



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ**
UNIVERSITY OF PATRAS

Σχολή Γεωπονικών Επιστημών Πανεπιστημίου Πατρών

Τμήμα Γεωπονίας

Πτυχιακή Εργασία

**«Η ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΦΑΚΩΝ FRESNEL ΓΙΑ
ΘΕΡΜΑΝΣΗ / ΨΥΞΗ ΣΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΑ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»**

Ζακή Μαρία Α.Μ. 11792

Δημοπούλου Παρασκευή Α.Μ. 11601

Επιβλέπων Καθηγητής: Καυγά Αγγελική

Αμαλιάδα 2022

Σημείωση

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έγινε υποστηρικτικά και στα πλαίσια Διδακτορικής Διατριβής και συνιστά/αποτελεί μέρος - μετά από πλέον επιμέλεια - του κειμένου της βιβλιογραφικής ανασκόπησης της Διδακτορικής Διατριβής του υποψήφιου Διδάκτορα του τμήματος Γεωπονίας κ. Πετράκη Θεόδωρου

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	6
1. Το Θερμοκήπιο	7
2.1. Υλικά κάλυψης	8
2.2. Θέρμανση.....	11
2.2.1. Συστήματα κεντρικής θέρμανσης	13
2.2.2. Συστήματα θέρμανσης με νερό χαμηλής θερμοκρασίας	15
2.3. Αερισμός.....	15
2.4. Δροσισμός.....	19
2. Ηλιακή Ακτινοβολία και Ενέργεια	21
3. Φακοί Fresnel.....	28
3.1. Ιστορική αναδρομή	28
3.2. Λεπτοί φακοί.....	31
3.3. Φαινόμενα οπτικής	34
3.4. Γενικά για τους φακούς Fresnel.....	38
3.5. Φακοί Fresnel στο θερμοκήπιο	45
4. Συμπεράσματα	50
Βιβλιογραφία	51

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στην χρήση των φακών Fresnel για την θέρμανση και την ψύξη ενός θερμοκηπιακού συστήματος. Το θερμοκήπιο είναι ένα σύστημα που παρέχει τις βέλτιστες κλιματικές συνθήκες για τα φυτά που αναπτύσσονται στον εσωτερικό τους, προστατεύοντάς τα από ακραίες καιρικές συνθήκες, όπως χαμηλές θερμοκρασίες, υψηλές ταχύτητες ανέμου, βροχή, χαλάζι, κ.ά. Το θερμοκήπιο ως παθητικό σύστημα ηλιακής ενέργειας, βασίζεται πολλές από τις λειτουργίες του στην ηλιακή ακτινοβολία. Μία από αυτές είναι η θέρμανσή του. Ωστόσο, σε ακραίες περιπτώσεις έντονης ηλιακής ακτινοβολίας υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης και καταστροφής της καλλιέργειας. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η ψύξη του εσωτερικού του. Για τις δύο αυτές αντίθετες διεργασίες χρησιμοποιούνται, εκτός από τις παραδοσιακές μεθόδους, όπως κεντρικά συστήματα θέρμανσης ή για την ψύξη, ο αερισμός και η υδρονέφωση, και συγκεντρωτικά συστήματα ηλιακής ακτινοβολίας, όπως οι φακοί Fresnel, σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκά, θερμικά ή υβριδικά φωτοβολταϊκά/θερμικά ηλιακά συστήματα. Οι φακοί Fresnel, με την δυνατότητα διαχωρισμού της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας, έχουν την ικανότητα να βοηθούν στην ψύξη του χώρου του θερμοκηπίου, εστιάζοντας το μέρος της άμεσης ακτινοβολίας στον συλλέκτη προς παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ μέσω του διάχυτου μέρους, παρέχεται ο φωτισμός για της ανάγκες της καλλιέργειας. Αντίθετα, όταν η θερμοκρασία είναι σε επίπεδα κάτω του βιολογικού βέλτιστου, ο απορροφητής τίθεται εκτός εστιακής περιοχής, με την ηλιακή ακτινοβολία να διέρχεται εξ ολοκλήρου εντός του θερμοκηπίου για την θέρμανσή του.

Λέξεις κλειδιά: Φακοί Fresnel, Θερμοκήπιο, Θέρμανση, Ψύξη, Ηλιακή Ενέργεια

Abstract

This thesis deals with the use of Fresnel lenses for heating and cooling a greenhouse system. A greenhouse is a system that provide the optimal climatic conditions for the plants inside them, protecting them from extreme weather conditions, such low temperatures, high wind speed, rain, hail, etc. The greenhouse as a passive solar energy system, basis a lot of its functions on solar radiation. One of them is its heating. However, in extreme cases of high solar radiation levels, there is risk of overheating and damage to the crop. Therefore, cooling the interior of the system is necessary. For these two opposite functions are used, in addition to the traditional methods, such as central heating systems, or ventilation and fog systems for cooling, ang centralized solar systems, such as Fresnel lenses, in combination with photovoltaic, thermal, or hybrid photovoltaic/thermal solar systems. Fresnel lens, with the ability to separate the direct and diffuse solar radiation, can help cool the interior of greenhouse by focusing the direct component of solar radiation on the collector to produce heat or electricity, while through the diffuse component, can provide the light needed by the crop. On the other hand, when temperature is below the biological optimal level, the absorber is placed outside the focal aera, with the solar radiation passing completely inside the greenhouse for its heating.

Keywords: Fresnel lenses, Greenhouse, Heating, Cooling, Solar Energy

1. Το Θερμοκήπιο

Τα θερμοκήπια είναι εξαιρετικά εξελιγμένα συστήματα, τα οποία έχουν ως στόχο την παροχή ιδανικών συνθηκών για την βέλτιστη ανάπτυξη και παραγωγή των φυτών καθ' όλη την διάρκεια του έτους. [1] Ως ελεγχόμενη περιβαλλοντική γεωργική εγκατάσταση, μπορεί να προάγει σε ικανοποιητικό βαθμό τον μεταβολισμό των καλλιεργειών, να συνεισφέρει στον έλεγχο των ασθενειών και των παρασίτων, ενώ παράλληλα, να βελτιώσει την χρήση των πόρων και να μειώσει την περιβαλλοντική ρύπανση, συμπεριλαμβανομένων των εκπομπών άνθρακα. [2] Είναι, ωστόσο, εγκαταστάσεις υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης, με αυτή να προσεγγίζει έως και το 50% του κόστους παραγωγής του θερμοκηπίου. Η κατανάλωση ενέργειας για την συμπλήρωση του αναγκαίου για τα φυτά φωτισμού, του αερισμού, της θέρμανσης και του δροσισμού είναι γνωστή και ως βασική κατανάλωση ενέργειας και αντιπροσωπεύει περισσότερο από το 90% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης του θερμοκηπίου. Οι παράγοντες που αποτελούν βασικά στοιχεία για την ανάπτυξη των φυτών είναι το φως, η θερμοκρασία, η υγρασία και η σύνθεση του αέρα (περιεκτικότητα σε CO₂) και θα πρέπει να παρέχονται και να διατηρούνται σε βέλτητα επίπεδα. [1]

Ο σημαντικότερος, ίσως, παράγοντας για την ανάπτυξη των φυτών είναι η ηλιακή ακτινοβολία, καθώς έχει άμεση επίδραση στην διεργασία την φωτοσύνθεσης. Τα θερμοκήπια είναι απαραίτητο να κατασκευάζονται με χρήση διαφανών υλικών κάλυψης, έτσι ώστε να φτάνει στα φυτά όσο το δυνατόν περισσότερη ακτινοβολία, και ιδιαίτερα ακτινοβολία στο φάσμα του ορατού της ηλιακής ακτινοβολίας. Σημαντικό είναι κατά τον σχεδιασμό του θερμοκηπίου να λαμβάνεται υπόψιν το γεγονός της χαμηλής θέσης του ήλιου σε κάποιες εποχές και ημέρες του έτους, δηλαδή σε μέρες που η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, η ένταση της ακτινοβολίας εξαρτάται και από την περιοχή. Σε περιοχές με μικρά γεωγραφικά πλάτη, όπου η ένταση της ακτινοβολίας είναι σε υψηλά επίπεδα, μπορεί να χρειαστεί σκίαση του χώρου του θερμοκηπίου για την αποφυγή υπερθέρμανσης.

Η θερμοκρασία στον χώρο του θερμοκηπίου είναι ένας ακόμη πολύ σημαντικός παράγοντας, καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την διαπνοή των φυτών. Όταν η θερμοκρασία στο θερμοκήπιο πέσει κάτω από τα επιθυμητά όρια για την εκάστοτε καλλιέργεια πρέπει να παρέχεται στο θερμοκήπιο ενέργεια υπό μορφή θερμότητας. Το υλικό κάλυψης του θερμοκηπίου πρέπει να ελαχιστοποιεί τις πιθανές απώλειες θερμότητας και σε συνδυασμό με την μέγιστη μετάδοση θερμότητας να διατηρούν σε χαμηλά επίπεδα τις απαιτήσεις θέρμανσης κατά τις ψυχρές περιόδους. Σε περιπτώσεις υψηλών εσωτερικών θερμοκρασιών, όπου ξεπερνιέται το “άνω” όριο της κατάλληλης θερμοκρασίας, η πλεονάζουσα θερμότητα πρέπει να απομακρύνεται μέσω διάχυσης με αερισμό του χώρου του θερμοκηπίου ή τεχνητή ψύξη. [1]

Όσον αφορά την υγρασία στον χώρο του θερμοκηπίου είναι ίσως το πιο περίπλοκο κομμάτι. Η υγρασία εντός του θερμοκηπίου επηρεάζεται τόσο από τις εξωτερικές συνθήκες του περιβάλλοντος, όσο και από τις εσωτερικές, λόγω του νερού που διαπνέεται από τα φυτά. Πάντα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου με μία ενεργή καλλιέργεια, η απόλυτη υγρασία είναι υψηλότερη της εξωτερική, ωστόσο, η επίδραση της θερμοκρασίας στην σχετική υγρασία, την καθιστά χαμηλότερη από την εξωτερική, καθώς σχεδόν πάντα η θερμοκρασία εντός του θερμοκηπίου είναι

μεγαλύτερη από την εξωτερική. Σημασία, λοιπόν, στο κομμάτι της υγρασίας έχει ότι ο αέρας του θερμοκηπίου έχει υψηλότερη απόλυτη υγρασία και συνεπώς υψηλότερη περιεκτικότητα σε υδρατμούς. Καθώς η διαπνοή επηρεάζει την υγρασία του αέρα, και ταυτόχρονα η υγρασία του αέρα επηρεάζει την διαπνοή, ο έλεγχος της υγρασίας του θερμοκηπίου περιορίζεται στην ρύθμιση της υγρασίας σε επίπεδο αποφυγής των ακραίων καταστάσεων, καθώς η διατήρησή της σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο είναι αδύνατη. Ο έλεγχος της υγρασίας εξαρτάται από πολλούς, παράλληλα, παράγοντες, όπως οι απαιτήσεις των φυτών, ο καιρός, η διαθεσιμότητα του εξοπλισμού για θέρμανση, εξαερισμό και υδρονέφωση και η παροχή ενέργειας. [3]

Τα θερμοκήπια στην Ελλάδα

Παραπάνω αναφέραμε πως ένα θερμοκήπιο πρέπει να είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να παρέχει τις βέλτιστες συνθήκες καθ' όλη την διάρκεια του έτους, ενώ ταυτόχρονα επηρεάζεται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Συνεπώς, για τον σχεδιασμό ενός θερμοκηπίου απαιτείται καλή και σαφής γνώση του κλίματος της περιοχής. Η Ελλάδα βρίσκεται στην περιοχή της Μεσογείου, με επικράτηση του Μεσογειακού κλίματος. Τα χαρακτηριστικά του Μεσογειακού κλίματος είναι ήπιοι χειμώνες και θερμά καλοκαίρια, με πολύ υψηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο, αν και οι συνθήκες φαίνονται ιδανικές, τα θερμοκήπια παρουσιάζουν ορισμένα προβλήματα, όπως οι χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω από το βιολογικό βέλτιστο) κατά τις νύχτες του χειμώνα, με την θέρμανση να κρίνεται απαραίτητη για τουλάχιστον 3 με 6 μήνες μέσα στο έτος, οι υψηλές θερμοκρασίες κατά την διάρκεια της ημέρας, η υψηλή νυχτερινή σχετική υγρασία, τα χαμηλά ποσά ηλιακής ακτινοβολίας τον χειμώνα και η παρουσία φορτίων ανέμου, χαλαζιού και ορισμένες φορές χιονιού.

Για να μπορούν να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω προβλήματα που επηρεάζουν τα θερμοκήπια της Μεσογειακής λεκάνης απαιτείται τα θερμοκήπια στην περιοχή αυτή να σχεδιάζονται βάσει συγκεκριμένων χαρακτηριστικών, όπως της υψηλής διαπερατότητας στην ηλιακή ακτινοβολία, της καλής θερμικής μόνωσης και της ύπαρξης συστημάτων θέρμανσης για διατήρηση της θερμοκρασίας σε επιθυμητά επίπεδα, ιδίως κατά την διάρκεια την νύχτας τον χειμώνα, του αποτελεσματικού εξαερισμού από ανεμιστήρες, ενώ θα πρέπει ο σκελετός του θερμοκηπίου να παρουσιάζει υψηλή σταθερότητα για να αντιστέκεται επαρκώς στα φορτία του ανέμου και του χιονιού. [1]

2.1. Υλικά κάλυψης

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία ενός θερμοκηπίου είναι τα υλικά κάλυψης, οι ιδιότητες των οποίων επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ποσότητα και την ποιότητα του φωτός που περνάει στον χώρο των φυτών. [4] Τα υλικά κάλυψης που κυκλοφορούν στο εμπόριο παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά όσον αφορά την φασματική μετάδοση και τις ενεργειακές απαιτήσεις του θερμοκηπίου. Έτσι με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά και για τις διαφορετικές κλιματικές συνθήκες της κάθε περιοχής πρέπει να επιλέγεται προσεχτικά το είδος του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί για την επένδυση του θερμοκηπίου.

Τα βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει το υλικό κάλυψης είναι:

- Υψηλή διαπερατότητα στο φάσμα του ορατού και την φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία – PAR. Τα μήκη κύματος που αντιστοιχούν σε αυτή την ακτινοβολία είναι από 400 έως 700nm. Η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία αποτελεί περίπου το 47% της ηλιακής ακτινοβολίας και είναι απαραίτητη για την βασική διεργασία της φυτικής παραγωγής, την φωτοσύνθεση. Μετρείται από τους *αισθητήρες PAR* και χρησιμοποιούνται κυρίως στην γεωργική έρευνα για μετρήσεις ακτινοβολίας μέσα στην κόμη των φυτών, στα θερμοκήπια, στους θαλάμους ανάπτυξης και στο εργαστήριο για μετρήσεις φωτισμού.
- Χαμηλή διαπερατότητα στην ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος – FIR – με μήκη κύματος από 3.000 έως 20.000nm. Η ακτινοβολία αυτή αποτελεί μόλις το 2% της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας και εκπέμπεται από κάθε σώμα που έχει συνήθη θερμοκρασία. Είναι σημαντικό το είδος αυτής της ακτινοβολίας να μην διαπερνά το υλικό κάλυψης και έτσι να δημιουργείται μία παγίδα θερμότητας στο χώρο του θερμοκηπίου, που ονομάζεται “φαινόμενο του θερμοκηπίου”. Η διαπερατότητα στην ακτινοβολία FIR διαφέρει ανάμεσα στα διάφορα υλικά κάλυψης, με τους υαλοπίνακες να παρουσιάζουν ποσοστό διέλευσης 0%, το PVC, 12%, και το καθαρό πολυαιθυλένιο 88%.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής. Ο χρόνος που διαρκεί ένα υλικό κάλυψης εξαρτάται από την διάδοση του φωτός μέσα από αυτό, συνεπώς θα πρέπει η μείωση της μετάδοσης του φωτός να είναι χαμηλή σε σχέση με τον χρόνο. Η διάρκεια ζωής ενός υλικού κάλυψης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας, ιδιαίτερα στα πλαστικά υλικά κάλυψης (αποπολυμερισμός) και η αντοχή τους στον άνεμο. Συγχρόνως, η αντοχή σε συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες, όπως η χαλαζόπτωση, αποτελεί σημαντικό στοιχείο, καθώς υλικά κάλυψης όπως οι υαλοπίνακες παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία. Η υπεριώδης ακτινοβολία αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τον χρόνο ζωής των υλικών κάλυψης και πιο συγκεκριμένα για τα πλαστικά. Τα φωτοχημικά φαινόμενα που προκαλούνται από αυτό το είδος ακτινοβολίας μειώνουν την φωτεινή διαπερατότητά τους, την μηχανική αντοχή τους και τελικά επέρχεται η καταστροφή του υλικού.
- Συμπύκνωση υδρατμών υπό μορφή μεμβράνης, και όχι υπό μορφή σταγόνων. Η συμπύκνωση της υγρασίας του αέρα, που αυξάνεται από την διαπνοή των φυτών και την εξάτμιση του εδάφους, στην εσωτερική πλευρά του υλικού κάλυψης του θερμοκηπίου, είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την αφύγρανση του χώρου και τον έλεγχο του κλίματος. Ο τρόπος με τον οποίο συμπυκνώνεται η υγρασία εξαρτάται από το είδος των επιφανειών, οι οποίες διαχωρίζονται μεταξύ υδρόφιλων και υδρόφοβων. Στις μεν πρώτες επιφάνειες η συμπύκνωση γίνεται υπό μορφή μεμβράνης, ενώ στις δεύτερες υπό μορφή σταγόνων. Οι σταγόνες που δημιουργούνται στις υδρόφοβες επιφάνειες αποτελούν σημαντικό κίνδυνο για τις καλλιέργειες, καθώς με την πτώση τους πάνω σε αυτές η ανάπτυξη ασθενειών είναι συχνό φαινόμενο. Από την άλλη, η συμπύκνωση των υδρατμών υπό μορφή μεμβράνης παρουσιάζει τόσο το πλεονέκτημα της απομάκρυνσης του νερού από τις πλάγιες πλευρές του θερμοκηπίου, ενώ η μεγάλη απορρόφηση που παρουσιάζουν οι υδρατμοί στην μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας μειώνει σημαντικά την διαπερατότητα σε αυτό το είδος ακτινοβολίας.
- Χαμηλή συσσώρευση σκόνης. Η ανάπτυξη ηλεκτροστατικών φορτίων στην επιφάνεια του υλικού κάλυψης του θερμοκηπίου ωφελεί την συσσώρευση σκόνης και αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα, λόγω της μείωσης της διαπερατότητας του φωτός. Η

ποσοτικοποίηση της απώλειας του φωτός είναι δύσκολη, με αυτή να ποικίλλει μεταξύ 5 έως 40%. Η πιθανή συσσώρευση σκόνης σε πλαστικές επιφάνειες είναι υψηλότερη από ό,τι σε γυάλινες, λόγω της πιο εύκολης “φόρτισης” των πλαστικών φιλμ, ενώ η δυνατότητα της βροχής να μπορεί να αφαιρέσει πιο εύκολα την σκόνη από το γυαλί, δίνει στους υαλοπίνακες ένα σημαντικό πλεονέκτημα. [4] [5]

Τα τρία βασικά υλικά κάλυψης για θερμοκήπια είναι το γυαλί, τα άκαμπτα πλαστικά φύλλα (σκληρά πλαστικά) και οι πλαστικές μεμβράνες (μαλακά πλαστικά). Στα σκληρά πλαστικά βρίσκουμε τα ακρυλικά φύλλα διπλού τοιχώματος (PMMA) και τις πολυκαρβονικές διπλές επιφάνειες (PC). Από την άλλη, στα μαλακά πλαστικά υπάρχει μεγαλύτερη ποικιλία κυρίως λόγω επεξεργασμένων φύλλων πολυαιθυλενίου (PE). Πιο συγκεκριμένα, βρίσκουμε φύλλα πολυαιθυλενίου με σταθεροποίηση UV, με απορρόφηση στην ακτινοβολία FIR (φύλλα PE – IR) και φύλλα πολυαιθυλενίου με χαμηλή διαπερατότητα στην ακτινοβολία FIR (φύλλα PE – EVA). Ένα ακόμη είδος πλαστικού υλικού κάλυψης, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως στην Ιαπωνία, είναι το φύλλο PVC (πολυβινυλοχλωρίδιο). Το PVC παρουσιάζει χαμηλή διαπερατότητα στην ακτινοβολία FIR. [4] Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα ποσοστά διέλευσης στην άμεση και διάχυτη συνιστώσα της ολικής ακτινοβολίας, το ποσοστό διέλευσης στην μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία, καθώς και η διάρκεια ωφέλιμης χρήσης για τα παραπάνω υλικά κάλυψης.

Πίνακας 1: Ποσοστά διέλευσης στην ακτινοβολία και διάρκεια ωφέλιμης χρήσης. [5]

Υλικό	Ποσοστό διέλευσης στην ακτινοβολία (%)			Διάρκεια ωφέλιμης χρήσης σε έτη
	Φωτεινή ακτινοβολία		Μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία	
	Άμεση	Διάχυτη		
Υαλοπίνακας (4mm)	89 – 91	82	0	25
Ακρυλικό (PMMA) διπλού τοιχώματος	80 – 89	76 – 83	0 – 1	15
Πολυκαρβονική διπλή επιφάνεια (12mm)	80	61 – 66	0 – 1	14
Πολυαιθυλένιο με σταθεροποίηση UV (200μm)	89 – 90	81	40 – 60	1 – 5
Πολυαιθυλένιο PE – IR (200μm)	80 – 89	80	13 – 30	3 – 5
Πολυαιθυλένιο PE – EVA (180μm)	90	82	20 – 40	4 – 5
Διαφανές φύλλο PVC (200mm)	85 – 91	80	17	4 – 6

2.2. Θέρμανση

Για να μπορεί εντός του θερμοκηπίου να συντηρηθεί μια υγιής καλλιέργεια, με την ποιότητα και την ποσότητα του παραγόμενου προϊόντος να είναι υψηλή, πρέπει οι κλιματικές συνθήκες εντός του θερμοκηπίου να είναι οι βέλτιστες. Κατά την διάρκεια της νύχτας, αλλά πολλές φορές και την ημέρα ιδιαίτερα την χειμερινή περίοδο, οι θερμοκρασίες εντός του θερμοκηπίου είναι πιθανόν να μειωθεί κάτω από το βιολογικό βέλτιστο. Σε τέτοιες περιπτώσεις τα θερμοκήπια πρέπει να θερμαίνονται για να ανταποκρίνονται στον ρόλο τους. [4] Κατά τον σχεδιασμό του συστήματος θέρμανσης του θερμοκηπίου πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η θερμοκρασία στο ύψος των φυτών πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο ομοιόμορφη σε όλη την έκταση του θερμοκηπίου, ενώ ταυτόχρονα η θερμοκρασία κατά την διάρκεια της θέρμανσης να ξεπερνά την θερμοκρασία στο σημείο δρόσου, ώστε να αποφευχθεί η συμπύκνωση των υδρατμών και να μειωθεί ο κίνδυνος ανάπτυξης ασθενειών. Παράλληλα, με την απόδοση του συστήματος σημασία πρέπει να δίνεται και στην ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος, ώστε να είναι η χαμηλότερη δυνατή.

