίνουν έρευνες στο μέλλον, όπου θα αναλύονται τα διάφορα φάσματα των λευκών LED και να μην ομαδοποιούνται όλα ως «λευκά». (McCree, 1972b)

5.1.1.1 Η επίδραση του τεχνητού φωτισμού LED στο φύλλωμα των φυτών

Το πιο γνωστό σύστημα μέτρησης φωτός για τα φυτά είναι το κβαντικό σύστημα μέτρησης φωτονίων. Βάση αυτού του συστήματος, προκύπτει πως το σύνολο των

φωτονίων που συγκρούονται στο φύλλο ενός φυτού ανά δευτερόλεπτο, επηρεάζει άμεσα τη φωτοσύνθεση και πιθανότατα σχετίζεται με το μέγεθος της χημικής αλλαγής στα μόρια του φυτού. Το κβαντικό σύστημα δεν είναι πάντα αποδεκτό, για τη μέτρηση του φωτός στα φυτά, για αυτό υπάρχουν και τα φωτομετρικά και ραδιομετρικά συστήματα μέτρησης φωτός στα φυτά.

Ειδικότερα, όσον αφορά τη μέτρηση του φωτός στα φύλλα των φυτών, οι διάφοροι κατασκευαστές, ως φωτομετρικές μονάδες μέτρησης δίνουν τα lumens (lm) για να μετρούν τη συνολική φωτεινή έξοδο και τα millicandela (mcd) για τον υπολογισμό της φωτεινής έντασης. Το πρόβλημα με αυτές τις μονάδες μέτρησης είναι πως χρειάζονται συγκεκριμένοι συντελεστές μετατροπής για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο κβαντικό ή στο ραδιομετρικό σύστημα κι αυτή είναι μια κουραστική διαδικασία, η οποία μπορεί να καταλήξει σε λάθη.

Στα φύλλα των φυτών, η σύγκρουση της ακτινοβολίας δεν είναι γραμμική κι αυτό οφείλεται στην ύπαρξη μεγάλης ποικιλίας φωτοϋποδοχέων στο εσωτερικό τους. (Shinomura et al., 2000)

5.1.1.2 Η επίδραση του τεχνητού φωτισμού LED στο ύψος των φυτών

Ο φωτισμός LED όταν λειτουργεί συμπληρωματικά στο φως του ήλιου, μπορεί να ελέγξει το ύψος τους φυτού. Για να έχει θετική επίδραση στο ύψος των φυτών, θα πρέπει να ελέγχεται και να προσαρμόζεται λεπτομερώς στις ανάγκες των φυτών. Σίγουρα είναι καλύτερος παράγοντας στην αύξηση του ύψους των φυτών σε σχέση με την εφαρμογή χημικών μέσων. (Bian et al., 2017) Επίσης, με τη χρήση των LED φωτιστικών παρουσιάζεται μεγαλύτερη αύξηση στο ύψος των φυτών σε σχέση με λοιπά είδη φωτιστικών. (Davis et al., 1991)

5.1.1.3 Η επίδραση του τεχνητού φωτισμού LED στο νωπό βάρος των φυτών

Όσον αφορά το νωπό βάρος των φυτών, η βιβλιογραφία δείχνει πως τα επίπεδα στα οποία κυμαίνεται, στις διάφορες αναλογίες εκπομπής LED φωτός, ποικίλει ανάλογα με το είδος του φυτού που μελετάται. Όπως θα παρατηρηθεί και σε επόμενη ενότητα, τα διάφορα είδη φυτών, όπως τα δένδρα, τα καλλωπιστικά φυτά, τα κηπευτικά και λοιπά είδη, σημειώνουν διαφορετικές τιμές νωπού βάρους στις διάφορες αναλογίες φωτός. Επίσης, οι διαφορετικές τιμές συναντώνται και στα διάφορα επιμέρους φυτά, τα οποία ανήκουν σε κοινές ομάδες φυτών. (Μπαντής, 2015)

5.2 Η επίδραση του φωτός στις φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών

5.2.1 Φως και φωτοϋποδοχείς

Τα φυτά είναι καθηλωμένα στο έδαφος και βρίσκονται σε διαρκή ανταγωνισμό με άλλα φυτά για φως, χώρο, νερό και θρεπτικά συστατικά. Ο ανταγωνισμός για το φως

προκαλεί μορφολογικές και αναπτυξιακές μεταβολές. Τα φυτά έχουν την ικανότητα να αντιλαμβάνονται ακόμη και μικρές αλλαγές στο φάσμα, στην ένταση και στην κατεύθυνση του φωτός. Οι φωτοϋποδοχείς ή φωτοδέκτες λαμβάνουν αυτά τα φωτεινά σήματα αποκτώντας πληροφορίες που χρησιμοποιούνται για να ρυθμίσουν την ανάπτυξή τους. Τρεις κύριες ομάδες φωτοϋποδοχέων έχουν αναγνωριστεί και είναι οι εξής: το φυτόχρωμα που αντιλαμβάνεται το ερυθρό (R) και υπέρυθρο (FR), τα κρυπτοχρώματα που αντιλαμβάνονται το μπλε (B) και το υπεριώδες-A (UV-A) και οι φωτοτροπίνες που αντιλαμβάνονται το μπλε (B). (Σχήμα 3) (Μπαντής, 2015)

Φυτόχρωμα:

Το φυτόχρωμα αποτελεί τον κυριότερο πρωτογενή φωτοϋποδοχέα στα ανώτερα φυτά. Έχουν χαρακτηριστεί πέντε τύποι φυτοχρώματος (Phy A, B, C, D, E), αλλά οι περισσότεροι μελετημένοι είναι το PhyA και PhyB. Το φυτόχρωμα βρίσκεται σε δύο διαφορετικές λειτουργικές μορφές στα φυτά, το ανενεργό φυτόχρωμα (P_r) και το ενεργό φυτόχρωμα (P_{fr}). Η απορρόφηση ερυθράς κυρίως ακτινοβολίας (660nm) από το χρωμοφόρο του P_r (phytochrome red) προκαλεί στερεοχημική αλλαγή της δομής του χρωμοφόρου από cis σε all-trans μορφή P_{fr} (phytochrome far-red). Η στερεοχημική αυτή αλλαγή επιφέρει όπως είναι φυσικό διαφοροποιήσεις και στο πρωτεϊνικό σκέλος του φωτοϋποδοχέα, όπως αυτό παρουσιάζεται στο δομικό μοντέλο του P_{fr} . Η μορφή αυτή του φυτοχρώματος σηματοδοτεί την έναρξη μιας φωτορυθμιζόμενης απόκρισης. Φωτισμός του P_{fr} με υπέρυθρη ακτινοβολία (730nm) επαναφέρει το χρωμοφόρο του φυτοχρώματος από την all-trans μορφή στην αρχική cis με αποτέλεσμα την επαναφορά και του πρωτεϊνικού σκέλους του φυτοχρώματος στην αρχική του ανενεργή μορφή P_r . Η φωτομετατροπή του P_r σε P_{fr} αλλά και η επαναφορά του P_{fr} στην P_r μορφή, περιλαμβάνει μια σειρά ενδιάμεσες μη σταθερές φυτοχρωμικές μορφές, που χαρακτηρίζονται σύμφωνα με τους Eilfeld και Rüdiger (1985), βάση των φασματοφωτομετρικών τους χαρακτηριστικών. (Pinho et al., 2005)

Επομένως, η αναλογία ερυθρού προς μακρινό ερυθρό φως (R:FR) που απορροφάται από τα φυτά καθορίζει τον λόγο μεταξύ (P_r) και (P_{fr}) μορφών του φυτοχρώματος και αυτό είναι καθοριστικό για τη φωτομορφογένεση των φυτών. Όταν το φως περνά μέσα από τα φύλλα των φυτών, απορροφάται εκλεκτικά κυρίως το ερυθρό φως. Κατά συνέπεια, η αναλογία ερυθρού προς μακρινό ερυθρό φως (R:FR) μειώνεται σημαντικά, καθώς η ηλιακή ακτινοβολία διαπερνά τα ανώτερα φύλλα και φτάνει στα κατώτερα. Η μεταβολή αυτή στο λόγο R:FR εντοπίζεται από το φυτόχρωμα και έχουμε διάφορες μεταβολές, όπως ότι τα χαμηλότερα τμήματα των φυτών παρουσιάζουν μεγαλύτερα μεσογονάτια διαστήματα και πιο ανοιχτοπράσινα φύλλα, ενώ δεν σχηματίζουν πλάγιους βλαστούς. Την ίδια εικόνα μπορεί να παρουσιάσουν όμως και ολόκληρα τα φυτά, αν σκιάζονται σε σημαντικό βαθμό από άλλα γειτονικά, λόγω υπερβολικά πυκνής φύτευσης.

Επίσης, το φυτόχρωμα αποτελεί τη χρωστική, μέσω της οποίας τα φυτά αναγνωρίζουν και αντιδρούν στη φωτοπερίοδο, δηλαδή τον χρόνο ύπαρξης του φωτός

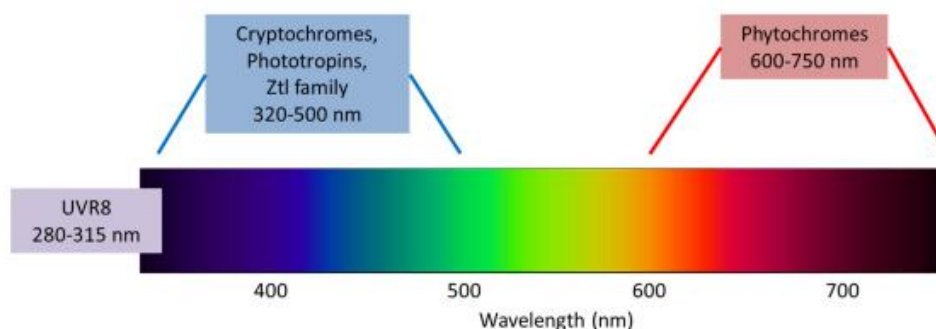
ανεξάρτητα από την έντασή του. Η φωτοπερίοδος, με τη σειρά της, επηρεάζει σημαντικές βιολογικές λειτουργίες των φυτών, όπως είναι η άνθιση, ο σχηματισμός βολβών και κονδύλων, ο λήθαργος των οφθαλμών, το φύτρωμα των σπόρων κ.α. (Σάββας, 2016)

Κρυπτοχρώματα:

Το 1993 αναγνωρίστηκε και απομονώθηκε από την *Arabidopsis* το πρώτο γονίδιο που κωδικοποιεί πρωτεΐνη με δράση υποδοχέα του μπλε φωτός, το HY4. Το γονίδιο αυτό αργότερα ονομάστηκε κρυπτόχρωμα. Τα περισσότερα κρυπτοχρώματα είναι οι δέκτες της μπλε και της UV-A ακτινοβολίας που προσπίπτει στα φυτά. Έχει βρεθεί ότι τα κρυπτοχρώματα συμμετέχουν σε μια σειρά από διεργασίες και σε αντιδράσεις φωτομορφογένεσης. Αυτές είναι η κυτταρική επιμήκυνση, η έκφραση γονιδίων, ο φωτοτροπισμός των φυτών, η αναστολή της επιμήκυνσης των βλαστών, η αύξηση των φύλλων και η φωτοπεριοδική άνθιση. Τα κρυπτοχρώματα δρουν σε συνεργασία με το φυτόχρωμα, το οποίο απορροφά την ερυθρή και υπέρυθη ακτινοβολία. (Schuerger et al., 1997a)

Φωτοτροπίνες:

Οι πιο γνωστές φωτοτροπίνες είναι οι χλωροφύλλες, τα καροτενοειδή και οι φλαβίνες. (Heraut-Bron et al., 2001) Τα καροτενοειδή και οι φλαβίνες είναι φωτοϋποδοχείς του μπλε φωτός, γι' αυτό κι απορροφούν ιδιαίτερα στην περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας, δηλαδή στα 370nm περίπου. (Hart J.W., 1998) Οι φωτοτροπίνες ρυθμίζουν την φωτοεπαγόμενη κίνηση των φυτών, δηλαδή την κίνηση των χλωροπλαστών, τον φωτοτροπισμό, την αύξηση των φύλλων και το άνοιγμα των στομάτων. (Μπαντής, 2015)



Σχήμα 3: Οι βασικοί φωτοϋποδοχείς των φυτών και οι περιοχές ακτινοβολίας όπου απορροφούν (Μπαντής, 2020)

5.2.2 Ο φθορισμός της χλωροφύλλης - Φωτοσυνθετική απόδοση του φωτοσυστήματος II (PSII)

Η φωτοσύνθεση στηρίζεται στη δέσμευση του φωτός από τους φωτοϋποδοχείς των θυλακοειδών μεμβρανών των χλωροπλαστών, που βρίσκονται κυρίως στο μεσόφυλλο του φυλλώματος. (Pinho et al., 2005) Η χλωροφύλλη α (chl a) είναι από τα βασικά

μόρια που απορροφούν την ηλιακή ενέργεια. Η ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από τα φύλλα έχει τρεις πιθανές οδούς. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη φωτοσύνθεση, μπορεί να αποβληθεί με τη μορφή θερμότητας, ή μπορεί να επανεκπεμφθεί ως φθορίζουσα ακτινοβολία (φθορισμός χλωροφύλλης). Όταν μία από τις προαναφερόμενες οδούς αυξηθεί ελαττώνονται αντιστοίχως οι άλλες δύο. (Maxwell et al, 2000)

Η μέτρηση του φθορισμού χλωροφύλλης είναι μία μη καταστροφική μέθοδος υπολογισμού της φωτοσυνθετικής απόδοσης των φυτών. Το μεγαλύτερο ποσοστό του φθορισμού χλωροφύλλης προέρχεται από το φωτοσύστημα II (PSII). Η ευαισθησία του PSII σε βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες καταπόνησης καθιστά τη μέτρηση του φθορισμού χλωροφύλλης μία σημαντική τεχνική για την κατανόηση των φυσιολογικών παραμέτρων των φυτών, καθώς και για τη χρήση του ως δείκτη της αντίδρασης των φυτών σε περιβαλλοντικές αλλαγές και σε καταπονήσεις. (Bjorkman, Demmig, 1987)

Η αναλογία του μεταβλητού φθορισμού προς τον μέγιστο φθορισμό χλωροφύλλης ($\frac{F_V}{F_M}$), που εκπέμπεται από το φωτοσύστημα II (PSII), λειτουργεί ως ο ποσοτικός δείκτης στη μέτρηση της αποτελεσματικότητας της φωτοχημείας του PSII. (Kitajima, Butler, 1975) Οι τιμές του λόγου ($\frac{F_V}{F_M}$) μπορούν να χρησιμοποιηθούν κι ως δείκτες μέτρησης της φωτοσυνθετικής απόδοσης των φυτών. Οι χαμηλές τιμές του λόγου ($\frac{F_V}{F_M}$) μπορεί να δείχνουν πιθανή φωτοαναστολή, στην περίπτωση που τα φυτά εκτίθενται σε περιβάλλοντα με δυσμενείς συνθήκες ανάπτυξης. (Baker, Rosenqvist, 2004)

5.2.3 Εκτίμηση του δυναμικού ανάπτυξης ριζών

Για να θεωρείται το ριζικό σύστημα των φυτών επαρκώς σχηματισμένο, θα πρέπει να είναι σε θέση να βοηθάει τα ίδια τα φυτά στην αποφυγή υδάτινων καταπονήσεων. Η μελέτη της λειτουργίας των ριζών των φυτών είναι εξαιρετικά σημαντική, μιας και αντλούνται πληροφορίες για τον βαθμό στον οποίο απορροφούν το νερό και τις θρεπτικές ουσίες που αναλογούν στην ανάπτυξη του φυτού. (Μπαντής, 2015)

Για την πρόβλεψη της ανάπτυξης των ριζών των φυτών χρησιμοποιείται η μέθοδος εκτίμησης της δυναμικότητας ανάπτυξης ριζών RGP (root growth potential). Το RGP ορίζεται ως η ικανότητα των φυταρίων να αυξάνουν το μέγεθος του ριζικού τους συστήματος μέσω του σχηματισμού νέων ριζών αλλά και της επιμήκυνσης υπαρχουσών ριζών. Η μέθοδος RGP χρησιμοποιείται και ως δείκτης της μεταφυτευτικής επίδοσης των φυτών με τον οποίο καθίσταται δυνατή η πρόβλεψη της επιτυχούς εγκατάστασης. (Mattsson, 1996)

Βέβαια, η μεγιστοποίηση του ποσοστού επιβίωσης των μεταφυτευμένων φυτών εξαρτάται και από τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των φυτών. (Radoglou, 2001) Τα φυτά τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλά ποιοτικά χαρακτηριστικά, μπορούν να ανταπεξέλθουν ακόμη και στις δύσκολες συνθήκες που επικρατούν στο εξωτερικό περιβάλλον της καλλιέργειας. Σε περίπτωση που τα φυτά δε διαθέτουν υψηλά ποιοτικά χαρακτηριστικά, ακόμη και σε καλλιέργεια με ευνοϊκές συνθήκες περιβάλλοντος, δε θα μπορέσουν να

παράγουν τα αναμενόμενα αποτελέσματα ανάπτυξης, αλλά και μεταφύτευσης. (Radoglou et al., 2009) Εκτός από τα ποιοτικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά των φυτών, οι παράμετροι της μεθόδου RGP, εξαρτώνται κι από το είδος τους φυτού. (Kostopoulou et al., 2010)

5.2.4 Η αντιοξειδωτική ικανότητα των φυτών

Τα φυτά χρησιμοποιούν το οξυγόνο για να μπορούν να δεσμεύουν ηλεκτρόνια. Παράλληλα όμως παράγεται και ενεργή μορφή οξυγόνου (ROS), η οποία είναι τοξική για τα φυτά. Όταν η παραγωγή ενεργής μορφής οξυγόνου (ROS), είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από τον βαθμό τον οποίο το φυτό μπορεί να αποσβένει με την αντιοξειδωτική του δράση, τότε δημιουργείται οξειδωτική καταπόνηση στα φυτά. Έτσι συμπεραίνουμε, ότι η αντιοξειδωτική ικανότητα των φυτών είναι αρκετά σημαντική για τη σωστή ανάπτυξη των φυτών. (Γαλάτης κ.α., 2003)

5.3 Η επίδραση του φωτός στον δευτερογενή μεταβολισμό των φυτών-περιεκτικότητα των φυτοχημικών ενώσεων

Εκτός από τους πρωτογενείς μεταβολίτες όπως είναι οι υδατάνθρακες, τα αμινοξέα και τα σάκχαρα, τα φυτά συνθέτουν μεγάλο αριθμό χημικών ουσιών που ονομάζονται δευτερογενείς μεταβολίτες και ποικίλουν ανάλογα με την οικογένεια και το είδος τους. (Taiz, Zeiger, 2010)

Οι δευτερογενείς μεταβολίτες προσφέρουν προστασία από μικρόβια και ιούς και είναι σημαντικοί παράγοντες στην παραγωγή συγκεκριμένων αρωμάτων, γεύσεων και χρωμάτων των φυτών.

Η παραγωγή δευτερογενών μεταβολιτών στους φυτικούς ιστούς ρυθμίζεται από την αλληλεπίδραση περιβαλλοντικών, φυσιολογικών, βιοχημικών και γενετικών παραγόντων. Το φως είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για την παραγωγή των δευτερογενών μεταβολιτών.

Οι τρεις κύριες ομάδες δευτερογενών μεταβολιτών είναι οι φαινολικές ενώσεις, τα τερπενοειδή και οι αζωτούχες ενώσεις. Η παραγωγή φαινολικών ενώσεων και τερπενοειδών (κυρίως καροτενοειδών) επηρεάζεται από την απορροφηθείσα από τα φυτά ακτινοβολία. (Γαλάτης κ.α., 2003)

5.3.1 Ολικές και απλές φαινολικές ενώσεις

Οι φαινολικές ενώσεις αποτελούν μία από τις κύριες ομάδες δευτερογενών μεταβολιτών και περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων τα φαινολικά οξέα και τα φλαβονοειδή (Σχήμα 4). Το μόριο των φαινολικών οξέων περιλαμβάνει έναν αρωματικό δακτύλιο με μία καρβοξυλική ομάδα (-COOH) και απορροφά κυρίως ακτινοβολία μήκους κύματος 320nm. Στα φυτά έχουν σημαντικό ρόλο ως κυανές και ερυθρές χρωστικές, ως αντιοξειδωτικά και ως ενώσεις που προστατεύουν από την UV ακτινοβολία. Επίσης

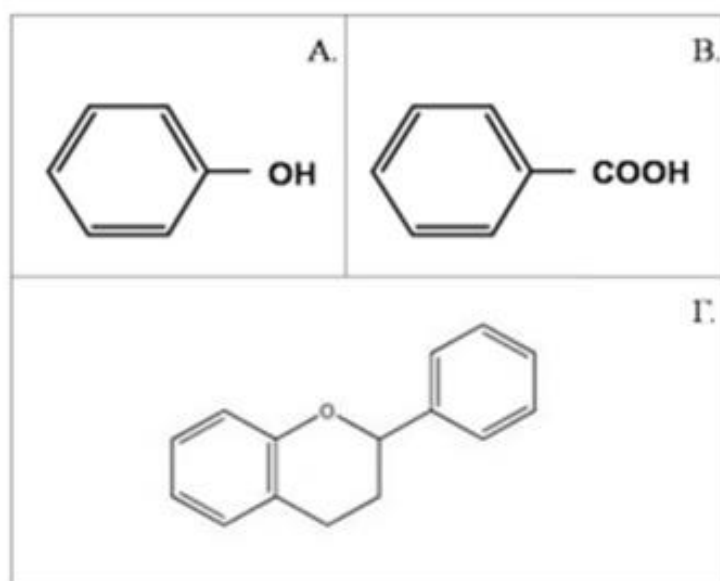
έχουν την ικανότητα να αποσβένουν τις ελεύθερες ρίζες και να προστατεύουν τα φυτά από μύκητες, έντομα και βακτήρια. (Lattanzio et al., 2006)

Είναι μη φωτοσυνθετικές χρωστικές, οι οποίες αποτρέπουν βλάβες που οφείλονται στο φως και διευκολύνουν τη σωστή λειτουργία της φωτοσύνθεσης σε πληθώρα περιβαλλοντικών συνθηκών. (Solovchenko, Merzlyak, 2008)

Η συγκέντρωση αυτών των ενώσεων εξαρτάται από την εποχή και ποικίλει στα διάφορα αυξητικά και αναπτυξιακά στάδια. Επιπροσθέτως, η βιοσύνθεσή τους στους χλωροπλάστες και η συγκέντρωσή τους στα χυμοτόπια ενεργοποιούνται από την έκθεση στο φως. (Kefeli et al., 2003)

Οι φαινολικές ενώσεις διακρίνονται σε δύο είδη, στις ολικές φαινολικές ενώσεις (TPC) και στις απλές φαινολικές ενώσεις (SPC).

