



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ακτινοβολούμενη ψύξη
Radiative cooling

Κονταξή Νικολέττα
Α.Μ: 2015050097

ΕΠΙΤΡΟΠΗ:
Κολοκοτσά Διονυσία (επιβλέπουσα)
Λαζαρίδης Μιχαήλ
Τσούτσος Θεοχάρης

Περίληψη

Στα μεσαία μήκη κύματος, ιδίως μεταξύ 8 και 13 μm , η ατμόσφαιρα της Γης είναι εξαιρετικά διαφανής στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Αυτό το εύρος μήκους κύματος συμπίπτει με το μέγιστο μήκος κύματος της θερμικής ακτινοβολίας από επίγειες δομές σε τυπικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Ενώ ιστορικά η ακτινοβολία ψύξης αναπτύχθηκε σε μεγάλο βαθμό για νυχτερινές εφαρμογές πρόσφατες εργασίες έχουν επιτύχει την ακτινοβολία ψύξης κατά τη διάρκεια της ημέρας. Συγκεκριμένα, αποδείχθηκε ότι μπορεί να επιτευχθεί η ακτινοβολία ψύξης κάτω από τη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος, με μια φωτονική δομή που αντανακλά σχεδόν όλο το προσπίπτον φως του ήλιου και ταυτόχρονα εκπέμπει σημαντική θερμική ακτινοβολία. Μια τέτοια δομή, που είναι σχεδόν τέλειος ηλιακός ανακλαστήρας, δεν κάνει χρήση του προσπίπτοντος ηλιακού φωτός.

Οι βασικές αρχές της ακτινοβολούμενης ψύξης είναι η σχεδόν τέλεια ανάκλαση στο ορατό φάσμα και κοντά στο υπέρυθρο φάσμα (0,3–3 μm) και η υψηλή θερμική εκπομπή στην περιοχή του υπέρυθρου ατμοσφαιρικού παραθύρου (8-13 μm). Με βάση αυτές τις δύο βασικές αρχές, έχουν διεξαχθεί μελέτες με τη χρήση διαφόρων υλικών και δομών για να βρεθεί το πιο αποτελεσματικό σύστημα ακτινοβολούμενης ψύξης. Σε αυτή την εργασία σχεδιάστηκαν έξι διαφορετικές φωτονικές δομές που μπορούν να ψύξουν μία επιφάνεια πάνω από την οποία είναι τοποθετημένες. Η κάθε δομή σχεδιάστηκε με διαφορετικά υλικά και πάχη με σκοπό να διεξαχθούν συμπεράσματα και να αποφασιστεί ποια είναι πιο αποτελεσματική.

Abstract

In mid-wavelengths, especially between 8 and 13 μm , the atmosphere of the Earth is extremely transparent in electromagnetic radiation. This wavelength range coincides with the maximum wavelength of thermal radiation from terrestrial structures at typical ambient temperatures. While historically radiative cooling developed to a large extent for night applications, recent work has achieved radiative cooling during the day. In particular, it has been shown that radiative cooling can be achieved under the ambient air temperature, with a photonic structure that reflects almost all the incident sunlight and simultaneously emits significant thermal radiation. Such a structure, which is almost perfect solar reflector, doesn't make use of incident solar light.

The basic principles of radiative cooling are the almost perfect reflection in the visible spectrum and close to the infrared spectrum (0.3–3 microns) and the high thermal emission in the area of the infrared atmospheric window (8-13 microns). Based on these two basic principles, studies have been conducted using various materials and structures to find the most effective radiant cooling system. In this study, six different photonic structures were designed that can cool a surface which they are placed. Each structure was designed with different materials and thicknesses in order to draw conclusions and decide which is most effective.

Περιεχόμενα

Πίνακας εικόνων	6
1. Εισαγωγή	7
2. Σκοπός- Μεθοδολογία- Υπολογιστικά εργαλεία	8
2.1 Σκοπός της εργασίας	8
2.2 Μεθοδολογία	8
2.3 Υπολογιστικά εργαλεία	9
2.3.1 Λογισμικά προσομοίωσης	9
2.3.2 Αριθμητικές τεχνικές προσομοίωσης	12
2.3.3 Lumerical-FDTD	16
3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	20
3.1 Παράθυρο ατμοσφαιρικής διαφάνειας	22
3.2 Μοντελοποίηση θερμοκρασιών σταθερής κατάστασης ηλιακών απορροφητών	24
3.3 Θερμική εκπομπή- απορρόφηση- διαπερατότητα	25
3.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την ακτινοβολούμενη ψύξη	29
3.5 Μέθοδοι ψύξης κτιρίου για εξοικονόμηση ενέργειας	33
3.6 Εφαρμογές ακτινοβολούμενης ψύξης	35
3.6.1 Ρούχα	36
3.6.2 Ηλιακά κύτταρα	37
3.6.3 Cool roofs- Δροσερές στέγες	39
3.6.4 Δροσερά πεζοδρόμια	42
3.6.5 Θερμοκήπια	45
4. Υλικά ακτινοβολούμενης ψύξης	49
4.1 Επιλεκτική εκπομπή	51
4.2 Ανακλαστικότητα	54
4.3 Πίσω ανακλαστήρας (στρώμα καθρέφτη)	56
4.4 Υλικό μήτρας	57
4.5 Μονωτικό υλικό	58
4.6 Δυναμικός διακόπτης	59
5. Μοντελοποίηση υλικών	61
5.1 Πειραματική διαδικασία	61
6. Αποτελέσματα- Συζήτηση	71
6.1 Αποτελέσματα	71
6.2 Συζήτηση	78
7. Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις	80