Σε πολλά, ωστόσο, θερμοκήπια δεν χρησιμοποιείται κάποιου είδους θέρμανση, ιδιαίτερα σε θερμοκήπια της Νοτίου Ελλάδος, που το κλίμα χαρακτηρίζεται από έντονη ηλιακή ακτινοβολία και υψηλές σχετικά θερμοκρασίες. Σε τέτοιες περιπτώσεις σημασία δίνεται στο να προστατευτεί η καλλιέργεια από αντίξοες καιρικές συνθήκες, όπως ισχυροί άνεμοι και υπερβολικές βροχοπτώσεις. Τα θερμοκήπια αυτά χαρακτηρίζονται ως *μη θερμαινόμενα*, χωρίς δηλαδή να περιλαμβάνουν κάποιου είδους συστήματος τεχνητής θέρμανσης. Η θέρμανση σε αυτά τα θερμοκήπια επαφίεται αποκλειστικά στην ηλιακή ακτινοβολία και την ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που εισέρχεται στο εσωτερικό του. Αν και τις ηλιόλουστες ημέρες μπορεί να αναπτυχθεί θερμοκρασία υψηλότερη από την εξωτερική, τις νύχτες ή σε ημέρες με πυκνή νεφοκάλυψη και κρύους πνέοντες ανέμους, η θερμοκρασία μπορεί να πέσει σε χαμηλά επίπεδα με δυσμενή αποτελέσματα για τα φυτά.

Ανάλογα με το είδος και τις δυνατότητες του συστήματος τεχνητής θέρμανσης, τα θερμοκήπια χαρακτηρίζονται ως *ελαφρώς θερμαινόμενα* ή *πλήρως θερμαινόμενα*. Τα ελαφρώς θερμαινόμενα θερμοκήπια εξοπλίζονται πολλές φορές με ένα απλό αερόθερμο μικρής ισχύος. Σκοπός τους είναι κυρίως η προστασία του θερμοκηπίου από την εμφάνιση παγετού, αλλά μερικές φορές χρησιμοποιείται για την διατήρηση της θερμοκρασίας σε επίπεδο που να αποφεύγεται η συμπύκνωση των υδρατμών. Ωστόσο, σε αυτές τις περιπτώσεις θερμοκηπίων, οι θερμοκρασίες απέχουν πολύ από τις άριστες για την ανάπτυξη των φυτών. Από την άλλη, τα πλήρως θερμαινόμενα θερμοκήπια είναι εξοπλισμένα με σύστημα θέρμανσης που επιτρέπει την ρύθμιση της θερμοκρασίας στο βέλτιστο επίπεδο. Σε περιπτώσεις ημερών με μερική ή πλήρη νεφοκάλυψη, ή/και με χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες, η ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί για την κατάλληλη θέρμανση του χώρου του θερμοκηπίου και τότε κρίνεται απαραίτητη η λειτουργία του συστήματος θέρμανσης, ώστε να διατηρηθεί η θερμοκρασία σε άριστο επίπεδο. Κατά την διάρκεια της νύχτας, τα συστήματα θέρμανσης καταναλώνουν εξαιρετικά μεγάλες ποσότητες από την απαιτούμενη ενέργεια για την σωστή λειτουργία του θερμοκηπίου. Για την ρύθμιση της θερμοκρασίας, η κεντρική θέρμανση του θερμοκηπίου αποτελείται από την ροή ζεστού νερού ή αερόθερμα κατάλληλης ισχύος, με χρήση αεραγωγών για την ομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας. [5]

Τα συστήματα θέρμανσης που χρησιμοποιούνται σε ένα θερμοκήπιο μπορούν να διακριθούν σε αρκετές κατηγορίες, ως προς την πηγή ενέργειας σε συμβατικά συστήματα ή σε συστήματα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ως προς τον φορέα θερμότητας, δηλαδή τον μέσον που χρησιμοποιείται για την μεταφορά της θερμότητας, σε συστήματα θέρμανσης με αέρα, με ζεστό νερό, με ατμό και με ακτινοβολία και με βάση τον τρόπο μεταφοράς της θερμότητας. Ο τρόπος μεταφοράς μπορεί να γίνεται με τέσσερις βασικούς τρόπους:

- την συναγωγή (επαγωγή), όπου ο αέρας του θερμοκηπίου μεταφέρεται στον θερμαντικό σώμα, θερμαίνεται και στην συνέχεια μεταφέρεται σε όλο τον χώρο του θερμοκηπίου. Η μεταφορά της θερμότητας στην συγκεκριμένη περίπτωση γίνεται με βεβιασμένη συναγωγή,
- τον συνδυασμό ακτινοβολίας και ελεύθερης συναγωγής, όπου η κατανομή της θερμότητας γίνεται με εναέριους σωλήνες ζεστού νερού ή ατμού. Η ποσότητα της θερμότητας εδώ παρουσιάζει μεγάλη εξάρτηση από την διάμετρο των σωλήνων μεταφοράς,
- την αγωγιμότητα, όπου η θερμότητα μεταφέρεται με αγωγή. Η χρήση αυτού του τρόπου μεταφοράς γίνεται από συστήματα θέρμανσης δαπέδου ή τραπεζιών καλλιέργειας, όπου η θερμότητα μεταφέρεται με αγωγή στο δάπεδο και από εκεί ξανά με αγωγή στις γλάστρες και τις ρίζες των φυτών, και
- τον συνδυασμό συναγωγής και ακτινοβολίας, όπου με κυκλοφορία νερού χαμηλής θερμοκρασίας σε σωληνώσεις μεγάλης επιφάνειας που βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους, η θερμότητα μεταφέρεται με ελεύθερη συναγωγή στον αέρα και από εκεί με θερμική ακτινοβολία στο κάτω μέρος των φύλλων των φυτών. [5]

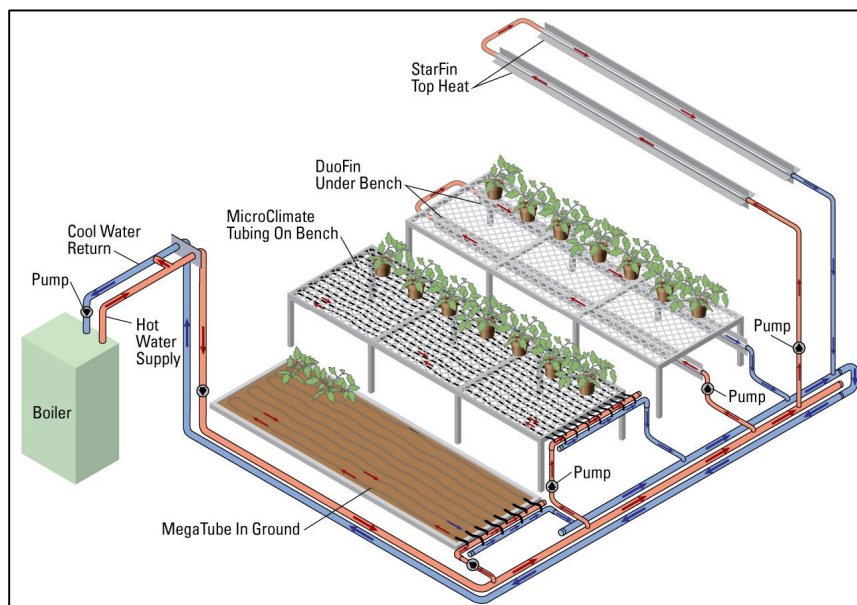
Πέραν της διαφοράς του τρόπου μεταφοράς της θερμότητας κατά τον σχεδιασμό και την εγκατάσταση του συστήματος θέρμανσης πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κάποια επιμέρους ζητήματα. Αρχικά, η μείωση του φυσικού φωτισμού που προκαλείται από την χρήση μέσων όπως σωληνώσεις, πρέπει να είναι μικρή ώστε να μην επηρεάζεται η ανάπτυξη των φυτών. Σημαντικό, επίσης, όσον αφορά την απόδοση της παραγωγής είναι το σύστημα θέρμανσης να μην καταλαμβάνει σημαντικό μέρος του χώρου του θερμοκηπίου, που θα οδηγήσει στην μείωση την καλλιεργήσιμης έκτασης. Η θέση τοποθέτησής του πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην εμποδίζει τις εργασίες και την απόδοση των εργατών, ενώ με μία πιθανή αύξηση της ταχύτητας του αέρα να μην προκαλούνται κραδασμοί ή τοπικές αφυδατώσεις των φυτών. Συγχρόνως, σε πολύ μεγάλες ταχύτητες του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο ή με την ύπαρξη μεγάλων επιφανειών των θερμαντικών στοιχείων αυξάνονται πολύ οι απώλειες ενέργειας. Συνεπώς, πρέπει να γίνεται έλεγχος και ο ολικός συντελεστής απωλειών του θερμοκηπίου να είναι σχετικά μικρός. Ακόμη, η κατανομή της θερμότητας θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο ομοιόμορφη, ώστε οι θερμοκρασίες να είναι παρόμοιες, με τον ρυθμό κατανάλωσης νερού και αύξησης των φυτών να είναι ίδιος σε όλη την επιφάνεια του θερμοκηπίου. Τέλος, αλλά ύψιστης σημασίας είναι το σύστημα θέρμανσης να μπορεί να θέτει γρήγορα την θερμοκρασία σε κατάλληλο επίπεδο, ώστε να μειώνεται αποτελεσματικά η συμπύκνωση των υδρατμών στην φυλλική επιφάνεια των φυτών.

2.2.1. Συστήματα κεντρικής θέρμανσης

Τα συστήματα κεντρικής θέρμανσης που χρησιμοποιούνται στα θερμοκήπια αποτελούνται από έναν κεντρικό λέβητα, ένα δοχείο πίεσης που έχει σχεδιαστεί να θερμαίνει νερό ή να παράγει ατμό, με την λειτουργία του να βασίζεται στην καύση φυσικού αερίου ή πετρελαίου. Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιείται ελεγχόμενη καύση του καυσίμου. Ο λέβητας τοποθετείται σε μόνιμη θέση έξω από το θερμοκήπιο και το ζεστό νερό ή τον ατμό να μεταφέρεται εντός του χώρου του θερμοκηπίου μέσω ενός δικτύου σωληνώσεων (pipe system). Τα βασικά εξαρτήματα τα οποία σχηματίζουν έναν λέβητα είναι ο καυστήρας, ο εναλλάκτης θερμότητας και τα χειριστήρια. Οι σωληνώσεις μεταφοράς του νερού ή του ατμού βρίσκονται συνήθως κάτω από τους πάγκους καλλιέργειας ή κατά μήκος των πλευρικών τοιχωμάτων της περιμέτρου του θερμοκηπίου. Έτσι, με το σύστημα αυτό υπάρχει η δυνατότητα ικανοποιητικής θέρμανσης, τόσο του αέρα, όσο και του εδάφους του θερμοκηπίου, ωστόσο, περιορίζεται από την μεγάλη αδράνειά του, δηλαδή ο χρόνος απόκρισης στις εντολές για έναρξη ή παύση της θέρμανσης είναι αρκετά μεγάλος. [5] [6] [7]

Σύστημα ζεστού νερού

Το ζεστό νερό, σήμερα, προτιμάται για την θέρμανση του χώρου του θερμοκηπίου, ιδιαίτερα σε χώρες της Ευρώπης, ακόμη σε μεγάλης έκτασης θερμοκήπια. Το βασικό πλεονέκτημα αυτού του τρόπου θέρμανσης είναι η δυνατότητα της ρύθμισης της θερμοκρασίας του νερού, ώστε να ταιριάζει με τις απαιτήσεις παροχής θερμότητας, είτε πρόκειται για θέρμανση δαπέδου ή θέρμανση πάγκων, είτε για περιμετρική θέρμανση προς αφαίρεση πάγου ή χιονιού. Με αυτό τον τρόπο, τα συστήματα ζεστού νερού παρέχουν καλύτερη ομοιομορφία θέρμανσης, ενώ μπορούν να εξοικονομήσουν ενέργεια με την ανοχή μικρότερων θερμοκρασιών στα άνω στρώματα του θερμοκηπίου. Παράλληλα, σε περίπτωση βλάβης του λέβητα υπάρχει αρκετά μεγάλο απόθεμα θερμότητας για την διατήρηση της θερμοκρασίας, μέχρι την επιδιόρθωσή του. [5] [6]



Εικόνα 1: Διάγραμμα συστήματος θέρμανσης με ζεστό νερό. [8]

Σύστημα παραγωγής ατμού

Στους λέβητες παραγωγής ατμού, ο ατμός ρέει μέσω των σωληνώσεων από περιοχές υψηλής πίεσης σε περιοχές χαμηλής πίεσης, χωρίς την βοήθεια εξωτερικής πηγής ενέργειας (π.χ. αντλία). Κύριο πλεονέκτημα του ατμού είναι η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Ιδιαίτερα όταν ο λέβητας είναι τοποθετημένος μακριά από το θερμοκήπιο αυτό μπορεί να είναι πολύ σημαντικό όφελος. Ωστόσο, απαιτείται ένα σύστημα υπό πίεση, του οποίου η διατήρηση είναι αρκετά δύσκολη. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της θέρμανσης με ζεστό αέρα είναι η γρήγορη ανταπόκριση στην ενέργεια του ελέγχου, ενώ ο συνολικό συντελεστής των θερμικών απωλειών του θερμοκηπίου είναι μικρότερος από ένα σύστημα σωληνώσεων μεταφοράς ζεστού νερού. Τέλος, έχει αποδειχθεί ότι το κάλυμμα του θερμοκηπίου (υαλοπίνακας ή πολυαιθυλένιο) δεν επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας όταν η θέρμανση γίνεται με ζεστό αέρα. [5] [6] [9]



Εικόνα 2: Λέβητας παραγωγή ατμού. [10]



Εικόνα 3: Λέβητας παραγωγής ζεστού νερού. [5]

2.2.2. Συστήματα θέρμανσης με νερό χαμηλής θερμοκρασίας

Στα συγκεκριμένα συστήματα θέρμανσης το νερό που χρησιμοποιείται βρίσκεται σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία, περίπου 20 με 60°C. Λόγω των μικρών απαιτήσεων ενέργειας για την θέρμανση, η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να προέρχεται από ήπιες μορφές ενέργειας, αλλά και από συμβατικά καύσιμα. Η παραγόμενη θερμότητα από τέτοιου είδους συστήματα είναι συνήθως χαμηλού κόστους, τόσο λόγω της χρήσης ήπιων μορφών ενέργειας, όσο και του γεγονότος ότι το ζεστό νερό μπορεί να μεταφέρεται στον χώρο του θερμοκηπίου μέσω σωληνώσεων από υλικά χαμηλού κόστους, όπως πολυαιθυλένιο ή πολυπροπυλένιο. Αυτό ωφελεί και στην δημιουργία ανεξάρτητων συστημάτων θέρμανσης του αέρα του θερμοκηπίου και του υπεδάφους [5] Βασικό πλεονέκτημα των συστημάτων χαμηλής θερμοκρασία είναι η τοποθέτηση των σωληνώσεων αρκετά κοντά στην καλλιέργεια, χωρίς τα φυτά να διατρέχουν κίνδυνο καταστροφής λόγω υψηλών θερμοκρασιών, ενώ ταυτόχρονα γίνεται πιο εύκολο ο έλεγχος των συνθηκών κοντά στα φυτά και αποφεύγεται η ανάπτυξη μυκητολογικών ασθενειών. [11]

Τα συστήματα χαμηλής θερμοκρασίας αποκτούν επιπλέον πλεονέκτημα στην θέρμανση του υπεδάφους του θερμοκηπίου. Οι θερμοκρασία στο ριζόστρωμα πρέπει να διατηρείται σε θερμοκρασία περίπου 22°C. Έτσι, η αντίστοιχη θερμοκρασία των σωληνώσεων που βρίσκονται στο έδαφος πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 25 με 35°C, εύρος που καλύπτεται εύκολα από ένα σύστημα θέρμανσης χαμηλής θερμοκρασίας. Οι υψηλές θερμοκρασίες στην ρίζα των φυτών δημιουργούν σοβαρά προβλήματα στα φυτά, με την αύξηση της σχετικής υγρασίας στον χώρο και την δημιουργία ευνοϊκού περιβάλλοντος για την ανάπτυξη νηματωδών παρασίτων.

Η χαμηλή θερμοκρασία από την άλλη φέρνει στην επιφάνεια και κάποια επιμέρους ζητήματα, τα οποία απαιτούν προσοχή. Για την απόδοση της απαιτούμενης ποσότητας θερμότητας θα πρέπει είτε η επιφάνεια των σωλήνων που μεταφέρουν το νερό να είναι αρκετά μεγάλη, είτε ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από το θερμαντικό στοιχείο στον αέρα να είναι επίσης μεγάλος. Για την αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, συνήθως γίνεται χρήση ανεμιστήρων που με την ροή του αέρα αυξάνουν τον ρυθμό συναγωγής στην επιφάνεια του θερμαντικού στοιχείου. Ένα ακόμη μειονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι η αυξημένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό οφείλεται αρχικά στην γρήγορη πτώση της θερμοκρασίας του νερού κατά την μεταφορά του, με αποτέλεσμα να απαιτούνται αντλίες μεγαλύτερης ισχύος για την ροή μεγαλύτερης ποσότητας νερού σε σωλήνες μεγαλύτερης διατομής. Συγχρόνως, κατά την χρήση αερόθερμων ζεστού νερού, απαιτείται μεγαλύτερη ταχύτητα αέρα, επομένως και μεγαλύτερη θερμή επιφάνεια του εναλλάκτη, ενώ για την καλύτερη ομοιομορφία της θερμοκρασίας στον χώρο του θερμοκηπίου απαιτείται η τοποθέτηση περισσότερων από ένα αερόθερμων. [5]

2.3. Αερισμός

Με τον όρο αερισμό μπορούν να περιγραφούν δύο διαφορετικές τεχνικές, αυτή της ανάδευσης του αέρα εντός του θερμοκηπίου, και αυτή της ανταλλαγής του θερμού εσωτερικού αέρα, με τον πιο ψυχρό εξωτερικό αέρα. Η δεύτερη τεχνική ονομάζεται ειδικότερα εξαερισμός. [5] Ο σκοπός του αερισμού δεν αντιστοιχεί αποκλειστικά στην κάλυψη μίας ανάγκης, αλλά χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή διοξειδίου του άνθρακα και οξυγόνου, την διασπορά της πλεονάζουσας

θερμοκρασίας και γενικότερα για τον έλεγχο της, και τέλος για τον έλεγχο της υγρασίας. Ο αερισμός είναι από του πιο σημαντικούς παράγοντες και από τις διεργασίες που πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη σημασία για μία καλή απόδοση της καλλιέργειας με αξιόλογη ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος, καθ' όλη την διάρκεια του έτους.

Διακρίνουμε δύο τύπους αερισμού, τον φυσικό αερισμό (natural ventilation), ο οποίος διενεργείται μέσω πλευρικών ανοιγμάτων ή ανοιγμάτων στην οροφή του θερμοκηπίου, και ο δυναμικός αερισμός, στον οποίο γίνεται χρήση ανεμιστήρων και εξαρτάται από την παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα εξαερισμού αξιολογούνται βάσει συγκεκριμένων χαρακτηριστικών, όπως ο ρυθμός αερισμού που προσφέρουν, η διαφορά θερμοκρασία που δημιουργείται μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού, η ομοιογένεια της θερμοκρασίας μέσα στο θερμοκήπιο και η ταχύτητα του αέρα στο ύψος των φυτών, αλλά και ανάμεσά τους. [12]

Φυσικός (ή παθητικός) εξαερισμός

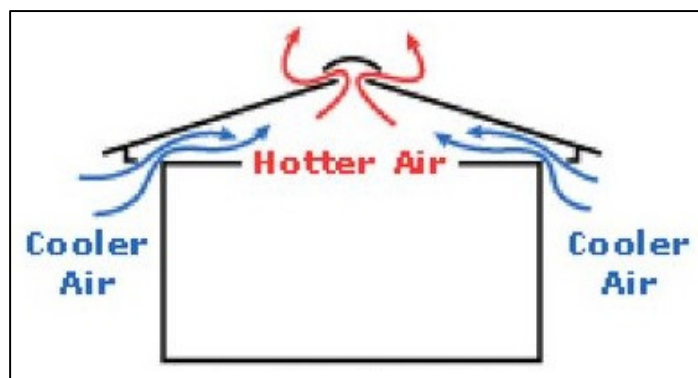
Ο φυσικός εξαερισμός συμβαίνει μέσω των ανοιγμάτων εξαερισμού, είτε στις πλευρές του θερμοκηπίου, είτε στην οροφή, λόγω των φυσικών διαφορών πίεσης που είναι απαραίτητες για την ελεύθερη ανταλλαγή και κίνηση του αέρα. Για να έχουμε έναν ικανοποιητικό ρυθμό ανανέωσης του αέρα θα πρέπει η επιφάνεια των ανοιγμάτων να είναι ίση με το 25 με 30% της συνολικής καλυπτόμενης επιφάνειας του θερμοκηπίου. Οι διαφορές πίεσης δημιουργούνται μέσω δύο διαφορετικών διεργασιών, του φαινομένου του ελκυσμού, λόγω διαφοράς θερμοκρασίας και υγρασίας, εντός και εκτός θερμοκηπίου, και της δράσης του ανέμου στις διαφορετικές πλευρές του θερμοκηπίου.