Σε έρευνες που γίνονται για τον προσδιορισμό των ολικών φαινολικών ενώσεων (TPC) των εκχυλισμάτων των φυτών, χρησιμοποιείται η χρωματομετρική εφαρμογή Folin-Ciocalteu, και οι μετρήσεις γίνονται με το φασματοφωτόμετρο UV-VIS. (Singleton, Rossi, 1965)

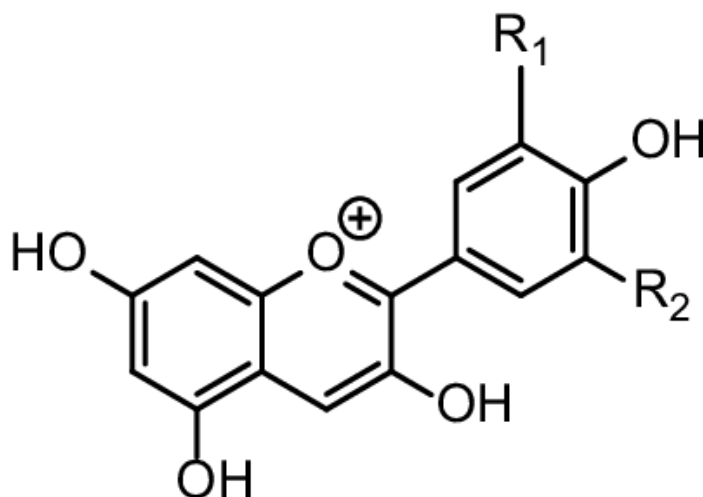


Σχήμα 4: Γενική χημική δομή του μορίου των φαινολικών ενώσεων (Α), φαινολικών οξέων (Β) και флаβονοειδών (Γ) (Μπαντής, 2015)

5.3.2 Φλαβονοειδή και ανθοκυανίνες

Τα φλαβονοειδή, ανήκουν στην οικογένεια των φαινολικών ενώσεων. (Lattanzio et al., 2006) Έχουν τρεις αρωματικούς δακτυλίους και απορροφούν κυρίως ακτινοβολία μήκους κύματος 360nm. (Seigler, 1998) Στα ανώτερα φυτά, τα φλαβονοειδή εντοπίζονται στην εφυμενίδα καθώς και σε επιφανειακούς ιστούς των φύλλων των φυτών, όπως είναι η επιδερμίδα και το μεσόφυλλο. (Solovchenko, Merzlyak, 2008) Ο σημαντικότερος ρόλος τους στα φυτά είναι η αντιμικροβιακή και αντιοξειδωτική τους δράση. (Karamanoli et al., 2011)

Στα φλαβονοειδή ανήκουν κι οι ανθοκυανίνες (Σχήμα 5), οι οποίες συμμετέχουν στον χρωματισμό των ανθέων και των καρπών και συνεισφέρουν στην προσέλκυση εντόμων. Παράλληλα, παρουσιάζουν αντιμικροβιακή δράση και παρέχουν προστασία στα κύτταρα από βλάβες που προκαλούνται από την απορρόφηση της κυανής και UV ακτινοβολίας. (Seigler, 1998)



Σχήμα 5: Γενική χημική δομή του μορίου των ανθοκυανινών

5.3.3 Χλωροφύλλες a,b και καροτενοειδή

Οι διάφορες αναλογίες φωτός στην καλλιέργεια των φυτών, προκαλούν διαφορές στο χρώμα των φύλλων των φυτών. Αυτές οι διαφορές χρώματος δε διακρίνονται πάντα με γυμνό μάτι και οφείλονται στις ποικίλες συγκεντρώσεις των χλωροφυλλών, που είναι γνωστές χρωστικές ουσίες. (Μπαντής, 2020)

Αξίζει να αναφερθεί και το γεγονός, ότι στα φυτά το πράσινο χρώμα των φύλλων βασίζεται στην αδυναμία της χλωροφύλλης να απορροφά από πράσινα φωτόνια. (Lafont et al., 2012)

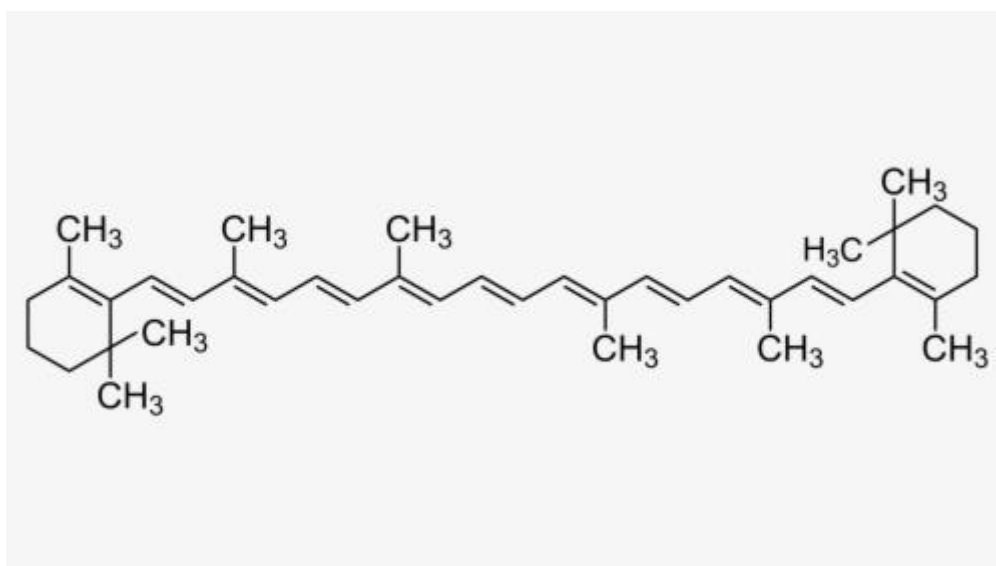
Η χλωροφύλλη απορροφά σε μέγιστο βαθμό στις περιοχές του μπλε και του κόκκινου. Όσον αφορά τις μπλε περιοχές, οι κορυφές απορρόφησης της χλωροφύλλης, εμφανίζονται σε μήκη κύματος που κυμαίνονται μεταξύ των 425-475nm, ενώ στις κόκκινες περιοχές, εμφανίζονται μεταξύ των 625-675nm. Επίσης, μέγιστη απορρόφηση έχουμε με την εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας σε μήκη κύματος μεταξύ των 300-400nm και στις περιοχές με υπέρυθρο χρώμα που κυμαίνονται μεταξύ των 700-800nm. (Hart J.W., 1998) Η χλωροφύλλη a απορροφά ισχυρά φως, το οποίο κυμαίνεται σε μήκος κύματος 660nm. (Pinho et al., 2005)

Τα καροτενοειδή (Σχήμα 6) είναι ένα είδος των τερπενοειδών και ανήκουν στην ομάδα των τετρατερπενίων. Είναι βοηθητικές χρωστικές ουσίες χρώματος πορτοκαλί, κίτρινου ή κόκκινου και εντοπίζονται στους χλωροπλάστες και στους χρωμοπλάστες των φυτών. Τα καροτενοειδή λειτουργούν ως συστήματα περισυλλογής του φωτός. Σε συνεργασία με τη χλωροφύλλη απορροφούν τη φωτεινή ενέργεια και τη μεταφράζουν

σε χημική ενέργεια, η οποία χρησιμοποιείται στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Επιπλέον, συνεισφέρουν στη φωτοσύνθεση συλλέγοντας και μεταφέροντας την φωτεινή ενέργεια στη χλωροφύλλη, σε φασματικές περιοχές ακτινοβολίας όπου η απορρόφηση της χλωροφύλλης είναι μικρή. Έχουν τη δυνατότητα να προστατεύουν τα φυτά από την εκπομπή σε υπερβολικό φως, ελαττώνοντας τις βλάβες στις μεμβράνες. (Davies, 2004)

Τα καροτενοειδή χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις ξανθοφύλλες και τα καροτένια. Οι ξανθοφύλλες ασχολούνται με τον έλεγχο της ποσότητας της ενέργειας που απορροφάται από τα φυτά καθώς και τον περιορισμό σχηματισμού χλωροφύλλης σε τριπλή κατάσταση (^3Chl). Έτσι, δεν παράγεται ενεργή μορφή οξυγόνου (ROS) και επιτυγχάνεται η προστασία της χλωροφύλλης και του κυττάρου από διάφορες οξειδώσεις, με αποτέλεσμα την αύξηση της βιωσιμότητας των φυτών.

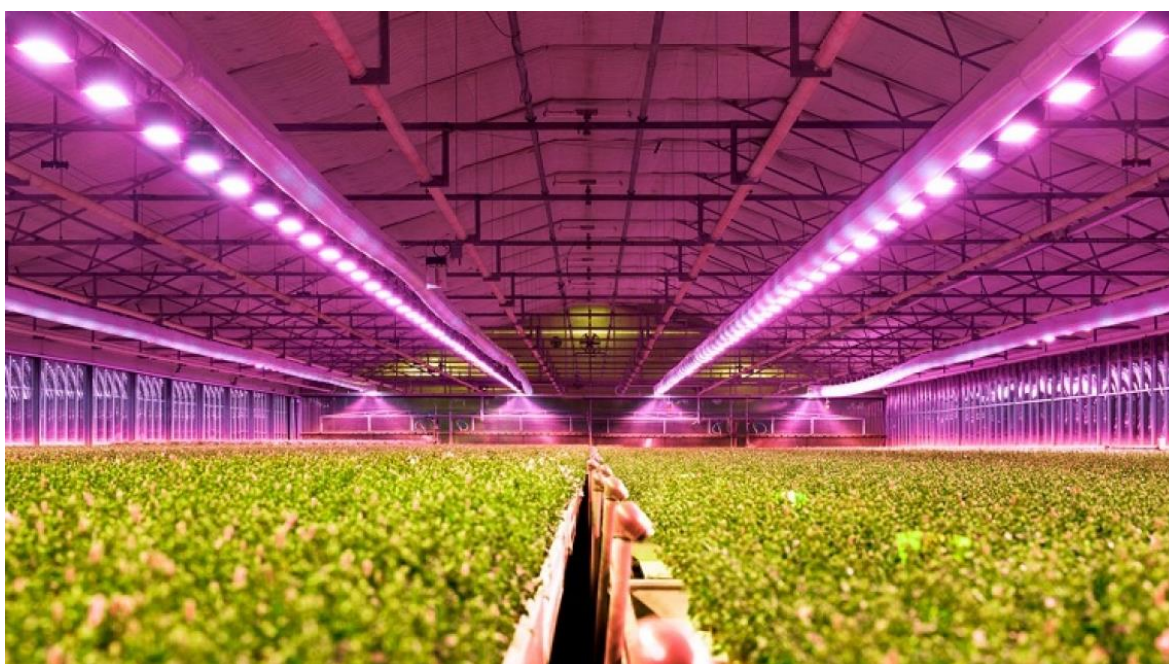
Τα καροτενοειδή παρέχουν προστασία στα φυτά όταν εκτίθενται σε υπερβολικό φωτισμό, μέσω της απελευθέρωσης περίσσειας ενέργειας και της απόσβεσης ελεύθερων ριζών. Η έλλειψη των καροτενοειδών συνεπάγεται επιπτώσεις στα μόρια του φυτού, λόγω της υπερβολικής έκθεσης στο φως. Τα μόρια που επηρεάζονται κατά κύριο λόγο είναι οι πρωτεΐνες, οι μεμβράνες κ.α. (Taiz, Zeiger, 2010)



Σχήμα 6: Χημική δομή του μορίου της β καροτίνης

6. Ανασκόπηση πειραματικών μελετών που αφορούν την επίδραση της εκπομπής του τεχνητού φωτισμού σε διάφορα είδη φυτών

Μεγάλος αριθμός ειδών έχουν μελετηθεί με τη χρήση λαμπτήρων LED και άλλων ειδών τεχνητού φωτισμού. Μεταξύ άλλων έχουν δοκιμαστεί, από τα δένδρα η ροδιά, η κερασιά, η οξιά και η δρυς, από τα αρωματικά φυτά ο βασιλικός και το μελισσόχορτο, από τα κηπευτικά η ντομάτα, το μαρούλι, ο αρακάς, το αγγούρι, το λάχανο και η καρπουζιά, από τα βιομηχανικά φυτά η ελαιοκράμβη με πολυάριθμες δημοσιεύσεις και από τα καλλωπιστικά φυτά το χρυσάνθεμο, η τριανταφυλλιά και η καμπανούλα.



Εικόνα 7: Χρήση φωτισμού LED σε θερμοκήπιο-φυτώριο παραγωγής πολλαπλασιαστικού φυτικού υλικού.

6.1 Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στα Δένδρα

6.1.1 Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στη Ροδιά (*Punica granatum*)

Η ροδιά είναι ένα φυλλοβόλο, αγκαθωτό μικρό δένδρο ή θάμνος, το οποίο κατάγεται από την κεντρική Ασία. Αρχικά καλλιεργήθηκε στην αρχαία Αίγυπτο, έπειτα στην Ελλάδα και με τα χρόνια εξαπλώθηκε σε όλο τον κόσμο.^(Mars, 2000) Ως δένδρο χαρακτηρίζεται από μεγάλη προσαρμοστικότητα γενετικά στις διάφορες ποικιλίες κλιματικών συνθηκών. Ανά τον κόσμο μπορούν να συναντηθούν έως και 500 διαφορετικές ποικιλίες ροδιάς, με τις 50 εξ αυτών να είναι εμπορεύσιμες.^(Texeira da Silva et al., 2013)

Το ύψος της ροδιάς κυμαίνεται μεταξύ των 1,5-5 μέτρων. Τα άνθη της ροδιάς εκπτύσσονται στη μασχάλη των βλαστών μονά, διπλά ή σε ταξιανθία 3-5 ανθέων μαζί. Ο καρπός έχει σφαιρικό σχήμα κι εσωτερικά χωρίζεται σε χώρους με λευκά τοιχώματα, ενώ το εδώδιμο τμήμα του καρπού είναι οι σπόροι. Κάθε καρπός μπορεί να περιέχει από 300-600 σπόρους, ανάλογα με το μέγεθός του. (Stover, Mercure, 2007)

Η κατανάλωση των καρπών της ροδιάς έχει ιδιαίτερα υψηλή θρεπτική αξία και προστατευτικές ιδιότητες έναντι πλήθους ασθενειών. (Fischer et al., 2011) Στα ρόδια υπάρχουν περίπου 153 φυτοχημικές ουσίες, με κύρια ομάδα τις πολυφαινόλες. (Holland et al., 2009)

Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε φυτά ροδιάς έξι εβδομάδων, με τον φωτισμό τους με διάφορες μεταχειρίσεις LED φωτός αλλά και με λαμπτήρες φθορισμού FL, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση στο ύψος των βλαστών και το μήκος των ριζών. Τα φυτά παρουσίασαν αυξημένο νωπό και ξηρό βάρος στα φύλλα, στους βλαστούς και στις ρίζες. Επηρεάστηκαν θετικά τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά και τα φυτοχημικά χαρακτηριστικά των φυτών. (Μπαντής, 2015)

Αριθμός και επιφάνεια των φύλλων: Στην καλλιέργεια της ροδιάς, είτε με χρήση λαμπτήρων φθορισμού FL, είτε με συνδυασμό λαμπτήρων LED, δεν παρατηρήθηκε σημαντική ανάπτυξη στο φύλλωμα των φυτών. Όταν τα φυτά ήταν έξι εβδομάδων, είχαν σχηματίσει περίπου 11-15 φύλλα. Παρόλο που δεν παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση στην ποσότητα των φύλλων, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση στην επιφάνεια του φυλλώματος. Ειδικά τα φυτά τα οποία προ καλλιεργήθηκαν υπό την μεταχείριση φωτός LED με μέσο ποσοστό μπλε, πράσινης και κόκκινης ακτινοβολίας και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο, σημείωσαν κατά πολύ μεγαλύτερη αύξηση στην επιφάνεια του φυλλώματος, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις τεχνητού φωτός που χρησιμοποιήθηκαν. (Μπαντής, 2015)

Επιδράσεις στο χρώμα των φύλλων και των βλαστών: Στη διάρκεια του πειράματος υπήρξαν διάφορες αποχρώσεις στα φύλλα των φυτών. Τα φυτά που αναπτύχθηκαν υπό τις λάμπες φθορισμού FL με αποχρώσεις φωτισμού μπλε, πράσινου, κόκκινου και χαμηλού ποσοστού ερυθρού/υπέρυθρο, εμφάνισαν στα φύλλα τους αποχρώσεις ανοικτού πράσινου χρώματος. Τα φυτά που υπέστησαν διαφορετικές αποχρώσεις φωτός με LED φωτιστικά παρουσίασαν κοκκινωπά φύλλα. (Μπαντής, 2015) Σε διαφορετική μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε φυτά ροδιάς, εμφανίστηκε κοκκινωπό χρώμα στα φύλλα, με ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά μπλε ακτινοβολίας. (Ouzounis et al., 2014a)

Ο βλαστός στα φυτά που αναπτύχθηκαν με λάμπες φθορισμού FL είχε πράσινο χρώμα, ενώ ο βλαστός στα φυτά που αναπτύχθηκαν με λάμπες LED είχε κόκκινο χρώμα. Η διαφορά αυτή οφείλεται πολύ πιθανόν στις διαφορετικές χρωστικές που εμπεριέχονται στα φυτά. (Μπαντής, 2015)

Ριζικό σύστημα: Όσον αφορά το ριζικό σύστημα, οι μεταχειρίσεις φωτός LED με υψηλό ποσοστό κόκκινης και μπλε ακτινοβολίας ήταν αυτές με τις οποίες τα φυτά παρουσίασαν τις υψηλότερες τιμές ανάπτυξης στο ριζικό τους σύστημα. (Μπαντής, 2015)

Ύψος φυτών και μήκος βλαστών: Στα αρχικά ακόμα στάδια της ανάπτυξης των φυτών της ροδιάς, οι διάφορες αναλογίες LED φωτός που άντλησαν τα φυτά, είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση του ύψους τους. Ειδικά τα φυτά που αναπτύχθηκαν υπό την επίδραση της μεταχείρισης LED με μέσο ποσοστό μπλε, πράσινης και κόκκινης ακτινοβολίας και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο, έδειξαν ραγδαία αύξηση του ύψους τους.

Σε επόμενα στάδια ανάπτυξης και σε συνθήκες με διαφορετικό φωτισμό, παρατηρήθηκε πως οι βλαστοί της ροδιάς, οι οποίοι αντλούσαν φως από την παραπάνω αναλογία, υπερείχαν σημαντικά σε μήκος σε σχέση με λουιές αναλογίες φωτός LED, οι οποίες δεν παρουσίασαν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. (Μπαντής, 2015)

Βάρος φυτών: Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας έδειξαν ότι τα φυτά της ροδιάς υπό την επίδραση λαμπτήρων φθορισμού FL και των λαμπτήρων LED με μέσο ποσοστό μπλε, πράσινου και κόκκινου φωτός και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο, είχαν τις περισσότερες απώλειες στο συνολικό βάρος των φυτών κατά τη διάρκεια της ξήρανσης. Αυτές οι μεγάλες απώλειες βάρους είναι πολύ πιθανόν να οφείλονταν στη μεγάλη περιεκτικότητα των συγκεκριμένων φυτών σε νερό και σε διάφορες πτητικές ενώσεις, τα οποία χάθηκαν κατά τη διάρκεια της τεχνητής ξήρανσης που υπέστησαν τα φυτά. Οι μεταχειρίσεις LED με υψηλό ποσοστό κόκκινης ακτινοβολίας ήταν αυτές που μείωσαν τη διαφορά βάρους κατά τη διάρκεια της ξήρανσης.

Παρόλα αυτά, στην καλλιέργεια των φυτών της ροδιάς, η αναλογία φωτός LED, που συνδύαζε το μπλε, πράσινο και κόκκινο φως και είχε χαμηλό λόγο ερυθρού/υπέρυθρο, αποτέλεσε τη μεταχείριση με το υψηλότερο ποσοστό συνολικού νωπού βάρους και ξηρού βάρους, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες αναλογίες φωτός.

Όσον αφορά την ξηρή βιομάζα των φυτών της ροδιάς, τη μεγαλύτερη απόδοση την είχαν τα φωτιστικά LED των κόκκινων αποχρώσεων, ακολούθησαν η μεταχείριση φωτός LED με μέσο ποσοστό μπλε, πράσινης και κόκκινης ακτινοβολίας και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο, η μεταχείριση FL. Τέλος η μεταχείριση LED με μειωμένη κόκκινη ακτινοβολία, έδωσε τις χαμηλότερες τιμές.