8.Βιβλιογραφία	82
Βιβλιογραφία εικόνων.....	88
9. Παράρτημα.....	90

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1: Η πρώτη συσκευή radiative cooling σχεδιασμένη από τον Shanhui Fan. (Πηγή: K-T.Lin et al, 2021)	22
Εικόνα 2: Απεικόνιση ηλιακής ακτινοβολίας. (Πηγή: Zhao et al, 2019)	23
Εικόνα 3: Ηλιακό φάσμα AM1.5.....	25
Εικόνα 4: Ακτινοβολούμενη ψύξη το πρωί και το βράδυ. (Πηγή: W.Li et al, 2020)..	35
Εικόνα 5: Απεικόνιση κλειστού συστήματος ψύξης νερού. (Πηγή: J.Chen and L.Lu, 2020)	35
Εικόνα 6: Ηλιακά κύτταρα τύπου I και II. (Πηγή: K-T.Lin et al, 2021)	39
Εικόνα 7: Ηλιακή ακτινοβολία σε ταράτσα με ή χωρίς λευκή επίστρωση.....	41
Εικόνα 8: Λευκό χρώμα σε ταράτσα για μείωση της θερμοκρασίας.	41
Εικόνα 9: Εφαρμογή δροσερών υλικών επίστρωσης σε παρκινγκ αυτοκινήτων.	45
Εικόνα 10: Απεικόνιση της ακτινοβολίας που δέχεται ένα θερμοκήπιο. (Πηγή: Sustainability, 2019).	48
Εικόνα 11: Υλικά ακτινοβολούμενης ψύξης. (Πηγή: W.Li, et al, 2020).	51
Εικόνα 12: Απεικόνιση πολυστρωματικής δομής. (Πηγή: W.Li et al, 2020).....	60
Εικόνα 13: Η δομή της πρώτης προσομοίωσης στο Lumerical.....	64
Εικόνα 14: Η δομή της δεύτερης προσομοίωσης στο Lumerical.	65
Εικόνα 15: Η δομή της τρίτης προσομοίωσης στο Lumerical.....	67
Εικόνα 16: Η δομή της τέταρτης προσομοίωσης στο Lumerical.	68
Εικόνα 17: Η δομή της πέμπτης προσομοίωσης στο Lumerical.	69
Εικόνα 18: Η δομή της έκτης προσομοίωσης στο Lumerical.....	70
Εικόνα 19: Διάγραμμα αποτελεσμάτων της πρώτης προσομοίωσης.	72
Εικόνα 20: Γραφική παράσταση απορρόφησης συναρτήσει μήκους κύματος από βιβλιογραφία. (Πηγή: M.A. Kecebas et al, 2017).....	73
Εικόνα 21: Διάγραμμα αποτελεσμάτων της δεύτερης προσομοίωσης.	74
Εικόνα 22: Φωτονική δομή του ψύκτη και τα αποτελέσματα απορρόφησης. (Πηγή: K-T.Lin et al, 2021)	74
Εικόνα 23: Διάγραμμα αποτελεσμάτων της τρίτης προσομοίωσης.	75
Εικόνα 24: Διάγραμμα αποτελεσμάτων της τέταρτης προσομοίωσης.	76
Εικόνα 25: Διάγραμμα αποτελεσμάτων της πέμπτης προσομοίωσης.	77
Εικόνα 26: Διάγραμμα αποτελεσμάτων της έκτης προσομοίωσης.	78

1. Εισαγωγή

Η ψύξη είναι μια σημαντική τελική χρήση ενέργειας παγκοσμίως και αποτελεί βασικό παράγοντα της μέγιστης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Ο κλιματισμός, για παράδειγμα, υπολογίζεται κοντά στο 15% της πρωτογενούς ενέργειας που χρησιμοποιείται από τα κτίρια στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (Aaswath P. Raman, Marc Abou Anoma, Linxiao Zhu, Eden Rephaeli and Shanhui Fan, 2015). Η μέγιστη ζήτηση ψύξης, εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Καθώς αυξάνεται η συνειδητοποίηση των κινδύνων της υπερθέρμανσης του πλανήτη, πολλές ερευνητικές δραστηριότητες πραγματοποιούνται για να αποτρέψουν την περαιτέρω ανάπτυξη του προβλήματος. Μία από τις προσεγγίσεις επικεντρώνεται στην ακτινοβολούμενη ψύξη, μια τεχνική που δεν απαιτεί ενέργεια για τη μείωση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Με την ακτινοβολούμενη ψύξη ακτινοβολείται θερμότητα στα 8-13 μm του διαφανούς ατμοσφαιρικού παραθύρου της Γης.