Εικόνα 4: Συνεχόμενα πλευρικά παράθυρα σε συνδυασμό με παράθυρα οροφής. [17]

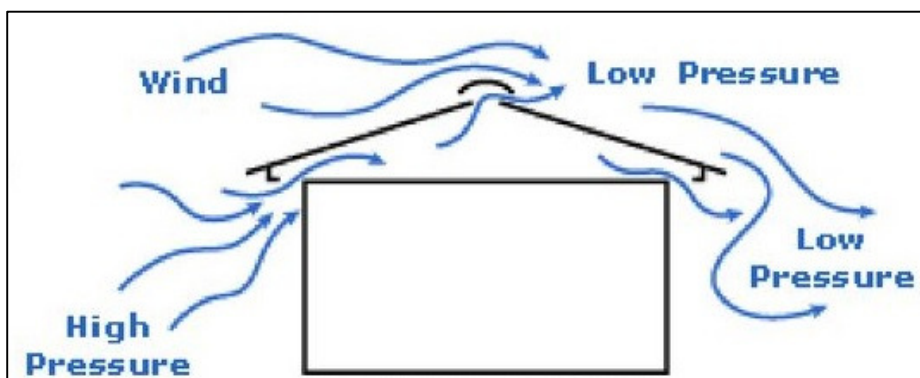
Το φαινόμενο του ελκυσμού οφείλεται στην ιδιότητα του αέρα να γίνεται πιο ελαφρύς με την αύξηση της θερμοκρασίας του, και τις έντονες δυνάμεις άνωσης που οφείλονται στις θερμοκρασιακές διαφορές του εσωτερικού και του εξωτερικού αέρα. Κατά το φαινόμενο του

ελκυσμού, ο αέρας του θερμοκηπίου όντας πιο θερμός από τον εξωτερικό τείνει να κινείται ανοδικά και να εξέρχεται από τα ανοίγματα της οροφής. Η έλλειψη αέρα στα κατώτερα στρώματα του θερμοκηπίου μειώνει την πίεση εκεί δημιουργώντας υποπίεση, με αποτέλεσμα να εισέρχεται από τα πλευρικά παράθυρα ο ψυχρός εξωτερικός αέρας. Ο ψυχρός αέρας, όντας βαρύτερος λόγω της χαμηλότερης πυκνότητάς του, παραμένει σχετικά στάσιμος έως ότου θερμανθεί και ξεκινήσει να ανέρχεται.



Εικόνα 5: Εξαερισμός λόγω διαφοράς θερμοκρασίας

Η δεύτερη αιτία δημιουργίας διαφοράς πίεσης είναι η ταχύτητα του ανέμου που δρα στις διαφορετικές επιφάνειες του θερμοκηπίου. Σε ένα θερμοκήπιο και στην πλευρά που πνέει προς αυτή ο άνεμος δημιουργείται στατική πίεση υψηλότερη της βαρομετρικής. Στην αντίθετη, υπήνεμη πλευρά, η πίεση που δημιουργείται είναι χαμηλότερη της βαρομετρικής. Έτσι, στις διαφορετικές αυτές πλευρές δημιουργείται θετική και αρνητική πίεση με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα ρεύμα αέρα. Ανάλογα με την ταχύτητα του αέρα και την δύναμη που ασκεί στην προσήνεμη πλευρά του θερμοκηπίου ασκείται μεγαλύτερη δύναμη και συνεπώς μεγαλύτερη διαφορά πίεσης. [5]



Εικόνα 6: Εξαερισμός λόγω διαφοράς στατική πίεσης

Δυναμικός εξαερισμός

Σε περιπτώσεις που στο εξωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες, μεγαλύτερες των 30°C, και άπνοια, ή σχετικά χαμηλές ταχύτητες ανέμου, τότε ο φυσικός εξαερισμός δεν επαρκεί και τίθεται επιτακτική η ανάγκη του δυναμικού εξαερισμού. Ο

δυναμικός εξαερισμός βασίζεται στην λειτουργία ανεμιστήρων που προκαλούν εξαναγκασμένη κίνηση του αέρα για την μεταφορά του εντός και εκτός θερμοκηπίου. Τέτοια συστήματα για να είναι αποτελεσματικά πρέπει να έχουν την κατάλληλη ισχύ ώστε να μπορούν να ελαχιστοποιούν την αύξηση της θερμοκρασίας τις θερμές ώρες, να δημιουργούν ομοιομορφία των συνθηκών σε όλο τον χώρο του θερμοκηπίου, να είναι αυτοματοποιημένα με την μικρότερη δυνατή ανάγκη για συντήρηση και να είναι οικονομικό τόσο κατά την αγορά και την εγκατάσταση, αλλά και κατά την λειτουργία του. [5]

Όταν η θερμοκρασία στο θερμοκήπιο αυξηθεί σε επίπεδο ανώτερο του επιθυμητού, ένας θερμοστάτης δίνει εντολή για άνοιγμα των περσίδων, που είναι κλειστές όταν το σύστημα είναι εκτός λειτουργίας για την αποφυγή απωλειών ενέργειας. Οι περσίδες του ανεμιστήρα τοποθετούνται στο εσωτερικό των πτερυγίων του ανεμιστήρα, έτσι ώστε ο ανεμιστήρας και το περίβλημα να είναι τελείως διαχωρισμένα από το περιβάλλον του θερμοκηπίου όταν ο ανεμιστήρας δεν λειτουργεί. Ιδιαίτερη προσοχή στη θέση και τη γεωμετρία της συσκευής εισόδου αέρα είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική ψύξη και την ομοιόμορφη κατανομή. Με την λειτουργία των εξαεριστήρων, αυτοί απορροφούν και εξάγουν τον θερμό αέρα από το θερμοκήπιο, δημιουργώντας ένα ελαφρύ κενό που τραβάει τον εξωτερικό αέρα μέσω των ανοιγμάτων της πλευράς που βρίσκεται απέναντι από του εξαεριστήρες. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται εξαερισμός με υποπίεση. Καθώς ο αέρας ρέει μεταξύ των φυτών, απορροφά θερμότητα, αυξάνοντας την θερμοκρασία και την υγρασία του πριν βγει από το θερμοκήπιο. [18] Ένας εναλλακτικός τρόπος εξαερισμού είναι ο εξαερισμός με υπερπίεση. Το σύστημα υπερπίεσης χρησιμοποιείται συνήθως όταν υπάρχουν υποχρεωτικά ανοίγματα οροφής και πλευρικά, ενώ παρέχει και μεγαλύτερη θερμοκρασιακή ομοιομορφία. Σε αυτό το σύστημα, οι εξαεριστήρες δρουν αντίστροφα από το σύστημα υποπίεσης, απορροφώντας τον αέρα από το εξωτερικό του θερμοκηπίου. Ο αέρας αυτός διοχετεύεται στο εσωτερικό αυξάνοντας την πίεση. Για να επέλθει ισορροπία, ο επιπλέον αέρας εξέρχεται από τα ανοίγματα του θερμοκηπίου δημιουργώντας μία συνεχόμενη ροή. Σε ένα σύστημα δυναμικού εξαερισμού, η δυναμικότητα των εξαεριστήρων πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μπορούν να κάνουν 60 αλλαγές του αέρα ανά ώρα και να καλύπτουν τις ανάγκες την θερινή περίοδο. Η χειμερινή περίοδο, λόγω των συνθηκών η απαιτούμενη ισχύς είναι ίση με το ένα τέταρτο της ισχύος που απαιτείται το καλοκαίρι. [5] [7]



Εικόνα 7: Εξαεριστήρες σε τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο.

2.4. Δροσισμός

Σε περιοχές που το κλίμα τους χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλές θερμοκρασίες, ενώ οι ταχύτητες του ανέμου είναι χαμηλές ιδιαίτερα το καλοκαίρι, ακόμη και ο δυναμικός εξαερισμός αδυνατεί να μειώσει την θερμοκρασία. Παράλληλα, οι πολύ υψηλές ταχύτητες του ανέμου εντός του θερμοκηπίου για μείωση της θερμοκρασίας, προκαλούν υπερβολική αύξηση της διαπνοής, γεγονός που μπορεί να αποδειχτεί καταστροφικό για τα φυτά. Τα παραπάνω οδηγούν στην διαδικασία του δροσισμού με εξάτμιση νερού, ο οποίος είναι ένας αξιόπιστος τρόπος για την μείωση της θερμοκρασίας και ταυτόχρονα, την αύξηση της υγρασίας στον χώρο του θερμοκηπίου. Τα δύο χρησιμοποιούμενα μέσα δροσισμού με εξάτμιση είναι ο συνδυασμός δυναμικού εξαερισμού με χρήση υγρού τοιχώματος (υγρή παρειά) και η εκτόξευση νερού υπό μορφή πολύ λεπτών σταγόνων (υδρονέφωση) κι ταυτόχρονα φυσικός εξαερισμός.

Σύστημα δυναμικού εξαερισμού με υγρή παρειά (Fan and Pad system)

Ένα σύστημα δυναμικού εξαερισμού με υγρή παρειά αποτελείται από ανεμιστήρες εξαγωγής που είναι τοποθετημένοι στο ένα άκρο του θερμοκηπίου και από μία επιφάνεια πορώδους υλικού με μία αντλία, που κυκλοφορεί νερό πάνω και μέσα σε αυτό, στο άλλο άκρο. Με την λειτουργία των ανεμιστήρων, ο αέρας έλκεται μέσα από την βρεγμένη επιφάνεια, εξατμίζοντας το νερό. Η θερμική ενέργεια που περιέχεται στον αέρα απορροφάται από το νερό κατά την αλλαγή φάσης του σε ατμό. Με την μείωση της ενέργειας αυτής μειώνεται και η θερμοκρασία του αέρα. Με αυτό το σύστημα, ωστόσο, δημιουργούνται διαβαθμίσεις της θερμοκρασίας στον χώρο του θερμοκηπίου, καθώς ο αέρας είναι ιδιαίτερα ψυχρός αμέσως μετά την υγρή επιφάνεια, ενώ στο άλλο άκρο ο αέρας είναι πιο θερμός, λόγω της απορρόφησης θερμότητας από την ηλιακή ακτινοβολία, τα φυτά και το έδαφος, καθ' όλη την διάρκεια ροής του στο θερμοκήπιο. [13]



Εικόνα 8: Υγρό τοίχωμα (εσωτερική όψη).

Υδρονέφωση

Ένα σύστημα ψύξης με υδρονέφωση βασίζεται στον ψεκασμό πολύ μικρών σταγόνων νερού πάνω από την καλλιέργεια. Η διάμετρος των σταγόνων πρέπει να είναι πολύ μικρή έτσι ώστε να δημιουργείται μία μεγάλη επιφάνεια προς εξατμίση, αλλά και για να μην επικάθονται στο φύλλωμα των φυτών. Οι σταγόνες πρέπει να εξατμίζονται κατά την πτώση τους μέσα στο ρεύμα αέρα που δημιουργείται στο θερμοκήπιο. Η υδρονέφωση μπορεί να διακριθεί μεταξύ δύο περιπτώσεων, την υδρονέφωση χαμηλής πίεσης και την υδρονέφωση υψηλής πίεσης. Στην πρώτη περίπτωση οι εκτοξευτές εφοδιάζουν τον χώρο του θερμοκηπίου με σταγόνες μεγέθους μεγαλύτερου των 200μm. Από αυτές ένα μέρος εξατμίζεται στον αέρα και ένα μέρος πέφτει στην επιφάνεια των φυτών και εξατμίζεται ανάλογα με την θερμοκρασία της επιφάνειάς τους. Η ποσότητα του νερού που εξατμίζεται στον αέρα είναι σχετικά μικρή, περίπου 20 με 30% της συνολικής ποσότητας του νερού. Με την δεύτερη περίπτωση της υδρονέφωσης υψηλής πίεσης οι διάμετροι των σταγόνων είναι μόλις μερικές δεκάδες μικρόμετρα, με αποτέλεσμα το νερό να εξατμίζεται κατά ένα μεγάλο μέρος κατά την πτώση. Με αυτή την μέθοδο αποφεύγονται τα προβλήματα που μπορεί να δημιουργηθούν στην καλλιέργεια από την υδρονέφωση χαμηλής πίεσης. [4]



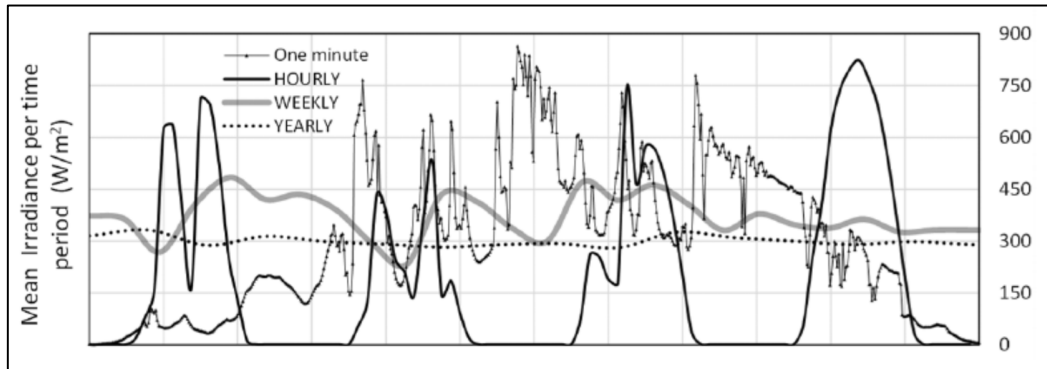
Εικόνα 9: Σύστημα υδρονέφωσης για ψύξη θερμοκηπίου. [14]

2. Ηλιακή Ακτινοβολία και Ενέργεια

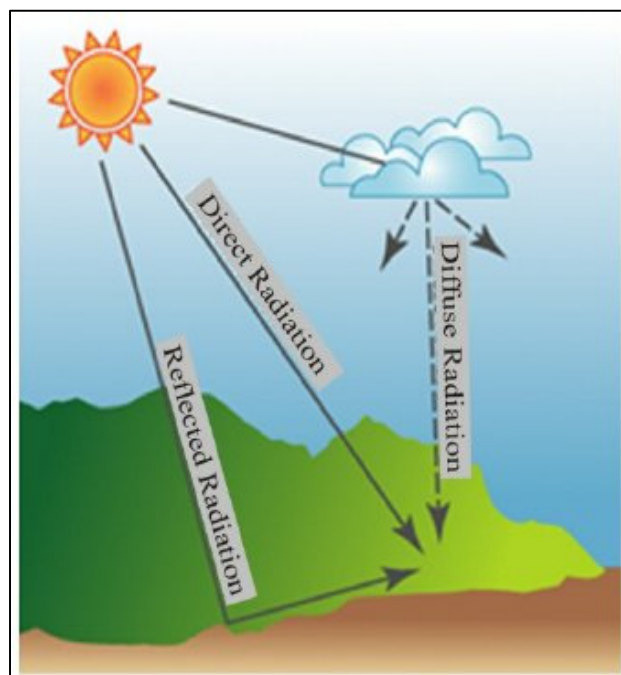
Μία από τις βασικές πηγές ενέργειας που καταναλώνεται είτε για την εξέλιξη φυσικών φαινομένων είτε από τον ίδιο τον άνθρωπο μέσω των δραστηριοτήτων του, αποτελεί ο Ήλιος. Ο Ήλιος έχει μία ενεργό θερμοκρασίας μέλανος σώματος 5777K, συνεπώς, και βάσει του νόμου Stefan – Boltzmann, η εκπεμπόμενη από την επιφάνεια του ενέργεια κατέχει ένα τεράστιο ποσό. Ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας αυτής που φτάνει στην Γη αποθηκεύεται στους ωκεανούς διατηρώντας την θερμοκρασία σε ένα επίπεδο ισορροπίας, βοηθώντας έτσι στην βιοποικιλότητα. [15]

Η ηλιακή ενέργεια ταξινομείται μεταξύ θερμότητας (ηλεκτρομαγνητικό κύμα) και φωτός (φωτόνια), με το Ήλιο να είναι η κύρια πηγή ενέργειας τόσο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, αλλά και για Μη Ανανεώσιμες Πηγές, όπως τα ορυκτά καύσιμα τα οποία είναι ουσιαστικά αποτέλεσμα αποθηκευμένης για εκατομμύρια χρόνια ηλιακής ενέργειας. [16] Η μεγάλη ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία διαφορετικών τέτοιων συστημάτων, από απλά φωτοβολταϊκά πάνελ μέχρι και φωτοβολταϊκά συστήματα ενσωματωμένα σε κτήρια (Building-integrated photovoltaics – BIPV) προς αντικατάσταση των κλασικών οικοδομικών υλικών. Η χρήση της ηλιακής ενέργειας δεν περιορίζεται μόνο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά για την θέρμανση του νερού σε κτήρια, τον φωτισμό κ.α., ενώ η μεγάλη μείωση του κόστους οδήγησε σε ευρεία οικιακή χρήση. [17]

Κρίσιμο σημείο για τις εφαρμογές πάνω στην ηλιακή ενέργεια αποτελεί η εξαιρετικά έντονη μεταβλητότητά της, αλλά και οι διάφορες διεργασίες στις οποίες υπόκειται στην ατμόσφαιρα, όπως η απορρόφηση, η αντανάκλαση και η σκέδαση. Στην μεταβολή της έντασης της ακτινοβολίας που φτάνει στην Γη συνεισφέρει τόσο η χρονική διακύμανση (ημερήσια και ετήσια) (Εικόνα 10), λόγω της τροχιάς του Ήλιου, όσο και οι διάφορες ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπως τα νέφη, τα αιωρούμενα σωματίδια κ.τ.λ. Παράλληλα, άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι το γεωγραφικό πλάτος της εκάστοτε περιοχής και το υψόμετρό της. Από την μία οι μεταβολές που αφορούν την κίνηση του Ήλιου παρουσιάζουν ένα σταθερό μοτίβο, σε αντίθεση με τις μεταβολές λόγω της ατμόσφαιρας που είναι κατά κύριο λόγο ακανόνιστες. Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην Γη αποτελείται από δύο διαφορετικές συνιστώσες, την *άμεση* (*direct*), η οποία είναι το κομμάτι της ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια της Γης σε ευθεία γραμμή απευθείας από τον ήλιο, και την *διάχυτη* (*diffuse*), η οποία είναι αποτέλεσμα σκεδάσεων, από τα διάφορα στοιχεία της ατμόσφαιρας. Μία ακόμη συνιστώσα μπορεί να αποτελεί το *Albedo*, η *ανακλώμενη* δηλαδή από το έδαφος ακτινοβολία (Εικόνα 11). Το σύνολο των παραπάνω αναφέρεται ως *Παγκόσμια Ακτινοβολία* (*Global Radiation*). [18]

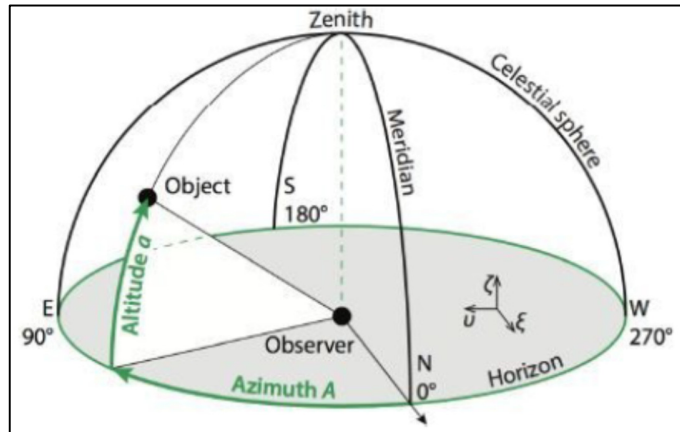


Εικόνα 10: Σύγκριση της μεταβλητότητας για διαφορετικές χρονικές κλίμακες για περιοχή της Βόρειας Αμερικής [19]



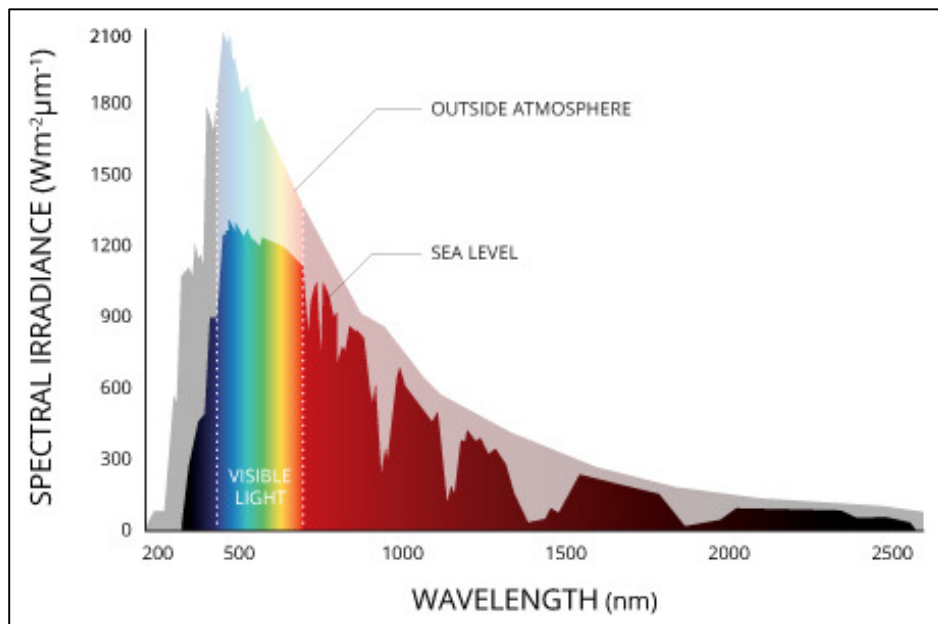
Εικόνα 11: Συστατώσες ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια [20]

Εκτός της χρονικής μεταβλητότητας, η ηλιακή ακτινοβολία και κατά συνέπεια η ηλιακή ενέργεια παρουσιάζει και διαφορετική χωρική κατανομή. Για κάθε περιοχή πάνω στην Γη, ο Ήλιος δεν έχει την ίδια θέση για κάθε χρονική στιγμή, επομένως είναι απαραίτητο κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος ηλιακής ενέργειας να γνωρίζουμε την θέση του ήλιου για μία δεδομένη στιγμή. Η παραμετροποίηση της θέσης του ήλιου για φωτοβολταϊκές εφαρμογές γίνεται με χρήση του οριζόντιου συστήματος συντεταγμένων, με την θέση του Ήλιου να εκφράζεται με δύο διαφορετικές γωνίες, την *γωνία α* με εύρος από -90° έως 90° , που δίνει το υψόμετρο του Ήλιου πάνω από το οριζόντιο επίπεδο της περιοχής, και το *αζιμούθιο A*, που είναι η γωνία μεταξύ της προβολής της απόστασης του Ήλιου από τον παρατηρητή στο οριζόντιο επίπεδο και της ευθείας που έχει κατεύθυνση προς τον Βορρά. (Εικόνα 12) Μετριέται από Δυτικά προς Ανατολικά με εύρος γωνίας από 0° έως 360° , με την γωνία να ίση με 0° για κατεύθυνση προς τον Βορρά. [18]



Εικόνα 12: Παρουσίαση υψομέτρου (altitude) και αζιμούθιου (azimuth) πάνω στο οριζόντιο σύστημα συντεταγμένων

Σημαντικό κομμάτι της ηλιακής ενέργειας αποτελεί το ηλιακό φάσμα (*solar spectrum*) (Εικόνα13), καθώς σύμφωνα με τον νόμο του Planck για την ακτινοβολία, η εκπεμπόμενη ενέργεια παρουσιάζει εξάρτηση από το μήκος κύματος. Το ηλιακό φάσμα αποτελείται από ακτινοβολία που αντιστοιχεί σε μήκη κύματος από 0 έως το άπειρο. Ωστόσο, μόνο ένα τμήμα αυτών (0,23 έως 2,26 μm) επιτρέπεται να διαπεράσει την ατμόσφαιρα. [16] Οι τρεις τρεις περιοχές κατά μήκος του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνουν στην επιφάνεια της Γης είναι η υπεριώδης (*ultraviolet*) με μήκη κύματος μικρότερα των 0,4 μm και σε ποσοστό περίπου 8% της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας, η ορατή (*PAR*) με μήκη κύματος μεταξύ 0,4 μm και 0,7 μm , σε ποσοστό 42,3% και η υπέρυθρη (*infrared*), η οποία σχετίζεται με την θέρμανση της Γης, με μήκη κύματος μεγαλύτερα των 0,7 μm , σε ποσοστό 49,4%. Καθεμία από αυτές τις περιοχές παρουσιάζει και διαφορετικό αντίκτυπο στο περιβάλλον. [21] Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας και στο επίπεδο της θάλασσας.