Η μεταχείριση φωτός LED με μέσο ποσοστό μπλε, πράσινης και κόκκινης ακτινοβολίας και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο είχε ως αποτέλεσμα, τις υψηλότερες τιμές νωπού και ξηρού βάρους των ριζών, των φύλλων και των βλαστών, σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις φωτός που χρησιμοποιήθηκαν. Οι χαμηλότερες τιμές νωπού και ξηρού βάρους των φύλλων παρουσιάστηκαν με δύο LED μεταχειρίσεις με υψηλό ποσοστό κόκκινης ακτινοβολίας και οι μικρότερες τιμές ξηρού βάρους των βλαστών και των ριζών σημειώθηκαν στην αναλογία φωτός LED με μέσο ποσοστό μπλε και κόκκινου φωτός και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο.

Στην έρευνα, επίσης, σημειώθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στον λόγο ξηρού βάρους ρίζας/βλαστού (R/S), μεταξύ των αναλογιών εκπομπής φωτός. Οι μεγαλύτεροι μέσοι όροι στον λόγο R/S, διαπιστώθηκαν υπό την επίδραση της LED με υψηλό ποσοστό κόκκινης ακτινοβολίας και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο. Σε γενικά πλαίσια στη βιβλιογραφία έχουν παρατηρηθεί αντικρουόμενα αποτελέσματα για τον λόγο R/S. (Μπαντής, 2015)

Επιδράσεις στον φθορισμό της χλωροφύλλης και στη φωτοσυνθετική απόδοση των φυτών: Στην περίπτωση της ροδιάς, ο φθορισμός της χλωροφύλλης σχετίζεται με τις συνθήκες του περιβάλλοντος, αλλά και με το είδος της ροδιάς. (Bjorkman, Demmig, 1987)

Η αναλογία ($\frac{F_V}{F_M}$), κυμάνθηκε μεταξύ του 0,18 και του 0,60. Σύμφωνα με αυτές τις μετρήσεις, οι υψηλότερες τιμές στη φωτοσυνθετική απόδοση σημειώθηκαν για τα φυτά που αναπτύχθηκαν υπό την επίδραση της μεταχείρισης LED με μέσο ποσοστό μπλε, πράσινης και κόκκινης ακτινοβολίας και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο. Οι υπόλοιπες LED μεταχειρίσεις σημείωσαν μικρότερες τιμές, με τελευταία τη μεταχείριση LED με υψηλό ποσοστό μπλε, πράσινης ακτινοβολίας, υψηλό λόγο ερυθρού/υπέρυθρο και 1% επιπρόσθετη UV ακτινοβολία. (Μπαντής, 2015)

Επίδραση στο δυναμικό ανάπτυξης των ριζών (RGP) μετά τη μεταφύτευση: Οι μετρήσεις στα φυτά της ροδιάς έδειξαν πως όλες οι μεταχειρίσεις που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσίασαν εξαιρετικές τιμές μήκους στη νέα ρίζα για τα φυτά που μεταφυτεύθηκαν σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης, σε σχέση με τα φυτά που η μεταφύτευσή τους έγινε νωρίτερα. Αυτό συμβαίνει γιατί σε πρώιμα στάδια τα φυτά δεν προλαβαίνουν να αναπτύξουν επαρκές ριζικό σύστημα.

Η μεταχείριση LED με τον συνδυασμό μέσου ποσοστού μπλε και κόκκινης ακτινοβολίας και χαμηλού ποσοστού ερυθρού/υπέρυθρο παρουσίασε τις μεγαλύτερες τιμές στην ανάπτυξη του μήκους των νέων ριζών.

Όσον αφορά το ξηρό βάρος της νέας ρίζας, οι υψηλότερες τιμές παρουσιάστηκαν με τη μεταχείριση LED με μέσο ποσοστό μπλε, πράσινης και κόκκινης ακτινοβολίας και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο και ακολούθησαν τα κόκκινα LED και τα φωτιστικά FL.

Βέβαια, το δυναμικό ανάπτυξης των ριζών εξαρτάται από το ξηρό βάρος, δηλαδή τη μάζα της βασικής ρίζας και τη μάζα όλων των ριζών, οι οποίες εκμεταλλεύονται τον εδαφικό όγκο. Οπότε, η μεταχείριση LED με μέσο ποσοστό μπλε, πράσινης και κόκκινης ακτινοβολίας και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο, είναι αυτή που εξασφαλίζει την επιτυχία της καλλιέργειας, γιατί πλεονεκτεί στην εκμετάλλευση μεγαλύτερου όγκου εδάφους στη μεταφύτευση των φυτών. (Μπαντής, 2015)

Αντιοξειδωτική ικανότητα: Οι μεταχειρίσεις φωτός που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάπτυξη των φυτών της ροδιάς, δεν έδειξαν διαφορές μεταξύ τους ως προς την αντιοξειδωτική ικανότητα των εκχυλισμάτων των φυτών. Υπήρξε όμως αύξηση της

περιεκτικότητας των φυτών σε καροτενοειδή και φαινολικές ενώσεις, η οποία οφειλόταν πρωτίστως στην επίδραση της μεταχείρισης FL και δευτερευόντως στην επίδραση της μεταχείρισης LED με μέσο ποσοστό μπλε, πράσινης και κόκκινης ακτινοβολίας και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο. Αυτό οδήγησε στην εμφάνιση αντιοξειδωτικής ικανότητας των εκχυλισμάτων με τον συνδυασμό αυτών των μεταχειρίσεων. (Μπαντής, 2015)

Επιδράσεις στην περιεκτικότητα των φυτών σε ολικές και απλές φαινολικές ενώσεις:

Όσον αφορά τις ολικές φαινολικές ενώσεις διαπιστώθηκε ότι οι LED μεταχειρίσεις παρουσίασαν υψηλότερες τιμές ολικών φαινολικών ενώσεων (TPC) σε σύγκριση με τη μεταχείριση με λάμπες φθορισμού FL. Στην περίπτωση της ροδιάς, ο σχηματισμός φαινολικών ουσιών (TPC), παρουσίασε σημαντικά αποτελέσματα υπό την επίδραση της μεταχείρισης φωτός LED με υψηλό ποσοστό μπλε, πράσινης ακτινοβολίας, υψηλό λόγο ερυθρού/υπέρυθρο και 1% επιπρόσθετη UV ακτινοβολία. Η τιμή της TPC με τη συγκεκριμένη μεταχείριση, ήταν 1,5 φορές υψηλότερη από τη μεταχείριση FL. (Μπαντής, 2015) Είναι γνωστό ότι η δημιουργία υψηλών τιμών (TPC), προσφέρει στα φυτά προστασία από την υπεριώδη ακτινοβολία. (Lattanzio et al., 2006)

Για τις απλές φαινολικές ενώσεις (SPC), οι μεγαλύτερες τιμές σχηματίστηκαν υπό την μεταχείριση LED με μέσο ποσοστό μπλε και κόκκινου φωτός και χαμηλού ποσοστού ερυθρού/υπέρυθρο και οι μικρότερες τιμές υπό τη μεταχείριση FL. Γενικά όμως, η μεταχείριση LED με μέσο ποσοστό μπλε, πράσινης και κόκκινης ακτινοβολίας και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο, παρουσίασε μικρότερες τιμές στις ολικές φαινολικές ενώσεις σε σύγκριση με τις υπόλοιπες LED μεταχειρίσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερο βαθμό. (Μπαντής, 2015)

Επιδράσεις στην περιεκτικότητα των φυτών σε φλαβονοειδή και ανθοκυανίνες: Στις μετρήσεις που έγιναν στα φυτά της ροδιάς, η μεταχείριση LED με υψηλό ποσοστό κόκκινης ακτινοβολίας και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο και η LED που εκπέμπει μέσο ποσοστό μπλε και κόκκινου και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο σημείωσαν ιδιαίτερα υψηλές τιμές φλαβονοειδών. Η περιεκτικότητα σε φλαβονοειδή, που εμφάνισαν αυτές οι δύο μεταχειρίσεις, υπολογίστηκε έως και τρεις φορές μεγαλύτερη από των υπολοίπων μεταχειρίσεων LED και FL.

Στις μετρήσεις που έγιναν για την περιεκτικότητα σε ανθοκυανίνες, διαπιστώθηκε πως οι μεταχειρίσεις LED με υψηλή αναλογία κόκκινου φωτός σημείωσαν τις μεγαλύτερες τιμές. Οι λαμπτήρες φθορισμού FL, μεταξύ άλλων μεταχειρίσεων LED, σημείωσαν τις μικρότερες τιμές σε περιεκτικότητα σε ανθοκυανίνες. Κατά μέσο όρο, με τις μεταχειρίσεις LED επιτεύχθηκε μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ανθοκυανίνες.

Παρατηρήθηκε ότι στα φυτά που αναπτύχθηκαν με μεταχειρίσεις με υψηλό ποσοστό κόκκινου φωτός, το φύλλωμα που ανέπτυξαν δεν περιορίστηκε μόνο στο πράσινο χρώμα, αλλά σχηματίστηκαν και φύλλα με κοκκινωπές αποχρώσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα φύλλα των φυτών της ροδιάς έχουν υψηλές τιμές περιεκτικότητας σε φλαβονοειδή και ειδικά σε ανθοκυανίνες. (Μπαντής, 2015)

Επιδράσεις στην περιεκτικότητα των φυτών σε χλωροφύλλες a,b και καροτενοειδή:

Η επίδραση των λαμπτήρων φθορισμού FL, στην ανάπτυξη των φυτών της ροδιάς, σημείωσε εξαιρετικές τιμές στην περιεκτικότητα των χλωροφυλλών a και b. Οι υπόλοιπες μεταχειρίσεις LED απέδωσαν μικρότερες τιμές. Όμως οι μεταχειρίσεις LED πέρα από τις μικρότερες τιμές, παρουσίασαν και σημαντικές διαφορές αποδόσεων μεταξύ τους. Η μεταχείριση μέσο ποσοστό μπλε, πράσινης και κόκκινης ακτινοβολίας και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο, σημείωσε τις μεγαλύτερες τιμές χλωροφύλλης a, ενώ η μεταχείριση LED με υψηλό ποσοστό μπλε, πράσινης ακτινοβολίας, υψηλό λόγο ερυθρού/υπέρυθρο και 1% επιπρόσθετη UV ακτινοβολία σημείωσε τη μικρότερη περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη a. Οι υπόλοιπες μεταχειρίσεις δεν παρουσίασαν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Οι διαφορές που σημειώθηκαν στην περιεκτικότητα της χλωροφύλλης, υπό τις διάφορες μεταχειρίσεις φωτός, πολύ πιθανόν να οφείλονται στην ποικιλία των χρωματισμών του φωτός που εκπέμπουν τα φωτιστικά.

Επίσης, στην έρευνα που έγινε στα φυτά της ροδιάς, υπό τη μεταχείριση FL, σημειώθηκαν υψηλές τιμές στην περιεκτικότητα των φυτών σε καροτενοειδή. Οι υπόλοιπες μεταχειρίσεις φωτός LED παρουσίασαν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε καροτενοειδή, χωρίς όμως σημαντικές διαφορές μεταξύ τους.

Γενικά, η αύξηση σε περιεκτικότητα καροτενοειδών, οφείλεται στην παρουσία μεγάλης ποσότητας μπλε φωτός. Στην περίπτωση της ροδιάς, όμως, η περιεκτικότητα σε καροτενοειδή δεν αυξήθηκε με την εκπομπή μπλε φωτός, μιας και οι μεταχειρίσεις με μεγαλύτερη αναλογία μπλε ακτινοβολίας, παρουσίασαν μικρότερες τιμές καροτενοειδών. (Μπαντής, 2015)

6.1.2 Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στην Κερασιά (*Prunus avium*)

Επιφάνεια των φύλλων: Οι μεταχειρίσεις τεχνητού φωτός που εκπέμπονται στα φυτά, παρουσιάζουν διάφορα επίπεδα επίδρασης, όσον αφορά την ανάπτυξη στα διάφορα μέρη των φυτών. Έτσι, στην περίπτωση της κερασιάς, οι διάφορες μεταχειρίσεις φωτός, με λαμπτήρες LED (με μέσο ποσοστό μπλε και κόκκινου φωτός και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο) και λαμπτήρες φθορισμού FL λειτούργησαν παρόμοια, ως προς την αύξηση της επιφάνειας των φύλλων της. Το αποτέλεσμα ήταν να μην παρουσιαστεί κάποια σημαντική αύξηση της επιφάνειας των φύλλων του φυτού, υπό την επίδραση του τεχνητού φωτός. (Astolfi et al., 2012)

Ύψος φυτών και μήκος βλαστών: Σε έρευνα που έγινε, οι διάφορες αναλογίες φωτός που δόθηκαν στα φυτά της κερασιάς είχαν διαφορετικά αποτελέσματα ως προς το ύψος των φυτών. Τα φυτά της κερασιάς παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερες τιμές του μήκους των βλαστών τους, υπό την επίδραση της αναλογίας LED (με μέσο ποσοστό μπλε και κόκκινου φωτός και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο), σε σχέση με την αναλογία του φωτός που δόθηκε από τους λαμπτήρες φθορισμού FL. (Astolfi et al., 2012)

Βάρος φυτών: Στην ίδια έρευνα που πραγματοποιήθηκε για την επιρροή των διαφόρων αναλογιών φωτός στο βάρος των φυτών της κερασιάς, τα αποτελέσματα έδειξαν πως ούτε η μεταχείριση φωτός LED που χρησιμοποιήθηκε αλλά ούτε και οι λαμπτήρες φθορισμού FL, παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές ως προς την ανάπτυξη του νωπού και ξηρού βάρους των βλαστών των φυτών της κερασιάς. (Astolfi et al., 2012)

Επιδράσεις στην περιεκτικότητα των φυτών σε χλωροφύλλες a,b και καροτενοειδή:

Στην περίπτωση της κερασιάς, δεν παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές όσον αφορά την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλες a,b μεταξύ διαφορετικών μεταχειρίσεων και συγκεκριμένα των μεταχειρίσεων FL και LED (με μέσο ποσοστό μπλε και κόκκινου φωτός και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο).

Επίσης, παρόλο που η εκπομπή μπλε ακτινοβολίας, βοηθάει στην αύξηση των καροτενοειδών, στην περίπτωση της κερασιάς, δε σημειώθηκαν εξαιρετικές τιμές περιεκτικότητας καροτενοειδών με την επίδραση των μεταχειρίσεων FL και LED. (Astolfi et al., 2012)

6.1.3 Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στην Οξιά (*Fagus sylvatica*)

Επιφάνεια των φύλλων: Σε σχετικά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για την αξιολόγηση του βαθμού στον οποίο οι διάφορες μεταχειρίσεις φωτός επιδρούν στην αύξηση της επιφάνειας του φυλλώματος της οξιάς, παρατηρήθηκε πως ο συνδυασμός φωτός LED (με μέσο ποσοστό μπλε και κόκκινου φωτός και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο), συντέλεσε ώστε να δημιουργηθεί φύλλωμα με μεγαλύτερη επιφάνεια, ενώ η μεταχείριση φωτός FL δε συνέβαλε ιδιαίτερα στην αύξηση της επιφάνειας του φυλλώματος. (Astolfi et al., 2012)

Ύψος φυτών και μήκος βλαστών: Η συγκεκριμένη αναλογία φωτός LED απέδωσε μεγαλύτερες τιμές ύψους στους βλαστούς των φυτών της οξιάς, σε σύγκριση με την επίδραση του φωτός που προήλθε από τους λαμπτήρες φθορισμού FL. (Astolfi et al., 2012)

Βάρος φυτών: Η ίδια αναλογία φωτός LED, στο φυτό της οξιάς, μπορεί να επιφέρει υψηλότερες τιμές νωπού και ξηρού βάρους στους βλαστούς, σε σχέση με τις λάμπες φθορισμού FL, που οι τιμές τους κυμαίνονται σε χαμηλότερα επίπεδα. (Astolfi et al., 2012)

Επιδράσεις στην περιεκτικότητα των φυτών σε χλωροφύλλες a,b και καροτενοειδή:

Όπως και στα φυτά της ροδιάς, έτσι και στα φυτά της οξιάς, η μεταχείριση FL, απέδωσε υψηλή περιεκτικότητα στις χλωροφύλλες a και b. Οι τιμές της μεταχείρισης FL ήταν μεγαλύτερες από τις τιμές της μεταχείρισης LED (με μέσο ποσοστό μπλε και κόκκινου φωτός και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο). Όπως προαναφέρθηκε, οι διαφορετικές τιμές περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη, πολύ πιθανόν να οφείλονται στις διαφορετικές αποχρώσεις φωτός που εκπέμπονται από τα φωτιστικά.

Στην περίπτωση της οξιάς, οι μεταχειρίσεις φωτός FL και LED (με μέσο ποσοστό μπλε και κόκκινου φωτός και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο) δε βοηθούν αρκετά στην αύξηση των καρποτενοειδών και δεν παρουσίασαν και σημαντικές διαφορές μεταξύ τους ως προς την περιεκτικότητα σε αυτές τις ουσίες. (Astolfi et al., 2012)

6.1.4 Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στη Δρυ (*Quercus suber*)

Αριθμός και επιφάνεια των φύλλων: Η επίδραση του φωτός στο φύλλωμα των φυτών, διαφοροποιείται ως προς την ποσότητα των φύλλων που αναπτύσσονται στα φυτά και ως προς την αύξηση της επιφάνειας του φυλλώματος των φυτών. Στην περίπτωση της δρυός, η μεταχείριση φωτός FL μπορεί να αναπτύξει σημαντικά μεγαλύτερη επιφάνεια φυλλώματος στα φυτά, συγκριτικά με άλλες μεταχειρίσεις φωτός. (Astolfi et al., 2012)

Ύψος φυτών και μήκος βλαστών: Οι διάφορες αναλογίες φωτός που δίνονται στα φυτά από τα φωτιστικά, έχουν διαφορετική επίδραση κατά περίπτωση. Σε έρευνα που έγινε, η επίδραση των λαμπτήρων φθορισμού FL, έδωσε μικρότερες τιμές στο ύψος των φυτών της δρυός, σε σχέση με την αναλογία LED (με μέσο ποσοστό μπλε και κόκκινου φωτός και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο) η οποία σημείωσε ιδιαίτερα υψηλές τιμές στο ύψος των βλαστών. (Astolfi et al., 2012)

Βάρος φυτών: Τα διάφορα είδη των λαμπτήρων που χρησιμοποιούνται καθώς και οι αναλογίες φωτός που μπορεί αυτοί να εκπέμπουν στα φυτά, ιδίως σε δένδρα όπως είναι οι δρυς, δε φέρουν πάντα τα επιθυμητά αποτελέσματα για τον χρήστη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, είτε η χρήση της αναλογίας φωτός LED είτε η χρήση λαμπτήρων φθορισμού FL δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές ως προς τις τιμές του νωπού και του ξηρού βάρους των βλαστών της δρυός. (Astolfi et al., 2012)

Επιδράσεις στην περιεκτικότητα των φυτών σε χλωροφύλλες a,b και καρποτενοειδή:

Στη δρυ, έχουν διαπιστωθεί υψηλές τιμές περιεκτικότητας των χλωροφυλλών a και b, όταν το φως που αντλούν τα φυτά προέρχεται από τη μεταχείριση FL. Αντιθέτως, σε φυτά δρυός που αναπτύχθηκαν υπό τη μεταχείριση LED (με μέσο ποσοστό μπλε και κόκκινου φωτός και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο), οι τιμές της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη ήταν μικρότερες.

Γενικά σε πειράματα που έχουν γίνει σε διάφορα είδη δένδρων, η περιεκτικότητα των φυτών σε χλωροφύλλη παρουσιάζει υψηλές τιμές, όταν το φως που αντλούν τα φυτά προέρχεται από τη μεταχείριση FL.