Στα μεσαία μήκη κύματος, ιδίως μεταξύ 8 και 13 μm , η ατμόσφαιρα της Γης είναι εξαιρετικά διαφανής στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Αυτό το εύρος μήκους κύματος συμπίπτει με το μέγιστο μήκος κύματος της θερμικής ακτινοβολίας από επίγειες δομές σε τυπικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Ενώ ιστορικά η ακτινοβολία ψύξης αναπτύχθηκε σε μεγάλο βαθμό για νυχτερινές εφαρμογές πρόσφατες εργασίες έχουν επιτύχει την ακτινοβολία ψύξης κατά τη διάρκεια της ημέρας. Συγκεκριμένα, αποδείχθηκε ότι μπορεί να επιτευχθεί η ακτινοβολία ψύξης κάτω από τη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος, με μια φωτονική δομή που αντανακλά σχεδόν όλο το προσπίπτον φως του ήλιου και ταυτόχρονα εκπέμπει σημαντική θερμική ακτινοβολία. Μια τέτοια δομή, που είναι σχεδόν τέλειος ηλιακός ανακλαστήρας, δεν κάνει χρήση του προσπίπτοντος ηλιακού φωτός.

2. Σκοπός- Μεθοδολογία- Υπολογιστικά εργαλεία

2.1 Σκοπός της εργασίας

Η εργασία αυτή έχει ως βασικό στόχο να μελετηθεί το φαινόμενο της ακτινοβολούμενης ψύξης. Πιο συγκεκριμένα, κατασκευάστηκαν έξι διαφορετικές δομές ακτινοβολούμενης ψύξης με διάφορα υλικά και έπειτα για κάθε μία δομή ξεχωριστά εξετάστηκε η συμπεριφορά της απορρόφησης στο ατμοσφαιρικό παράθυρο (8-13μm). Η επιθυμητή συμπεριφορά είναι να παρουσιάζεται αρκετά υψηλή η απορρόφηση σε αυτό το διάστημα από τα 8 έως τα 13μm. Με βάση τα αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό αν οι δομές θα είναι αποδοτικές και έπειτα αξιολογούνται.

2.2 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την διεξαγωγή της παρούσας εργασίας είναι η εξής:

- Μελέτη φαινομένου ακτινοβολούμενης ψύξης και των θεμελιωδών αρχών που την διέπουν.
- Επιλογή του προγράμματος μοντελοποίησης Lumerical και εκμάθηση της λειτουργίας του.
- Επιλογή του αλγορίθμου από το παράδειγμα planar silicon solar cell του Lumerical για χρήση.
- Σχεδιασμός και έπειτα η κατασκευή διαφόρων δομών στο πρόγραμμα Lumerical.
- Εισαγωγή των δομών που σχεδιάστηκαν στον αλγόριθμο.
- Προσομοίωση για κάθε μία δομή ξεχωριστά.
- Εξαγωγή αποτελεσμάτων.
- Επιλογή των έξι καλύτερων δομών ως προς τα αποτελέσματα που εμφάνισαν.
- Ανάλυση των αποτελεσμάτων.
- Συμπεράσματα.

2.3 Υπολογιστικά εργαλεία

2.3.1 Λογισμικά προσομοίωσης

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα εμπορικά διαθέσιμα λογισμικά για την προσομοίωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (EM). Τα περισσότερα έχουν ενσωματώσει διαφορετικά μοντέλα υλικών, αριθμητικές μεθόδους και βελτιστοποιητές. Μερικά λογισμικά όπως τα SimSonic, Meep, Lumerical FDTD, ERMES, ANSYS HFSS, BeamPROP, OptiFDTD και OptiBPM, χρησιμοποιούν μία απλή αριθμητική μέθοδο, ενώ άλλα λογισμικά όπως τα OmniSim, CST Studio Suite, COMSOL,S4 και CAMFR, βασίζονται σε συνδυασμό διαφορετικών τύπων μεθόδων. Διάφορα παγκόσμια και τοπικά εργαλεία βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται στη διαδικασία βελτιστοποίησης ενώ οι αριθμητικές μέθοδοι λειτουργούν ως η θεμελίωση του κάθε εργαλείου (Jie Feng and Mattheos Santamouris, 2019). Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα λογισμικά για την προσομοίωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Maxwell FDFD	Το Maxwell FDFD βασίζεται σε ένα MATLAB πακέτο που επιλύει τις εξισώσεις Maxwell του τομέα συχνότητας.
Sim sonic	Το Sim sonic είναι ελεύθερα διαθέσιμο τρίτου μέρους λογισμικό για την προσομοίωση της διάδοσης υπερήχων, με βάση την περιορισμένη διαφορά χρόνου-τομέα FDTD.
GprMax	Το GprMax είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα που προσομοιώνει την διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο του Yee για την επίλυση των εξισώσεων

του Maxwell σε 3D χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Finite-Difference Time Domain (FDTD).

XFDTD 3D ηλεκτρομαγνητικό λογισμικό προσομοίωσης

Το XF περιλαμβάνει πλήρες κύμα, στατικό, βιοθερμικό, βελτιστοποίηση και λύσεις κυκλωμάτων για την αντιμετώπιση μιας μεγάλης ποικιλίας εφαρμογών.

Meep

FDTD πακέτο.