Εικόνα 13: Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας [21]

Η ηλιακή ενέργεια είναι μία από τις συνιστώσες της λεγόμενης Πράσινης Ενέργειας. Η Πράσινη Ενέργεια είναι ένας τύπος ενέργειας που παράγεται με μέσα και μεθόδους οι οποίες προκαλούν ελάχιστη ή καθόλου ζημία στο περιβάλλον. Συνεπώς, η στροφή στην ηλιακή ενέργεια αποτελούσε και αποτελεί επιτακτική ανάγκη. Πριν από μία δεκαετία μορφές ενέργειας, όπως η ηλιακή ή η αιολική ήταν από τις πιο ακριβές μορφές παραγωγής ενέργειας. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη της τεχνολογίας που είχε ως αποτέλεσμα μεγάλες βελτιώσεις στα συστήματα ηλιακής ενέργειας, αλλά και οι οικονομίες κλίμακας, με την μείωση του κόστους λόγω αύξησης του παραγόμενου προϊόντος, κατέστησαν τις μορφές Πράσινης Ενέργειας από τις φθηνότερες στην αγορά.

Αποτελεί μία απεριόριστη πηγή ενέργειας, καθώς η ένταση που η Γη δέχεται καθημερινά αντιστοιχεί σε ένα ποσό περίπου 1366W, ενώ ταυτόχρονα είναι διαθέσιμη για όλους χωρίς κόστος. Κύριο πλεονέκτημα της ηλιακής ενέργειας είναι η απευθείας μετατροπή της σε μορφές ενέργειας χρήσιμες για διάφορες δραστηριότητες, όπως η ηλεκτρική και η θερμική, μέσω φωτοβολταϊκών ηλιακών κυψελίδων ή υβριδικών φωτοβολταϊκών/θερμικών συστημάτων. [22] Παράλληλα, ο διαχωρισμός της ηλιακής ακτινοβολίας σε άμεση και διάχυτη, κάνει την ηλιακή ενέργεια να επιδρά ταυτόχρονα σε ένα σύνολο φυσικών διαδικασιών στο νερό, τον αέρα και την φωτοσύνθεση μέσω της έμμεσης συνιστώσας, ενώ μέσω της άμεσης σε διάφορα τεχνικά συστήματα.

Για να μπορέσουμε να αξιοποιήσουμε την ηλιακή ενέργεια είναι απαραίτητη αρχικά η συλλογή της και μετέπειτα η μετατροπή της στην επιθυμητή μορφή ενέργειας. Η συλλογή της γίνεται με διάφορους τρόπους που χωρίζονται σε πρώτη φάση σε δύο κατηγορίες, τα *ενεργητικά συστήματα*, τα οποία χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη συσκευών μετατροπής της ενέργειας του ήλιου, σε χρήσιμες μορφές, όπως ζεστό νερό ή ηλεκτρισμό, και τα *παθητικά συστήματα*, των οποίων ο σχεδιασμός, η τοποθέτηση και τα υλικά κατασκευής τους εκμεταλλεύονται την θερμότητα και τον φως, απευθείας από τον ήλιο.

Ενεργητικά συστήματα ηλιακής ενέργειας

Ανάλογα με την χρήση στα ενεργητικά συστήματα διακρίνονται επιμέρους κατηγορίες, όπως αυτή της ενεργητικής θέρμανσης χώρου (active solar space heating), της θέρμανσης νερού (active solar water heating), τα φωτοβολταϊκά κύτταρα (photovoltaic – PV – solar cells) και τα συστήματα συγκέντρωσης ηλιακής ισχύος (concentrated solar power – CSP). Για την θέρμανση ενός χώρου τα ενεργητικά συστήματα αποτελούνται από έναν συλλέκτη ο οποίος με χρήση ενός μέσω όπως ο αέρα ή κάποιο υγρό, συλλαμβάνουν την ηλιακή θερμική ενέργεια και την μεταφέρουν μέσω ηλεκτρικών ανεμιστήρων ή σωληνώσεων. Για την θέρμανση νερού, τα συστήματα αποτελούνται από δύο μέρη, έναν ηλιακό συλλέκτη και μία δεξαμενή αποθήκευσης. Ανάλογα με το κλίμα της περιοχής, η διαδικασία θέρμανσης είναι διαφορετική. Σε περιοχές με πιο θερμό κλίμα, οι συλλέκτες λαμβάνουν την ηλιακή ενέργεια και θερμαίνουν το νερό απευθείας. Αντίθετα, σε περιοχές με χαμηλές θερμοκρασίες, γίνεται χρήση ρευστού υψηλής πυκνότητας το οποίο μεταφέρεται σε μία δεξαμενή νερού και θερμαίνει έμμεσα το νερό.

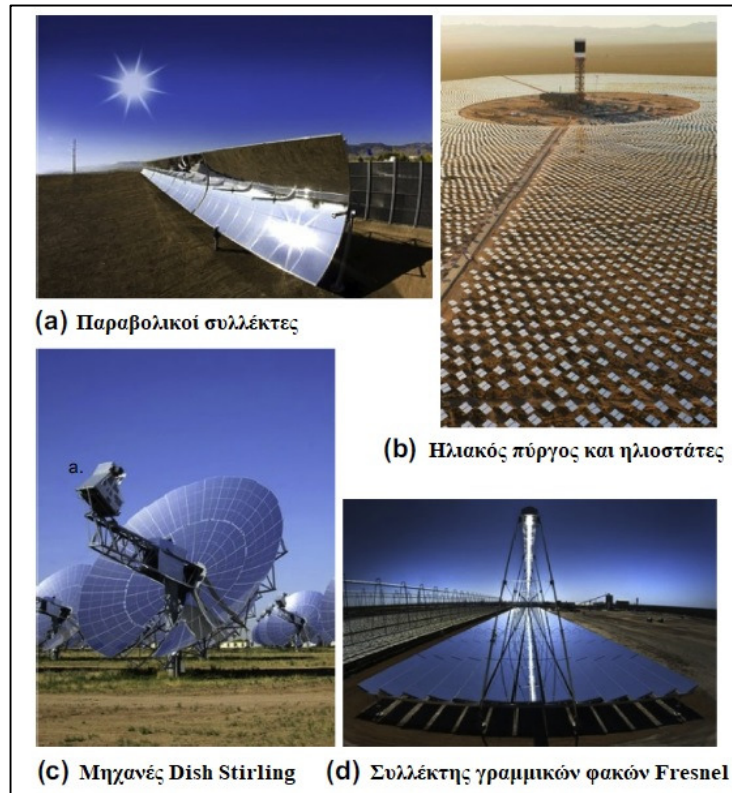
Τα παραπάνω συστήματα αφορούν την χρήση της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή θερμότητας. Ωστόσο, όπως είπαμε, η ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα ακόμη κύριο παραγόμενο προϊόν. Η χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδος σε αυτή την περίπτωση. Τα

φωτοβολταϊκά κύτταρα χρησιμοποιώντας ημιαγώγιμα υλικά, κάνουν χρήση του φωτοβολταϊκού φαινομένου και μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρισμό. Σύνηθες υλικό κατασκευής τέτοιων στοιχείων είναι το πυρίτιο, ωστόσο, μεγάλη ανάπτυξη έχουν και τα στοιχεία από πολυκρυσταλλικές λεπτές μεμβράνες (thin films). Τα φωτοβολταϊκά συστήματα περιλαμβάνουν μετατροπείς DC/AC, ενώ η ύπαρξη αποθηκευτικών χώρων, όπως μπαταρίες, κρίνεται απαραίτητη για χρήση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες αιχμής, ενώ κύριο πλεονέκτημά τους είναι η δυνατότητα λειτουργίας εντός ή εκτός δικτύου. [23]



Εικόνα 14: Ηλιακή εγκατάσταση στο Copper Mountain, Nevada συνολικής ισχύος 458MW [24]

Τέλος, ένα ακόμη ενεργητικό σύστημα αποτελεί το σύστημα συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας – CSP. Τέτοια συστήματα βασίζονται στην μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμότητα. Μέσω της θερμότητας αυτής ένα ρευστό μετατρέπεται σε ατμό που τροφοδοτεί μία ηλεκτρική γεννήτρια. Η μέθοδος αυτή κάνει χρήση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, οι δέσμες της οποίας υπόκεινται σε ανάκλαση με την βοήθεια καθρέπτων (ηλιοστάτες) και συγκεντρώνονται σε έναν δέκτη, όπου αναπτύσσονται θερμοκρασίες 500°C έως και 1000°C. Ο δέκτης είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας που χρησιμοποιείται για την μεταφορά της ηλιακής – θερμικής ενέργειας σε ένα ρευστό (συνήθως θαλασσινό νερό ή λάδι), το οποίο αποθηκεύεται σε μεγάλες δεξαμενές. Για μία ημέρα με έντονη ηλιοφάνεια τα συστήματα CSP χωρίς εγκαταστάσεις αποθήκευσης μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια για περίπου 11 ώρες, ενώ με χρήση λεβήτων φυσικού αερίου τα συστήματα αυτά υβριδοποιούνται, ώστε να θερμανθεί το ρευστό σε περιπτώσεις έλλειψης ηλιακής ακτινοβολίας. Συστήματα CSP είναι οι πύργοι ηλιακής ισχύος με χρήση ηλιοστατών, οι τεχνολογίες γραμμικών συλλεκτών που βασίζονται σε παραβολικούς καθρέπτες ή ανακλαστήρες Fresnel και οι μηχανές Dish Stirling. [23] [25]



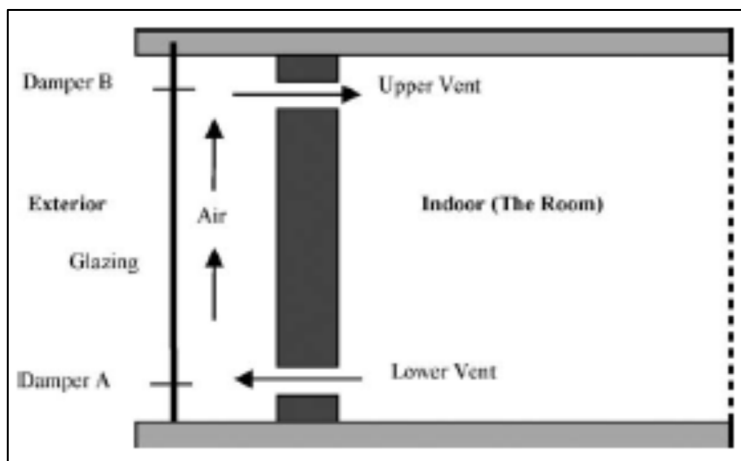
Εικόνα 15: Συστήματα CSP [25]

Παθητικά συστήματα ηλιακής ενέργειας

Τα συστήματα παθητικής συλλογής ηλιακής ενέργειας, αξιοποιούν την ίδια την κατασκευή του κτηρίου ή του θερμοκηπίου, καταναλώνοντας μηδενική ή ελάχιστη επιπλέον ενέργεια. Είναι ένας τρόπος με τον οποίο μπορεί ο κάτοχος να επωφεληθεί από την δωρεάν, ανανεώσιμη πηγή της ηλιακής ενέργειας, χωρίς επιπλέον συστήματα και κατά συνέπεια χωρίς επιπλέον κόστος. Τα παθητικά συστήματα, σε αντίθεση με τα ενεργητικά αφορούν κυρίως την θέρμανση και την ψύξη του χώρου. Βασίζονται στην κατάλληλη θέση και τον προσανατολισμό, ενώ σημαντικό ρόλο παίζουν τα υλικά κατασκευής, όπως για παράδειγμα ο τοίχος Trombe, ο οποίος με χρήση απορροφητικών υλικών έχει την δυνατότητα απορρόφησης της θερμότητας και απελευθέρωσή της όταν αυτό είναι απαραίτητο. Η σημασία των υλικών αυτών έγκειται στο γεγονός ότι υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές. Όσον αφορά τον προσανατολισμό, η χρήση γυάλινων παραθύρων στην νότια πλευρά μπορεί να παρέχει έως και το 60% της χειμερινής θέρμανσης. [23]

Το φαινόμενο που χρησιμοποιούν οι τεχνολογίες παθητικής ηλιακής θέρμανσης, αλλά και του φυσικού αερισμού είναι το φαινόμενο της *άνωσης* (*buoyancy effect*). Σύμφωνα με αυτό το φαινόμενο ο ρυθμός ροής του αέρα ελέγχεται από την διαφορά θερμοκρασίας, η οποία προκαλεί διαφορά στην πυκνότητα του αέρα στην είσοδο και την έξοδο. Παράδειγμα του φαινομένου της άνωσης είναι ο προαναφερθείς τοίχος Trombe (Εικόνα 16). Το ογκώδες αυτός τοίχος καλύπτεται από εξωτερικό τζάμι απ' όπου η ηλιακή ακτινοβολία θερμαίνει τον τοίχο. Μέρος της αποθηκευμένης ενέργειας μεταφέρεται στο χώρο μέσω αγωγιμότητας, αυξάνοντας την

θερμοκρασία του δωματίου. Ο αέρας χαμηλότερης θερμοκρασίας όντας πιο βαρύν εξέρχεται λόγω ροής αέρα από έναν αεραγωγό στο κάτω μέρος του τοίχου, όπου ανυψώνεται στο διάκενο μεταξύ τζαμιού και τοίχου λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του και του φαινομένου της άνωσης. Ο θερμός πλέον αέρα εισέρχεται ξανά στο χώρο από έναν αεραγωγό στο άνω μέρος του τοίχου. [26]



Εικόνα 16: Διάγραμμα λειτουργίας τοίχου Trombe [26]

Όσον αφορά τις τεχνολογίες παθητικής ηλιακής ψύξης με παραγωγή κρύου αέρα το φαινόμενο της άνωσης συμμετέχει και εδώ, με εξαναγκασμό κίνησης του αέρα για αερισμό ενός χώρου, δημιουργώντας ένα αποτέλεσμα ψύξης. Το φαινόμενο της άνωσης, συνεπώς, συντελεί και στον φυσικό εξαερισμό ενός χώρου. Μία ακόμη τεχνική που χρησιμοποιείται για την ψύξη ενός χώρου βασίζεται στο φαινόμενο της εξάτμισης. Η διαδικασία ψύξης με εξάτμιση κάνει χρήση της εξάτμισης του νερού για να ψύξει ένα ρεύμα αέρα. Η εξάτμιση είναι μία ενδόθερμη διεργασία, η οποία απαιτεί απορρόφηση ενέργειας για την αλλαγή φάσης ενός ρευστού. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το νερό απορροφά την ενέργεια που υπάρχει στον περιβάλλοντα αέρα προκειμένου να μετατραπεί σε ατμό. Η μείωση ενέργειας από τον αέρα προκαλεί και την μείωση της θερμοκρασίας του. Η ψύξη με εξάτμιση ταξινομείται σε άμεση και έμμεση.

Κατά την άμεση ψύξη με εξάτμιση (*direct evaporative cooling*) έχουμε την εμπλοκή των δύο ειδών της θερμότητας, της αισθητής και της λανθάνουσας. Στην άμεση ψύξη με εξάτμιση ο αέρας τροφοδοτείται συνεχώς με νερό και ανακυκλώνεται, έτσι ώστε το εξατμισμένο νερό να απομακρύνεται προκαλώντας ψύξη. Μέρος της αισθητής θερμότητας μετατρέπεται σε λανθάνουσα με το νερό να αποτελεί το μέσον αυτής της διαδικασίας. Η λανθάνουσα θερμότητα, πλέον υπό μορφή υδρατμών, διαχέεται στον χώρο με αποτέλεσμα την αύξηση της υγρασίας και μείωση της θερμοκρασίας.

Η έμμεση ψύξη με εξάτμιση (*indirect evaporative cooling*) βασίζεται στην ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ δύο ρευμάτων αέρα, ενώ στο πρακτικό κομμάτι την χρήση ενός τοίχου, με την μία του πλευρά να είναι υγρή και την άλλη ξηρή. Το νερό της υγρής πλευράς εξατμίζεται απορροφώντας την αισθητή θερμότητα της ξηρής ψύχοντάς την, με αποτέλεσμα ο αέρας που εισέρχεται από την υγρή πλευρά να ψύχει τον αέρα που εισέρχεται από την ξηρή. Με την μετατροπή της αισθητής σε λανθάνουσα θερμότητα δεν εισάγεται υγρασία στον αέρα που προέρχεται από τον χώρο της ξηρής πλευράς, που είναι και ο χώρος που θέλουμε να ψύξουμε. [26]

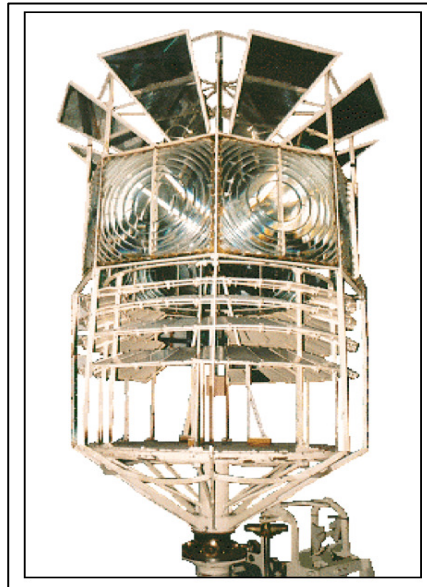
3. Φακοί Fresnel

3.1. Ιστορική αναδρομή

Το 1822, ο Γάλλος φυσικός και εφευρέτης, Augustin Fresnel, ως μέλος μίας ομάδας που δημιουργήθηκε το 1811 από την Γαλλική Επιτροπή Φάρων (French Commission on Lighthouses), κατάφερε να σχεδιάσει για πρώτη φορά έναν φακό που αποτελείτο από πάνελ σχήματος bullseye, το καθένα από τα οποία διαθλούσε το φως τόσο κάθετα, όσο και οριζόντια, παράγοντας μία πολύ ισχυρή ακτίνα φωτός. Η ανάγκη για δημιουργία ενός τέτοιου φακού προήλθε από το γεγονός ότι οι πρώτοι φακοί που χρησιμοποιήθηκαν σε φάρους (Αγγλία, 18^{ος} αιώνας) ήταν υπερβολικά βαρείς, λόγω του πάχους τους, και από κακής ποιότητας γυαλί, με αποτέλεσμα το φως να χανόταν πολύ εύκολα. Ένας φακός Fresnel αποτελείται από ειδικώς κομμένα κομμάτια γυαλιού που περιβάλλουν ένα λαμπτήρα. Έτσι, αν και οι ακτίνες του φωτός κανονικά θα διασκορπίζονταν, τώρα εστιάζονται σε μία ενιαία και έντονη ακτίνα φωτός προς μία ορισμένη κατεύθυνση.

Ο σχεδιασμός του Fresnel για έναν φακό που αναβόσβηνε, αρχικά περιλάμβανε 8 κυκλικά πάνελ σχήματος bullseye, τα οποία φωτιζόμενα από έναν λαμπτήρα, διαθλούσαν το φως σε καθετές και οριζόντιες κατευθύνσεις. Ακόμη, προσέθεσε 8 ακόμη πλάκες, τραπεζοειδούς σχήματος, πάνω και πίσω από τα 8 αρχικά πάνελ, υπό γωνία 25°, οι οποίες οδηγούσαν το φως του λαμπτήρα σε 8 επίπεδους καθρέπτες. Οι καθρέπτες αυτοί, είχαν τοποθετηθεί σε τέτοια γωνία ώστε να ανακλούν τις ακτίνες του φωτός που δέχονταν οριζόντια πάνω από τις 8 αρχικές πλάκες σχήματος bullseye. Οι τραπεζοειδείς πλάκες και οι πάνω καθρέπτες ήταν σχεδιασμένοι έτσι ώστε να αυξάνουν το φως κατά περίπου ένα τέταρτο του φωτός που εκπεμπόταν πάνω από την λάμπα, αλλά και να αυξάνουν την διάρκεια της αναλαμπής του φακού περίπου στο διπλάσιο από την διάρκεια των βασικών πάνελ. Τέλος, προσέθεσε τέσσερις μικρούς καθρέπτες σχήματος δακτυλίου για να κατευθύνουν τις ακτίνες του φωτός οριζόντια κοντά στον φάρο.