Όσον αφορά την περιεκτικότητα σε καρποτενοειδή στα φυτά της δρυός, οι μεταχειρίσεις FL και LED (με μέσο ποσοστό μπλε και κόκκινου φωτός και χαμηλό ποσοστό ερυθρού/υπέρυθρο) δε σημειώνουν ιδιαίτερα αυξητικά αποτελέσματα. Πιθανόν, για να μπορέσει ο χρήστης να αυξήσει την περιεκτικότητα των φυτών σε καρποτενοειδή να πρέπει να κάνει μεγαλύτερη χρήση του μπλε φωτός, αφού στη

βιβλιογραφία σημειώνεται πως η αύξηση του μπλε φωτός έχει τη δυνατότητα να αυξήσει τα καροτενοειδή στα φυτά. (Astolfi et al., 2012)

6.2 Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στα Αρωματικά Φυτά

6.2.1 Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στον Βασιλικό (*Ocimum basilicum*)

Επιφάνεια των φύλλων: Ο φωτισμός LED έχει σαφή επίδραση στην επιφάνεια των φύλλων του βασιλικού, καθώς στις συνθήκες αυτές έχει παρατηρηθεί σημαντική αύξηση της επιφάνειας του φυλλώματος

Ύψος φυτών και μήκος βλαστών: Συγκριτικά με τις διάφορες πηγές φωτός που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην καλλιέργεια του βασιλικού, οι λαμπτήρες φθορισμού υπερیشύουν ως προς το ύψος των φυτών. Οι λαμπτήρες φθορισμού στα φυτά του βασιλικού απέδωσαν μεγαλύτερο ύψος στους βλαστούς. (Fraszczak et al., 2014) Βασικός παράγοντας για την επιμήκυνση των φυτών είναι η αναλογία του ερυθρού προς το υπέρυθρο φως (R/FR) (Alokam et al., 2002) Με αυτή την αναλογία φωτός χαρακτηρίζονται και οι λάμπες φθορισμού FL. (Franklin, Whitelam, 2005)

Σε καλλιέργεια των φυτών του βασιλικού με φωτισμό αποκλειστικά με λαμπτήρες LED, η απόχρωση του μπλε σημείωσε τις μεγαλύτερες τιμές στο ύψος των φυτών. Τα φυτά που αναπτύχθηκαν με μεικτό φως (μπλε και λευκό) ή μόνο λευκό ήταν πιο κοντά σε σχέση με αυτά που αναπτύχθηκαν αποκλειστικά με τα μπλε LED. (Glowacka, 2008)

Βάρος φυτών: Οι λαμπτήρες φθορισμού FL αποδίδουν περισσότερο από τα φωτιστικά LED, ως προς το βάρος των φυτών του βασιλικού. Έρευνα που έγινε σε καλλιέργεια βασιλικού, με τη χρήση λαμπτήρων LED και φθορισμού FL, έδειξε πως τα φυτά που αναπτύχθηκαν με τις λάμπες φθορισμού FL, σημείωσαν μεγαλύτερη φυτική μάζα, σε σχέση με εκείνα που αναπτύχθηκαν με τα φωτιστικά LED. Συγκεκριμένα οι λάμπες φθορισμού FL με κόκκινο φως αυξάνουν τη μάζα των φυτών του βασιλικού έως και 23,6%. Αντιθέτως, οι λαμπτήρες LED, κυμαίνονται σε χαμηλότερα ποσοστά απόδοσης που δεν ξεπερνούν το 14,2%. (Fraszczak et al., 2014)

Επίσης, μεγαλύτερο νωπό βάρος δημιουργείται από τους λαμπτήρες φθορισμού FL. Η υπεριώδης ακτινοβολία UV που αναλογεί στο 1,4% της φασματικής τους σύνθεσης, αυξάνει το νωπό βάρος των φυτών του βασιλικού. (Massa et al., 2008)

Επιδράσεις στον φθορισμό της χλωροφύλλης και στη φωτοσυνθετική απόδοση των φυτών: Η αναλογία του μεταβλητού φθορισμού προς τον μέγιστο φθορισμό χλωροφύλλης ($\frac{F_V}{F_M}$) δε διέφερε μεταξύ των πηγών φωτός LED και FL, που χρησιμοποιήθηκαν σε καλλιέργεια βασιλικού.

Σε γενικές γραμμές, σε έρευνα που έγινε σε φυτά βασιλικού, δεν σημειώθηκαν ιδιαίτερες διαφορές στις τιμές της φωτοσυνθετικής απόδοσης, ούτε με τη χρήση λαμπτήρων LED, ούτε με λαμπτήρες FL.

Οι μετρήσεις του καθαρού ρυθμού αφομοίωσης ενέργειας (NAR), διέφεραν βάση του πλήθους των ημερών καλλιέργειας και του είδους των πηγών φωτός που χρησιμοποιήθηκαν. Τις πρώτες 14 ημέρες της καλλιέργειας η τιμή NAR ήταν μεγαλύτερη για τα φυτά στα οποία χρησιμοποιήθηκαν λαμπτήρες FL. Όμως μετά την 21^η ημέρα καλλιέργειας, τα φυτά, στα οποία η πηγή φωτός προήλθε από φωτιστικά LED, σημείωσαν μεγαλύτερη τιμή NAR. Θα πρέπει να σημειωθεί πως τις επόμενες ημέρες της καλλιέργειας δεν υπήρχαν διαφορές στις μετρήσεις που έγιναν για τον καθαρό ρυθμό αφομοίωσης ενέργειας (NAR), ούτε για τις πηγές φωτός LED, ούτε για τις πηγές φωτός FL. (Fraszczak et al., 2014)

Επιδράσεις στην περιεκτικότητα των φυτών σε χλωροφύλλες a,b: Με τη χρήση των λαμπτήρων φθορισμού FL, σημειώθηκε διαφορά στην περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, η οποία οφείλεται στη μπλε απόχρωση που διαθέτουν και εκπέμπουν, σε σχέση με τα LED. (Matsuda et al., 2008)

6.2.2 Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στο Μελισσόχορτο ή Μέλισσα η φαρμακευτική (*Melissa officinalis*)

Επιφάνεια των φύλλων: Η χρήση λαμπτήρων LED και φθορισμού FL παρουσιάζει θετική επίδραση στην ανάπτυξη της επιφάνειας του φυλλώματος των φυτών, στην καλλιέργεια μελισσόχορτου. Σε συγκεκριμένη έρευνα που έγινε, φάνηκε πως τα φυτά που καλλιεργήθηκαν με φωτιστικά LED υπερτερούσαν σε επιφάνεια φυλλώματος από τα φυτά που καλλιεργήθηκαν με λαμπτήρες φθορισμού. Οι τιμές των δύο πηγών φωτισμού δεν είχαν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους, αλλά οι τιμές των LED υπερτερούσαν. Ιδίως μετά από 14 και 21 ημέρες καλλιέργειας του μελισσόχορτου, η επιφάνεια φυλλώματος ήταν μεγαλύτερη στα φυτά που αναπτύχθηκαν με LED. Μετά το πέρασμα αυτών των ημερών, δεν υπήρχαν σαφείς διαφορές στα φυτά που αναπτύχθηκαν με LED φώτα, σε σχέση με τα φυτά που αναπτύχθηκαν με λαμπτήρες φθορισμού FL. (Fraszczak et al., 2014)

Ύψος φυτών και μήκος βλαστών: Είναι γνωστό πως η επίδραση του τεχνητού φωτός, ανεξαρτήτως πηγής προέλευσης, είναι σημαντική για την ανάπτυξη των φυτών. Σε έρευνα που έγινε σε φυτά μελισσόχορτου, που αναπτύχθηκαν με φως που προερχόταν από λαμπτήρες φθορισμού FL και φωτιστικά LED, τα αποτελέσματα ήταν θετικά ως προς το ύψος των φυτών. Τα φυτά που καλλιεργήθηκαν υπό την επίδραση των φωτιστικών LED, παρουσίασαν υψηλότερους βλαστούς σε σχέση με τα φυτά που καλλιεργήθηκαν με φωτιστικά φθορισμού FL. (Fraszczak et al., 2014) Το μελισσόχορτο γίνεται ψηλότερο με μπλε αποχρώσεις φωτός, ιδίως με αυτές που προέρχονται από φωτιστικά LED. Οι πιο ανοικτές αποχρώσεις του μπλε προάγουν ακόμα ψηλότερα φυτά. Οι λαμπτήρες FL εκπέμπουν καλύτερα στην αναλογία ερυθρού προς υπέρυθρο φως (R/FR), η οποία δεν προάγει το ύψος των φυτών του μελισσόχορτου. (Glowacka, 2008)

Βάρος φυτών: Το βάρος του μελισσόχορτου, κυρίως στα πρώτα στάδια της ανάπτυξης του, είναι ιδιαίτερα χαμηλό. Η επίδραση των διαφόρων πηγών φωτός δεν παρουσιάζει σημαντικά αποτελέσματα στην ανάπτυξη των φυτών του μελισσόχορτου. Το μεγαλύτερο νωπό βάρος παρουσίασαν τα φυτά που αναπτύχθηκαν με μπλε φως, ενώ τα φυτά που αναπτύχθηκαν με λευκό φως δε σημείωσαν ανάλογες τιμές στο βάρος τους. Δεν έχει καμία σημασία το είδος του φωτιστικού που θα επιλεγεί για την καλλιέργεια των βοτάνων του μελισσόχορτου, όσον αφορά τη μάζα τους, γιατί εξαρτάται μόνο από την απόχρωση της λάμπας που θα χρησιμοποιηθεί. (Glowacka, 2008)

Επιδράσεις στον φθορισμό της χλωροφύλλης και στη φωτοσυνθετική απόδοση των φυτών: Στην αναλογία του μεταβλητού φθορισμού προς τον μέγιστο φθορισμό χλωροφύλλης ($\frac{F_V}{F_M}$), μεταξύ των πηγών φωτισμού που χρησιμοποιήθηκαν στην καλλιέργεια του μελισσόχορτου, δεν υπήρξαν σημαντικές διαφορές.

Οι λαμπτήρες FL, δίνουν περίπου 38% υψηλότερο ρυθμό αφομοίωσης της ενέργειας (NAR) σε σχέση με τους λαμπτήρες LED, στα φυτά του μελισσόχορτου. Ο ρυθμός αφομοίωσης ενέργειας (NAR) ήταν μεγαλύτερος την 21^η και 35^η ημέρα υπό το φως των λαμπτήρων FL. Μετά τις 28 ημέρες δεν υπήρχε διαφορά για καμία πηγή φωτός. (Fraszczak et al., 2014)

Το κόκκινο φως που εκπέμπουν οι λαμπτήρες φθορισμού FL δίνουν μεγαλύτερη φωτοσυνθετική απόδοση, συγκριτικά με τα φώτα LED. Σε γενικές γραμμές, οι αποχρώσεις του κόκκινου και μπλε φωτός ενισχύουν τον ρυθμό της φωτοσύνθεσης και την ανάπτυξη των φυτών, αφού αυξάνεται η απορρόφηση φωτός από τη χλωροφύλλη. (Kim et al., 2004b)

Επιδράσεις στην περιεκτικότητα των φυτών σε χλωροφύλλες a,b: Ούτε οι πηγές φωτός LED, ούτε οι πηγές φωτός FL, σημείωσαν ιδιαίτερες τιμές στην περιεκτικότητα της χλωροφύλλης στα φυτά του μελισσόχορτου. (Fraszczak et al., 2014)

6.3 Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στα Κηπευτικά

Στον τομέα της παραγωγής κηπευτικών προϊόντων, μπορούν να επιτευχθούν θετικά αποτελέσματα με τη χρήση συμπληρωματικού φωτισμού με LED, με την προϋπόθεση, όμως, ο χρήστης να ελέγχει την ποσότητα του φωτός και τη φασματική σύνθεση της ακτινοβολίας που παρέχεται στην καλλιέργεια. Έτσι, τα θερμοκήπια θα δίνουν άριστες παραγωγές κηπευτικών προϊόντων, βάση των ποιοτικών χαρακτηριστικών τους και η προσφορά προϊόντων υψηλής ποιότητας θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ζήτησης από τους καταναλωτές. Εκτός αυτού, θα μπορέσει να υπάρξει και σωστή διατήρηση των φυσικών πόρων σε παγκόσμια εμβέλεια. (Pinho, 2008)

Σύμφωνα με έρευνες που έχουν γίνει σε καλλιέργειες λαχανικών, υπάρχει μεγάλη διαφορά στην ανάπτυξή τους, αν η εκπομπή του φωτός κυμαίνεται σε μήκος κύματος

500nm, σε σχέση με το φως που κυμαίνεται στα 470nm, 525nm και 660nm. Η μάζα των φυτών των λαχανικών που καλλιεργούνται στο μήκος κύματος φωτός των 500nm, είναι σχεδόν κατά 20% μεγαλύτερη από τη μάζα των φυτών που καλλιεργήθηκαν σε μήκη κύματος όπως τα 470nm, 525nm και 660nm. (Mizuno et al., 2011)

6.3.1 Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στην Ντομάτα (*Solanum lycopersicum*)

Αριθμός και επιφάνεια των φύλλων: Δεν παρουσιάζεται σημαντική αύξηση της επιφάνειας του φυλλώματος των φυτών της ντομάτας υπό την επίδραση φωτός που προέρχεται από λαμπτήρες που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη των φυτών, δηλαδή λάμπες φθορισμού FL, φωτιστικά LED ή λαμπτήρες εκκένωσης νατρίου υψηλής πίεσης HPS. Απλά παρατηρήθηκε ότι, σε φυτά ντομάτας, η επίδραση του συνδυασμού φωτός κόκκινου και μπλε LED σημείωσε μεγαλύτερη επιφάνεια φυλλώματος, σε σχέση με τα φυτά που απορρόφησαν μόνο κόκκινο LED φως. (Ouzounis et al., 2016)

Όμως, ανάλογα με το είδος φωτισμού που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση, μπορεί να δούμε αποτελέσματα ως προς την πυκνότητα ή τον αριθμό των φύλλων των φυτών. Μια έρευνα έδειξε πως τα LED φωτιστικά σχημάτισαν σημαντικά περισσότερα φύλλα σε καλλιέργεια ντομάτας, σε σχέση με τα φυτά που άντλησαν φως από φωτιστικά HPS. (Brazaityte et al., 2010)

Ριζικό σύστημα: Η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος των φυτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις μεταχειρίσεις φωτός που ο κάθε χρήστης χρησιμοποιεί στην καλλιέργεια. Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε φυτά ντομάτας, οι μεταχειρίσεις LED σημείωσαν σημαντική ανάπτυξη του ριζικού συστήματος των φυτών. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε πως ο συνδυασμός κόκκινου και μπλε LED φωτός παρουσίασε μεγαλύτερες τιμές αύξησης του ριζικού συστήματος, σε σύγκριση με τα μονόχρωμα LED. (Li Y. et al., 2017)

Ύψος φυτών και μήκος βλαστών: Η χρήση της μεταχείρισης LED φωτός κόκκινου χρώματος, σε καλλιέργεια ντομάτας, έδωσε πολύ σημαντικές τιμές στο ύψος των φυτών. (Li Y. et al., 2017) Επίσης, η εκπομπή χαμηλής αναλογίας R:FR LED φωτός, βοηθάει στην αύξηση του μήκους του στελέχους της ντομάτας. Ενώ σε κάποιες περιπτώσεις κηπευτικών, η εκπομπή μπλε φωτός (σε χαμηλά επίπεδα εκπομπής) βοηθάει στην επιμήκυνση των βλαστών των φυτών, στην περίπτωση της ντομάτας η επίδρασή του ήταν αρνητική. (Snowden et al., 2016)

Βάρος φυτών: Σε φυτά ντομάτας, έχει παρατηρηθεί μεγάλη αύξηση στο νωπό και ξηρό βάρος με τη χρήση κόκκινου LED φωτός, η οποία μπορεί να φθάσει από 11 έως και 15%. Επίσης, το συμπληρωματικό μπλε φως, αποδίδει μεγαλύτερες τιμές ξηρού βάρους βλαστών στα φυτά της ντομάτας. (Hernandez, Kubota, 2016)

Επιδράσεις στην περιεκτικότητα των φυτών σε φλαβονοειδή και ανθοκυανίνες: Στην περίπτωση της ντομάτας η αποδοτικότερη μεταχείριση φωτός, όσον αφορά την περιεκτικότητα των φυτών σε ανθοκυανίνες, είναι αυτή που εκπέμπει μπλε φως. Στο γεγονός αυτό, παίζουν ρόλο και τα κρυπτοχρώματα των φυτών της ντομάτας που λειτουργούν ως υποδοχείς του μπλε και του UV-A φωτός. (Giliberto et al., 2005)

6.3.2 Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στο Μαρούλι (*Lactuca sativa*)

Τα ιδιαίτερα οπτικά χαρακτηριστικά και το μικρό μέγεθος των συσκευών LED επιτρέπουν στον χρήστη να εφαρμόζει ορθές στρατηγικές διανομής του φωτός μέσα στο θερμοκήπιο κι έτσι να οδηγείται σε αύξηση της φυτικής του παραγωγής, ακόμη και σε περιπτώσεις όπου η φωτοσυνθετική ροή των φωτονίων (PPF) είναι χαμηλή. Η χαμηλή φωτοσυνθετική ροή των φωτονίων μπορεί να αντισταθμιστεί με υψηλότερη φωτοπερίοδο ή την αφομοίωση υψηλότερων ποσοστών διοξειδίου του άνθρακα. Αυτή η παρατήρηση είναι ιδιαίτερα γνωστή στην καλλιέργεια του μαρουλιού. (Kitaya et al., 1998)

Αριθμός και επιφάνεια των φύλλων: Σε πείραμα που έγινε σε καλλιέργεια μαρουλιού σε θαλάμους ανάπτυξης, με τη βοήθεια φωτιστικών φθορισμού FL και LED, δεν παρατηρήθηκε αξιόλογη αύξηση του φυλλώματος των φυτών. Αυτή η παρατήρηση ισχύει και για την επίδραση κάθε είδους λαμπτήρα ξεχωριστά, αλλά και για την επίδραση του συνδυασμού των δύο ειδών λαμπτήρα μαζί. (Li, Kubota, 2009)

Επίσης, σε διαφορετική έρευνα που έγινε, σε διάστημα 45 ημερών μετά τη σπορά του μαρουλιού, με την επίδραση και των δύο ειδών φωτισμού (LED και FL), πάλι δε σημειώθηκε σημαντική αύξηση του φυλλώματος των φυτών. (Johkan et al., 2010)

Σε άλλο πείραμα όμως, σημειώθηκαν σημαντικά αποτελέσματα στον βαθμό αύξησης της επιφάνειας του φυλλώματος του μαρουλιού από κάποιες μεταχειρίσεις φωτός. Η μεταχείριση κόκκινου και μπλε LED φωτός είχε ως αποτέλεσμα να αναπτυχθεί φύλλωμα με μικρότερη επιφάνεια, ενώ οι μεταχειρίσεις κόκκινου, μπλε και λευκού LED φωτός και η επίδραση των λαμπτήρων φθορισμού FL είχαν ως αποτέλεσμα να σχηματιστεί μεγαλύτερη επιφάνεια φυλλώματος στο μαρούλι. (Lin et al., 2013)

Σε διαφορετικό πείραμα, παρατηρήθηκε ότι σε διάστημα 50 ημερών μετά τη σπορά του μαρουλιού, τα φυτά που αντλούσαν ακτινοβολία από τα μπλε LED, σημείωσαν μικρότερο αριθμό φύλλων, σε σχέση με τα φυτά που αντλούσαν ακτινοβολία από λάμπες φθορισμού FL και από τα υπόλοιπα είδη LED. (Chen et al., 2014)

Ριζικό σύστημα: Οι διάφορες μεταχειρίσεις φωτός που εκπέμπονται στα φυτά, τα βοηθούν στην αποτελεσματικότερη ανάπτυξή τους. Μια σημαντική επίδραση είναι αυτή στο ριζικό τους σύστημα. Σε καλλιέργεια μαρουλιού, ο συνδυασμός συγκεκριμένων ειδών και αποχρώσεων φωτός επηρέασε σημαντικά την ανάπτυξη της ξηρής μάζας των ριζών των φυτών. Αυτός ο συνδυασμός ήταν το κόκκινο και μπλε χρώμα LED φωτός. Χρησιμοποιήθηκαν και μονόχρωμα LED φωτιστικά με μπλε φως και λάμπες φθορισμού

FL, τα οποία όμως σημείωσαν μικρότερες τιμές στην ανάπτυξη της ξηρής μάζας των ριζών. (Johkan et al., 2010)

Βάρος φυτών: Στην περίπτωση του μαρουλιού, έχουν σημειωθεί μεγαλύτερες τιμές νωπού βάρους βλαστών, υπό την επίδραση του κόκκινου, πράσινου και μπλε LED φωτός, σε σχέση με τους λαμπτήρες κόκκινου και μπλε LED φωτός, τις πράσινες λάμπες φθορισμού και τις ψυχρές-λευκές λάμπες φθορισμού. (Kim et al., 2004)

Επίσης, σε καλλιέργεια μαρουλιού, η εκπομπή φωτός με αναλογία κόκκινου και μπλε LED φωτός, έδωσε μεγαλύτερες τιμές νωπού βάρους ρίζας, σε σχέση με την αναλογία φωτός κόκκινου, μπλε και λευκού LED. (Lin et al., 2013)

Σε άλλο πείραμα, τα μαρούλια που αναπτύχθηκαν για 45 ημέρες, υπό τις μεταχειρίσεις φωτός κόκκινου LED και συνδυασμού κόκκινου με μπλε LED, είχαν μεγαλύτερη αύξηση της ξηρής βιομάζας, συγκριτικά με τα φυτά που υπέστησαν τη μεταχείριση FL. (Johkan et al., 2010)

Γενικά στη βιβλιογραφία, ο λόγος ξηρού βάρους ρίζας προς βλαστό R/S παρουσιάζει αντικρουόμενα αποτελέσματα. Στην περίπτωση του μαρουλιού, τα φυτά που αναπτύχθηκαν υπό την επίδραση λαμπτήρων FL, σημείωσαν μικρότερο λόγο ξηρού βάρους ρίζας προς βλαστό R/S, συγκριτικά με τις μεταχειρίσεις φωτός LED. (Johkan et al., 2010) Όσον αφορά τη σύγκριση των μεταχειρίσεων LED μεταξύ τους, τα φυτά του μαρουλιού που αναπτύχθηκαν υπό την επίδραση του κόκκινου και μπλε φωτός LED σημείωσαν μικρότερο λόγο R/S, συγκριτικά με τη μεταχείριση φωτός κόκκινου, μπλε και λευκού LED. (Lin et al., 2013)

Αντιοξειδωτική ικανότητα: Σε έρευνα που πραγματοποιήθηκε για την ανάπτυξη των φυτών του μαρουλιού με την επίδραση φωτεινής ακτινοβολίας, δεν παρουσιάστηκαν αυξημένες τιμές αντιοξειδωτικής ικανότητας, σε καμία από τις μεταχειρίσεις που χρησιμοποιήθηκαν. Οι μετρήσεις έγιναν σε διάστημα 45 ημερών μετά τη σπορά των μαρουλιών και εφαρμόστηκαν οι μεταχειρίσεις κόκκινου και μπλε LED φωτός καθώς και η μεταχείριση FL. Παρόλα αυτά, τα εκχυλίσματα των φυτών δε σημείωσαν αυξημένη αντιοξειδωτική ικανότητα. (Johkan et al., 2010)