Opti FDTD

Το Opti FDTD είναι ένα ισχυρό, εξαιρετικά ενσωματωμένο και φιλικό προς το χρήστη CAD περιβάλλον που επιτρέπει το σχεδιασμό και την προσομοίωση προηγμένων παθητικών και μη γραμμικών φωτονικών συστατικών. Περιλαμβάνει μία προηγμένη οριοθετημένη συνθήκη προσομοίωσης που βελτιστοποιεί τη χρήση μνήμης και παρέχει πιο ακριβή αποτελέσματα.

Lumerical solutions

Τα εξαρτήματα σχεδιασμού του Lumerical χρησιμοποιούν πολυφυσικό στυλ προσομοίωσης όπου οι ροές εργασιών στο μοντέλο οπτικά, ηλεκτρικά και θερμικά επιδρούν στο φυσικό επίπεδο.

S4 Stanford λύση στρωματοποιημένης δομής

Το S4 είναι ένας κώδικας τομέα συχνότητας που λύνει τις γραμμικές εξισώσεις του Maxwell σε πολύ-επίπεδες περιοδικές δομές και αυτό μπορεί να

	υπολογίσει τη μετάδοση, την ανάκλαση ή το φάσμα απορρόφησης δομών που αποτελούνται από περιοδικά, με σχέδια και επίπεδα στρώματα.
OmniSim	Το OmniSim είναι ένα ισχυρό και ευέλικτο πακέτο προσομοίωσης για το σχεδιασμό και την βελτιστοποίηση νανο-φωτονικών και πλασμονικών συσκευών.
COMSOL multiphysics	Η μονάδα οπτικών κυμάτων παρέχει χαρακτηριστικά για εξειδικευμένη μοντελοποίηση οπτικών κυμάτων όταν συνδυάζεται με τη βασική λειτουργικότητα της COMSOL multiphysics.
ERMES	Είναι ένας κώδικας πεπερασμένων στοιχείων στη συχνότητα τομέα που εφαρμόζεται σε C++, μία απλοποιημένη έκδοση της σταθμισμένης κανονικοποιημένης μεθόδου εξίσωσης Maxwell.
ANSYS HFSS	Είναι μια τρισδιάστατη ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση λογισμικού για τον σχεδιασμό και την προσομοίωση ηλεκτρονικών προϊόντων υψηλής συχνότητας.
OptiBPM	Για το σχεδιασμό πολύπλοκων οπτικών κυματοδηγών. Αναπαριστά την καθοδήγηση, την ζεύξη, την μεταγωγή, τον διαχωρισμό, την πολυπλεξία και την αποπολυπλεξία των οπτικών σημάτων σε φωτονικές συσκευές.
BeamPROP	Για τον σχεδιασμό και την

προσομοίωση ολοκληρωμένων και
οπτικό-ινών κυματοδηγών συσκευών και
κυκλωμάτων.

Πίνακας 1: Διαθέσιμα λογισμικά ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

2.3.2 Αριθμητικές τεχνικές προσομοίωσης

Πεπερασμένη διαφορά στον τομέα του χρόνου (FDTD) και πεπερασμένη διαφοράς στον τομέα της συχνότητας (FDFD).

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών επιλύει διαφορικές εξισώσεις προσεγγίζοντας τις με εξισώσεις διαφοράς και διαφοράς δεύτερης τάξης που μπορούν να ληφθούν σε κεντρικές διαφορές. Οι μέθοδοι FDTD και FDFD βασίζονται σχετικά με τη διακριτοποίηση διαφορικών μορφών εξισώσεων του Maxwell. Η μέθοδος FDTD βασίζεται σε μια άμεση αριθμητική λύση των εξισώσεων της καμπύλης του Maxwell με τη μορφή που εξαρτάται από το χρόνο, εντός των πεδίων των οποίων εξελίσσονται επαναλαμβάνοντας τις εξισώσεις του Maxwell σε μικρά χρονικά βήματα. Ο Yee πρωτοστάτησε στην εφαρμογή τεχνικής ανάλυσης χρονικών τομέων για την επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων το 1966. Χρησιμοποίησε ένα πεπερασμένο αλγόριθμος διαφοράς, ο οποίος έγινε γνωστός ως η προσέγγιση FDTD, σε μία δικτυωτή- πλεγματική δομή. Είναι μια από τις πιο δημοφιλείς αριθμητικές τεχνικές για ανάλυση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Yee et al, 1966).

Το FDFD χρησιμοποιεί τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών για να μεταμορφώσει το πεδίο συχνότητας στις εξισώσεις του Maxwell σε αριθμητικά επιλύσιμες μορφές. Οι εξισώσεις χρονικού τομέα είναι απαραίτητες για τη διερεύνηση παροδικών καταστάσεων και δυναμική, ενώ οι εξισώσεις συχνότητας-τομέα συνήθως χρησιμοποιούνται για μελέτη σταθερών καταστάσεων. Η μέθοδος FDFD μπορεί να χειριστεί τα υλικά διασποράς με ακρίβεια ενώ μετατρέποντας τις παραμέτρους από το εξαρτώμενο από τη συχνότητα υλικό σε μια βοηθητική διαφορική εξίσωση τομέα-χρόνου μπορούν να επιτρέψουν στην εφαρμογή του FDTD να εφαρμόζεται σε τέτοια υλικά επίσης. Το FDTD μπορεί να δημιουργήσει ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα για γενικά διηλεκτρικά υλικά. Ωστόσο, το FDFD είναι μια καλύτερη επιλογή για το πολύ συντονισμένο μήκος κύματος ορισμένων υλικών (Takayama Y et al, 2002).