Η παραπάνω μεθοδολογία αντιστοιχεί στον σχεδιασμό του βασικού φακού πρώτης τάξης, τον οποίο ο Fresnel, περιστρέφοντάς τον γύρω από τον κάθετο άξονά του και τοποθετώντας 12 κάθετες πλάκες, δημιούργησε τον πρώτο σταθερό φακό το 1824. Ωστόσο, συνέχισε να τοποθετεί καθρέπτες, τόσο πάνω όσο και κάτω από την βασική ζώνη του φακού, σε συνδυασμό με μικρούς φακούς τοποθετημένους υπό γωνία πάνω και κάτω από την λάμπα που καθοδηγούσαν το φως στους πάνω και κάτω καθρέπτες. Η συνολική εκπεμπόμενη οριζόντια ακτίνα φωτός ήταν αποτέλεσμα της ακτίνας από το βασικό σχέδιο, υποβοηθούμενη από το επιπλέον φως που ανακλούσαν οι καθρέπτες και είχε σχήμα ενός επίπεδου δίσκου. Στην Εικόνα 17 παρουσιάζεται ο πρώτος φακός Fresnel πρώτης τάξης. [27] Μετά από δοκιμές διαπιστώθηκε η μεγάλη αποδοτικότητα ενός φακού Fresnel, καθώς μπορεί να συλλάβει το 83% του φωτός που εκπέμπει ένας λαμπτήρας, την στιγμή που το ποσοστό αυτό για έναν ανοιχτό λαμπτήρα ή έναν λαμπτήρα με τοποθετημένους ανακλαστήρες από πίσω, είναι 3% και 17%, αντίστοιχα. [28]



Εικόνα 17: Ο πρώτος φακός Fresnel [27]

Ανάλογα με την ανάγκες φωτισμού και το μέγεθος του κάθε φάρου, δημιουργήθηκαν και διαφορετικά μεγέθη φακών Fresnel, που ονομάζονται «τάξεις» («orders»). Ξεκινώντας από την «πρώτη τάξη», όπου παρουσιάζεται ο μεγαλύτερος σε μέγεθος φακός Fresnel (με ύψος 2387,6mm), προχωράμε σε μεγαλύτερες τάξεις, με το μέγεθος των φακών να μειώνεται («δεύτερη», «τρίτη», κ.ο.κ.). Η τάξη του κάθε φακού εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ της πηγής του φωτός (λαμπτήρας) και το φακού. Ο φακός «πρώτης τάξης», αποτελούμενος από εκατοντάδες γυάλινα πρίσματα, είναι ο πιο διαδεδομένος, καθώς έχει τοποθετηθεί στους περισσότερους φάρους, παρουσιάζοντας ταυτόχρονα και την μεγαλύτερη εστιακή απόσταση (920mm). Οι φακοί μικρότερων τάξεων τοποθετούνται σε μικρότερους φάρους. [28]

Ο λαμπτήρας που χρησιμοποίησε ο Fresnel στον πρώτο φακό, αποτελείτο από τέσσερα ομόκεντρα φυτίλια τα οποία χρησιμοποιούσαν ως καύσιμη ύλη λάδι Colza. Στα τέλη της δεκαετίας του '60, ωστόσο, η δημιουργία λαμπτήρων ο οποίοι έκαιγαν κηροζίνη ή ανθρακαέριο. Η χρήση τέτοιων λαμπτήρων σε φακούς Fresnel πρώτης τάξης, θα έθετε την πηγή εκτός εστίας και το περισσότερο φως θα χανόταν. Έτσι, μετά από τις προτάσεις των Thomas Stevenson το 1869 και John Richardson Wigham το 1872, κατασκευάστηκε τελικά το 1885 ένας φακός μεγαλύτερος αυτού του Fresnel πρώτης τάξης, μετά από πρόταση του Stevenson. Ο φακός αυτός ονομάστηκε «Hyper-radial» ή «Hyper-Radiant» και είναι ύψος περίπου 3,7m και εστιακή απόσταση 1330mm. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι διαφορετικοί ως προς το μέγεθος φακοί Fresnel, σε συνδυασμό με τις εστιακές αποστάσεις τους. [29]

Πίνακας 2: Τάξεις Φακών Fresnel [27] [29] [30]

Order	Height (mm)	Focal Length (mm)
Hyper-radial	3700,0	1330,0
First-order	2387,6	920,0
Second-order	1854,2	700,0
Third-order	1422,4	500,0
Third-order Middle	914,4	400,0
Forth-order	711,2	250,0
Fifth-order	508,0	187,5
Sixth-order	431,8	150,0

Στην Εικόνα 18 παρουσιάζεται ο Hyper-radial φακός στο Μακαρυ΄u Point της Χαβάης, ενώ στην Εικόνα 19 παρουσιάζονται οι φακοί Fresnel, 1^{ης}, 2^{ης} και 3^{ης} τάξης.



Εικόνα 18: Hyper-radial Fresnel Lens [27]

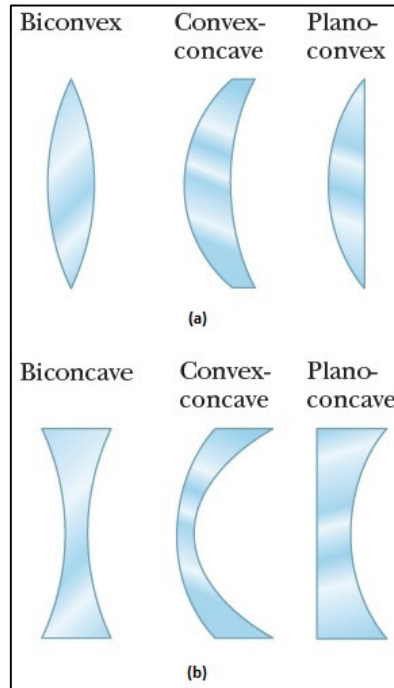


Εικόνα 19: Φακοί Fresnel 1^{ης}, 2^{ης} και 3^{ης} τάξης (από αριστερά προς δεξιά) [28]

3.2. Λεπτοί φακοί

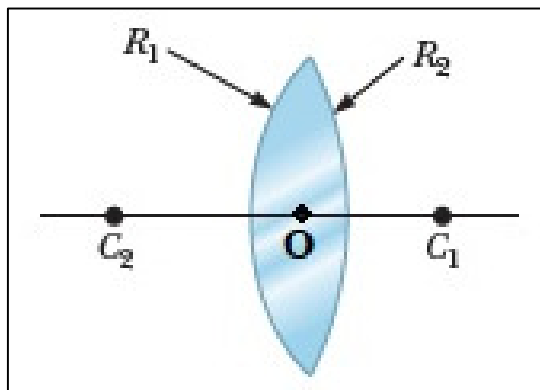
Ένας φακός ορίζεται ως ένα διαφανές αντικείμενο, φτιαγμένο είτε από γυαλί, είτε από πλαστικό, με δύο αντίθετες καμπυλωτές επιφάνειες ή μία καμπυλωτή και μία επίπεδη. Οι επιφάνειες αυτές έχουν επεξεργαστεί (λειανθεί) έτσι ώστε όταν το φως διαπεράσει τον φακό, αυτό, μέσω του φαινομένου της διάθλασης, να εστιαστεί ή να διαχυθεί. Αυτή η διαδικασία μπορεί να προκαλέσει μεγέθυνση ή σμίκρυνση ενός αντικειμένου. [31] [32]

Οι φακοί ανάλογα με το σχήμα και τις ιδιότητές τους ως προς την σύγκλιση ή την απόκλιση του φωτός μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, τους συγκλίνοντες και τους αποκλίνοντες (ή αμφίκυλους - biconcave) φακούς. Κάθε μία από τις δύο κατηγορίες περιέχει επιμέρους υποκατηγορίες ανάλογα με τις επιφάνειες του εκάστοτε φακού (Εικόνα 20a & b). Εάν και οι δύο επιφάνειες είναι κυρτές, τότε ο φακός ονομάζεται αμφίκυρτος (bi-convex) ή αμφίκυλλος (biconcave) αν οι δύο επιφάνειες είναι κοίλες. Οι αμφίκυρτοι φακοί είναι πάντα συγκλίνοντες, σε αντίθεση με τους αμφίκυλλους οι οποίοι είναι πάντα αποκλίνοντες. Εάν η μία επιφάνεια είναι κυρτή και η αντίθετη κοίλη, τότε ο φακός ονομάζεται κυρτός-κοίλος (convex-concave). Μία πρώτη εκτίμηση για να διευκρινίσουμε εάν ένας τέτοιος φακός είναι συγκλίνων ή αποκλίνων, είναι να παρατηρήσουμε το πάχος στο κέντρο του φακού. Οι συγκλίνοντες φακοί παρουσιάζονται παχύτεροι στο κέντρο τους, παρά στην περίμετρο, ενώ οι αποκλίνοντες φακοί λεπτότεροι στο κέντρο, με μεγαλύτερη περίμετρο. Τέλος, οι φακοί στους οποίους η μία επιφάνεια είναι κυρτή και η άλλη επίπεδη, ονομάζονται επιπεδόκυρτοι (plano-convex), ή επιπεδόκυλλος (plano-concave) εάν η μία επιφάνεια είναι κοίλη και η άλλη επίπεδη. Ξανά, το πάχος στο κέντρο του φακού μπορεί εύκολα να φανερώσει αν ο φακός είναι συγκλίνων ή αποκλίνων. [33]



Εικόνα 20: (a) Συγκλίνοντες φακοί, (b) Αποκλίνοντες φακοί [34]

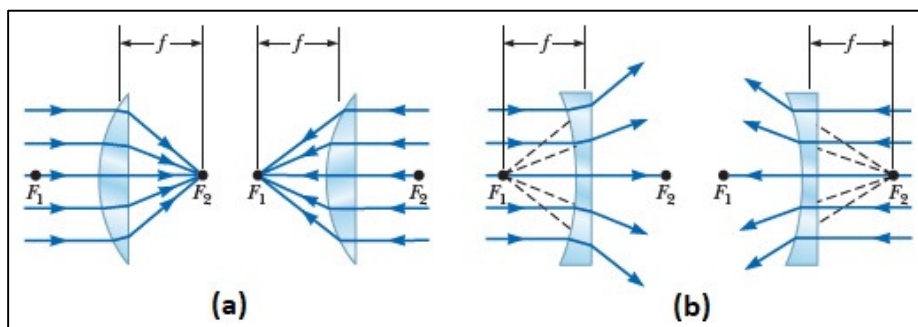
Ένας λεπτός φακός, είναι ένας φακός του οποίου το πάχος είναι σχετικά μικρό ως προς την εστιακή του απόσταση. Χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο βασικών σημείων και αποστάσεων. Ορίζουμε τον *οπτικό άξονα* ή *κύριο άξονα* (*optical axis*) ως την ευθεία γραμμή, σύμφωνα με την οποία ο φακός παρουσιάζει μία περιστροφική συμμετρία. Ο οπτικός άξονας, αν και νοητός, είναι μία γραμμή πάνω στην οποία βρίσκονται σημεία σημαντικά για τον χαρακτηρισμό ενός φακού, ενώνοντας, αρχικά τα δύο κέντρα καμπυλότητας του φακού. Το *κέντρο καμπυλότητας* (*center of curvature – C*) είναι το κέντρο της σφαίρας που συμμετέχει στον σχηματισμό του φακού, ενώ η απόσταση μεταξύ του σημείου αυτού και της καμπύλης επιφάνειας του φακού που δέχεται δεύτερη, για έναν συγκλίνων, και πρώτη, για ένα αποκλίνων φακό, τις ακτίνες του φωτός (με το φως να κινείται παράλληλα από την πλευρά του κέντρου καμπυλότητας) ονομάζεται *ακτίνα καμπυλότητας* (*radius of curvature – R*). Τα σημεία τομής μεταξύ του οπτικού άξονα και των “τόξων” που αντικατοπτρίζουν τις πλευρές του φακού, ονομάζονται *κορυφές* (*vertexes – V*), ενώ το σημείο που βρίσκεται στον κύριο άξονα και οι ακτίνες το διασχίζουν χωρίς καμία μεταβολή στην κατεύθυνσή τους (σε αντίθεση με τις υπόλοιπες ακτίνες που διαδίδονται μέσω του φακού) ονομάζεται *οπτικό κέντρο* (*optical center – O*). [31] [32] [35] [36]



Εικόνα 21: Γεωμετρία λεπτού φακού [37]

Σε έναν συγκλίνων φακό οι ακτίνες φωτός που τον διαπερνούν τείνουν να συγκλίνουν σε ένα συγκεκριμένο σημείο, το οποίο ονομάζεται εστία (focal point – F). Ένας λεπτός φακός, έχει δύο εστίες, μία στην πλευρά του φακού όπου οι ακτίνες του φωτός κινούνται παράλληλα με τον οπτικό άξονα και προς τον φακό, και μία άλλη για την αντίθετη πλευρά, όπου οι ακτίνες συγκλίνουν αν πρόκειται για συγκλίνων (π.χ. αμφίκυρτο) φακό, ή απομακρύνονται από τον οπτικό άξονα αν πρόκειται για αποκλίνων (π.χ. αμφίκοιλο) φακό. Η πρώτη εστία συχνά ονομάζεται κύρια, ενώ η άλλη δευτερεύουσα (F_1 & F_2 , αντίστοιχα, στην Εικόνα 22). Η απόσταση μεταξύ της κατακόρυφου που περνά από το οπτικό κέντρο του φακού και της κάθε εστίας, ονομάζεται εστιακή απόσταση (focal length – f). Η εστιακή απόσταση μπορεί να χαρακτηριστεί είτε θετική, όταν πρόκειται για συγκλίνων φακό, είτε αρνητική όταν πρόκειται για αποκλίνων, ενώ μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο των κατασκευαστών φακών (lens makers' equation) εάν γνωρίζουμε τις ιδιότητες του φακού (Σχέση 1). Από τον τύπο αυτό, μπορούν αντίστροφα να υπολογιστούν οι ακτίνες καμπυλότητας του φακού, R_1 και R_2 , εάν γνωρίζουμε την εστιακή απόσταση και τον δείκτη διάθλασης, n , του φακού. [33]

$$\frac{1}{f} = (n - 1) * \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$

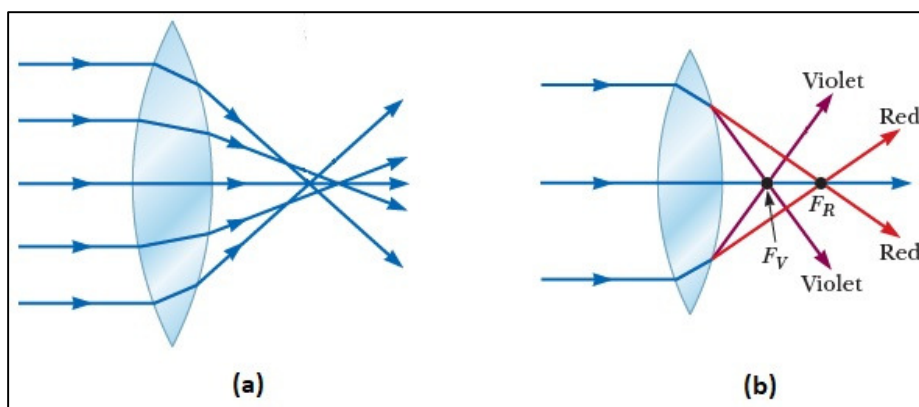


Εικόνα 22: Εστίες (F_1 & F_2) και εστιακές αποστάσεις (f) επιπεδόκυρτων και επιπεδόκοιλων λεπτών φακών [37]

Εκτροπές των φακών

Στο μοντέλο για τους συγκλίνοντες φακούς όλες οι ακτίνες φωτός που προσπίπτουν στον φακό, διαθλώνται σχηματίζοντας μικρές γωνίες με τον κύριο οπτικό άξονα και συγκλίνουν σε ένα σημείο, την εστία. Ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει πάντα λόγω των κατασκευαστικών ατελειών του σχήματος των φακών, αλλά και του υλικού κατασκευής τους. Τα σφάλματα που προκύπτουν έχουν ως συνέπεια οι ακτίνες να μην εστιάζονται σε ένα μοναδικό σημείο, με τις αιτίες της απόκλισης αυτής να ονομάζονται *εκτροπές (ή σφάλματα) των φακών*.

Ανάλογα με την απόσταση μεταξύ του κύριου οπτικού άξονα και της πηγής από την οποία εκπέμπεται μία μονοχρωματική ακτίνα φωτός, μπορούν να προκύψουν οι *σφαιρικές εκτροπές*. Σε αυτό το είδος σφάλματος των φακών, οι προσπίπτουσες στον φακό ακτίνες που βρίσκονται πιο μακριά από τον κύριο άξονα, συγκλίνουν σε εστία που σχηματίζεται πιο κοντά στον φακό. Αντίθετα, ακτίνες που ξεκινούν από πηγή πιο κοντά στον κύριο άξονα, τείνουν να εστιάζουν σε πιο μακρινό σημείο (Εικόνα 10a). Εκτός από τα σφάλματα σφαιρικότητας, οι φακοί παρουσιάζουν σφάλματα λόγω του φαινομένου της διασποράς και ονομάζονται *χρωματικές εκτροπές*. Η τάση των ακτίνων διαφορετικού μήκους κύματος να διαθλώνται περισσότερο ή λιγότερο, δημιουργεί διαφορετικές εστίες για κάθε διαφορετικό χρώμα του φάσματος μίας ακτίνας φωτός. Έτσι, για παράδειγμα, το ιώδες (violet) χρώμα μίας ακτίνας διαθλάται περισσότερο από το κόκκινο (red), εστιάζοντας σε σημείο πιο κοντά στον φακό (Εικόνα 10b). [33]



Εικόνα 23: (a) Σφαιρική εκτροπή (b) Χρωματική εκτροπή [37]

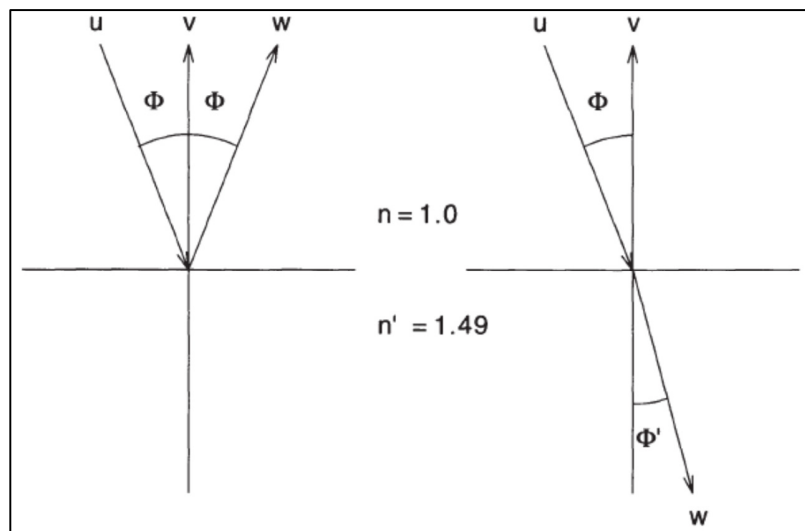
3.3. Φαινόμενα οπτικής

Ανάκλαση και διάθλαση

Δύο φαινόμενα που εμφανίζονται συχνά σε προβλήματα Γεωμετρικής Οπτικής είναι η ανάκλαση και η διάθλαση του φωτός. Μία μονοχρωματική ακτίνα φωτός (συγκεκριμένο μήκος κύματος) που προσπίπτει στο όριο μεταξύ δύο διαφορετικών μέσων, ονομάζεται *προσπίπτουσα ακτίνα*. Ένα μέρος της ακτίνας αυτής ανακλάται, με την ακτίνα που προκύπτει να ονομάζεται *ανακλώμενη* και να σχηματίζει γωνία Φ με μία ευθεία κάθετη στο όριο των δύο μέσων, που ονομάζεται *κάθετος* (Εικόνα 24). Ο κανόνας που ισχύει για το φαινόμενο της ανάκλασης είναι ότι η γωνία που

σχηματίζει η προσπίπτουσα ακτίνα με την κατακόρυφο, ισούται με την αντίστοιχη μεταξύ ανακλώμενης ακτίνας και καθέτου. [38]

Η *διάθλαση*, γενικά, ορίζεται ως το φαινόμενο κατά το οποίο ένα κύμα αλλάζει κατεύθυνση καθώς περνά από ένα μέσο σε ένα άλλο, ως συνέπεια της αλλαγής στην ταχύτητά του. Το φως, ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα, διαθλάται όταν διασχίζει το όριο που διαχωρίζει δύο διαφορετικά υλικά λόγω αλλαγής στην ταχύτητά του. Το μέρος της προσπίπτουσας ακτίνας που δεν ανακλάται, αλλά στο άλλο μέσον, έχει διαφορετική κατεύθυνση από αυτήν της προσπίπτουσας και ονομάζεται *διαθλώμενη*, με την *γωνία διάθλασης* (η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ακτίνας και της κάθετης ευθείας στο όριο των δύο μέσων – γωνία Φ' στην Εικόνα 24) να εξαρτάται από την ταχύτητα της ακτίνας στα δύο διαφορετικά μέσα. [33] [34]



Εικόνα 24: Ανάκλαση (αριστερά) και διάθλαση (δεξιά) του φωτός [38]

Ένας συντελεστής σημαντικός για το φαινόμενο της διάθλασης, είναι ο *δείκτης διάθλασης* (*refractive index – n*) και δίνεται από την Σχέση 2:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

όπου c , η ταχύτητα του φωτός στο κενό ($c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ m/s}$), και v , η ταχύτητα του φωτός στο μέσον. Από την Σχέση 2, εύκολα συμπεραίνουμε ότι ο δείκτης διάθλασης είναι ένας καθαρός αριθμός και πάντα μεγαλύτερος ή ίσος της μονάδας (η ταχύτητα στο κενό είναι η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να έχει το φως). Τυπικές τιμές δεικτών διάθλασης για διάφορα υλικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 [37]:

Πίνακας 3: Τυπικές τιμές δεικτών διάθλασης [37] [38]

Material	Refractive index - n
Vacuum	1
Air	1,000293
Water	1,333
Ice	1,309
Methyl methacrylate	1,493
Glass (crown)	1,52
Glass (flint)	1,66
Diamond	2,419

Κατά την μετάβαση μίας ακτίνας από υλικό με χαμηλότερο δείκτη διάθλασης σε υλικό με μεγαλύτερο, η ακτίνα τείνει να διαθλασθεί προς την κάθετο. Σε αντίθετη μετάβαση, η ακτίνα κινείται προς την διαχωριστική γραμμή των δύο διαφορετικών μέσων.

Νόμος του Snell

Η γωνία διάθλασης του φωτός και η γωνία πρόσπτωσης μιας ακτίνας που περνάς από ένα μέσο σε ένα άλλο, συνδέονται με την Σχέση 3, η οποία είναι γνωστή ως *Νόμος του Snell* και δείχνει την άμεση εξάρτηση της διαθλώμενης ακτίνας από τις οπτικές ιδιότητες του κάθε μέσου.

$$\frac{\sin \Phi'}{\sin \Phi} = \frac{v'}{v} = \text{constant} \quad (3)$$

όπου Φ' , η γωνία διάθλασης, Φ , η γωνία πρόσπτωσης, και v και v' , οι ταχύτητες του φωτός στα δύο διαφορετικά μέσα με δείκτες διάθλασης n και n' της Εικόνας 24, αντίστοιχα.