Επιδράσεις στην περιεκτικότητα των φυτών σε ολικές και απλές φαινολικές ενώσεις: Σε έρευνες που έχουν γίνει σε φυτά μαρουλιού, έχουν σημειωθεί μεγάλες τιμές φαινολικών ενώσεων υπό των μεταχειρίσεων φωτός FL και κόκκινου LED. (Li, Kubota, 2009) Σε μια περίπτωση μελέτης όμως, σε χρονικό διάστημα 45 ημερών μετά τη σπορά, δεν παρουσιάστηκαν διαφορές στις τιμές των φαινολικών ενώσεων, υπό την επίδραση των μεταχειρίσεων FL και LED. (Johkan et al., 2010)

Επιδράσεις στην περιεκτικότητα των φυτών σε φλαβονοειδή και ανθοκυανίνες: Σε πείραμα που έγινε στην καλλιέργεια του μαρουλιού, σημειώθηκαν εξαιρετικές τιμές στην περιεκτικότητα ανθοκυανινών, σε φυτά που αναπτύχθηκαν υπό των μεταχειρίσεων

με LED φωτιστικά, με εκπομπή μπλε φωτός. (Johkan et al., 2010) Επίσης, μεγάλη περιεκτικότητα ανθοκυανινών, στα μαρούλια, σημειώθηκε στα φυτά που αναπτύχθηκαν υπό τη μεταχείριση FL σε συνδυασμό με μπλε LED φως. Όμως τα φυτά που αναπτύχθηκαν υπό τη μεταχείριση FL, παρουσίασαν μικρότερη περιεκτικότητα σε ανθοκυανίνες. (Li, Kubota, 2009)

Επιδράσεις στην περιεκτικότητα των φυτών σε χλωροφύλλες a,b και καροτενοειδή: Οι μεταχειρίσεις LED βοηθούν στην αύξηση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλες a,b και σε καροτενοειδή. Συγκεκριμένα, σε έρευνα που έγινε, τα αποτελέσματα έδειξαν, πως η μεταχείριση FL σε συνδυασμό με κόκκινο LED φως και η μεταχείριση FL σε συνδυασμό με μπλε LED φως παρουσίασαν πολύ αυξημένη περιεκτικότητα σε χλωροφύλλες και καροτενοειδή. (Chen et al., 2014)

6.3.3 Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στον Αρακά (*Pisum sativum*)

Ριζικό σύστημα: Το κόκκινο LED φως βελτιώνει τη δομή της ρίζας των φυτών του αρακά. Σε καλλιέργεια αρακά, η χρήση του κόκκινου LED φωτός, οδήγησε στην ανάπτυξη περισσότερων ριζικών τριχιδίων στο ριζικό σύστημα των φυτών. Ο μεγάλος όγκος των τριχιδίων που αναπτύχθηκαν, διευκόλυνε την ανάπτυξη υγιών φυτών, καθώς επιτεύχθηκε η απορρόφηση σωστής αναλογίας νερού και θρεπτικών στοιχείων. (Choi, Cho, 2019) Επίσης, η επίδραση του κόκκινου LED φωτός συμβάλλει στην επιμήκυνση της ρίζας στα πρώτα στάδια της ανάπτυξής της και ρυθμίζει την πλευρική ανάπτυξη του ριζικού συστήματος των φυτών του αρακά. (Correll, Kiss, 2005) (Salisbury et al., 2007)

Ύψος φυτών και μήκος βλαστών: Η επίδραση της κόκκινης LED ακτινοβολίας φωτός στην ανάπτυξη των φυτών του αρακά δίνει σημαντικά αποτελέσματα. Σε έρευνα που έγινε, όμως, φάνηκε πως στην πρώιμη ανάπτυξη των φυτών παίζει σημαντικό ρόλο κι ο χρόνος έκθεσης των φυτών στο κόκκινο LED φως. Στα φυτά που η ακτινοβολία διήρκεσε μόλις ένα τέταρτο της ώρας σημειώθηκαν σημαντικές τιμές ανάπτυξης. Τα φυτά που αναπτύχθηκαν υπό την επίδραση του κόκκινου LED φωτός για χρονικό διάστημα μεταξύ μισής και μίας ώρας δεν αύξησαν το ύψος τους, ούτε σημείωσαν κάποια διαφορά στην ανάπτυξή τους. Αυτό αποδεικνύει για ακόμη μια φορά, ότι η υπερβολική εκπομπή ακτινοβολίας μπορεί να έχει κι αρνητικά αποτελέσματα στην ανάπτυξη των φυτών. (Solano et al., 2020)

Βάρος φυτών: Είναι γνωστό, πως η σωστή φροντίδα των φυτών καθώς και η χρήση ορθής αναλογίας φωτισμού, πριν τη μεταφύτευση, δίνουν σημαντικά αποτελέσματα ως προς το νωπό βάρος των φυτών. Στην περίπτωση του αρακά, μετά από 96 ώρες έκθεσης των φυταρίων σε φωτισμό LED, παρατηρήθηκε πως τα φυτά που άντλησαν ακτινοβολία μπλε χρώματος LED, παρουσίασαν μεγαλύτερες τιμές νωπού βάρους, σε σχέση με τα φυτά τα οποία άντλησαν φως που προήλθε από κόκκινους και λευκούς λαμπτήρες LED. (Wu et al., 2007)

Αντιοξειδωτική ικανότητα: Σε έρευνες που έγιναν για την αντιοξειδωτική ικανότητα των εκχυλισμάτων των φυτών του αρακά, υπό την επίδραση διαφορετικών μεταχειρίσεων φωτός, δε σημειώθηκαν ιδιαίτερα αυξημένες τιμές, ούτε σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Έπειτα από 96 ώρες φωτεινής ακτινοβολίας με κόκκινο LED φως σημειώθηκε κάποια αύξηση της αντιοξειδωτικής ικανότητας, η οποία υπερτερούσε σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις, όπως οι εκπομπές λευκού LED φωτός και μπλε LED φωτός. (Wu et al., 2007)

6.3.4 Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στην Αγγουριά (*Cucumis sativus*)

Αριθμός και επιφάνεια των φύλλων: Η επίδραση των διαφόρων αναλογιών φωτός στο φύλλωμα της αγγουριάς είναι σημαντική. Σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε, τα αποτελέσματα έδειξαν πως μεταχειρίσεις φωτός με υψηλό ποσοστό κόκκινης ακτινοβολίας, σχηματίζουν μεγαλύτερα φύλλα στο φυτό της αγγουριάς. (Hogewoning et al., 2010)

Σε άλλη περίπτωση καλλιέργειας, όπου χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικός πράσινος φωτισμός LED, με ακτινοβολία που κυμαίνονταν σε μήκος κύματος 520nm, τα φύλλα των φυτών διογκώθηκαν και αυξήθηκε η επιφάνεια του φυλλώματος σε ικανοποιητικά επίπεδα. Επίσης, οι αγγουριές που αναπτύχθηκαν υπό την επίδραση συμπληρωματικού LED φωτισμού με πράσινη ακτινοβολία στα 520nm και πορτοκαλί ακτινοβολία στα 622nm, σημείωσαν φυτά με περισσότερα φύλλα. Όμως, τα φυτά που αναπτύχθηκαν με συμπληρωματικό κίτρινο LED φως στα 595nm, μεγάλωσαν με πιο αργούς ρυθμούς και είχαν τη μικρότερη επιφάνεια φύλλων. Στην ίδια έρευνα, όταν στα κίτρινα LED φώτα ακτινοβολίας 595nm έδρασε συμπληρωματικά και LED UV ακτινοβολία στα 380nm, τότε σημειώθηκε ακόμα μικρότερη επιφάνεια στο φύλλωμα των φυτών. (Brazaityte et al., 2009)

Ύψος φυτών και μήκος βλαστών: Ο συμπληρωματικός LED φωτισμός που εκπέμπει σε μήκη κύματος γύρω στα 520nm, επιδρά θετικά στο ύψος των φυτών της αγγουριάς. Αντίθετα, τα φωτιστικά LED που εκπέμπουν ακτινοβολία UV, η οποία κυμαίνεται στα 380nm, αποδίδουν φυτά μικρότερου ύψους. (Brazaityte et al., 2009)

Βάρος φυτών: Οι διάφορες αναλογίες φωτός, που εκπέμπονται στα φυτά, επηρεάζουν τη μάζα των φυτών. Στην περίπτωση της αγγουριάς, η αυξημένη εκπομπή κόκκινου φωτός, με συμπληρωματικό μπλε φως, οδηγούν στην ανάπτυξη φυτών με μεγάλα επίπεδα νωπού και ξηρού βάρους των βλαστών. Επίσης, με αυτή τη μεταχείριση φωτός, τα φυτά της αγγουριάς εμφανίζουν από 11-15% μεγαλύτερη ξηρή μάζα. (Hernandez, Kubota, 2016)

Σε άλλο πείραμα, αποδείχθηκε πως τα φωτιστικά LED πράσινου χρώματος, που εκπέμπουν στα 520nm, δίνουν μεγαλύτερο ξηρό και νωπό βάρος στα φυτά της αγγουριάς. Επιπλέον, σημαντικές τιμές στην ξηρή μάζα των φυτών, αλλά σε μικρότερη

κλίμακα, είχαν οι συνδυασμοί LED φώτων με πορτοκαλί LED φως στα 622nm. (Brazaityte et al., 2009)

Επιδράσεις στον φθορισμό της χλωροφύλλης και στη φωτοσυνθετική απόδοση των φυτών:

Κατά τη διάρκεια ενός πειράματος, σε καλλιέργεια φυτών αγγουριάς, υπό τη μονοχρωματική μεταχείριση κόκκινου φωτός παρουσιάστηκε μικρότερος ρυθμός φωτοσύνθεσης, σε σχέση με τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις φωτός. (Matsuda et al., 2004) Ο λόγος που συνέβη αυτό είναι πως το μονοχρωματικό κόκκινο φως επηρεάζει αποκλειστικά και μόνο το φυτόχρωμα, ενώ οι υπόλοιπες αποχρώσεις φωτός, όπως το μπλε φως, ενεργοποιούν λειτουργίες περισσότερων φωτοϋποδοχέων, όπως των κρυπτοχρωμάτων και των φωτοτροπινών. (Hernandez, Kubota, 2016) Επίσης το μονοχρωματικό κόκκινο φως, δημιουργεί δυσλειτουργία στη φωτοσύνθεση ως προς την αναλογία $\frac{F_V}{F_M}$, ενώ το μονοχρωματικό μπλε φως και άλλοι συνδυασμοί διαφόρων αποχρώσεων φωτός δεν παρουσιάζουν αυτήν τη δυσλειτουργία. (Hogewoning et al., 2010)

Μια άλλη έρευνα, έδειξε πως παράχθηκε μεγαλύτερος αριθμός χρωστικών φωτοσύνθεσης στα φύλλα των φυτών, όταν το σύνολο του φωτός που αντλήθηκε από τα φυτά προερχόταν από λαμπτήρες LED. Τη χαμηλότερη φωτοσυνθετική απόδοση μεταξύ των μεταχειρίσεων LED, την είχε η μεταχείριση με συμπληρωματικό UV LED φως στα 380nm. (Brazaityte et al., 2009)

Επιδράσεις στην περιεκτικότητα των φυτών σε χλωροφύλλες a,b και καροτενοειδή:

Στην περίπτωση της αγγουριάς, όπως και σε άλλα φυτά, η έρευνα έδειξε πως με τη χρήση μπλε φωτός, σημειώνεται αύξηση της περιεκτικότητας των φυτών σε χλωροφύλλες a,b και σε καροτενοειδή. Αυτή η αύξηση κυμάνθηκε έως και 50%, σε σχέση με την περιεκτικότητα φυτών που αναπτύχθηκαν χωρίς τη χρήση τεχνητού φωτισμού. (Hogewoning et al., 2010) Επίσης, ο συμπληρωματικός φωτισμός με κίτρινα LED φώτα που εκπέμπουν στα 595nm δίνει υψηλή περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη a και καροτενοειδή.

Τα αντίθετα αποτελέσματα, δηλαδή χαμηλή περιεκτικότητα σε χλωροφύλλες a,b και καροτενοειδή μας δίνει ο συμπληρωματικός φωτισμός με UV ακτινοβολία LED στα 380nm, με πράσινη απόχρωση LED στα 520nm και με πορτοκαλί απόχρωση LED στα 622nm. Ειδικά, ο συμπληρωματικός UV LED φωτισμός, δίνει στα φυτά της αγγουριάς τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη b και σε καροτενοειδή. (Brazaityte et al., 2009)

6.3.5 Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στο Λάχανο (*Brassica oleracea*)

Ανθοφορία φυτών: Σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε, η χρήση τεχνητού φωτισμού παρουσίασε διάφορα αποτελέσματα στην ανθοφορία των φυτών λάχανου. Τα αποτελέσματα αυτά διέφεραν ανάλογα με το είδος φωτισμού που χρησιμοποιήθηκε. Τα φυτά τα οποία αναπτύχθηκαν με φωτιστικά LED αποχρώσεων κόκκινου φωτός ή συνδυασμού κόκκινου με μπλε, παρουσίασαν μεγαλύτερη διάρκεια ανθοφορίας σε

σχέση με τα φυτά που καλλιεργήθηκαν με φωτιστικά φθορισμού FL. Επιπλέον, η χρήση των κόκκινων LED φώτων, προτιμάται, γιατί βοηθάει στη δημιουργία μεγαλύτερου αριθμού ανθέων και στο πιο γρήγορο (χρονικά) άνοιγμά τους. (Li H. et al., 2012)

Βάρος φυτών: Η ανάπτυξη των κηπευτικών με την υποστήριξη μεταχειρίσεων φωτός LED είναι πολύ σημαντική. Στη βιβλιογραφία συναντώνται έρευνες, στις οποίες αναφέρεται τόσο η θετική επίδραση συνδυασμού των μεταχειρίσεων φωτός LED, όσο και της κάθε μεταχείρισης ξεχωριστά.

Σε έρευνα που έγινε στο Κινέζικο λάχανο, τα αποτελέσματα έδειξαν πως οι μεταχειρίσεις φωτός LED και συγκεκριμένα ο συνδυασμός κόκκινου με μπλε LED φωτός σε αναλογία 6 προς 1 παρουσίασε σημαντικές τιμές αύξησης της μάζας των φυτών. Σημειώθηκε μεγαλύτερο νωπό και ξηρό βάρος στα φυτά του λάχανου υπό τη μεταχείριση αυτή, σε σχέση με τα υπόλοιπα φυτά της καλλιέργειας, στα οποία το φως προήλθε από μονόχρωμα φωτιστικά LED, διαφόρων χρωμάτων. Μερικά από αυτά ήταν τα κόκκινα, τα μπλε, τα πράσινα και τα κίτρινα LED. (Fan et al. 2013)

Επίσης, σε ανάλογη έρευνα που έγινε στο κινέζικο λάχανο, διαπιστώθηκε πως το νωπό βάρος των βλαστών ήταν μεγαλύτερο, στα φυτά που αναπτύχθηκαν με μπλε ή με κόκκινα LED ή με συνδυασμό των μπλε και κόκκινων LED, σε σχέση με τα φυτά που αναπτύχθηκαν με λάμπες φθορισμού FL. Όσον αφορά το ξηρό βάρος των βλαστών και το νωπό και ξηρό βάρος των ριζών των φυτών, σημειώθηκαν μεγαλύτερες τιμές στις καλλιέργειες με κόκκινα LED φώτα και μικρότερες τιμές παρουσίασαν τα φυτά στα οποία δόθηκε φως προερχόμενο από λαμπτήρες φθορισμού FL. Φαίνεται λοιπόν πως η επίδραση του LED φωτός φέρει σημαντικότερα αποτελέσματα στη μάζα των φυτών του λάχανου, σε σχέση με τα φωτιστικά φθορισμού FL. (Li H. et al., 2012)

Επιδράσεις στον φθορισμό της χλωροφύλλης και στη φωτοσυνθετική απόδοση των φυτών: Η φωτοσυνθετική απόδοση των φυτών του λάχανου, επηρεάζεται θετικά από την επίδραση κόκκινου LED φωτός. Όταν, όμως, η έκθεση είναι υπερβολική, τότε ενισχύεται η συσσώρευση αμύλου στους χλωροπλάστες των φύλλων και έχουμε ως αποτέλεσμα την αναστολή της φωτοσύνθεσης. (Kowallik, 1982) Γενικά, όμως, ως προς τη φωτοσυνθετική απόδοση των φυτών του λάχανου παραμένει η καλύτερη απόχρωση φωτός LED. (Li H. et al., 2012)

Επιδράσεις στην περιεκτικότητα των φυτών σε χλωροφύλλες a,b και καροτενοειδή: Οι διαφορετικές ποιότητες και ποσότητες φωτός, έφεραν διαφορετικά αποτελέσματα στην περιεκτικότητα των χλωροφυλλών a,b και των καροτενοειδών, στην καλλιέργεια του κινέζικου λάχανου.

Τα μπλε LED παρέχουν ευεργετικές ιδιότητες στις χρωστικές ουσίες των φυτών του λάχανου και βοηθούν στην παραγωγή βιταμίνης C, σακχαρόζης και διαλυτών σακχάρων. (Poudel et al., 2008) Έτσι, σε έρευνα, τα φυτά τα οποία αναπτύχθηκαν με μπλε LED φώτα σημείωσαν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη a, χλωροφύλλη b και

καροτενοειδή, σε αντίθεση με τα φυτά τα οποία αναπτύχθηκαν υπό την επίδραση λαμπτήρων φθορισμού FL. Τα μπλε LED φώτα είναι η προτιμώμενη πηγή τεχνητού φωτός στην καλλιέργεια των φυτών του λάχανου. (Li H. et al., 2012)

6.3.6 Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στην Καρπουζιά (*Citrullus lanatus*)

Αριθμός και επιφάνεια των φύλλων: Στην περίπτωση της καρπουζιάς, οι μεταχειρίσεις που συνδύαζαν την κόκκινη και μπλε LED απόχρωση φωτός, δημιούργησαν ικανοποιητικό φύλλωμα στα φυτά. Αντιθέτως, τα φυτά στα οποία η εκπομπή φωτός ήταν μονοχρωματική, δηλαδή ή κόκκινη ή μπλε, τα αποτελέσματα δεν ήταν στον ίδιο βαθμό ικανοποιητικά. (Hogewoning et al., 2010)

Ριζικό σύστημα: Όσον αφορά την ανάπτυξη των ριζών των φυτών της καρπουζιάς, η επίδραση κάθε μεταχείρισης με φωτισμό LED είναι σημαντική, σύμφωνα με τις παρατηρούμενες τιμές στα διάφορα πειράματα. Ειδικότερα, η μεταχείριση LED κόκκινης ακτινοβολίας φωτός με 12% επιπρόσθετη μπλε ακτινοβολία, σημείωσε αύξηση της βιομάζας στο ριζικό σύστημα των φυτών έως και 90%, σε σχέση με άλλες μεταχειρίσεις όπως η FL και η μπλε LED. (Μπαντής, 2020)

Ύψος φυτών και μήκος βλαστών: Στην περίπτωση της καρπουζιάς, η μεταχείριση κόκκινου LED φωτός, οδήγησε στην αύξηση του ύψους του φυτού. (Sager et al., 1997)

Επίσης, οι αναλογίες φωτός ερυθρού/υπέρυθρο (R/FR) και μπλε φωτός, σε χαμηλά όμως επίπεδα, αυξάνουν το μήκος των βλαστών της καρπουζιάς. (Casal, 2013)

Βάρος φυτών: Είναι φανερό πως η αύξηση του μήκους των βλαστών των φυτών συμβάλλει και στην αύξηση της ξηρής μάζας των βλαστών. Οι διάφορες μεταχειρίσεις φωτός LED αυξάνουν την ξηρή μάζα των βλαστών των φυτών και στα σπορόφυτα σημειώνουν καλύτερη κατανομή ξηρής μάζας. Ειδικότερα, η εκπομπή του κόκκινου LED φωτός δίνει πολύ υψηλές τιμές της ξηρής μάζας των φυτών της καρπουζιάς. Εάν, ο χρήστης, στο κόκκινο LED φως συμπληρώσει και μπλε LED φως, τότε θα αυξήσει ακόμα περισσότερο τις τιμές παραγωγής της ξηρής μάζας των βλαστών των φυτών της καρπουζιάς. Δυστυχώς, όμως, δε θα μπορεί να αποδοθεί ο μέγιστος φωτοσυνθετικός ρυθμός (P_{max}). (Μπαντής, 2020)

Για να προσδιοριστούν ως επιτυχή τα αποτελέσματα του τεχνητού φωτισμού στην ανάπτυξη των φυτών, ελέγχεται ο λόγος της ρίζας προς τον βλαστό (R/S). Οι συνδυασμοί φωτός από λάμπες φθορισμού FL και μπλε LED λαμπτήρες έδωσαν τις μικρότερες τιμές του λόγου R/S στα φυτά της καρπουζιάς. Γίνεται εμφανές, πως τα σπορόφυτα και τα φυτά της καρπουζιάς, παρουσιάζουν μειωμένη ικανότητα άντλησης νερού και θρεπτικών συστατικών υπό την επίδραση αυτών των μεταχειρίσεων φωτός. Αντιθέτως, οι αναλογίες φωτός κόκκινου LED, LED κόκκινης ακτινοβολίας φωτός με 12% επιπρόσθετη μπλε ακτινοβολία, και LED κόκκινης ακτινοβολίας φωτός με 24%

επιπρόσθετη μπλε ακτινοβολία, έδωσαν τις μεγαλύτερες τιμές στο λόγο R/S στα φυτά της καρπουζιάς. (Μπαντής, 2020)