Ανάλυση αυστηρού-συζευγμένου κύματος (RCWA)

Ανάλυση αυστηρού-συζευγμένου κύματος (RCWA), η οποία αναφέρεται επίσης ως η μέθοδος Fourier. Η μέθοδος (FMM) ή η μέθοδος σκέδασης (SMM), είναι μια τεχνική χωρίς πλέγμα που χρησιμοποιεί ένα σύνολο επίπεδα κύματα σε διαφορετικές γωνίες για να αντιπροσωπεύουν πεδία σε κάθε στρώμα. Ως ημι-αναλυτική μέθοδος για επίλυση προφίλ αντανάκλασης, μετάδοσης και περίθλασης, είναι εξαιρετικό για μοντελοποίηση περιοδικών δομών λόγω της βάσης της στην αναπαράσταση Fourier (Liu et al, 2012).

Διακριτή προσέγγιση διπόλων (DDA) και μέθοδος οριακού στοιχείου (BEM)

Η διακριτή προσέγγιση διπόλων (DDA), η οποία χρησιμοποιείται γενικά για την πρόβλεψη διασκορπισμένων κυμάτων EM από σωματίδια, βασίζεται στη διακριτοποίηση αντικειμένων σε υπο-όγκους που συμπεριφέρονται ως διπόλα ηλεκτρικού σημείου. Το DDA προτάθηκε αρχικά από τους Purcell και Pennyacker (PP), οι οποίοι χρησιμοποίησαν ένα σύνολο διπόλων σημείου αντικαθιστώντας τον διασκορπιστή (Purcell et al, 1973). Η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των διπόλων και του πεδίου προσβολής μπορεί να παράγει ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων που μπορούν να λυθούν για να ληφθεί πόλωση δίπολου. Οι ποσότητες σκέδασης μπορούν να προέρχονται από αυτές τις πολώσεις.

Η μέθοδος οριακού στοιχείου (BEM), που είναι επίσης γνωστή ως μέθοδος ροπών (MoM) και αναφέρεται συχνά ως μέθοδος ολοκληρωμένης εξίσωσης, χρησιμοποιείται για την επίλυση γραμμικών μερικής διαφοράς εξισώσεων σε ολοκληρωμένη μορφή. Ο Harrington ήταν ο πρώτος που εφάρμοσε MoM στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Όταν εφαρμόζεται αυτή η μέθοδος, οι όροι πρέπει να καθοριστούν αντί να υπολογίζονται από τις διαφορικές εξισώσεις (Harrington et al, 1994). Ωστόσο, οι διακριτές εξισώσεις του Maxwell στο BEM το καθιστούν δύσκολο να εφαρμόζεται όταν τα μέσα είναι ανομοιογενή. Επιπλέον, η BEM συχνά απαιτεί τη γνώση της λειτουργίας Green, η οποία είναι δύσκολο να υπολογιστεί, ειδικά για υλικά που έχουν χωρικά ποικίλες παραμέτρους. Ωστόσο, είναι δύσκολο να διαχωριστεί σαφώς το DDA από το BEM μόνο με βάση την ένταση του ήχου εξισώσεις των

πεδίων EM. Ένας πιθανός τρόπος για να γίνει αυτή η διάκριση είναι ότι η διατύπωση του DDA μπορεί να ερμηνευθεί ως αντικατάσταση ενός διασκορπιστή με ένα σύνολο δίπολων που αλληλεπιδρούν. Αυτό είναι ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό του DDA που δεν μοιράζεται με το MoM.

Μέθοδος μεταφοράς μήτρας (TMM)

Η μέθοδος μεταφοράς μήτρας (TMM) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της διάδοσης των κυμάτων EM μέσω στρωματοποιημένου υλικού. Δεδομένου ότι οι εξισώσεις του Maxwell δείχνουν τη συνέχεια για το ηλεκτρικό πεδίο στα όρια από το ένα μέσο στο άλλο, εάν το πεδίο δίνεται στην αρχή ενός επιπέδου, το πεδίο στο το τέλος του στρώματος μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας μια λειτουργία μήτρας. Ένας συνδυασμός επιπέδων μπορεί να θεωρείται ως σύστημα πινάκων. Στο τελευταίο βήμα, η μήτρα του συστήματος μετατρέπεται σε διαπερατότητα και ανάκλαση. Είναι γρήγορο, ακριβές και αυστηρό. Επιπλέον, επειδή αντιμετωπίζει τα πάντα ως προς τα εμπρός διάδοση, η ίδια η μέθοδος είναι εγγενώς ασταθής. Όταν υπάρχουν πίσω κύματα ή αποσυντιθέμενο πεδίο αλλά αντιμετωπίζονται ως προς τα εμπρός πολλαπλασιαστικά κύματα, αναπτύσσονται εκθετικά, οδηγώντας σε αριθμητική αστάθεια. Η TMM καταναλώνει επίσης μεγάλες ποσότητες υπολογιστικών πόρων σε 3D προσομοίωση επειδή πρέπει να λύσει μια πολύ μεγάλη ομάδα γραμμικής εξίσωσης σε τρεις διαστάσεις (Born et al, 2013).