Η ταχύτητα του φωτός μέσα σε ένα μέσο, εξαρτάται τόσο από το μήκος κύματος της ακτίνας, λ , όσο και από την συχνότητα αυτής, f , και δίνεται από την Σχέση 4:

$$v = f * \lambda \quad (4)$$

Παράλληλα, μία ακτίνα φωτός που κινείται μέσα σε δύο διαφορετικά μέσα παρουσιάζει μεταβολή του μήκους κύματος της, αλλά όχι και της συχνότητας. Έτσι, συνδυάζοντας τις Σχέσεις 2, 3 και 4 προκύπτει, μία διαφορετική μορφή του Νόμου του Snell (Σχέση 5) [33]:

$$\frac{\sin \Phi'}{\sin \Phi} = \frac{v'}{v} = \frac{f * v'}{f * v} = \frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{c/n'}{c/n} = \frac{n}{n'} = \text{constant}$$

$$n * \sin \Phi = n' * \sin \Phi' \quad (5)$$

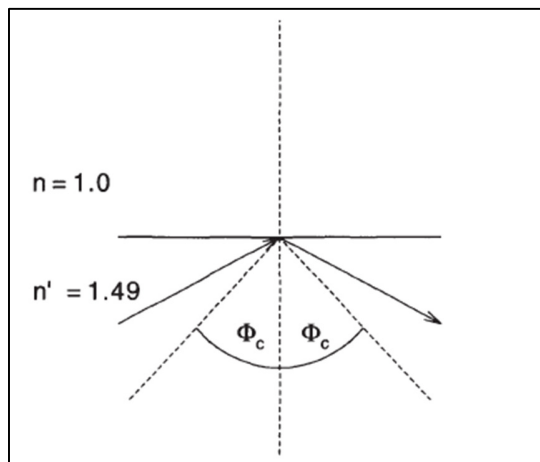
Ολική εσωτερική ανάκλαση

Ένα ακόμη σημαντικό φαινόμενο για τον κλάδο της Οπτικής είναι η ολική εσωτερική ανάκλαση, με το φαινόμενο αυτό να συμβαίνει όταν μία ακτίνα φωτός κινείται από ένα μέσο με έναν συγκεκριμένο δείκτη διάθλασης (n') σε ένα με μικρότερο δείκτη διάθλασης ($n < n'$). Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, όταν μία ακτίνα μεταβαίνει από ένα υλικό με μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης, σε ένα υλικό με μικρότερο, τότε η διαθλώμενη τείνει να απομακρύνεται από την κάθετο. Έτσι, κατά την κίνηση αυτή της ακτίνας, μπορούμε να ορίσουμε μία *κρίσιμη γωνία* – $\Phi_{critical}$ ή Φ_c – που λαμβάνει η προσπίπτουσα ακτίνα, και κατά την οποία η διαθλώμενη ακτίνα κινείται παράλληλα στην διαχωριστική γραμμή των δύο υλικών, δηλαδή $\Phi' = 90^\circ$. Για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες από την κρίσιμη γωνία, η ακτίνα υφίσταται ολική εσωτερική ανάκλαση. [37]

Εφαρμόζοντας τον Νόμο του Snell σε αυτή την ειδική περίπτωση, για $\Phi = \Phi_c$, $\Phi' = 90^\circ$ και για μετάβαση της ακτίνας από υλικό με δείκτη διάθλασης n' , σε υλικό με δείκτη διάθλασης n , έτσι ώστε $n < n'$, προκύπτει ότι:

$$n * \sin \Phi = n' * \sin \Phi' \rightarrow n * \sin \Phi_c = n' * \sin 90 \rightarrow$$

$$\sin \Phi_c = \frac{n'}{n} \quad (6)$$



Εικόνα 25: Ολική εσωτερική ανάκλαση ακτίνας για γωνίες μεγαλύτερες της $\Phi_{critical}$ [38]

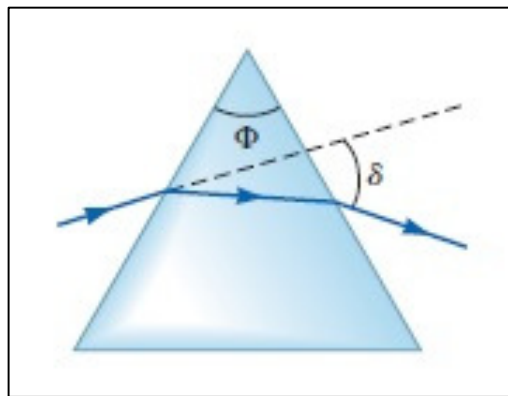
Διασπορά

Η ταχύτητα μίας ακτίνας που κινείται σε ένα μέσο διαφέρει ανάλογα με το μήκος κύματος της ακτίνας. Συνεπώς, και λόγω της Σχέσης 2, ο δείκτης διάθλασης, n , ενός υλικού παρουσιάζει εξάρτηση από το μήκος κύματος της ακτίνας ή πιο απλά το χρώμα της. [38]

$$n = n(\lambda) \quad (7)$$

Σύμφωνα με τον Νόμο του Snell, η γωνία διάθλασης εξαρτάται από τον δείκτη διάθλασης. Έτσι, συνεπάγεται και η εξάρτησή της από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, ακτίνα μήκους κύματος 450nm (μπλε φως) πρόκειται να εκτραπεί περισσότερο από μία ακτίνα 700nm (κόκκινο φως), όταν και οι δύο θα διαθλαστούν σε ένα μέσο με ίδιο δείκτη διάθλασης. Η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος είναι ένα φαινόμενο που ονομάζεται *διασπορά*. [33]

Στην Εικόνα 26, φαίνεται η διάθλαση μονοχρωματικής ακτίνας φωτός. Η γωνία δ , σύμφωνα με την οποία το φως εξέρχεται από το πρίσμα, ονομάζεται *γωνία εκτροπής* και εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, ενώ η γωνία Φ , ονομάζεται *θλαστική ή διαθλαστική γωνία* και είναι η γωνία μεταξύ της επιφάνειας, που η ακτίνα αρχικά προσπίπτει και της επιφάνειας που το φως αναδύεται τελικά από το πρίσμα. [37] Στην πιο ειδική περίπτωση όπου η γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας στο πρίσμα ισούται με την γωνία αναδύσεως (από το πρίσμα), η γωνία εκτροπής γίνεται ελάχιστη και ονομάζεται *γωνία ελάχιστης εκτροπής*, δ_m . Σε αυτή την περίπτωση, η γωνία μέσα στο πρίσμα γίνεται κάθετη στο επίπεδο που διχοτομεί την θλαστική γωνία.



Εικόνα 26: Διάθλαση ακτίνας από πρίσμα και εκτροπή κατά γωνία δ [37]

3.4. Γενικά για τους φακούς Fresnel

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 3.2, η διάθλαση είναι ένα φαινόμενο το οποίο συμβαίνει στο όριο μεταξύ δύο μέσων εντός των οποίων διαδίδεται μία ακτίνα φωτός. Σε μία διαθλαστική επιφάνεια, όπως ένας φακός, το μεγαλύτερο εσωτερικό μέρος της δεν παίζει ιδιαίτερο ρόλο στην οπτική του. Έτσι, στην περίπτωση των λεπτών φακών, μία ακτίνα κινείται προς μία σταθερή κατεύθυνση, έως ότου συναντήσει την κάθετη ευθεία στον οπτικό άξονα που περνάει από το οπτικό κέντρο του λεπτού φακού, όπου και διαθλάται. Στην ιδιότητα αυτή της διάθλασης βασίζεται ο σχεδιασμός των φακών Fresnel, με τον τύπο του επιπεδόκυρτου φακού να χαρακτηρίζεται ως ιδανικός για να καθοριστούν οι εστιακές του ικανότητες. [37]

Αν και οι φακοί Fresnel δημιουργήθηκαν αρχικά για χρήση σε φάρους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως συλλέκτες ηλιακής ακτινοβολίας. Η λειτουργία των φάρων βασίζεται στο γεγονός, ότι το φως που προέρχεται από μία λάμπα στο εσωτερικό του διαθλάται και μετά την έξοδό του διαδίδεται παράλληλα σε μακρινές αποστάσεις. Με βάση την *αρχή της αναστρεψιμότητας του φωτός* (*principle of reversibility of light*), η οποία αναφέρει πως κατά την

αλλαγή της κατεύθυνσής του το φως ακολουθεί την ίδια πορεία, αναιρώντας ουσιαστικά τον νόμο του Snell, αλλά και την προσέγγιση ότι οι ακτίνες του ήλιου διαδίδονται παράλληλα, το φως του προσπίπτει στην επιφάνεια του φακού προερχόμενο από τον ήλιο έχει την δυνατότητα να διαθλαστεί και να επέλθει σύγκλιση αυτού στο σημείο της λάμπας. [38]

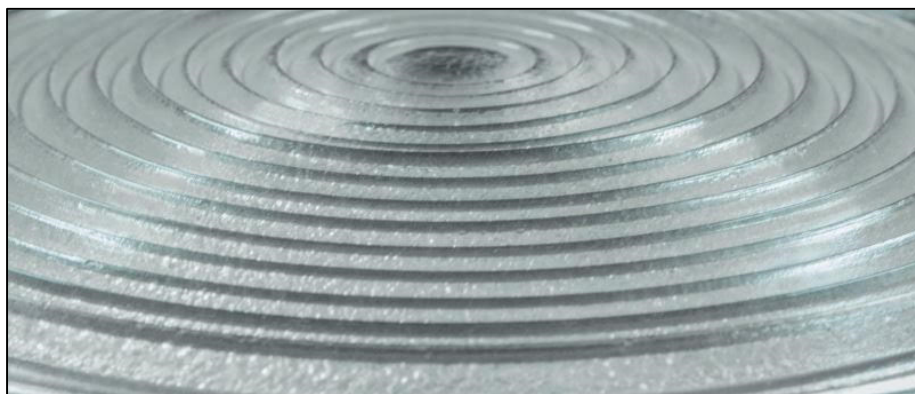
Οι φακοί Fresnel είναι δυνατόν να λάβουν πολλές διαφορετικές μορφές. Ωστόσο, η δημιουργία ενός τέτοιου φακού βασίζεται στην ιδέα της αφαίρεσης του κύριου όγκου του φακού και την μετατροπή της συνεχούς επιφάνειας σε πολλές μικρότερες πλευρικές επιφάνειες της ίδια καμπυλότητας. Η επεξεργασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό ενός συνόλου *αυλακώσεων* (*grooves*), με αυτές να είναι παράλληλες για την περίπτωση ενός φακού γραμμικής εστίασης (linear focus lens – 2D) και ομόκεντρες για την περίπτωση ενός κυκλικού φακού εστίασης (circular focus lens – 3D). Προς την κεντρική γραμμή των “γραμμικών” φακών και το κέντρο των “κυκλικών” η επιφάνεια του φακού είναι σχεδόν παράλληλη προς την πίσω επίπεδη επιφάνεια των φακών, ενώ προχωρώντας προς τα άκρα του φακού οι γωνίες των αυλακώσεων κάθε φορά αυξάνονται, έτσι ώστε να μειώνονται σημαντικά οι σφαιρικές εκτροπές. Η κάθε μία από αυτές τις αυλακώσεις διαθλούν το φως και το συγκεντρώνουν σε μία σταθερή εστιακή περιοχή. [39]

Η ευρεία χρήση των φακών Fresnel σε συγκεντρωτικά συστήματα ηλιακής ακτινοβολίας βασίζεται σε κάποια βασικά τους πλεονεκτήματα, όπως η υψηλή οπτική απόδοση, ο μικρός όγκος με χαμηλό βάρος, το μικρό κόστος μαζικής παραγωγής και η ουσιαστική αύξηση της ενεργειακής τους πυκνότητας. [40] Παράλληλα, σε σχέση με τους παραδοσιακούς “χοντρούς” φακούς, η οπτική διαπερατότητα των φακών Fresnel είναι καλύτερη, ενώ για την παρακολούθηση της ηλιακής ακτινοβολίας απαιτείται σαφώς μικρότερο ποσό ενέργειας. [39] Τα δύο υλικά που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για την δημιουργία φακών Fresnel είναι το γυαλί και ο μεθακρυλικός μεθυλεστέρας (PMMA) γνωστός και ως πλεξιγκλάς. Η χρήση του γυαλιού ως υλικό κατασκευής ενδείκνυται όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως υλικά κάλυψης με την μορφή υαλοπινάκων ή σε περιπτώσεις υψηλών θερμοκρασιών. Παράλληλα, η ανθεκτικότητά τους στην υπεριώδη ακτινοβολία, σε αντίθεση με το απλό πλαστικό, ωφελεί στην διατήρησή τους για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Από την άλλη το PMMA, είναι ένα υλικό παρόμοιο με το γυαλί ως προς τα οπτικά χαρακτηριστικά, παρουσιάζει ανθεκτικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία, σταθερότητα σε θερμοκρασίες τουλάχιστον 80°C, ενώ η ειδική διαπερατότητά του ταιριάζει αρκετά με το ηλιακό φάσμα. Παράλληλα, το μικρό βάρος του το καθιστά ιδανικό υλικό για την παραγωγή και τον σχεδιασμό φακών Fresnel. Η εισαγωγή νέων τεχνολογιών για τον σχεδιασμό τέτοιων φακών με την βοήθεια των υπολογιστών, σε συνδυασμό με την δημιουργία νέων πλαστικών (πολυμερών) έχει ωφελήσει σε μεγάλο βαθμό τους φακούς Fresnel και κατ’ επέκταση την χρήση τους σε πολλές εφαρμογές. [40]

Τύποι φακών Fresnel

Οι φακοί Fresnel μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες, τους φακούς απεικόνισης (imaging Fresnel lens), οι οποίοι εστιάζοντας το φως σε ένα συγκεκριμένο σημείο δημιουργούν

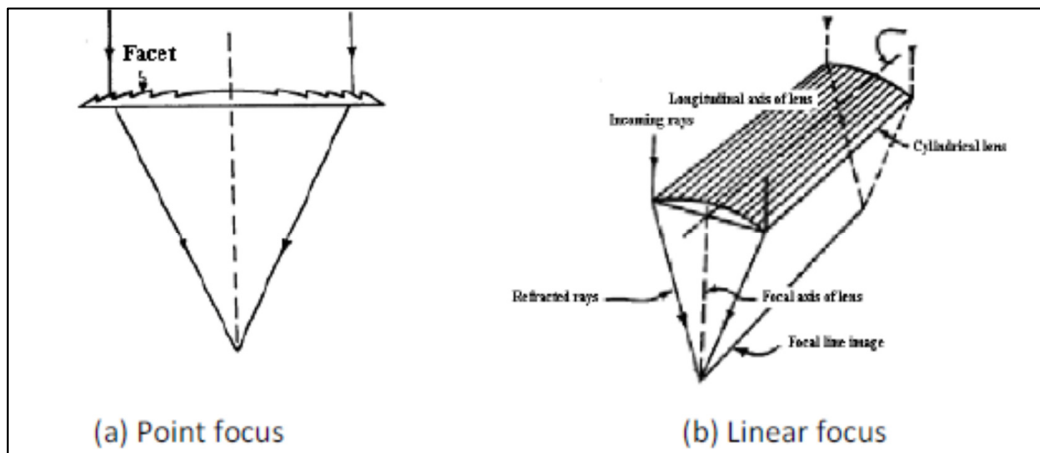
ακριβείς εικόνες, και τους μη απεικονιστικούς φακούς, οι οποίοι δεν έχουν μεγάλη ακρίβεια και χρησιμοποιούνται κυρίως για συγκέντρωση της ακτινοβολίας προς εκμετάλλευσή της σε εφαρμογές ηλιακής ενέργειας. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που ο ήλιος θεωρείται η πηγή του φωτός, για ένα φακό Fresnel απεικόνισης ο ήλιος σχηματίζεται στο εστιακό σημείο, ενώ για ένα μη απεικονιστικό φακό, η εικόνα του ήλιου σχηματίζεται σε στο εστιακό επίπεδο μιας γραμμής [41] [42] Η καθεμία από τις δύο παραπάνω κατηγορίες χωρίζονται σε δύο επιμέρους. Οι σφαιρικοί και οι κυλινδρικοί φακοί Fresnel είναι δύο υποκατηγορίες των φακών απεικόνισης. Οι πρώτοι είναι ισοδύναμοι με τους απλούς σφαιρικούς φακούς, με την δημιουργούμενη εικόνα ωστόσο να μην είναι τόσο ευκρινής λόγω φαινομένων περίθλασης στα άκρα των κορυφών. Οι σφαιρικοί φακοί Fresnel αποτελούνται από αυλακώσεις σε σχήμα δακτυλίου που συνεργάζονται για την εστίαση του φωτός σε ένα σημείο (Εικόνα 27). Οι κυλινδρικοί φακοί από την άλλη, χρησιμοποιούν σαν αυλακώσεις ευθύγραμμα τμήματα κυκλικής διατομής, με το φως να εστιάζεται σε μία μόνο γραμμή. Τα φαινόμενα περίθλασης συμβαίνουν και σε αυτή την περίπτωση.



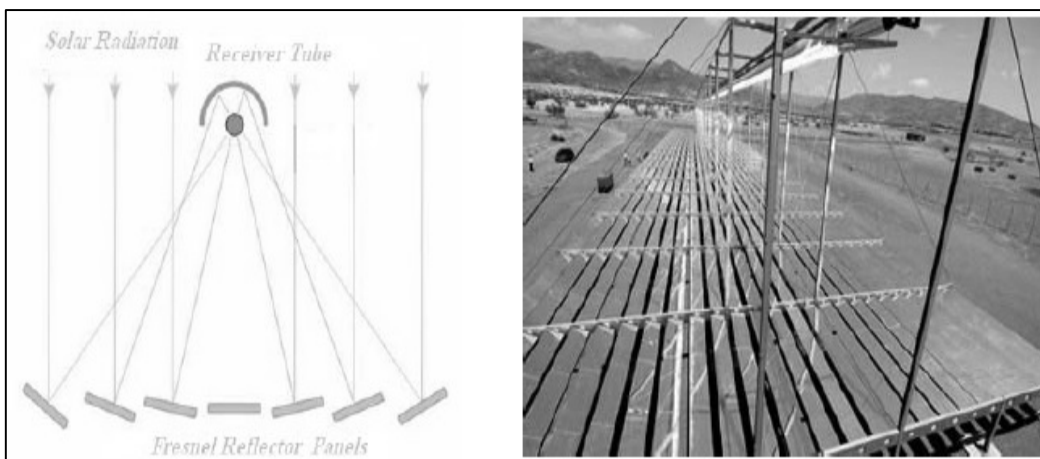
Εικόνα 27: Σφαιρικός απεικονιστικός φακός Fresnel

Οι μη απεικονιστικοί φακοί Fresnel χωρίζονται και αυτοί σε δύο επιμέρους κατηγορίες, παρόμοιες με τις παραπάνω περιπτώσεις. Από την μία, υπάρχουν οι Σημειακοί Φακοί Fresnel, στους οποίους η γωνία των αυλακώσεων έχει σχεδιαστεί, έτσι ώστε μία παράλληλη δέσμη ηλιακού φωτός, να εστιάζεται σε ένα μοναδικό σημείο (Εικόνα 28a). Από την άλλη, υπάρχουν οι ευρέως διαδεδομένοι με πολλές εφαρμογές σε συγκεντρωτικά ηλιακά/θερμικά συστήματα, Γραμμικοί Φακοί Fresnel, οι οποίοι εστιάζουν το παράλληλο προσπίπτον φως, σε μία ευθεία γραμμή, παράλληλη στον άξονα του φακού (Εικόνα 28b).