Ένας ακόμη σημαντικός δείκτης μέτρησης του ξηρού βάρους των βλαστών των φυτών, είναι η αναλογία DW/L (ξηρό βάρος προς μήκος). Είναι ένας ποιοτικός δείκτης μέτρησης, ο οποίος έχει δοκιμαστεί και σε πειράματα καλλιέργειας του καρπουζιού. (Bantis et al. 2019) Συγκεκριμένα, σε έρευνα που έγινε σε καλλιέργεια καρπουζιού, ο δείκτης αυτός παρουσίασε τις χαμηλότερες τιμές, στα φυτά που αναπτύχθηκαν υπό την επίδραση των μεταχειρίσεων FL ή μπλε LED, σε σχέση με τα υπόλοιπα φυτά τα οποία αναπτύχθηκαν με διαφορετικές μεταχειρίσεις LED. Οι ίδιες τιμές σημειώθηκαν και σε επανάληψη του πειράματος αυτού. (Μπαντής, 2020)

Επιδράσεις στον φθορισμό της χλωροφύλλης και στη φωτοσυνθετική απόδοση των

φυτών: Έρευνα έδειξε, πως οι τιμές $\frac{F_V}{F_M}$ στα φύλλα 44 φυτών καρπουζιάς κυμαίνονται μεταξύ των 0,78 και 0,86, όταν έχουμε αποκλειστικά την επίδραση κόκκινου LED φωτός. (Bjorkman, Demmig, 1987). Η επίδραση του μπλε LED φωτός έδωσε διαφορετικές τιμές του λόγου $\frac{F_V}{F_M}$, οδηγώντας στο συμπέρασμα πως είναι πιο κατάλληλο για τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα. (Hogewoning et al., 2010)

Σε άλλο πείραμα σε φυτά καρπουζιάς, οι μικρότερες τιμές μέγιστου φωτοσυνθετικού ρυθμού (Pmax) εμφανίστηκαν όταν τα φυτά αναπτύχθηκαν υπό τη μεταχείριση κόκκινου LED φωτός σε ποσοστό 100%. Αντιθέτως, οι μεγαλύτερες τιμές Pmax, εμφανίστηκαν στα φυτά που καλλιεργήθηκαν με τη μεταχείριση μπλε LED φωτός σε ποσοστό 100%. (Μπαντής, 2020)

Επιδράσεις στην περιεκτικότητα των φυτών σε φλαβονοειδή και ανθοκυανίνες: Με τη χρήση φωτιστικών που εκπέμπουν μπλε LED φως παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας των φυτών σε ανθοκυανίνες, γιατί απορροφούν ακτινοβολία σε αυτές τις περιοχές μήκους κύματος φωτός. (McCree, 1972)

Επιδράσεις στην περιεκτικότητα των φυτών σε χλωροφύλλες a,b και καροτενοειδή:

Στην περίπτωση της καρπουζιάς, δε διαπιστώθηκαν σημαντικές διαφορές στην περιεκτικότητα των φυτών σε χλωροφύλλες a,b με τη χρήση διαφόρων ειδών τεχνητού φωτισμού. (Μπαντής, 2020)

Όσον αφορά τα καροτενοειδή η περιεκτικότητά τους αυξάνεται, όταν τα φυτά εκτίθενται σε εκπομπή φωτός από μπλε LED φωτιστικά. (Cope et al., 2014)

6.4 Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στα Βιομηχανικά Φυτά

6.4.1 Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στην Ελαιοκράμβη (*Brassica napus*)

Ριζικό σύστημα: Σε έρευνα που έγινε σε φυτά ελαιοκράμβης, η χρήση τεχνητού φωτισμού και συγκεκριμένα οι μεταχειρίσεις που εμπεριείχαν τις ακτινοβολίες κόκκινου

και μπλε χρώματος, σημείωσαν σημαντικές τιμές στην ανάπτυξη των ριζών των φυτών. Η αναλογία τρία προς ένα του συνδυασμού μπλε προς κόκκινο LED φως παρείχε τις μεγαλύτερες τιμές ανάπτυξης στο ριζικό σύστημα των φυτών. Τις χαμηλότερες τιμές ανάπτυξης, τις σημείωσαν οι λαμπτήρες φθορισμού FL. Επίσης, στη μελέτη αυτή, έγινε σύγκριση μεταξύ των κόκκινων LED και μπλε LED μεταχειρίσεων φωτός, αλλά δεν εντοπίστηκαν σημαντικές διαφορές ανάμεσά τους. (Li H. et al., 2013)

Ύψος φυτών και μήκος βλαστών: Γενικά, η επίδραση του φωτός δεν επηρεάζει σημαντικά το ύψος της ελαιοκράμβης. Σε έρευνα που έγινε, με εκπομπή φωτός τόσο από λαμπτήρες LED, όσο και από λαμπτήρες φθορισμού FL, τα αποτελέσματα στο ύψος των βλαστών της ελαιοκράμβης ήταν ασήμαντα και δεν παρουσιάστηκαν και ιδιαίτερες διαφορές μεταξύ των δύο ειδών φωτισμού. (Li H. et al., 2013)

Βάρος φυτών: Στα φυτά της ελαιοκράμβης, παρουσιάζεται μεγαλύτερη ξηρή βιομάζα με τη χρήση φωτισμού LED, σε σχέση με τη χρήση λαμπτήρων φθορισμού FL. Πιο συγκεκριμένα, η μεταχείριση φωτός LED, με αναλογίες φωτός τρία προς ένα του συνδυασμού μπλε προς κόκκινο και ένα προς ένα του συνδυασμού μπλε προς κόκκινο, παρουσίασαν μεγαλύτερη παραγωγή ξηρής βιομάζας, σε σχέση με τις αντίστοιχες αναλογίες των λαμπτήρων φθορισμού FL. (Li H. et al., 2013)

6.5 Επίδρασεις του τεχνητού φωτισμού στα Καλλωπιστικά Φυτά

Θα πρέπει να σημειωθεί πως, ο συμπληρωματικός τεχνητός φωτισμός στα καλλωπιστικά φυτά είναι καλύτερος παράγοντας ανάπτυξης, σε σχέση με τα χημικά που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις καλλιέργειες. Όμως, για να λειτουργήσει ορθά, θα πρέπει ο χρήστης να δώσει ιδιαίτερη προσοχή στα επίπεδα φάσματος που θα εκπέμπουν τα φωτιστικά, ώστε να μην προκληθούν ανεπιθύμητες διαφορές στα μορφολογικά χαρακτηριστικά των φυτών. (Bian et al., 2017)

Στα καλλωπιστικά φυτά, όπως είναι η πετούνια και το γεράνι, ο φωτισμός LED, συμπληρωματικά με το φως του ηλίου, μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην ανάπτυξη των φυτών και κυρίως να επιδράσει στο ύψος τους. (Davis et al., 1991)

Σε έρευνα που έγινε σε θερμοκήπιο της Νορβηγίας, αποδείχθηκε ότι ο συμπληρωματικός φωτισμός LED είναι ικανός να αυξήσει τον ρυθμό ανάπτυξης καλλωπιστικών φυτών, όπως η μπιγκόνια και το χρυσάνθεμο, από 49% έως και 58%. Τα αποτελέσματα αυτά βασίζονται στην αύξηση των χημικών ρυθμιστών ανάπτυξης των φυτών. (Moe, 1997)

6.5.1 Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στο Χρυσάνθεμο (*Chrysanthemum indicum*)

Ανθοφορία φυτών: Σε πείραμα που έγινε, η επίδραση του μπλε φωτός στα φυτά του χρυσάνθεμου είχε σχεδόν μηδαμινή επίδραση στην ανθοφορία των φυτών, όταν αυτά βρισκόταν σε φυσικό φως. Στα φυτά, όμως, που φωτίστηκαν με μπλε φως (σε μήκος κύματος στα 463nm και σε ένταση $70\mu\text{mol}^{-2}\text{s}^{-1}\text{PAR}$), κατά τη διάρκεια της νύχτας και για 4 συνεχόμενες ώρες, η ανθοφορία εμφανίστηκε πιο γρήγορα σε σχέση με τα χρυσάνθεμα που καλλιεργήθηκαν χωρίς πρόσθετο τεχνητό φωτισμό. Ακόμη και τα μπουμπούκια των φυτών σχηματίστηκαν πιο γρήγορα σε αυτά τα φυτά. Όσο μεγαλύτερη είναι η χρονική διάρκεια εκπομπής των χρυσάνθεμων στην ακτινοβολία των μπλε φωτών, κατά τη διάρκεια της νύχτας, τόσο περισσότερο ενισχύεται η ανθοφορία τους. (Nissim-Levi et al., 2019)

Αντιθέτως, η εκπομπή λευκού ή κόκκινου φωτός αναστέλλει πλήρως την ανθοφορία στα φυτά του χρυσάνθεμου. (Jeong et al., 2012)

Ύψος φυτών και μήκος βλαστών: Σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε, σε καλλιέργεια χρυσάνθεμων, οι πηγές φωτός που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα μπλε και κόκκινα LED. Η ένταση του φωτός κυμάνθηκε περίπου στα $20\mu\text{mol}^{-2}\text{s}^{-1}\text{PAR}$. Οι δοκιμές διαρκούσαν από το τέλος της μίας ημέρας μέχρι την αρχή της επόμενης (δηλαδή ολονύκτιος φωτισμός). Τα αποτελέσματα του πειράματος έδειξαν πως τα φυτά που άντλησαν ακτινοβολία από τα LED ήταν ελάχιστα ψηλότερα από εκείνα που αναπτύχθηκαν με λευκό φως ή από αυτά που καλλιεργήθηκαν χωρίς καθόλου πρόσθετο φως. Συμπεραίνεται λοιπόν, πως μόνο ο ολονύκτιος φωτισμός δεν επαρκεί ώστε οι λάμπες LED να συμβάλλουν στην αύξηση του ύψους των φυτών του χρυσάνθεμου. (Nissim-Levi et al., 2019)

Βάρος φυτών: Σε καλλιέργεια χρυσάνθεμου, χρησιμοποιήθηκαν φωτιστικά πυρακτώσεως (IL) για τη γρηγορότερη ανάπτυξη των φυτών. Για λόγους οικονομίας, μερικά φυτά αναπτύχθηκαν με συνεχόμενη ροή φωτός (έως και 14 ώρες) και κάποια άλλα με διακεκομμένη ροή φωτός. Τα φυτά τα οποία καλλιεργήθηκαν με διακεκομμένο φως, ανεξαρτήτως ποικιλίας, ανέπτυξαν μικρότερους μίσχους και παρουσίασαν χαμηλότερες τιμές βάρους, συγκριτικά με τα φυτά που αναπτύχθηκαν με συνεχόμενη ροή φωτός. Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει ακόμα και στις καλλιέργειες χρυσάνθεμου να χρησιμοποιούνται φωτιστικά LED, τα οποία να λειτουργούν με συνεχόμενη ροή φωτός, γιατί τελικά αποδίδουν με χαμηλότερα κόστη. (Nissim-Levi et al., 2019)

Επιδράσεις στην περιεκτικότητα των φυτών σε φλαβονοειδή και ανθοκυανίνες: Στην περίπτωση των χρυσάνθεμων, οι μεταχειρίσεις φωτός, οι οποίες εκπέμπουν φως μπλε χρώματος, εμφανίζουν εξαιρετικά μεγάλη περιεκτικότητα σε φλαβονοειδή. (Ouzounis et al., 2014b)

6.5.2 Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στην Τριανταφυλλιά (*Rosa* sp.)

Βάρος φυτών: Σε καλλιέργεια που διεξήχθη εντός θερμοκηπίου σε τριανταφυλλίες, το νωπό βάρος σημείωσε υψηλότερες τιμές στα φυτά που αναπτύχθηκαν υπό την επίδραση LED φωτιστικών και αναλογία φωτός 20% μπλε προς 80% κόκκινο χρώμα. Επίσης, ανάλογα αποτελέσματα έδωσε και η αναλογία φωτός LED με ποσοστό 100% κόκκινου φωτός. Αντίθετα, οι τριανταφυλλίες που αναπτύχθηκαν υπό την επίδραση της λευκής ακτινοβολίας LED, παρουσίασαν χαμηλότερες τιμές νωπού βάρους. Αντίστοιχα αποτελέσματα σημειώθηκαν και στην παραγωγή ξηρής βιομάζας. Οι μεταχειρίσεις φωτός μπλε, κόκκινου LED και κόκκινου LED, σχημάτισαν σε σημαντικό βαθμό περισσότερη ξηρή βιομάζα σε σχέση με τη μεταχείριση του λευκού LED. (Ouzounis et al., 2014b)

Επιδράσεις στην περιεκτικότητα των φυτών σε φλαβονοειδή και ανθοκυανίνες: Στην περίπτωση της καλλιέργειας της τριανταφυλλιάς, σε έρευνα που έγινε σε θερμοκήπιο, παρατηρήθηκαν ιδιαίτερα υψηλές τιμές στην περιεκτικότητα φλαβονοειδών, όταν οι μεταχειρίσεις φωτός που χρησιμοποιήθηκαν περιείχαν υψηλότερο ποσοστό μπλε φωτός. (Ouzounis et al., 2014b)

6.5.3 Επιδράσεις του τεχνητού φωτισμού στην Καμπανούλα (*Campanula cochleariifolia*)

Χρώμα φυλλώματος: Η υψηλή ένταση φωτός κόκκινου και μπλε χρώματος, όταν εκπέμπεται στο τελευταίο στάδιο ανάπτυξης των φυτών και για μία συνεχόμενη εβδομάδα, δίνει με σιγουριά πρασινωπό φύλλωμα στα φυτά. (Kamath et al., 2021)

Ύψος φυτών και μήκος βλαστών: Η συγκομιδή των φυτών της καμπανούλας γίνεται όταν αυτά έχουν σχετικά μικρό ύψος, δηλαδή γύρω στα 7,5εκ. Η κατάλληλη ένταση φωτός δίνει, σε μικρότερο χρόνο, το ιδανικό ύψος για τη γρηγορότερη συγκομιδή των φυτών της καμπανούλας. (Kamath et al., 2021)

Επίσης, η ένταση της ακτινοβολίας των φωτιστικών επηρεάζει και τη δημιουργία διακλαδώσεων στα φυτά της καμπανούλας. Όσο υψηλότερη είναι η ένταση του φωτός, τόσο περισσότερες διακλαδώσεις δημιουργούνται στα φυτά. Όμως, η αυξημένη ένταση της ακτινοβολίας απαιτεί και μεγαλύτερη προσοχή στον χρόνο έκθεσης των φυτών στο φως. (Kong et al., 2018)

Βάρος φυτών: Ενώ στα υπόλοιπα καλλωπιστικά φυτά οι διάφορες αναλογίες φωτός αποφέρουν διαφορετικά αποτελέσματα ως προς τις τιμές του νωπού βάρους των φυτών, στην περίπτωση της καμπανούλας, δεν παρατηρούνται ιδιαίτερα σημαντικές διαφορές στο νωπό της βάρος. Επίσης, στην περίπτωση της καμπανούλας, δεν παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές μεταξύ των διαφορετικών μεταχειρίσεων φωτός κι ως προς τον σχηματισμό ξηρής βιομάζας. (Ouzounis et al., 2014b)

Η μάζα των φυτών δε μεταβάλλεται ιδιαίτερα ούτε σε σχέση με την ένταση του φωτός που εκπέμπουν τα φωτιστικά. Η έκθεση σε υψηλή ένταση φωτός ($170 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) κόκκινου χρώματος, αλλά και η έκθεση σε χαμηλή ένταση φωτός ($100 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) κόκκινου και μπλε χρώματος, δίνουν παρόμοιες τιμές μάζας στα φυτά της καμπανούλας. (Kamath et al., 2021)

Επιδράσεις στον φθορισμό της χλωροφύλλης και στη φωτοσυνθετική απόδοση των φυτών:

Η μεγάλη ένταση ακτινοβολίας φωτός στα φυτά της καμπανούλας επηρεάζει αρνητικά τη φωτοσυνθετική τους απόδοση. Ακόμη κι αν σε μετέπειτα χρόνο, μειωθεί η ένταση της ακτινοβολίας, τα αποτελέσματα θα είναι και πάλι αρνητικά. Η μειωμένη φωτοσυνθετική λειτουργία των φυτών, με την εφαρμογή υψηλής έντασης φωτός, παρατηρείται στο σύνολο των φυτών, τα οποία έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με την καμπανούλα. (Kamath et al., 2021)

Επίσης, σε άλλη έρευνα, η έκθεση των φυτών για μεγάλο χρονικό διάστημα σε κόκκινο φως (συγκριτικά με τον συνδυασμό κόκκινου και μπλε φωτός), οδηγεί στη μείωση του ρυθμού φωτοσύνθεσης. (Zhang et al., 2020) Θα πρέπει, όμως, να εκπέμπεται η σωστή αναλογία κόκκινου και μπλε φωτός, στα φυτά της καμπανούλας, ώστε να διατηρηθεί η καλή φωτοσυνθετική λειτουργία τους. (Kamath et al., 2021)

Επιδράσεις στην περιεκτικότητα των φυτών σε φλαβονοειδή και ανθοκυανίνες:

Στην περίπτωση της καμπανούλας, οι διάφορες μεταχειρίσεις φωτός σημειώνουν εξαιρετικές τιμές ως προς την περιεκτικότητα των φυτών σε φλαβονοειδή. Οι μεταχειρίσεις φωτός που εκπέμπουν μπλε φως είναι αυτές που μας δίνουν τις αυξημένες αυτές τιμές. (Ouzounis et al., 2014b)

Επιδράσεις στην περιεκτικότητα των φυτών σε χλωροφύλλες a,b:

Από διάφορα πειράματα, συμπεραίνουμε, πως η χρήση φωτός με μειωμένη ένταση προκαλεί τη μείωση της περιεκτικότητας των χλωροφυλλών a,b στα φύλλα των φυτών της καμπανούλας. (Nhut et al., 2003)

7. Συμπεράσματα

Ο τρόπος με τον οποίο αντλούν φως, τα φυτά, βασίζεται σε νόμους της φωτοχημείας και η δέσμευση του φωτός επηρεάζει φυσιολογικές λειτουργίες του φυτού, όπως τη φωτοσύνθεση και τη φωτομορφογένεση. Η αποτελεσματικότητα με την οποία αντλούν τα φυτά φωτόνια από διαφορετικά μήκη κύματος και συμμετέχουν στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, μας δίνεται από την καμπύλη κβαντικής απόδοσης. Βάση αυτής της καμπύλης, η λειτουργία της φωτοσύνθεσης πραγματοποιείται σε μήκη κύματος που κυμαίνονται μεταξύ των 400-700nm. Αυτό το τμήμα αναφέρεται ως φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία ή PAR.

Ο αντίκτυπος των συστημάτων ηλεκτρικού φωτισμού είναι μεγάλος, όσον αφορά τη φυσιολογία και την ανάπτυξη των φυτών. Υπάρχουν διάφορα είδη τεχνητού φωτισμού που χρησιμοποιούνται στην καλλιέργεια των φυτών, ιδίως σε κλειστούς χώρους, όπως τα θερμοκήπια. Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως (IL) ήταν οι πρώτοι που χρησιμοποιήθηκαν στην καλλιέργεια φυτών. Η ενεργειακή τους απόδοση είναι μικρή και μόνο το 6-7% της ενέργειας που καταναλώνουν αποδίδεται ως φωτοσυνθετικά ενεργή μορφή φωτός. Οι λαμπτήρες εκκένωσης αερίου είναι ενεργειακά αποδοτικότεροι και γι' αυτό στις μέρες μας αντικαθιστούν σταδιακά τους λαμπτήρες πυρακτώσεως. Παρόλο που εκπέμπουν μεγάλη ένταση PAR, παράλληλα εκλύουν και μεγάλες ποσότητες θερμότητας. Συνεπώς, μπορούν να αυξήσουν τη θερμοκρασία των φυτών ή να προκαλέσουν βλάβες σε αυτά εάν τοποθετηθούν πολύ κοντά τους. Διακρίνονται σε λαμπτήρες εκκένωσης αερίου υψηλής πίεσης και λαμπτήρες εκκένωσης αερίου χαμηλής πίεσης. Από αυτούς, οι λαμπτήρες εκκένωσης νατρίου υψηλής πίεσης είναι οι πιο διαδεδομένοι στην καλλιέργεια φυτών και κυρίως στην παραγωγή κηπευτικών προϊόντων, γιατί η ηλεκτρική τους απόδοση προσεγγίζει περίπου το 30% κι έχουν μεγάλη αντοχή στις εξωτερικές συνθήκες περιβάλλοντος. Οι πιο σύγχρονοι λαμπτήρες αυτής της κατηγορίας είναι οι λαμπτήρες εκκένωσης μεταλλικών αλογονιδίων, οι οποίοι εκπέμπουν υψηλά επίπεδα ενεργής ακτινοβολίας PAR, με σχετικά υψηλό ποσοστό μπλε ακτινοβολίας και αυτό τους καθιστά κατάλληλους για χρήση στην καλλιέργεια φυτών. Οι λαμπτήρες φθορισμού (FL) ανήκουν στους λαμπτήρες εκκένωσης αερίου χαμηλής πίεσης και στο εμπόριο διατίθενται σε μεγάλη ποικιλία φασματικών συνθέσεων. Έχουν σχετικά μεγάλη διάρκεια ζωής, περίπου στις 9.000 ώρες λειτουργίας, αλλά υστερούν στη δυναμική των LED. Οι δίοδοι εκπομπής φωτός LED αποτελούν κατάλληλη πηγή φωτός για την εξασφάλιση της ανάπτυξης των μορφολογικών και φυτοχημικών χαρακτηριστικών των φυτών.