Μέθοδος επέκτασης επιπέδου κύματος (PWEM)

Η μέθοδος επέκτασης επιπέδου κύματος (PWEM) επιλύει τις εξισώσεις του Maxwell διατυπώνοντας ένα πρόβλημα ιδιοτιμής από την εξίσωση. Είναι αυστηρή και κατάλληλη για τρόπους αντιμετώπισης προβλημάτων. Μπορεί να υπολογίσει τόσο τους τρόπους στις περιοδικές διηλεκτρικές δομές όσο και τη δομή της ζώνης των φωτονικών κρυστάλλων (Shi et al, 2004; Antos et al 2010).

Μέθοδος διάδοσης δέσμης (BPM)

Η μέθοδος διάδοσης δέσμης (BPM) είναι βασικά ένας «εμπρόσθιος» αλγόριθμος διάδοσης σε ένα τομέα όπου η κυρίαρχη κατεύθυνση διάδοσης είναι διαμήκης. Αρχικά αναπτύχθηκε στη δεκαετία του 1970. Υπολογίζει μόνο το επίπεδο πεδίου σε μια συγκεκριμένη ώρα και δεν επιλύει το σύνολο χώρο λύσης. Βασίζεται επίσης σε κατά προσέγγιση διαφορικές εξισώσεις, πράγμα που σημαίνει ότι δεν είναι αυστηρή μέθοδος και μπορεί να εφαρμοστεί μόνο για την ανάλυση δομών για τις οποίες η επίδραση από τα ανακλώμενα πεδία στα πεδία προώθησης μπορούν να παραμεληθούν. Αυτό αποκλείει τη χρήση του BPM για περιπτώσεις στις οποίες, για παράδειγμα, ο διαθλαστικός δείκτης αλλάζει απότομα (Van et al, 1981).

Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM), μέθοδος πεπερασμένου στοιχείου-χρόνου (FETD) και μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων συχνότητας.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) έχει σχεδιαστεί για ανάλυση σταθερής κατάστασης και μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί σε μη δομημένο πλέγμα και να αντιμετωπίζει εξαιρετικά πολύπλοκα σχήματα. Προερχόμενη από το δομικό πεδίο ανάλυσης, η FEM εφαρμόστηκε για πρώτη φορά σε ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα το 1968. Τέσσερα βασικά βήματα εμπλέκονται στις περισσότερες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων: η διακριτοποίηση της περιοχής λύσης, η εύρεση που διέπει εξισώσεις για στοιχεία, η συναρμολόγηση όλων των στοιχείων στην περιοχή της λύσης και η επίλυση των συστημάτων εξίσωσης.

Η μέθοδος τομέα πεπερασμένων στοιχείων (FETD) είναι ένας συνδυασμός FEM και FDTD. Η μέθοδος FETD προσεγγίζει τους χειριστές curl στις εξισώσεις του Maxwell χρησιμοποιώντας FEM και τα παράγωγα χρόνου χρησιμοποιώντας πεπερασμένες διαφορές όπως στο FDTD (Sadiku, 1989). Η κύρια πρακτική διαφορά μεταξύ FETD και FDTD είναι η κατάσταση σταθερότητας. Το ρητό χρονικό βήμα απαιτεί μια κατάσταση σταθερότητας και περιορίζεται από το μικρότερο βήμα χώρου. Το μικρότερο διαστημικό βήμα στο FDTD είναι απλώς το μέγεθος του κελιού ενώ δεν είναι δομημένο τετραεδρικό πλέγμα FETD, το μικρότερο διαστημικό βήμα

μπορεί να είναι πολύ μικρότερο, που σημαίνει το βήμα χρόνου μπορεί επίσης να είναι πολύ μικρότερο, οδηγώντας στο αποτέλεσμα ότι πρέπει να υπολογιστούν πολύ περισσότερα βήματα χρόνου (Kabir et al 2017). Η μέθοδος τομέα συχνότητας πεπερασμένων στοιχείων (FEFD) είναι μια λύση τομέα συχνότητας σταθερής κατάστασης για σύνθετες τρισδιάστατες γεωμετρίες όπου η συνάρτηση Green δεν είναι γνωστή.

Βάση ακαδημαϊκής έρευνας οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν συχνότερα την τελευταία δεκαετία στην ακαδημαϊκή κοινότητα για έρευνες είναι οι FEM, FDTD και BEM. Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε η χρήση του λογισμικού Lumerical solutions και της μεθόδου προσομοίωσης FDTD. Η επιλογή αυτή έγινε διότι το συγκεκριμένο λογισμικό ήταν το πιο κατάλληλο εργαλείο προσομοίωσης για την συγκεκριμένη περίπτωση διότι περιλαμβάνει παραδείγματα με έτοιμες δομές οι οποίες επιτρέπουν την επεξεργασία και την τροποποίηση τους ώστε να ταιριάζουν σε κάθε διαφορετική εκδοχή. Σε αντίθετη περίπτωση είναι αναγκαία η δημιουργία μιας δομής εξ ολοκλήρου από την αρχή πράγμα το οποίο είναι δύσκολο και αρκετά χρονοβόρο. Επίσης ήταν πιο εύκολο στην χρήση σε σύγκριση με τα υπόλοιπα λογισμικά που δοκιμάστηκαν καθώς και το ότι η χρήση του ήταν δωρεάν για ακαδημαϊκές έρευνες ενώ κάποια άλλα δεν ήταν.