Παραπάνω, έχει αναφερθεί ότι το οπτικό φαινόμενο που χρησιμοποιούν οι φακοί Fresnel για να εστιάζουν το φως είναι η διάθλαση. Ωστόσο, υπάρχουν φακοί Fresnel που με την βοήθεια των «πλάγιων» επιφανειών που διαθέτουν, ανακλούν τις παράλληλες ακτίνες φωτός προς τον διαθέσιμο συλλέκτη. Οι φακοί αυτοί είναι γνωστοί και ως Ανακλαστές Fresnel. Τέτοια συστήματα Fresnel κάνουν χρήση 10 με 20 μεμονωμένων, μεγάλου μήκους, ανακλαστικών τμημάτων, αντί για έναν ενιαίο συλλέκτη, τα οποία είναι προσανατολισμένα στην διεύθυνση Βορρά – Νότου. Οι «καθρέπτες» αυτοί έχουν επιπλέον την δυνατότητα περιστροφής γύρω από τον άξονά τους για την καλύτερη παρακολούθηση του ήλιου (Εικόνα 29). [43]



Εικόνα 28: (α) Σημειακής και (β) Γραμμικής εστίασης φακοί Fresnel [42]

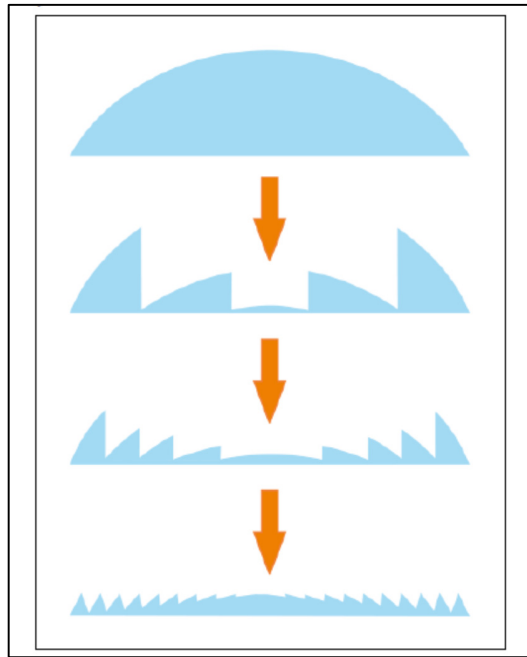


Εικόνα 29: Ανακλαστήρας Fresnel [42]

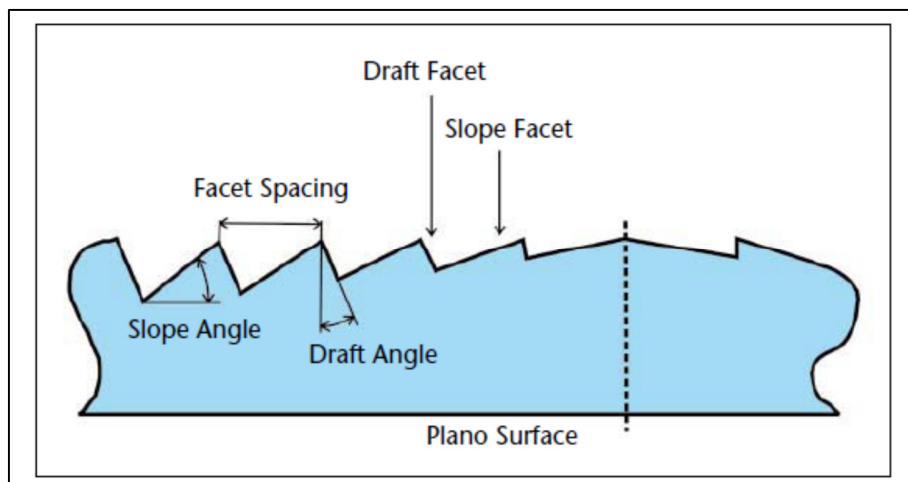
Σχεδιασμός και χαρακτηριστικά

Η βασική ιδέα για τον σχεδιασμό ενός φακού Fresnel είναι η αφαίρεση ενός μεγάλου μέρους του όγκου ενός επιπεδόκυρτου φακού δημιουργώντας επιμέρους αυλακώσεις, καθεμία από τις οποίες λειτουργεί ως ανεξάρτητη διαθλαστική επιφάνεια, με την γωνία της κάθε επιφάνειας να αυξάνεται καθώς απομακρυνόμαστε από το κέντρο του φακού (Εικόνα 30). Στην Εικόνα 31 παρουσιάζονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά ενός φακού Fresnel, όπως η απόσταση μεταξύ των επίπεδων όψεων των αυλακώσεων (facet spacing), η επιφάνεια βύθισης (draft facet), η κεκλιμένη επιφάνεια (slope facet), η γωνία βύθισης (draft angle) και η γωνία της κεκλιμένης επιφάνειας (slope angle), με την γωνία της κεκλιμένης επιφάνειας και την γωνία βύθισης να υπολογίζονται βάσει της παράλληλης ευθείας στην επίπεδη επιφάνεια του φακού και της καθέτου στην ίδια επιφάνεια, αντίστοιχα. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά ενός φακού Fresnel παρουσιάζουν ιδιαίτερη σημασία στην οπτική απόδοσή τους σε Συγκεντρωτικά Φωτοβολταϊκά Συστήματα (CPV). Παράλληλα, δύο ακόμη σημαντικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν ένα φακό Fresnel και βοηθούν στην εκτίμηση του βαθμού μετάδοσης είναι η ήδη αναφερθείσα εστιακή απόσταση, f , και ο αριθμός f (f -number),

ή αλλιώς η “ταχύτητα” του φακού. Ο αριθμός f ορίζεται ως ο λόγος της εστιακής απόστασης του φακού προς την καθαρή διάμετρο του διαφράγματος του φακού, ϕ . Με την αύξηση του αριθμού f , αυξάνεται η “ταχύτητα” του φακού, ενώ οι ακτίνες που διαθλώνται εστιάζονται πιο γρήγορα, με την εστία να βρίσκεται πιο κοντά στον φακό. [44] [45]



Εικόνα 30: Δημιουργία φακού Fresnel από επιπέδοκυρτο φακό [44]



Εικόνα 31: Πλάγιο προφίλ φακού Fresnel [44]

Σε έναν φακό Fresnel, οι ακτίνες που προσπίπτουν σε αυτόν μεταδίδονται δια μέσου των κεκλιμένων επιφανειών και συγκλίνουν σε ένα σημείο όταν οι επιφάνειες βύθισης σχηματίζουν γωνίες ίσες με 90° (γωνία βύθισης = 90°). Στην περίπτωση που οι γωνίες βύθισης του φακού είναι μικρότερες από 90° η εστίαση των ακτίνων μειώνεται, καθώς το φως διαθλάται σε πολλές διαφορετικές κατευθύνσεις. Από την άλλη πλευρά, είναι αναγκαίο να δοθούν μερικές μοίρες κλίση

στην επιφάνεια βύθισης για να διευκολυνθεί η αφαίρεση του καλουπιού, κατά την κατασκευή. [46]

Τα δύο σημεία εκατέρωθεν ενός φακού Fresnel, στα οποία το φως εστιάζεται (F_1 και F_2 στην Εικόνα 9), ονομάζονται *συζυγή* (*conjugates*). Ο σχεδιασμός ενός φακού διαφέρει ανάλογα με το είδος των συζυγών, καθώς έχουμε τα “πεπερασμένα” και τα “άπειρα” συζυγή (“finite” & “infinite” conjugates). Στην περίπτωση των πεπερασμένων συζυγών σχεδίων, το φως περνώντας τον φακό Fresnel, εστιάζεται σε ένα μοναδικό σημείο, την εστία. Στην αντίθετη περίπτωση των απείρων συζυγών σχεδίων, το φως “συλλέγεται” από τον φακό Fresnel και στην συνέχεια διαδίδεται υπό μορφή παράλληλων ακτίνων. Στην περίπτωση των ηλιακών συστημάτων, και θεωρώντας ότι το φως του ήλιου διαδίδεται και προσπίπτει σε παράλληλες δέσμες, ο σχεδιασμός απείρων συζυγών είναι αυτός που προτιμάται. Οι φακοί Fresnel σε ένα ηλιακό σύστημα μπορούν να χρησιμοποιηθούν με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ένας φακός Fresnel, με την μία πλευρά του επίπεδη, έχει την δυνατότητα να τοποθετηθεί με τις αυλακώσεις να “κοιτούν” προς τα πάνω (grooves-out), δηλαδή προς την κατεύθυνση απ’ όπου προέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία, είτε οι αυλακώσεις να “βλέπουν” προς το έδαφος (grooves-in). Η περίπτωση που δίνει τα πιο καλά αποτελέσματα ως προς την εστίαση του φωτός, είναι οι αυλακώσεις του φακού να κοιτούν την ευθυγραμμισμένη δέσμη, δηλαδή η “grooves-out” περίπτωση, καθώς αποφεύγονται οι σφαιρικές εκτροπές και αυξάνεται η απόδοση συλλογής του φωτός. [47]

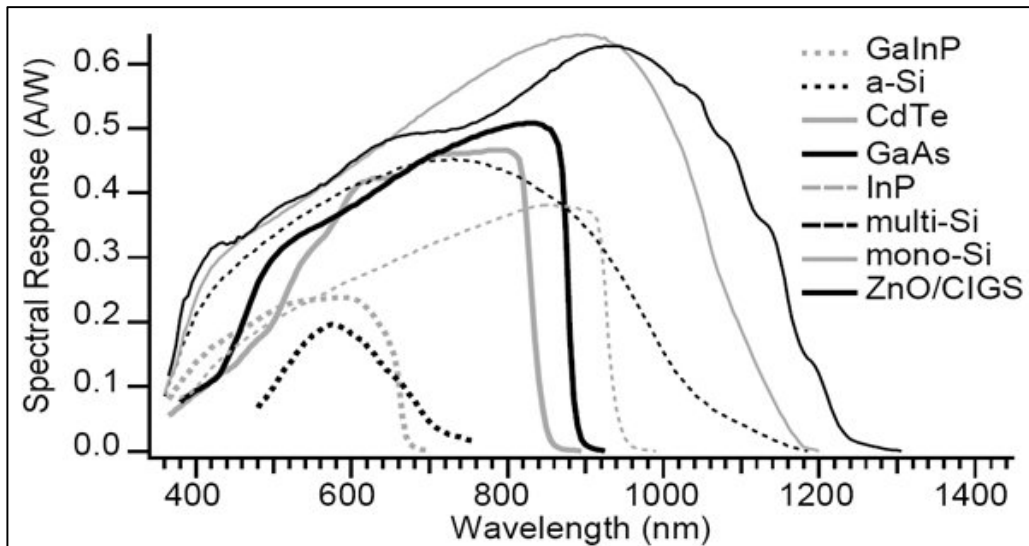
Και οι δύο παραπάνω περιπτώσεις παρουσιάζουν κάποια επιμέρους μειονεκτήματα. Στην πρώτη περίπτωση των “grooves-out” παρουσιάζεται έντονα το φαινόμενο της σκίασης και του αποκλεισμού (shadowing and blocking effect), όπου η μη-αποτελεσματική επιφάνεια του κάθε αυλακιού, δεν επιτρέπει την διάδοση ενός μέρους του προσπίπτοντος φωτός και συνεπώς την εστίαση του. Παράλληλα, ένα πιο πρακτικό ζήτημα και μειονέκτημα αυτού του τρόπου τοποθέτησης είναι η συγκράτηση σκόνης ανάμεσα στις τομές του φακού μειώνοντας την απόδοση του. Στην δεύτερη περίπτωση των “grooves-in”, τοποθετώντας την επίπεδη επιφάνεια προς τον ήλιο, έχουμε το μειονέκτημα των έντονων επιφανειακών ανακλάσεων και των εκτροπών εκτός του άξονα. Έτσι, έχουμε αφενός χαμηλή απόδοση, καθώς το ποσοστό διέλευσης του φωτός μέσω του φακού είναι μικρότερο, αφετέρου έχουμε μικρή συγκέντρωση των ακτίνων στο εστιακό σημείο. [48]

Χαρακτηρισμός των φακών Fresnel

Κατά τον σχεδιασμό ενός συγκεντρωτικού συστήματος ηλιακής ενέργειας είναι αναγκαίο να ληφθούν υπόψιν τρία βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία είναι αναγκαία για την αξιολόγηση του συστήματος. Αυτά είναι η φασματική φύση της εστιασμένης δέσμης φωτός, η συνολική ισχύς που μεταδίδεται από τον φακό και η ομοιογένεια της εστιακής περιοχής.

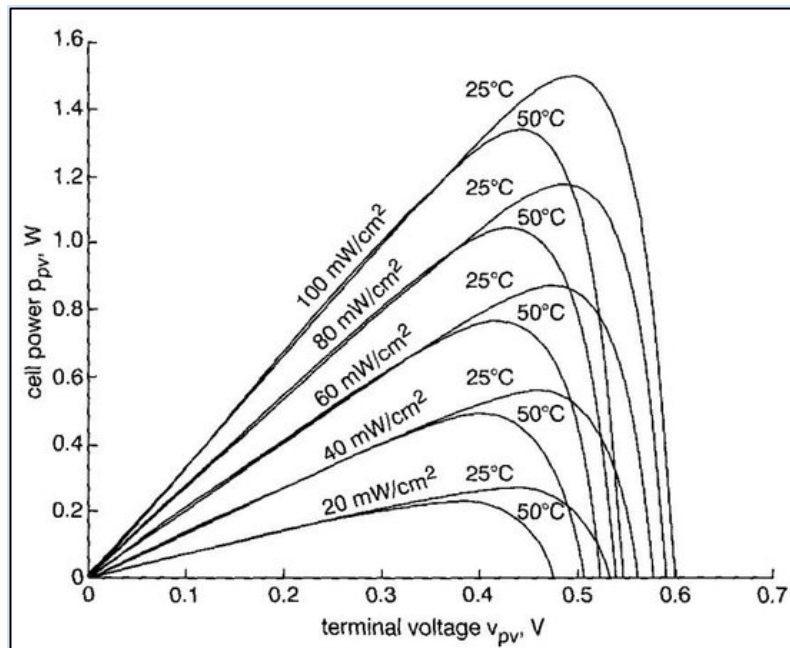
Στην Εικόνα 32 παρουσιάζονται οι φασματικές αποκρίσεις διαφόρων υλικών από τα οποία κατασκευάζονται οι κυψελίδες των φωτοβολταϊκών. Ευκολά μπορεί να παρατηρηθεί ότι για κάθε υλικό το φάσμα διαφέρει και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την διαφορετική τιμή της απόδοσης της κάθε μονάδας. Παράλληλα, παραπάνω αναφέρθηκε η συσχέτιση του δείκτη διάθλασης του υλικού

από το οποίο είναι κατασκευασμένος ένας φακός Fresnel, με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Συνεπώς, για να έχουν την επιθυμητή απόδοση του συστήματος ο φακός θα πρέπει να παρουσιάζει διαφάνεια και να μεταδίδει όσο το δυνατόν περισσότερο το φως που αντιστοιχεί στο φάσμα των μηκών κύματος που ταιριάζει με το αντίστοιχο του ηλιακού κυττάρου. Τα ηλιακά αυτά κύτταρα αποτελούν τον συλλέκτη του συστήματος. [49] [50]



Εικόνα 32: Φασματική απόκριση διαφορετικών υλικών ηλιακών κυψελίδων [49]

Στην Εικόνα 33 και μέσω των καμπυλών ισχύος – τάσεως για ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο, φαίνεται η εξάρτηση που παρουσιάζει η παραγόμενη ισχύς ενός κυττάρου από τόσο από την εισερχόμενη ακτινοβολία, όσο και από την θερμοκρασία. Μία ηλιακή κυψελίδα έχει την δυνατότητα να λειτουργεί σε ικανοποιητικά επίπεδα για ένα συγκεκριμένο εύρος προσπίπτουσας ισχύος. Εάν η προερχόμενη ισχύς είναι μειωμένη, λόγω αδιαπερατότητας του φακού Fresnel, τότε ο συλλέκτης δεν θα έχει την δυνατότητα παραγωγής της επιθυμητής, ή βάσει των δυνατοτήτων του, ισχύος. Αντίθετα, εάν ο φακός συγκεντρώνει και μεταδίδει υψηλής ισχύος ακτινοβολία και για μεγάλο χρονικό διάστημα, υπάρχει περίπτωση πρόκλησης βλάβης του συλλέκτη λόγω υπερθέρμανσης και αύξησης των απωλειών αντίστασης. [50] [51]

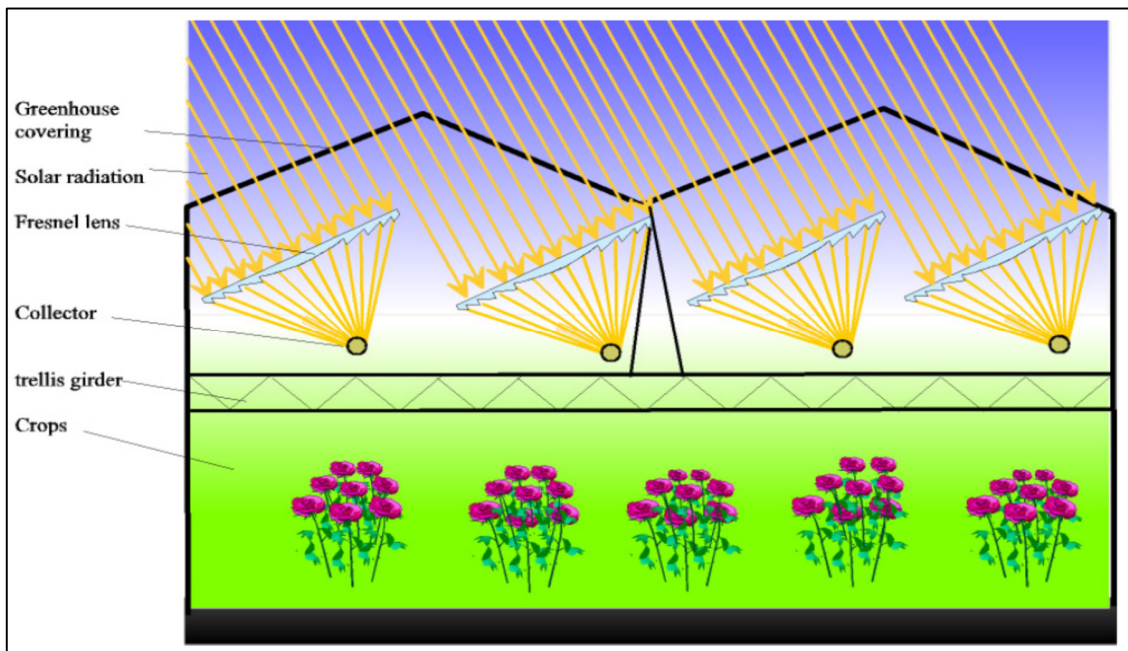


Εικόνα 33: Καμπύλες ισχύος – τάσεως φωτοβολταϊκών κυψελίδων [51]

Τέλος, ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο παρουσιάζει ευαισθησία στην ομοιογένεια του φωτισμού που προσπίπτει σε αυτό. Λόγω της σύνδεσης των αντιστάσεων ενός φωτοβολταϊκού σε σειρά και των μεγάλων πυκνοτήτων ρεύματος που προκύπτει από τον συγκεντρωμένο φωτισμό ενός φακού Fresnel, είναι απαραίτητο να αποφεύγονται σημεία τα σημεία σκίασης πάνω στον συλλέκτη. Παράλληλα, πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στο “φαινόμενο κατανεμημένης διόδου” (distributed diode effect), σύμφωνα με το οποίο οι πλευρικές αντιστάσεις ενός στοιχείου προκαλούν επιμέρους πτώσεις τάσης στην επιφάνεια με αποτέλεσμα την παραγωγή διαφορετικών πυκνοτήτων ρεύματος σύμφωνα με την καμπύλη I-V του στοιχείου. Έτσι, είναι απαραίτητο τα προφίλ φωτισμού στους συλλέκτες να είναι όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα, έχοντας υπόψιν ότι σε μεγάλο βαθμό οι συγκεντρωτές, όπως οι φακοί Fresnel, μεταδίδουν ανομοιόμορφο σχετικά φωτισμό, επιδρώντας αρνητικά στην απόδοση του συλλέκτη. [52]

3.5. Φακοί Fresnel στο θερμοκήπιο

Η προσθήκη φακών Fresnel σε μία θερμοκηπιακή μονάδα (χαμηλής οροφής) περιγράφεται σαφώς από τον Sonneveld, P. (2014) [53] στην Εικόνα 34, με τους φακούς να συμπεριλαμβάνουν ένα σύστημα παρακολούθησης του ήλιου για μεγαλύτερη απόδοση, ιδιαίτερα τις πρωινές και απογευματινές ώρες, τις ώρες δηλαδή που ένας στάσιμος φακός θα δεχόταν ελάχιστη ακτινοβολία λόγω της μεγάλης ζενίθιας γωνίας.



Εικόνα 34: Σύστημα συγκέντρωσης ισχύος (Concentrated Power System - CPC) με Φακούς Fresnel [53]

Η βασική ιδιότητα των φακών Fresnel στην οποία βασίζονται τα Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα (ΣΗΣ) για την παραγωγή ηλεκτρικής ή/και θερμικής ενέργειας είναι ο διαχωρισμός μεταξύ των συνιστωσών της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο θερμοκήπιο, της άμεσης (direct) και την διάχυτης (diffuse) ακτινοβολίας. Η ιδιότητα αυτή τους καθιστά ικανούς στο να δημιουργούν ένα πολύ καλό περιβάλλον για την ανάπτυξη των φυτών, τόσο από πλευράς θερμοκρασίας, αλλά και φωτισμού. Η άμεση ακτινοβολία, η οποία για μία ηλιόλουστη, ανέφελη μέρα μπορεί να φτάσει το 80% της ολικής, προσπίπτει στον φακό και εστιάζεται στον συλλέκτη. Έτσι, ιδίως σε ζεστές ημέρες του καλοκαιριού εμποδίζεται η ροή της στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, διατηρώντας το επιθυμητό κλίμα, ενώ αποφεύγεται η υπερθέρμανση του θερμοκηπίου που μπορεί να καταστεί καταστροφική για την καλλιέργεια. Αντίθετα, το διάχυτο μέρος της ολικής ακτινοβολίας δεν επηρεάζεται από τον φακό, διατηρώντας τον φωτισμό σε επίπεδα κατάλληλα για την ανάπτυξη των φυτών. Κατά την διάρκεια των πρωινών και των απογευματινών ωρών, νεφελωδών και χειμερινών ημερών, όπου η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μικρή, παρέχεται η δυνατότητα απομάκρυνσης του συλλέκτη από την εστία του φακού, με σκοπό την διάδοση του ηλιακού φωτός εξ' ολοκλήρου εντός του θερμοκηπίου για την διατήρηση του μικροκλίματος, που “αντιστοιχεί” σε κάθε είδος καλλιέργειας. [53] [54]

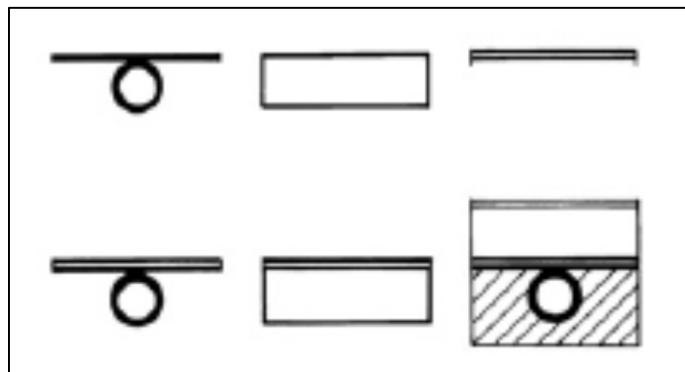
Απορροφητές

Στα Συγκεντρωτικά Ηλιακά Συστήματα που εφαρμόζονται σε θερμοκηπιακές μονάδες, οι φακοί Fresnel συνδυάζονται με γραμμικούς θερμικούς (thermal – T), φωτοβολταϊκούς (photovoltaics – PV) ή υβριδικούς φωτοβολταϊκούς/θερμικούς απορροφητές (PV/T). Τα συστήματα αυτά έχουν ως σκοπό την μετατροπή της συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμική ενέργεια για την

κάλυψη των θερμικών αναγκών του θερμοκηπίου ή σε ηλεκτρική ενέργεια για την δημιουργία ενός ενεργειακά πλήρως ή μερικώς αυτόνομου θερμοκηπίου.

Κύριος σκοπός ενός φωτοβολταϊκού συστήματος που λειτουργεί ως απορροφητής είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, με την συγκέντρωση υψηλής πυκνότητας ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτούς συνεπάγεται μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία όπως έχει αναφερθεί και στην Παράγραφο 3.4 παρουσιάζει αρνητικά αποτελέσματα στην απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Για την διατήρηση της απόδοσής τους προτείνεται ο συνδυασμός του με θερμικά υποσυστήματα, τα οποία με την βοήθεια τρεχούμενου νερού ή ροής αέρα ψύχουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, ενώ η απορροφούμενη αυτή θερμική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί για την θέρμανση του θερμοκηπίου όταν αυτό κριθεί απαραίτητο. Η εξαγόμενη θερμότητα είναι συνήθως χρήσιμη για κάλυψη θερμικών αναγκών χαμηλής θερμοκρασίας, λόγω των χαμηλών τιμών θερμοκρασίας που λειτουργούν τα φωτοβολταϊκά. Η παραχθείσα ηλεκτρική ενέργεια έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί απευθείας, είτε να αποθηκευτεί σε μπαταρίες για την κάλυψη αναγκών τεχνητού φωτισμού κατά την διάρκεια της νύχτας, είτε για την διατήρηση της θερμοκρασίας την ίδια χρονική περίοδο.