Τα LED είναι διαφόρων ειδών και η τεχνολογία τους εξελίσσεται διαρκώς. Η τεχνολογία των LED παρουσιάζει πολύ μεγάλη διακύμανση στα μήκη κύματος του φωτός. Υπάρχουν έως και 100 διαφορετικά μήκη κύματος, ενώ τα 10 μόνο από αυτά εκπέμπουν στην περιοχή της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας PAR και είναι

κατάλληλα για καλλιέργειες και πειράματα σε φυτά. Κύριο χαρακτηριστικό των LED είναι η φασματική εκπομπή στενής ζώνης φωτός, γι' αυτό και με τη χρήση τους μεγιστοποιείται η απορρόφηση φωτοσυνθετικών χρωστικών και κυρίως της χλωροφύλλης. Η φασματική τους ποιότητα βρίσκεται σε συνεχή εξέλιξη, καθώς επηρεάζεται ιδιαίτερα από τις εξωτερικές συνθήκες περιβάλλοντος. Η αξιολόγησή τους γίνεται βάση της ηλεκτρικής τους απόδοσης και της φωτοσυνθετικής τους απόδοσης. Η ηλεκτρική απόδοση δίνεται από τα ποσοστά μετατροπής της ισχύος εισόδου της ηλεκτρικής ενέργειας σε ισχύ φωτεινής ακτινοβολίας. Η φωτοσυνθετική απόδοση εξαρτάται από την απόδοση της φωτοσυνθετικής χρήσης, που ορίζει την αποτελεσματικότητα με την οποία η ακτινοβολούμενη ενέργεια μετατρέπεται σε χημική ενέργεια, μέσω της λειτουργίας της φωτοσύνθεσης και από το καθαρό ποσοστό αφομοίωσης της ενέργειας, που ορίζεται από τη χημική ενέργεια κι εξαρτάται από τον ρυθμό φωτοσύνθεσης. Δείκτες όπως είναι ο «CRI» μετρούν την απόδοση των χρωμάτων των φωτιστικών. Τα φωτιστικά LED έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως την καινοτόμα τεχνολογία, τη μεγάλη διάρκεια ζωής, την εξοικονόμηση ενέργειας, τη βέλτιστη απόδοση, κυρίως όσον αφορά τα μήκη κύματος φωτός που εκπέμπουν, την ευχρηστία, αφού μπορούν να συνδυαστούν εύκολα με διάφορες συμπληρωματικές συσκευές και τον οικολογικό αντίκτυπο. Τα μειονεκτήματά τους είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασης, το ότι η απόδοσή τους επηρεάζεται ιδιαίτερα από τις συνθήκες του περιβάλλοντος και η τεχνογνωσία που απαιτείται να έχει ο χρήστης.

Η επίδραση του φωτός στην ανάπτυξη των φυτών υπάρχει και είναι σημαντική. Η επίδραση παρατηρείται σε διάφορα χαρακτηριστικά των φυτών, όπως είναι το φύλλωμα, το ριζικό σύστημα, το ύψος και το νωπό και ξηρό βάρος των φυτών. Επίσης παρατηρείται σε διάφορες φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών, όπως στον φθορισμό της χλωροφύλλης, στη φωτοσυνθετική απόδοση, στο δυναμικό ανάπτυξης των ριζών και στην αντιοξειδωτική ικανότητα των φυτών. Σημαντική είναι και η επίδραση του φωτός στον δευτερογενή μεταβολισμό των φυτών, δηλαδή στην περιεκτικότητα σε φυτοχημικές ενώσεις, όπως οι ολικές και απλές φαινολικές ενώσεις, τα φλαβονοειδή, οι ανθοκυανίνες, οι χλωροφύλλες a,b και τα καροτενοειδή.

Σε γενικές γραμμές, τα μέγιστα αποτελέσματα στη φωτοσύνθεση επιτυγχάνονται όταν τα φυτά αναπτύσσονται κάτω από το ηλιακό φως ευρέος φάσματος με συμπληρωματικό LED φως, το οποίο διαθέτει ποικίλα φάσματα φωτός. Μελέτες των τελευταίων ετών έδειξαν πως σε ένα μεγάλο ποσοστό φυτών, η ανάπτυξη των φύλλων και οι ρυθμοί της φωτοσύνθεσης αυξάνονται σημαντικά με λευκά LED φώτα ευρέος φάσματος. Επίσης, δύο πολύ σημαντικές αποχρώσεις του φάσματος φωτός είναι το μπλε και το κόκκινο. Τα κρυπτοχρώματα και οι φωτοτροπίνες, που αποτελούν φωτουποδοχείς των φύλλων των φυτών, απορροφούν ακτινοβολία στην περιοχή του μπλε φάσματος (400-500nm) και αυτό επηρεάζει τις αντιδράσεις της φωτομορφογένεσης και τελικά τον σχηματισμό των μορφολογικών χαρακτηριστικών των φυτών. Μερικά από αυτά είναι οι ενδογενείς ρυθμοί ανάπτυξης, ο προσανατολισμός των οργάνων, η ανάπτυξη του

βλαστού και η αύξηση των στομάτων του φυτού. Το φυτόχρωμα, που αποτελεί επίσης σημαντικό φωτουποδοχέα των φύλλων, απορροφά στην περιοχή του κόκκινου φάσματος ακτινοβολίας (630-700nm) και προκαλεί μεγάλους ρυθμούς φωτοσύνθεσης και τελικά την υψηλή παραγωγή βιομάζας.

Οι διάφορες πηγές φωτός ποικίλουν σε απόδοση στις καλλιέργειες και είναι ανάλογες με το είδος του φυτού στο οποίο εκπέμπουν. Σε καλλιέργεια δένδρων, όπως για παράδειγμα στη ροδιά, οι διάφορες μεταχειρίσεις φωτός LED έφεραν θετικά αποτελέσματα στην ανάπτυξη των φυτών και στη βελτίωση των φυσιολογικών λειτουργιών τους. Η μόνη διαφοροποίηση, όσον αφορά τους λαμπτήρες φθορισμού ήταν ότι η χρήση τους απέδωσε φύλλωμα με πρασινωπό χρώμα, σε αντίθεση με το κοκκινωπό φύλλωμα των φυτών που αναπτύχθηκαν με λαμπτήρες LED. Επίσης, είχαν μεγαλύτερη απόδοση στην περιεκτικότητα των φυτών σε χλωροφύλλες a,b και καροτενοειδή, έναντι των λαμπτήρων LED. Στην κερασιά, η επίδραση του τεχνητού φωτισμού, ανεξαρτήτως είδους (FL ή LED), ήταν ασήμαντη. Κάποια βασικά μορφολογικά χαρακτηριστικά της οξιάς, όπως η επιφάνεια του φυλλώματος, το ύψος και το νωπό και ξηρό βάρος αυξήθηκαν με την επίδραση του LED φωτισμού, ενώ η περιεκτικότητα των φυτών σε χλωροφύλλες a,b αυξήθηκε με τη χρήση λαμπτήρων φθορισμού. Τα ίδια ισχύουν και στην περίπτωση της δρυός, με τη διαφορά ότι η επιφάνεια του φυλλώματος των φυτών που φωτιζόνταν με FL λαμπτήρες, ήταν μεγαλύτερη.

Οι διάφορες πηγές τεχνητού φωτισμού επιδρούν σημαντικά και στην ανάπτυξη των αρωματικών φυτών. Τα αρωματικά φυτά, όπως ο βασιλικός και το μελισσόχορτο, παρουσίασαν αύξηση της φυλλικής τους επιφάνειας, του ύψους και του νωπού βάρους τους, είτε με τον φωτισμό τους με λαμπτήρες LED, είτε με φθορισμού FL. Η φωτοσυνθετική απόδοση των φυτών βελτιώθηκε με τον φωτισμό τους με υψηλό ποσοστό κόκκινης ακτινοβολίας, ενώ η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλες a,b αυξήθηκε με ακτινοβολία μπλε φάσματος φωτός.

Η χρήση τεχνητού φωτισμού στην παραγωγή κηπευτικών προϊόντων είναι αυτή που συγκεντρώνει τον μεγαλύτερο αριθμό ερευνών, αφού τα κηπευτικά προϊόντα παρουσιάζουν μεγάλο εμπορικό ενδιαφέρον. Τα φωτιστικά LED και FL παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη επίδραση στην ανάπτυξη των κηπευτικών, με τα LED να υπερτερούν έναντι των FL, δίνοντας καλύτερα μορφολογικά χαρακτηριστικά στα φυτά και βέλτιστη παραγωγή. Οι έρευνες που πραγματοποιήθηκαν, για την επίδραση του τεχνητού φωτισμού, σε κηπευτικά προϊόντα υψηλής κατανάλωσης, όπως η ντομάτα, το μαρούλι, ο αρακάς, το αγγούρι, το λάχανο και η καρπουζιά έδειξαν ότι οι μεταχειρίσεις φωτός LED, οι οποίες εξέπεμπαν κόκκινη ή μπλε ή συνδυασμό κόκκινης και μπλε ακτινοβολίας, έδωσαν τις υψηλότερες τιμές στην επιφάνεια του φυλλώματος, στο ριζικό σύστημα, στο ύψος, στο νωπό και ξηρό βάρος και στη φωτοσυνθετική απόδοση των φυτών. Οι μπλε LED λαμπτήρες αύξησαν σημαντικά την περιεκτικότητα των φυτοχημικών ενώσεων στα κηπευτικά, γιατί το μπλε φως βοηθά στην παραγωγή σακχαρόζης και βιταμίνης C, με αποτέλεσμα να ενισχύεται η λειτουργία των χρωστικών ουσιών των φυτών. Στην

αγγουριά έγινε και χρήση LED πράσινων αποχρώσεων και απέδωσε υψηλότερα φυτά με μεγαλύτερο αριθμό φύλλων.

Στην καλλιέργεια βιομηχανικών φυτών και συγκεκριμένα στα φυτά της ελαιοκράμβης, οι λαμπτήρες LED υπερτερούν σημαντικά σε σχέση με τους λαμπτήρες φθορισμού σε απόδοση. Οι λαμπτήρες LED κόκκινων και μπλε αποχρώσεων συμβάλλουν ιδιαίτερα στην αύξηση του ριζικού συστήματος και της ξηρού βάρους των φυτών της ελαιοκράμβης.

Στα καλλωπιστικά φυτά, ο τεχνητός φωτισμός, φέρει διαφοροποιημένα αποτελέσματα, αναλόγως των συνθηκών. Σίγουρα, όμως ο συμπληρωματικός τεχνητός φωτισμός αποτελεί καλύτερο παράγοντα ανάπτυξης, σε σχέση με τα χημικά μέσα που χρησιμοποιούνται στις καλλιέργειες αυτές. Σύμφωνα με έρευνα ο συμπληρωματικός LED φωτισμός μπορεί να αυξήσει την ανάπτυξη του χρυσάνθεμου κατά 49-58%. Στην περίπτωση της καμπανούλας, η κατάλληλη ένταση φωτός παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στην αύξηση του ύψους των φυτών, αλλά και στη φωτοσυνθετική τους απόδοση. Ο LED φωτισμός αυξάνει το νωπό βάρος των χρυσάνθεμων και της τριανταφυλλιάς και η περιεκτικότητα και των τριών προαναφερθέντων καλλωπιστικών φυτών σε φλαβονοειδή και ανθοκυανίνες αυξάνεται σημαντικά με τη χρήση λαμπτήρων LED που εκπέμπουν φως μπλε χρώματος.

Οι πηγές φωτισμού που χρησιμοποιούνται περισσότερο στα διάφορα πειράματα των τελευταίων ετών είναι οι λαμπτήρες φθορισμού FL και οι δίοδοι εκπομπής φωτός LED. Βάση των αποτελεσμάτων τους, ο φωτισμός των θερμοκηπιακών καλλιεργειών με φωτιστικά LED συμβάλλει σημαντικά στην ανάπτυξη των διαφόρων φυτών και υπερτερεί σε σχέση με τα συμβατικά είδη φωτισμού. Ιδιαίτερα τα LED που εκπέμπουν στις περιοχές του κόκκινου και του μπλε φάσματος ακτινοβολίας, αποτελούν την πλειονότητα των φωτιστικών που χρησιμοποιούνται στη φυτική παραγωγή και έχουν τη μεγαλύτερη απόδοση και επιρροή στα φυτά. Οι αυξημένες τιμές στα μορφολογικά, φυσιολογικά και φυτοχημικά χαρακτηριστικά των φυτών, καθορίζουν την επέκταση της χρήσης των LED και μελλοντικά. Σίγουρα αποτελούν μία πηγή φωτός, η οποία αξίζει την προσοχή όλων των ενδιαφερόμενων καλλιεργητών. Η περαιτέρω μελέτη τους, για την επίτευξη της βελτίωσης των χαρακτηριστικών τους και κυρίως για την επιδίωξη του χαμηλότερου κόστους εγκατάστασής τους, σίγουρα θα επιφέρει σημαντική πρόοδο στον κλάδο της Γεωπονίας.

8. Βιβλιογραφία

Aikman D.P., 1989. Potential increase in photosynthetic efficiency from the redistribution of solar radiation in a crop. *J. Exp. Bot.*, 217, 855-864.

Alokam S., Chinnappa C.C., Reid D.M., 2002. Red/far-red light mediated stem elongation and anthocyanin accumulation in *Stellaria longipes*: differential response of alpine and prairie ecotypes. *Canad. J. Bot.* 80, 72–81.

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* 40:31-38.

Baker N.R., Rosenqvist E., 2004. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *Journal of Experimental Botany* 55:1607-1621.

Bantis F., Koukounaras A., Siomos A., Menexes G., Dangitsis C., Kintzonidis D., 2019. Assessing quantitative criteria for characterization of quality categories for grafted watermelon seedlings. *Horticulturae*, 5, 1-10.

Barta D.J., Tibbitts T.W., Bula R.J., Morrow R.C., 1992. Evaluation of light emitting diode characteristics for a space-based plant irradiation source. *Advances in Space Research* 12:141-149

Bian Z., Jiang N., Grundy S., Lu C., 2017. Uncovering LED light effects on plant growth: new angles and perspectives-LED light for improving plant growth, nutrition and energy-use efficiency. In *International Symposium on New Technologies for Environment Control, Energy-Saving and Crop Production in Greenhouse and Plant* 1227., pp. 491-498.

Bjorkman O., Demmig, B., 1987. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. *Planta*, 170(4), 489-504.

Both A.J., Bugbee B., Kubota C., Lopez R.G., Mitchell C., Runkle E.S., Wallace C., 2017. Proposed product label for electric lamps used in the plant sciences. *HortTechnology* 27, 544-549.

Brazaitytė A., Duchovskis P., Urbonavičiūtė A., Samuolienė G., Jankauskienė J., Kasiulevičiūtė-Bonakėrė A., Žukauskas A., 2009. The effect of light-emitting diodes lighting on cucumber transplants and after-effect on yield. *Zemdirbyste-Agriculture*, 96(3), 102-118.

Brazaityte A., Duchovskis P., Urbonaviciute A., Samuoliene G., Jankauskiene J., Sakalauskaite J., Sabajeviene G., Sirtautas R., Novickovas A., 2010. The effect of light-

emitting diodes lighting on the growth of tomato transplants. *Zemdirbyste-Agriculture* 97:89-98.

Casal J.J., 2013. Photoreceptor signaling networks in plant responses to shade. *Annu Rev Plant Biol*, 64, 403–427.

Casamayor J., Su D. & Sarshar M., 2015. Extending the lifespan of LED-lighting products. *Architectural Engineering and Design Management.*, 11(2), pp. 105-122.

Chang M.H., Das D., Varde P., Pecht M., 2012. Light emitting diodes reliability review. *Microelectronics Reliability* 52, 762-782

Chen X., Guo W., Xue X., Wang L., Qiao X., 2014. Growth and quality responses of ‘Green Oak Leaf’ lettuce as affected by monochromic or mixed radiation provided by fluorescent lamp (FL) and light-emitting diode (LED). *Scientia Horticulturae* 172:168-175.

Choi H., Cho H., 2019. Root hairs enhance *Arabidopsis* seedling survival upon soil disruption. *Sci. Rep.* 9, 11181.

Christensen A., Graham S., 2009. Thermal effects in packaging high power light emitting diode arrays. *Applied Thermal Engineering* 29, 364-371.

Ciolkosz D., Both A., Albright L., 2001. Selection and placement of greenhouse luminaires for uniformity. *Applied Engineering in Agriculture* 17, 875.

Cope K.R., Snowden M.C., Bugbee B., 2014. Photobiological interactions of blue light and photosynthetic photon flux: effects of monochromatic and broad spectrum light sources. *PhotochemPhotobiol*, 90, 574–584.

Correll M.J., Kiss J.Z., 2005. The roles of phytochromes in elongation and gravitropism of roots. *Plant Cell Physiol.* 46: 317–323.

Costa G.J.C., Da Cuello J.L., 2004. The phytometric system: A new concept of light measurement for plants. *J. Illum. Eng. Soc.*, 33, 1: 34-42.

Craford G., 2007. Current State of the art in high brightness LEDs, APS March Meeting Abstracts, p. 3001.

Davies K., 2004. Plant pigments and their manipulation. *Annual Plant Reviews* 14. Blackwell Publishing, Oxford.

Davis D.T., Curry A.E. and Steffens L.G., 1991. Chemical regulation of vegetative growth. *Crit. Rev. Plant Sci.* 10 (2), 151–188 <https://doi.org/10.1080/07352689109382310>.

Davis L., Rountree K., Mills K., 2018. Accelerated Stress Testing of Multi-Source LED Products: Horticulture Lamps and Tunable-White Modules. RTI International, Research Triangle Park, NC (United States)

de Carbonnel M., Davis P., Roelfsema M.R.G., Inoue S., Schepens I., Lariguet P., Geisler M., Davis D.T., Curry A.E. and Steffens L.G., 1991. Chemical regulation of vegetative growth. *Crit. Rev. Plant Sci.* 10 (2), 151–188 <https://doi.org/10.1080/07352689109382310>.

Dougher T.A., Bugbee B, 2001. Evidence for yellow light suppression of Lettuce growth. *Photochem. Photobiol.*, 73: 208-212.

Fan X., Zhang J., Xu Z., Guo S., Jiao X., Liu X., Gao Y., 2013. Effects of different light quality on growth, chlorophyll concentration and chlorophyll biosynthesis precursors of non-heading Chinese cabbage (*Brassica campestris* L.). *Acta Physiol Plant*, 35, 2721–2726.

Fischer U.A., Carle R., Kammerer D.R., 2011. Identification and quantification of phenolic compounds from pomegranate (*Punica granatum* L.) peel, mesocarp, aril and differently produced juices by HPLC-DAD-ESI/MSn. *Food Chemistry* 127:807-821

Franklin K.A., Whitelam G.C., 2005. Phytochromes and shade-avoidance responses. *Ann. Bot. (Lond.)* 96, 169–175.

Fraszczak B., Golcz A., Zawirska-Wojtasiak R., Janowska B., 2014. Growth rate of sweet basil and lemon balm plants grown under fluorescent lamps and LED modules. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus*, 13(2), 3-13.

Giliberto L., Perrotta G., Pallara P., Weller J.L., Fraser P.D., Bramley P.M., Fiore A., Tavazza M., Giuliano G., 2005. Manipulation of the blue light photoreceptor cryptochrome 2 in tomato affects vegetative development, flowering time, and fruit antioxidant content. *Plant Physiology* 137:199-208.

Głowacka B., 2008. Wpływ składu spektralnego światła na wzrost rozsady bazylii pospolitej (*Ocimum basilicum* L.), melisy lekarskiej (*Melissa officinalis* L.) i ogórecznika lekarskiego (*Borago officinalis* L.). *Zesz. Post. Nauk Rol.* 527, 131–138.

Gomez C., Morrow R.C., Bourget C.M., Massa G.D., Mitchell C.A., 2013. Comparison of intracanopy light-emitting diode towers and overhead highpressure sodium lamps for supplemental lighting of greenhouse-grown tomatoes. *HortTechnology* 23, 93-98.

Gu Y., Narendran N., 2004. A noncontact method for determining junction temperature of phosphor-converted white LEDs. *Third international conference on solid state lighting. International Society for Optics and Photonics*, pp. 107-115.

Gupta S.D., Agarwal A., Springer 2017. Artificial lighting system for plant growth and development: Chronological advancement, working principles, and comparative assessment. In *Light emitting diodes for agriculture.*, Singapore, pp. 1-25.

Hart J.W., 1998. *Light and Plant Growth – (Topics in plant physiology: 1)*, ed.: M. Black & J. Chapman.

He Raut-Bron V., Robin C., Varlet-Grancher and Guckert A., 2001. Phytochrome mediated effects on leaves of white clover: Consequences for light interception by the plant under competition for light. *Ann. Bot.*, 88, special issue, 737-743.

Hernandez R., Kubota C., 2016. Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs. *Environ Exp Bot*, 121, 66-74.

Hogewoning S., Trouwborst G., Harbinson J., Van Leperen W., 2010. Light distribution in leaf chambers and its consequences for photosynthesis measurements. *Photosynthetica* 48, 219-226.

Hogewoning S.W., Trouwborst G., Maljaars H., Poorter H., Van Leperen W., Harbinson, J., 2010b. 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, 313117.

Holland D., Hatib K., Bar-Yaakov I., 2009. Pomegranate: botany, horticulture, breeding, in: Janick J. (Ed.), *Horticultural Reviews*. John Wiley and Sons, New Jersey, 127-191.

Jeong S.W., Park S., Jin J.S., Seo O.N., Kim G.S., Kim Y.H., Shin S.C., 2012. Influences of four different light-emitting diode lights on flowering and polyphenol variations in the leaves of chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium*). *Journal of agricultural and food chemistry*, 60(39), 9793-9800.

Johkan M., Shoji K., Goto F., Hashida S., Yoshihara T., 2010. Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. *Hortscience* 45:1809-1814.

Johkan M., Shoji K., Goto F., Hahida S.N. & Yoshihara T., 2012. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environmental and Experimental Botany*, 75, 128-133.

Johnson J., Bugbee B., 2017. Double-Ended High Pressure Sodium Fixtures Decline less than 6% over 2 years and 5000 hours. Utah State University.