2.3.3 Lumerical-FDTD

Το FDTD είναι ένας προσομοιωτής στο DEVICE Multiphysics Simulation Suite της Lumerical, η πρώτη πλατφόρμα υπολογισμών πολυφυσικής στον κόσμο, ειδικά σχεδιασμένη για σχεδιαστές φωτονικών. Η πλατφόρμα DEVICE επιτρέπει στους σχεδιαστές να μοντελοποιούν με ακρίβεια στοιχεία όπου η πολύπλοκη αλληλεπίδραση οπτικών, ηλεκτρονικών και θερμικών φαινομένων είναι κρίσιμη για την απόδοση.

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών time-domain (FDTD) χρησιμοποιείται για την επίλυση των εξισώσεων του Maxwell στο τομέα του χρόνου. Οι εξισώσεις επιλύονται αριθμητικά σε ένα διακριτό πλέγμα τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο, και τα παράγωγα αντιμετωπίζονται με πεπερασμένες διαφορές. Δεν κάνει προσεγγίσεις ή παραδοχές σχετικά με το σύστημα και, ως εκ τούτου, είναι εξαιρετικά ευέλικτο και ακριβές. Δεδομένου ότι λύνει για όλα τα στοιχεία φορέα των ηλεκτρικών και

μαγνητικών πεδίων, είναι μια πλήρως διανυσματική μέθοδος προσομοίωσης. Επειδή είναι μια μέθοδος στον τομέα χρόνου, το FDTD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των ευρυζωνικών αποτελεσμάτων από μια μεμονωμένη προσομοίωση. Το FDTD χρησιμοποιείται συνήθως όταν το μέγεθος του χαρακτηριστικού είναι της τάξης του μήκους κύματος. Όταν τα μεγέθη χαρακτηριστικών είναι πολύ μεγαλύτερα από το μήκος κύματος, άλλες μέθοδοι όπως η ακτίνα ανίχνευσης είναι πιο αποτελεσματικές. Μπορούμε να εκτελέσουμε μια προσομοίωση FDTD για να δούμε τι συμβαίνει για δύο διαφορετικά μήκη κύματος. Είναι μια γενική και ευέλικτη τεχνική που μπορεί να αντιμετωπίσει πολλούς τύπους προβλημάτων. Μπορεί να χειριστεί αυθαίρετα πολύπλοκες γεωμετρίες και δεν κάνει παραδοχές για παράδειγμα, την κατεύθυνση της διάδοσης του φωτός. Επομένως, δεν έχει άλλες προσεγγίσεις εκτός από το βήμα πεπερασμένου μεγέθους και το πεπερασμένο μέγεθος είναι πολύ ακριβές. Ως μέθοδος τομέα χρόνου, μία προσομοίωση μπορεί να δώσει ευρυζωνικά αποτελέσματα. Τέλος, ο αλγόριθμος FDTD κλιμακώνεται καλά με παραλληλισμό, οπότε είναι κατάλληλος για σύγχρονο, υπολογιστές πολλαπλών πυρήνων και πολλαπλών επεξεργαστών, καθώς και συμπλέγματα υπολογιστών υψηλής απόδοσης (HPC). Επειδή είναι τόσο ευέλικτο, μπορεί να αντιμετωπίσει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Αυτά περιλαμβάνουν φωτονικούς κρυστάλλους, πλασμονικούς, αισθητήρες εικόνας CMOS, σκέδαση νανοσωματιδίων και απορρόφηση, ηλιακά κύτταρα με νανο-μοτίβο, OLEDs και LED, σχάρες, λιθογραφία, μετά-υλικά και ενσωματωμένα οπτικά, για να αναφέρουμε μόνο μερικά.

Μια σχέση διασποράς δίνει τη σχέση μεταξύ συχνότητας και ταχύτητας διάδοσης. Αυτή η σχέση είναι μάλλον απλή στον συνεχή κόσμο. Δυστυχώς, η διασπορά στο FDTD δεν είναι τόσο απλή. Παρ' όλα αυτά, παρέχει πολλές πληροφορίες στους εγγενείς περιορισμούς της μεθόδου FDTD και ως εκ τούτου είναι σημαντικό να έχει κανείς τουλάχιστον μία βασική κατανόηση. Τα εργαλεία που αναπτύχθηκαν στην ανάλυση της διασποράς FDTD μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής αντίστασης του πλέγματος. Επιπλέον, όπως θα φανεί, γνωρίζοντας τη σχέση διασποράς μπορεί κανείς να λάβει ακριβείς αναλυτικές εκφράσεις για τους συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης στο πλέγμα FDTD.