Στην Εικόνα 35 παρουσιάζονται έξι διαφορετικοί τύποι απορροφητών ηλιακής ακτινοβολίας. Στην πρώτη σειρά παρουσιάζεται ο συνδυασμός φωτοβολταϊκού με σωλήνα για παροχή και θέρμανση νερού, ένας τύπος αεραγωγού για θέρμανση αέρα και ένα γραμμικό φωτοβολταϊκό στοιχείο. Στην δεύτερη σειρά παρουσιάζονται απορροφητές για υβριδικά συστήματα – PV/T, με χρήση σωλήνων για θέρμανση νερού ή αέρα και φωτοβολταϊκών στοιχείων. Η ύπαρξη επιπλέον τζαμιών προσφέρει την δυνατότητα ακόμη μεγαλύτερης θερμομόνωσης. [55]

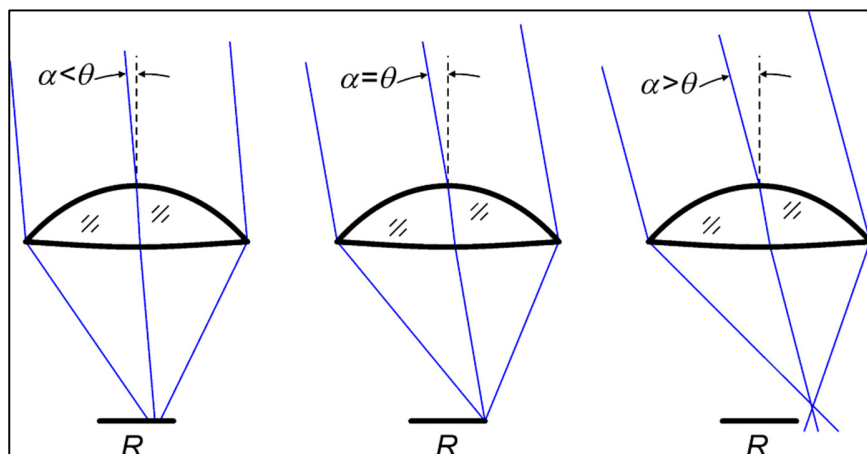


Εικόνα 35: Τύποι απορροφητών ηλιακής ακτινοβολίας [55]

Συστήματα παρακολούθησης

Ένα χαρακτηριστικό των φακών Fresnel, και γενικότερα των φακών, που παίζει σημαντικό ρόλο στην συγκέντρωση της ακτινοβολίας είναι η γωνία αποδοχής, θ (acceptance angle). Η γωνία αποδοχής ορίζεται ως η γωνία πρόσπτωσης στην οποία ο φακός συλλέγει περίπου το 90% της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας. [56] Με μία πιο ουσιαστική και απλοϊκή προσέγγιση, η γωνία αποδοχής είναι η γωνία βάσει της οποίας καθορίζεται το τμήμα του ουρανού που “βλέπει” ο φακός. [57]

Στην Εικόνα 36 παρουσιάζεται η γενική ιδέα λειτουργίας της γωνίας αποδοχής ενός φακού. Εάν η γωνία α με την οποία προσπίπτουν στον φακό οι παράλληλες ηλιακές ακτίνες είναι μικρότερη της γωνίας αποδοχής, τότε η ακτινοβολία έχει την δυνατότητα να λαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από τον φακό και να εστιάζει το σύνολό της στον απορροφητή. Αντίθετα, εάν η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη της γωνίας αποδοχής, και άρα εκτός των ορίων των συγκεντρωτικών δυνατοτήτων του φακού, ο απορροφητής δεν συλλέγει καθόλου ακτινοβολία.

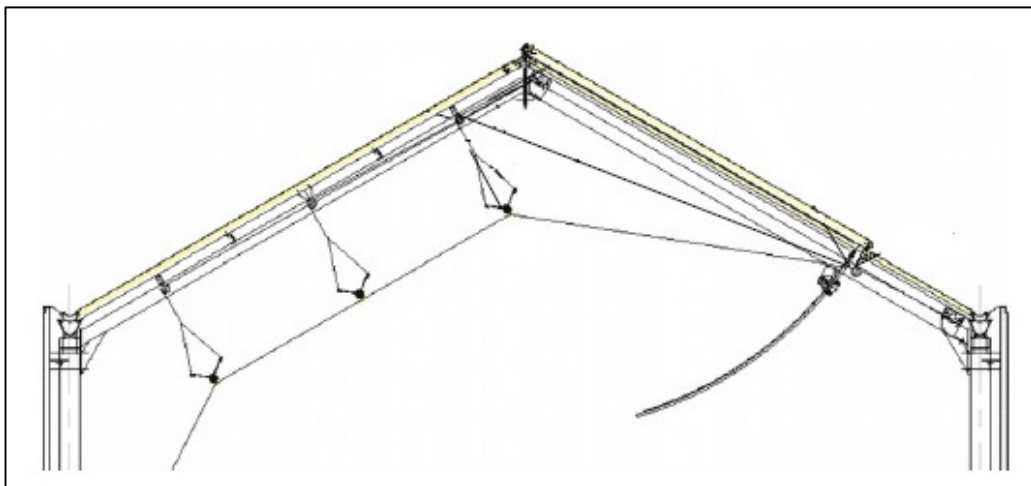


Εικόνα 36: Η γενική ιδέα της γωνίας αποδοχής θ [Jcc2011 at English Wikipedia, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons]

Για την αντιμετώπιση των περιπτώσεων κατά την διάρκεια της ημέρας, και κυρίως τις πρωινές και απογευματινές ώρες, που η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη της γωνίας αποδοχής, απαιτείται ένα σύστημα το οποίο θα ακολουθεί την πορεία του ήλιου, γνωστό ως *σύστημα παρακολούθησης (tracking system)*, με την ακρίβεια του κάθε συστήματος να εξαρτάται από το μέγεθος της γωνίας αποδοχής. Για παράδειγμα, ένας φακός με μικρή γωνία αποδοχής απαιτεί ένα υψηλής ακρίβειας σύστημα παρακολούθησης.

Στο πλαίσιο παρακολούθησης του ήλιου από τον συγκεντρωτή, υπάρχουν δύο διαφορετικά ηλιακά συστήματα παρακολούθησης, (α) τα συστήματα διπλού άξονα που παρακολουθούν τον ήλιο βάσει του υψομέτρου και του αζιμούθιου, και (β) τα συστήματα περιστροφής μονού άξονα με δυτικό-ανατολικό / βόρειο-νότιο προσανατολισμό. Από τα δύο αυτά συστήματα πιο ακριβές παρουσιάζεται το πρώτο, λόγω της ευρείας γωνίας περιστροφής και των λιγότερων οπτικών παρεμβολών, με το μειονέκτημα που αφορά την ανάπτυξη αλγορίθμου για την ακριβή παρακολούθηση της τροχιάς του ήλιου. Ένας επιπλέον διαχωρισμός αφορά την χρήση ηλεκτρικής ενέργειας και προγράμματος ελέγχου, σε παθητικά και ενεργητικά συστήματα παρακολούθησης. Ένα παθητικό σύστημα αρκείται σε φυσικές/μηχανικές αλλαγές, σε αντίθεση με τα ενεργητικά συστήματα τα οποία απαιτούν την χρήση κινητήρα, προγράμματος ελέγχου και αισθητήρων για την ανίχνευση της ηλιακής ακτινοβολίας. Το μικρό βάρος των φακών Fresnel τους καθιστά ιδανικούς για ένα ενεργητικό σύστημα παρακολούθησης, λόγω της μικρότερης απαιτούμενης ενέργειας. [58]

Τα συστήματα παρακολούθησης, ωστόσο, δεν αφορούν την παρακολούθηση μόνον με την κίνηση του φακού. Στην Εικόνα 36, και πιο συγκεκριμένα στην τρίτη περίπτωση παρατηρούμε τις ακτίνες να εστιάζονται εκτός του απορροφητή R. Για να αποφευχθεί η κίνηση ολόκληρου του φακού, υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής θέσης του απορροφητή. Στο συγκεκριμένο σύστημα παρακολούθησης, απαιτείται ένας φακός με ευρεία γωνία συγκέντρωσης της ακτινοβολίας και ένας απορροφητής που να ακολουθεί την θέση της καλύτερα εστιασμένης περιοχής. [59] Τέτοια συστήματα παρακολούθησης παρουσιάζουν ιδιαίτερη χρήση σε περιπτώσεις που οι φακοί Fresnel είναι ενσωματωμένοι στο θερμοκήπιο, δηλαδή αποτελούν υλικά κάλυψης των θερμοκηπιακών μονάδων. Και στην περίπτωση του απορροφητή με προσαρμοσμένο σύστημα παρακολούθησης, διακρίνονται δύο επιπλέον κατηγορίες, αυτές της παρακολούθησης μονού και διπλού άξονα. Στην πρώτη περίπτωση η κίνηση του απορροφητή αρκείται στην παράλληλη με τον φακό Fresnel κίνηση, ακολουθώντας έτσι μόνο σε ένα επίπεδο την εστιακή γραμμή που δημιουργείται από τον φακό. Η δεύτερη περίπτωση του διπλού άξονα όπως παρουσιάζεται από τους Sonneveld et al. (2011), αποτελείται από ένα σύνολο καλωδίων και μοτέρ. Ο πρώτο καλώδιο καθορίζει την απόσταση μεταξύ του απορροφητή και του φακού Fresnel, ενώ το δεύτερο ρυθμίζει την παράλληλη κίνηση του απορροφητή ως προς τον φακό (Εικόνα 37). [60] [61]



Εικόνα 37: Σύστημα παρακολούθησης απορροφητή διπλού άξονα σε ενσωματωμένους στο θερμοκήπιο φακούς Fresnel [61]

4. Συμπεράσματα

Τα θερμοκήπια, ως ελεγχόμενες περιβαλλοντικές γεωργικές εγκαταστάσεις, αντιπροσωπεύουν το επίπεδο του αγροτικού εκσυγχρονισμού μιας περιοχής. Είναι εγκαταστάσεις υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης, με αυτή να προσεγγίζει έως και το 50% του κόστους παραγωγής του θερμοκηπίου. Η κατανάλωση ενέργειας για την συμπλήρωση του αναγκαίου για τα φυτά φωτισμού, του αερισμού, της θέρμανσης και του δροσισμού είναι γνωστή και ως βασική κατανάλωση ενέργειας και αντιπροσωπεύει περισσότερο από το 90% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης του θερμοκηπίου. Η υψηλή κατανάλωση ενέργειας έχει γίνει ένας από τους πιο ισχυρούς περιοριστικούς παράγοντες της ανάπτυξης του θερμοκηπίου. Στην μείωση ενός μεγάλου μέρους της βασικής ενεργειακής κατανάλωσης, η ηλιακή ενέργεια αποτελεί ένα πολύ αποτελεσματικό εργαλείο, τόσο μέσω του φυσικού φωτισμού, όσο και μέσω της θερμικής ενέργειας που προσφέρει. Με χρήση των φακών Fresnel εντός του θερμοκηπίου, η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να φτάσει σε πολύ υψηλά επίπεδα και να μειώσει εξαιρετικά την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται για την διατήρηση των βέλτιστων συνθηκών εντός του θερμοκηπίου. Το κύριο πλεονέκτημα των φακών Fresnel είναι η ικανότητα διαχωρισμού της άμεσης και την διάχυτης συνιστώσας από την συνολική ηλιακή ακτινοβολία του προσπίπτει στο θερμοκήπιο. Η συγκέντρωση της άμεσης ακτινοβολίας από τον φακό Fresnel στον απορροφητή παρουσιάζει οφέλη, τόσο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για κάλυψη επιμέρους αναγκών, όπως ο δυναμικός εξαερισμός, όσο και στην απομάκρυνση του τμήματος της ηλιακής ακτινοβολίας που θερμαίνει σε μεγάλο βαθμό τον χώρο του θερμοκηπίου. Από την άλλη, το διάχυτο «κομμάτι» της ηλιακής ακτινοβολίας προσφέρει τον φωτισμό που είναι απαραίτητος για την κάλυψη των αναγκών των φυτών σε φωτισμό, για διεργασίες όπως η φωτοσύνθεση.

Συνεπώς, η χρήση των φακών Fresnel σε συνδυασμό με ένα φωτοβολταϊκό (PV), θερμικό (T) ή υβριδικό φωτοβολταϊκό/θερμικό (PV/T) ηλιακό σύστημα στον χώρο του θερμοκηπίου, μπορεί να καλύψει σε μεγάλο βαθμό τις ανάγκες διατήρησης του βέλτιστου μικροκλίματος, ενώ προσφέρει ταυτόχρονα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

Βιβλιογραφία

1. B. von Elsner, D. Briassoulis, D. Waaijenberg, A. Mistriotis, Chr. von Zabeltitz, J. Gratraud, G. Russo, R. Suay-Cortes. *Review of Structural and Functional Characteristics of Greenhouses in European Union Countries: Part I, Design Requirements*. Journal of Agricultural Engineering Research, Volume 75, Issue 1, 2000, Pages 1-16, ISSN 0021-8634.
2. Haixia Li, Yu Guo, Huajian Zhao, Yang Wang, David Chow. *Towards automated greenhouse: A state of the art review on greenhouse monitoring methods and technologies based on internet of things*. Computers and Electronics in Agriculture, Volume 191, 2021, 106558, ISSN 0168-1699.
3. Nederhoff, Elly. (1997). *Humidity in the greenhouse*. Commercial Greenhouse. 52.
4. Von Zabeltitz, C. (2011). *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates: Climate Conditions, Design, Construction, Maintenance, Climate Control*. Springer. Germany.
5. Μαυρογιαννόπουλος, Ν. Γ. (2017) *Τεχνολογία Θερμοκηπίων: Μικροκλίμα, Κατασκευή, Υλικά, Εξοπλισμός*. UNIBOOKS. Αθήνα.
6. Goldammer, T. (2019). *Greenhouse Management: A Guide to Operations and Technology*. Apex Publishers. First Edition. ISBN (13): 978-0-9675212-4-4. USA.
7. Γραφιαδέλλης Μ. (1987). *Σύγχρονα Θερμοκήπια*, Εκδόσεις Γαρταγάνη, Θεσσαλονίκη.
8. [Greenhouse Heating Systems - Environment & In-Bench Heating | BioTherm Solutions](#)
9. Van de Braak N. J., (1988). *New Methods of Greenhouses Heating. Engineering and Economics Aspects*. Acta Horticulturae, Vol. 245, pp. 149-157.
10. [Περιοδική επιθεώρηση του λέβητα ατμού \(turcert.com\)](#)
11. Popovski K., (1986). *Location of Heating Installations in Greenhouses for Low Temperature Heating*. CNRE Bulletin, Vol.15, pp. 51-55.
12. Sase S (2006) *Air movement and climate uniformity in ventilated greenhouses*. Acta Hortic 719:313–323.
13. Bucklin, Ray & Leary, J. & Wilkerson, D.. (2004). *Fan and Pad Greenhouse Evaporative Cooling Systems*.
14. Vox, Giuliano & Teitel, M. & Pardossi, Alberto & Minuto, A. & Tinivella, F. & Schettini, Evelia. (2010). *Sustainable greenhouse systems*. Sustainable Agriculture: Technology, Planning and Management. 1-80.
15. Foster, R., Witcher, J., Nelson, V., Ghassemi, M., Mimbela, L. E., Ghassemi, A. (2009). *Solar Energy: Renewable Energy and the Environment*. CRC Press.
16. Tiwari, G. N., Tiwari, A., Shyam. (2016). *Handbook of Solar Energy: Theory, Analysis and Applications*. Springer Singapore.

17. [What is Green Energy? \(Definition, Types and Examples\) - TWI \(twi-global.com\)](#)
18. Isabella, O., Jäger, K., Smets, A., Van Swaaij, R., Zeman, M. (2016). *Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems*. UIT Cambridge Ltd.
19. Perez, R., David, M., Hoff, T. E., Jamaly, M., Kivalov, S., Kleissl, J., Lauret, P., Perez, M. (2016). *Spatial and Temporal Variability of Solar Energy. Foundations and Trends® in Renewable Energy, 1(1), 1–44.*
20. Chalkias, Christos & Faka, Antigoni & Kalogeropoulos, Kleomenis. (2013). Assessment of the Direct Sun-Light on Rural Road Network through Solar Radiation Analysis Using GIS. *Open Journal of Applied Sciences*. 3. 224-231.
21. Fondriest Environmental, Inc. “Solar Radiation and Photosynthetically Active Radiation.” *Fundamentals of Environmental Measurements*. 21 Mar. 2014. Web.
22. Shaikh, Mohd Rizwan & Shaikh, Sirajuddin & Waghmare, Santosh & Labade, Suvarna & Tekale, Anil. (2017). A Review Paper on Electricity Generation from Solar Energy. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*.
23. [Solar Energy | EESI](#)
24. [Top 10 largest solar photovoltaic plants in the world \(imeche.org\)](#)
25. Kleissl, J. (2013). *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*. Elsevier.
26. Chan, H.-Y., Riffat, S. B., & Zhu, J. (2010). *Review of passive solar heating and cooling technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(2), 781–789.*
27. [The Fresnel Lens by Thomas Tag | US Lighthouse Society \(uslhs.org\)](#)
28. [Fresnel Lenses \(archive.org\)](#)
29. [Hyper-Radial Lenses by Thomas Tag | US Lighthouse Society \(uslhs.org\)](#)
30. [Makapu`u Lighthouse, Hawaii at Lighthousefriends.com \(archive.org\)](#)
31. [Light Website : Φακοί \(auth.gr\)](#)
32. [Lens | Definition of Lens by Merriam-Webster](#)
33. Seway, R. A. (1990). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. Houghton Mifflin Harcourt School. 3rd edition
34. [refraction | Definition, Examples, & Facts | Britannica](#)
35. Introduction To Lens Design by José Sasián
36. [What is the optical axis? | Socratic](#)

37. Seway, R. A., Jewett, J. W. (2013). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. Cengage Learning. 9th edition
38. Leutz, R., & Suzuki, A. (2001). *Fresnel Lens Optics. Nonimaging Fresnel Lenses*, 35–52.
39. Yeh, P., & Yeh, N. (2018). *Design and analysis of solar-tracking 2D Fresnel lens-based two staged, spectrum-splitting solar concentrators*. *Renewable Energy*, 120, 1–13.
40. Xie, W. T., Dai, Y. J., Wang, R. Z., & Sumathy, K. (2011). *Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 2588–2606.
41. Davis, A., & Kühnlenz, F. (2007). *Optical Design using Fresnel Lenses*. *Optik & Photonik*, 2(4), 52–55.
42. Jang, W., Kim, S. J., Lee, D., Lee, K.-H., Kim, Y.-G., Park, A., Park, Y., Lee, J. H. (2014). “*Design of partitioned linear Fresnel lens for medium-concentrated PV and its performance*.”, in 10th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems: CPV-10, 2014, vol. 1616, no. 1, pp. 67–71.
43. F. Q. Cui, Y. L. He, R. J. Xu and Y. B. Tao, “Optical Analysis of Fresnel Lens for concentrating PV system”, AIP Conference Proceedings 1207, 244-251 (2010).
44. Naichia Yeh, Pulin Yeh. Analysis of point-focused, non-imaging Fresnel lenses' concentration profile and manufacture parameters, *Renewable Energy*, Volume 85, 2016, Pages 514-523, ISSN 0960-1481.
45. Udawant, Rahul & Mohite, Kakasaheb & Takwale, Murlidhar. (2015). A review on CSTs.
46. Paul Breeze. Chapter 4 - Parabolic Trough and Fresnel Reflector Solar Power Plants, Editor(s): Paul Breeze, *Solar Power Generation*, Academic Press, 2016, Pages 25-34, ISBN 9780128040041.
47. [Fresnel Lenses Brochure.FM6 \(fresneltech.com\)](#)
48. Kritchman, E. M., Friesem, A. A., & Yekutieli, G. (1979). Highly concentrating Fresnel lenses. *Applied Optics*, 18(15), 2688.
49. Liu, Dingpu & Xiong, Limin & Meng, Haifeng & He, Yingwei & Zhang, Jieyu. (2012). Research on Outdoor Testing of Solar Modules. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*.
50. Chemisana, D., Vossier, A., Pujol, L., Perona, A., & Dollet, A. (2011). Characterization of Fresnel lens optical performances using an opal diffuser. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 658–663.
51. Saglam, Safak. (2010). Meteorological parameters effects on solar energy power generation. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*.

52. Mellor, A., Domenech-Garret, J. L., Chemisana, D., & Rosell, J. I. (2009). *A two-dimensional finite element model of front surface current flow in cells under non-uniform, concentrated illumination. Solar Energy, 83(9), 1459–1465.*
53. Sonneveld, P. (2014). *POSSIBILITY OF CLIMATE CONTROL OF A GREENHOUSE WITH CONCENTRATING SOLAR POWER SYSTEM - A CONCEPT DESIGN. Acta Horticulturae, (1054), 55–61.*
54. Chemisana, D., Lamnatou, C., & Tripanagnostopoulos, Y. (2012). *THE EFFECT OF FRESNEL LENS - SOLAR ABSORBER SYSTEMS IN GREENHOUSES. Acta Horticulturae, (952), 425–432.*
55. Tripanagnostopoulos, Y., Siabekou, C., & Tonui, J. K. (2007). *The Fresnel lens concept for solar control of buildings. Solar Energy, 81(5), 661–675.*
56. Benítez, P., Miñano, J. C., Zamora, P., Mohedano, R., Cvetkovic, A., Buljan, M., ... Hernández, M. (2010). *High performance Fresnel-based photovoltaic concentrator. Optics Express, 18(S1), A25.*
57. Volker Zagolla, Didier Dominé, Eric Tremblay, and Christophe Moser, "Self-tracking solar concentrator with an acceptance angle of 32°," *Opt. Express* 22, A1880-A1894 (2014).
58. Cheng, Tsung & Yang, Chao & Lin, I. (2016). *Biaxial-Type Concentrated Solar Tracking System with a Fresnel Lens for Solar-Thermal Applications. Applied Sciences.*
59. Kritchman, E. M., Friesem, A. A., & Yekutieli, G. (1981). *A fixed Fresnel lens with tracking collector. Solar Energy, 27(1), 13–17.*
60. Lamnatou, C., & Chemisana, D. (2013). *Solar radiation manipulations and their role in greenhouse claddings: Fresnel lenses, NIR- and UV-blocking materials. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 18, 271–287.*
61. Sonneveld, P. J., Swinkels, G. L. A. M., Tuijl, B. A. J. van, Janssen, H. J. J., Campen, J., & Bot, G. P. A. (2011). *Performance of a concentrated photovoltaic energy system with static linear Fresnel lenses. Solar Energy, 85(3), 432–442.*