Jones M.A., 2018. Using light to improve commercial value. *Horticulture research* 5, 47

Kaiser E., Weerheim K., Schipper R., Dieleman J.A., 2019. Partial replacement of red and blue by green light increases biomass and yield in tomato. *Scientia horticulturae* 249, 271-279.

Kamath D., Kong Y., Dayboll C. & Zheng Y., 2021. Dynamic versus Concurrent Lighting with Red and Blue Light-emitting Diodes as the Sole Light Source Can Potentially Improve *Campanula* Stock Plant Morphology for Cutting Production. *HortScience* 1(aop), 1-8.

Karamanoli K., Bouligaraki P., Constantinidou H.I.A., Lindow S.E., 2011. Polyphenolic compounds on leaves limit iron availability and affect growth on epiphytic bacteria. *Annals of Applied Biology* 159: 99-108.

Karlicek R., Sun C.C., Zissis G., & Ma R. (Eds.), Springer 2017. *Handbook of advanced lighting technology*. Cham, Switzerland.

Kasap S., 2001. *Pn junction devices and light emitting diodes*. An e-booklet available at <http://kasap3.usask.ca/samples/PNJunctionDevices.pdf>.

Kefeli V., Kalevitch M., Borsari B., 2003. Phenolic cycle in plants and environment. *Journal of Cell and Molecular Biology* 2: 13-18.

Khalilullah I., Reza T., Chen L., Mazumder A. M. H., Fan J., Qian C. & Fan X., April 2017. In-situ characterization of moisture absorption and hygroscopic swelling of silicone/phosphor composite film and epoxy mold compound in LED packaging. In 2017 18th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE), pp. 1-9. IEEE.

Kim H.H., Goins G.D., Wheeler R.M., Sager J.C., 2004. Stomatal conductance of lettuce grown under or exposed to different light qualities. *Annals of Botany* 94: 691-697.

Kim H.H., Wheeler R.M., Sager J.C., Yorio N.C., Goins G.D., 2005. Light-emitting diodes as an illumination source for plants: A review of research at Kennedy Space Center. *Habitation* 10, 71-78.

Kim S.J., Hahn E.J., Heo J.W., Peak K.Y., 2004b. Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets in vitro. *Sci. Hort.* 101, 143–151.

Kitajima M., Butler W.L., 1975. Quenching of chlorophyll fluorescence and primary photochemistry in chloroplasts by dibromothymoquinone. *Biochim. Biophys. Acta* 376, 105- 115.

Kitaya Y., Niu G., Koz Ai.T., Ohashi M., 1998. Photosynthetic photon flux photoperiod, and CO₂ concentration affect growth and morphology of Lettuce plug transplants. *HortScience* 33, 6, 998- 991.

Kitsinelis S., 2011. *Light sources: technologies and applications*. CRC Press, Florida.

Kong Y., Stasiak M., Dixon M.A. & Zheng Y., 2018. Blue light associated with low phytochrome activity can promote elongation growth as shade-avoidance response: A comparison with red light in four bedding plant species *Environ. Exp. Bot.* 155, 345- 359.

Kostopoulou P., Dini-Papanastasi O., Radoglou K., 2010. Density and substrate effects on morphological and physiological parameters of plant stock material of four forest species grown in mini-plugs. *Scandinavian Journal of Forest Research* 25:10-17.

Kowallik W., 1982. *Blue light effects on respiration. Annual Review of Plant Physiology*, 33, 51-72. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.pp.33.060182.000411>.

Krames M.R., Amano H., Brown J.J., Heremans P.L., 2002. *Introduction to the issue on high-efficiency light-emitting diodes. Selected Topics in Quantum Electronics IEEE Journal*, vol. 8(2), pp. 185-188.

Kumar A., Kuppusamy V.K., Holuszko M., Song S., Loschiavo A., 2019. *LED lamps waste in Canada: Generation and characterization. Resources, Conservation and Recycling* 146, 329-336.

Lafont R., Dauphin-Villemant C., Warren J.T. & Rees H., 2012. *Ecdysteroid chemistry and biochemistry. In Insect endocrinology. Academic Press.*, pp. 106-176.

Lafont U., Van Zeijl H., Van der Zwaag S., 2012. *Increasing the reliability of solid state lighting systems via self-healing approaches: A review. Microelectronics Reliability* 52, 71-89.

Lattanzio V., Lattanzio V.M.T., Cardinali A., 2006. *Role of phenolics in the resistance mechanisms of plants against fungal pathogens and insects, in: Imperato F. (Ed.), Phytochemistry: advances in Research, Research Signpost. Trivandrum, India*, pp. 23-67.

Lau E.K., 2013. *Understanding radiation safety of high-intensity light-emitting diodes, Product Compliance Engineering (ISPCE), 2013 IEEE Symposium on. IEEE*, pp. 1-3.

Leonardos E., Ma X., Lanoue J., Grodzinski B., 2019. *Leaf and whole plant gas exchange and water-use-efficiency of chrysanthemums under HPS and LEDs during vegetative and flower-induction stages. Canadian Journal of Plant Science*.

Li H., Tang C., Xu Z., Liu X. & Han X., 2012. *Effects of different light sources on the growth of non-heading Chinese cabbage (Brassica campestris L.). Journal of Agricultural Science*, 4(4), 262.

Li H., Tang C., Xu Z., 2013. *The effects of different light qualities on rapeseed (Brassica napus L.) plantlet growth and morphogenesis in vitro. Scientia Horticulturae* 150:117-124.

Li J., Wang J., Liu Z., Poppe A., 2014. *Solid State Physics Fundamentals of LED Thermal Behavior, Thermal Management for LED Applications. Springer*, pp. 15- 52.

Li Q., Kubota C., 2009. *Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. Environmental and Experimental Botany* 67:59-64.

Li X., Chen L., Chen M., 2011. *An approach of LED lamp system lifetime prediction, 2011 IEEE International Conference on Quality and Reliability. IEEE*, pp. 110-114.

Li Y., Xin G., Wei M., Shi Q., Yang F., Wang X., 2017. Carbohydrate accumulation and sucrose metabolism responses in tomato seedling leaves when subjected to different light qualities. *Sci Hortic*, 225, 490–497.

Lin K.H., Huang M.Y., Huang W.D., Hsu M.H., Yang Z.W., Yang C.M., 2013. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L.var. capitata). *Scientia Horticulturae* 150:86-91.

Lu G., Mehr M.Y., Van Driel W., Fan X., Fan J., Jansen K., Zhang G., 2015. Color shift investigations for LED secondary optical designs: comparison between BPA-PC and PMMA. *Optical Materials* 45, 37-41.

Mars M., 2000. Pomegranate plant material: genetic resources and breeding, a review. *Options Mediterraneennes: Serie A. Seminaires Mediterraneens* 42:55-62.

Martineau V., Lefsrud M., Naznin M.T., Kopsell D.A., 2012. Comparison of lightemitting diode and high-pressure sodium light treatments for hydroponics growth of Boston lettuce. *HortScience* 47, 477-482.

Massa G.D., Kim H.H., Wheeler R.M., Mitchell C.A., 2008. Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience* 43, 1951-1956.

Matsuda R., Ohashi-Kaneko K., Fujiwara K., Goto E., Kurata K., 2004. Photosynthetic characteristics of rice leaves grown under red light with or without supplemental blue light. *Plant Cell Physiol*, 45, 1870–1874.

Matsuda R., Ohashi-Kaneko K., Fujiwara K., Kurata K., 2008. Effects of blue light deficiency on acclimation of light energy partitioning in PSII and CO₂ assimilation capacity to high irradiance in spinach leaves. *Plant Cell Physiol*. 49, 664–670. Cooperate in the activation of the plastid psbD blue light-responsive promoter in Arabidopsis. *FEBS Letters*, 571, 26–30.

Mattsson A., 1996. Predicting field performance using seedling quality assessment. *New Forests* 13:223-248.

Maxwell K., Johnson G.N., 2000. Chlorophyll fluorescence - a practical guide. *J Exp Bot*, 51, pp. 659–666.

McCartney L., Lefsrud M., 2018. Protected agriculture in extreme environments: A review of controlled environment agriculture in tropical, arid, polar and urban locations. *Applied Engineering in Agriculture* 34, pp. 455-473.

McCree K.J. and Loomis R.S., 1969. Photosynthesis in fluctuating light, *Ecology*, 50, 3, pp. 422-428.

McCree K.J., 1972. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Metereol.*, 9, pp. 191-216.

McCree K.J., 1972a. "The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants", *Agricultural and Meteorology*, vol. 9, pp. 191-216.

McCree K.J., 1972b. "Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data", *Agricultural and Meteorology*, vol. 10, pp. 443-453.

Metallo R.M., Kopsell D.A., Sams C.E., Bumgarner N.R., 2018. Influence of blue/red vs. white LED light treatments on biomass, shoot morphology, and quality parameters of hydroponically grown kale. *Scientia horticulturae* 235, pp. 189-197.

Mickens M.A., Torralba M., Robinson S.A., Spencer L.E., Romeyn M.W., Massa G.D. & Wheeler R.M., 2019. Growth of red pakchoi under red and blue, supplemented white, and artificial sunlight provided by LEDs. *Scientia Horticulturae*, 245, pp. 200-209.

Mitchell C.A., 2015. Academic research perspective of LEDs for the horticulture industry. *HortScience* 50, pp. 1293-1296.

Mizuno T., Amaki W., Watanabe H., 2011. Effects of monochromatic light irradiation by LED on the growth and anthocyanin contents in leaves of cabbage seedlings, VI International Symposium on Light in Horticulture 907, pp. 179-184.

Moe R., 1997. Physiological aspects of supplementary lighting in horticulture. *Acta Hort. (ISHS)*, 4, 18, 17-24.

Moisio O., Pinho P., Tetri E. and Halonen L., 2004. "Controlling colour temperature of LED-luminaire," in *Proceedings of the 10th International Symposium on the Science and Technology of Light Sources - Toulouse, France*, pp. 375-376.

Moisio O., Pajula M., Pinho P., Halonen L. and Sepponen R., 2005. "Use of junction temperature in control of CCT in LED luminaire," in *Proceedings of the CIE Midterm Meeting and International Lighting Congress - Congreso Internacional De Iluminación - La Iluminación En El Siglo XXI, León, Spain*, pp. 328-334.

Narendran N. and Deng L., July 2002. Color Rendering Properties of LED Light Sources. *Solid State Lighting II: Proceedings of SPIE., Seattle, USA*, 7-11.

Naznin M.T., Lefsrud M., Gravel V. & Hao X., May 2016. Different ratios of red and blue LED light effects on coriander productivity and antioxidant properties. In *VIII International Symposium on Light in Horticulture* 1134, pp. 223-230.

Nelson J.A., Bugbee B., 2014. Economic analysis of greenhouse lighting: light emitting diodes vs high intensity discharge fixtures. *PloS one* 9, e99010.

Nhut D.T., Takamura T., Watanabe H., Okamoto K. & Tanaka M., 2003. Responses of strawberry plantlets cultured in vitro under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs) *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 73 43 52.

Niangoran N.U., Canale L., Tian F., Haba T.C. & Zissis G., October 2016. Optimal spectrum modeling calculation with light emitting diodes set based on relative quantum efficiency. In III International Symposium on Horticulture in Europe-SHE2016 1242., pp. 815-822.

Nissim-Levi A., Kitron M., Nishri Y., Ovadia R., Forer I. & Oren-Shamir M., 2019. Effects of blue and red LED lights on growth and flowering of *Chrysanthemum morifolium*. *Scientia horticultrae*, 254, 77-83.

Ouzounis T., Fretté X., Ottosen C.O., Rosenqvist E., 2014a. Spectral effects of LEDs on chlorophyll fluorescence and pigmentation in *Phalaenopsis* 'Vivien' and 'Purple Star'. *Physiologia Plantarum*, Epub ahead of print, doi: 10.1111/ppl.12300.

Ouzounis T., Fretté X., Rosenqvist E., Ottosen C.O., 2014b. Spectral effects of supplementary lighting on the secondary metabolites in roses, chrysanthemums, and campanulas. *Journal of Plant Physiology* 171:1491-1499.

Ouzounis T., Heuvelink E., Ji Y., Schouten H.J., Visser R.G.F., Marcelis L.F.M., 2016. Blue and red LED lighting effects on plant biomass, stomatal conductance, and metabolite content in nine tomato genotypes. *Acta Hortic*, 1134, 251–258.

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, e0202386.

Pecht M., Das D., Chang M.H., Springer 2014. Introduction to LED Thermal Management and Reliability, *Thermal Management for LED Applications.*, pp 3-14.

Pinho P., 2008. Usage and control of solid-state lighting for plant growth.

Pinho P., Moisio O., Tetri E. & Halonen L., 2004. Photobiological aspects of crop plants grown under light emitting diodes. In CIE Expert Symposium on LED Light Sources, Tokyo, Japan, CIE Central Bureau, 7-8.6., pp. 71-74.

Pinho P., Tetri E. and Halonen L., 2005. "Design and performance assessments of solid state light sources for plant growth," in *Proceedings of the 10th European Lighting Conference Lux Europa 2005: Lighting for Humans – Berlin, Germany*, pp. 297-301.

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 Organ Culture*, 92, 147-153. <http://dx.doi.org/10.1007/s11240-007-9317-1>.

Poulet L., Massa G., Morrow R., Bourget C., Wheeler R., Mitchell C.A., 2014. Significant reduction in energy for plant-growth lighting in space using targeted LED lighting and spectral manipulation. *Life Sciences in Space Research* 2, 43- 53.

Radoglou K.M., 2001. *Understanding planting establishment in constraint environment*, in: *Proceedings of Scientific meeting Hellenic Forestry Society, October 17-20, 2000, Kozani, Greece (in Greek with English summary)*. Greece: Hellenic Forest Society, 206–212.

Radoglou K., Dini-Papanastasi O., Kostopoulou P., Spyroglou G., 2009. *Forest regeneration material: state of the art and a new European approach for pre-cultivated planting stock production*, in: Poljakovic'-Pajnik L, Tobolka AT (Eds.), *Forestry in Achieving Millennium Goals*. Novi Sad, Serbia: Old Commerce, 17–24.

Rolland F., Moore B., Sheen J., 2002. *Sugar sensing and signaling in plants / The Plant Cell*, supplement, pp. 185–205.

Sager J.C., Edwards J.L., Klein W.H., 1982. "Light energy utilization efficiency for photosynthesis.", *Transactions of the ASAE - American Society of Agricultural Engineers*, vol. 25(6), pp. 1737-1746.

Sager J.C., Smith W.O., Edwards J.L., Cyr K.L., 1988. "Photosynthetic efficiency and phytochrome photoequilibria determination using spectral data", *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, vol. 31 (6), pp. 1882–1889.

Sager J.C., McFarlane J.C., Langhans R.W., Tibbitts T.W. (Eds.), 1997. *Radiation in: Plant growth chamber handbook*. North Central Region Research Publication, Iowa State University Press, 1–29.

Salisbury F.J., Hall A., Grierson C.S., Halliday K.J., 2007. *Phytochrome coordinates Arabidopsis shoot and root development*. *Plant J.* 50, 429–438.

Schanda J., Csuti P., Szabó F., Springer 2014. *Laboratory Measurement of Optical Properties of LEDs. Thermal Management for LED Applications.*, pp. 167-196.

Schuerger A.C., Brown C.S. and Stryjewski E.C., 1997a. *Anatomical features of Pepper plants (Capsicum annuum L.) grown under red light-emitting diodes supplemented with blue or far-red light*. *Ann. Bot.*, 79, 273-282.

Seigler D., 1998. *Plant Secondary metabolism*. Kluwer Academic publishers, Dordrecht.

Shinomura T., Uchida K. and Furuy A.M., 2000. *Elementary process of photoperception by phytochrome A for highirradiance response of hypocotyl elongation in Arabidopsis*. *Plant Physiol.*, 122, 1, 147-156.

Simeoneva M., Narendran N. and Boyce P., Winter 2003. *Application of Colored LEDs for Retail Display Windows*. *Journal of the Illuminating Engineering Society*.

Simpson R.S., 2003. *Lighting control—technology and applications*. Focal Press, Oxford.

Singh D., Basu C., Meinhardt-Wollweber M., Roth B., 2015. *LEDs for energy efficient greenhouse lighting*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49, 139-147.

Singleton V.L., Rossi J.A., 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdicphosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture* 16:144-158.

Snowden M.C., Cope K.R., Bugbee B., 2016. Sensitivity of seven diverse species to blue and green light: Interactions with photon flux. *PLoS One* 11.

Solano C.J., Hernández J.A., Suardíaz J. & Barba-Espín G., 2020. Impacts of LEDs in the Red spectrum on the germination, early seedling growth and antioxidant metabolism of pea (*Pisum sativum* L.) and melon (*Cucumis melo* L.). *Agriculture*, 10(6), 204.

Solovchenko A.E., Merzlyak M.N., 2008. Screening of visible and UV radiation as a photoprotective mechanism in plants. *Russian Journal of Plant Physiology* 55:719–737.

Steigerwald D.A., Bhat J.C., Collins D., Fletcher R.M., Holcomb M.O., Ludowise M.J., Martin P.S., Rudaz S.L., March-April 2002. "Illumination with solid state lighting technology", *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 8(2), pp. 310-320.

Stover E., Mercure E.W., 2007. The pomegranate: a new look at the fruit of paradise. *HortScience* 42:1088-1092.

Stutte G.W., 2009. Light-emitting diodes for manipulating the phytochrome apparatus. *HortScience*, 44(2), 231-234.

Swan B. & Bugbee B., 2017. Increasing blue light from LED's reduces growth of lettuce.

Taiz L., Zeiger E., 2010. *Plant Physiology*, 5th edition. Sinauer associates Inc, Sunderland, MA, pp 948.

Takao M., 2016. Health Effects of Occupational Exposure to LED Light: A Special Reference to Plant Cultivation Works in Plant Factories, in: Kozai, T., Fujiwara, K., Runkle, E.S. (Eds.), *LED Lighting for Urban Agriculture*. Springer, Singapore, pp. 429-443.

Texeira da Silva J.A., Rana T.S., Narzary D., Verma N., Meshram D.T., Ranade S.A., 2013. Pomegranate biology and biotechnology: a review. *Scientia Horticulturae* 160:85-107.

Tibbitts T.W., Morgan D.C, and Warrington I.J., 1983. "Growth of lettuce, spinach, mustard, and wheat plants under four combinations of high-pressure sodium, metal halide, and tungsten halogen lamps at equal PPFD", *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 108, pp. 622-630.

Tunde T., Bodrogi P. and Schanda J., 2001. Colour Rendering Properties of LED Sources. *Proceedings of the 2nd CIE Expert Symposium on LED Measurement.*, 11-12 May 2001, Gaithersburg, USA.

Van Driel W.D. & Fan X.J. (Eds.), 2012. *Solid state lighting reliability: components to systems* (Vol. 1). Springer Science & Business Media.

Van Lersel M.W., Springer 2017. *Optimizing LED lighting in controlled environment agriculture*. In *Light Emitting Diodes for Agriculture*, Singapore., pp. 59-80.

Wallace C., Both A., 2016. *Evaluating operating characteristics of light sources for horticultural applications*, VIII International Symposium on Light in Horticulture 1134, pp. 435-444.

Wheeler R.M., Mackowiak C.L., Sager J.C., 1991. "Soybean stem growth under high-pressure sodium with supplemental blue lighting", *Agronomy journal*, v. 83 (5): 903-906.

Wu B.S., Hitti Y., MacPherson S., Orsat V., Lefsrud M.G., 2020. *Comparison and perspective of conventional and LED lighting for photobiology and industry applications*. *Environmental and Experimental Botany*, 171, 103953.

Wu M.C., Hou C.Y., Jiang C.M., Wang Y.T., Wang C.Y., Chen H.H., Chang H.M., 2007. *A novel approach of LED light radiation improves the antioxidant activity of pea seedlings*. *Food Chemistry* 101:1753-1758.

Xie R.J., & Hirotsaki N., 2007. *Silicon-based oxynitride and nitride phosphors for white LEDs—A review*. *Science and technology of Advanced Materials*, 8(7-8), 588.

Yeh, 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(8), 2175-2180.

Zhang Y., Kaiser E., Zhang Y., Zou J., Bian Z., Yang Q. & Li T., 2020. *UVA radiation promotes tomato growth through morphological adaptation leading to increased light interception* *Environ. Exp. Bot.* 176 104073.

Zhao F., Narendran N., Vanderlofske J., 2002. *Optical elements for mixing colored LEDs to create white light*. *Solid State Lighting II: Proceedings of SPIE*. 7-11 July 2002, Seattle, USA.

Zukauskas A., Vaicekaskas R., Ivanauskas F., Gaska R. and Shur M., 2002. *Optimization of white polychromatic semiconductor lamps*. *Applied Physics Letters*, 80: 234-236.

Γαλάτης Β., Γανωτάκης Δ., Γκανή-Σπυροπούλου Κ., Καραμπουρνιώτης Γ., Κοτζαμπάσης Κ., Κωνσταντινίδου Ε.Ι., Μανέτας Ι., Ρουμπελάκη-Αγγελάκη Κ.Α., 2003. *Φυσιολογία Φυτών: από το Μόριο στο Περιβάλλον*. Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο, σελ. 673.

Μπαντής Φ.Θ., 2015. *Επίδραση τεχνητού φωτισμού διόδων εκπομπής φωτεινής ακτινοβολίας (Light-Emitting Diodes) στην ανάπτυξη σπορόφυτων ροδιάς (No. GRI-2015-15592)*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Μπαντής Φ.Θ., 2020. *Effects of light spectra from light-emitting diodes on the growth and quality of grafted watermelon seedlings (No. GRI-2020-28656)*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Σάββας Δημήτριος, 2016, Γενική Λαχανοκομία., Εκδόσεις Πεδίο.