Μία διάσταση (1D)

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών time-domain (FDTD) είναι αναμφισβήτη η απλούστερη, τόσο εννοιολογικά όσο και όσον αφορά την εφαρμογή, των τεχνικών πλήρους κύματος που χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων στην ηλεκτρομαγνητική. Μπορεί να αντιμετωπίσει με ακρίβεια ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων. Ωστόσο, όπως με όλες τις αριθμητικές μεθόδους, αυτό έχει το μερίδιο των αντικειμένων και η ακρίβεια εξαρτάται από την εφαρμογή. Το FDTD μπορεί να λύσει πολύπλοκα προβλήματα, αλλά είναι γενικά υπολογιστικά πολύ ακριβές. Για τις λύσεις μπορεί να απαιτεί μεγάλο χρόνο μνήμης και υπολογισμού. Η μέθοδος FDTD ταιριάζει χαλαρά την κατηγορία των τεχνικών «περιοχής συντονισμού, δηλαδή εκείνες στις οποίες οι χαρακτηριστικές διαστάσεις του ο τομέας ενδιαφέροντος είναι κάπου της τάξης του μήκους κύματος σε μέγεθος. Εάν ένα αντικείμενο είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με το μήκος κύματος, οι σχεδόν στατικές προσεγγίσεις παρέχουν γενικά πιο αποτελεσματικές λύσεις. Εναλλακτικά, εάν το μήκος κύματος είναι εξαιρετικά μικρό σε σύγκριση με τα φυσικά χαρακτηριστικά του το ενδιαφέρον, οι μέθοδοι που βασίζονται σε ακτίνες ή άλλες τεχνικές μπορεί να παρέχουν έναν πολύ πιο αποτελεσματικό τρόπο επίλυσης το πρόβλημα (John B Schneider,2010).

Δύο διαστάσεων (2D)

Ένα από τα πραγματικά συναρπαστικά χαρακτηριστικά της μεθόδου FDTD είναι ότι η απλότητα που απολαμβάνει η μέθοδος σε μία διάσταση διατηρείται σε μεγάλο βαθμό σε υψηλότερες διαστάσεις. Η πολυπλοκότητα άλλων αριθμητικών τεχνικών συχνά αυξάνεται σημαντικά καθώς αυξάνεται ο αριθμός των διαστάσεων. Με την FDTD μέθοδο, εάν γίνει κατανοητός ο αλγόριθμος σε μία διάσταση, δεν υπάρχει πρόβλημα στην κατανόηση του βασικού αλγορίθμου σε δύο ή τρεις διαστάσεις (John B Schneider,2010).

Τριών διαστάσεων (3D)

Με κατανόηση της εφαρμογής FDTD του TEz και των πλεγμάτων TMz, τα πρόσθετα βήματα που απαιτούνται για την υλοποίηση ενός τρισδιάστατου (3D) πλέγματος είναι σχεδόν ασήμαντα. Ένα πλέγμα 3D μπορεί να εξεταστεί ως στοιβαγμένα στρώματα TEz και πλέγματα TMz που αντισταθμίζονται σε ένα μισό χωρικό βήμα στην κατεύθυνση z. Οι εξισώσεις ενημέρωσης για τους κόμβους Hz και

Ez είναι σχεδόν ίδιες με αυτές που έχουν δοθεί ήδη - η μόνη διαφορά είναι ένας πρόσθετος δείκτης για τον καθορισμό της θέσης z . Οι εξισώσεις ενημέρωσης για τα άλλα στοιχεία πεδίου απαιτούν μικρές αλλαγές για να ληφθούν υπόψη οι παραλλαγές στην κατεύθυνση z , δηλαδή στις κυβερνητικές εξισώσεις το μερικό παράγωγο σε σχέση με το z δεν είναι πλέον μηδέν (John B Schneider, 2010).

3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Υπεύθυνα για το 8% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, τα συστήματα κλιματισμού και ψύξης καταναλώνουν το 17% του συνόλου της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται παγκοσμίως, ενώ οι ειδικοί προειδοποιούν ότι η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη πρόκειται να εξαπλασιαστεί μέχρι το 2050 (Andrew Tunncliffe, SkyCool Systems 2020).

Ο καθηγητής Shanhui Fan του Πανεπιστημίου Στάνφορντ και η ομάδα των ερευνητών του εργάζονται σε μια συσκευή που θα μπορούσε όχι μόνο να βοηθήσει στην αντιμετώπιση του προβλήματος, αλλά και να αξιοποιήσει τη δύναμη του ήλιου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Andrew Tunncliffe, SkyCool Systems 2020).

Στα τέλη του 2018, το ερευνητικό εργαστήριο του Fan ανακοίνωσε ότι πέτυχε μια παγκόσμια πρωτιά, κάτι που το πανεπιστήμιο υποστηρίζει ότι θα μπορούσε να φέρει επανάσταση στις συστοιχίες οροφής που παράγουν ενέργεια. Πρόκειται για μια συσκευή, η οποία δοκιμάστηκε στην οροφή ενός κτιρίου του Πανεπιστημίου του Στάνφορντ. Η συσκευή περιελάμβανε παραδοσιακά υλικά ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται σε ηλιακούς συλλέκτες και ένα καινοτόμο πολυεπίπεδο υλικό. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών τους βρέθηκε ότι το ανώτερο στρώμα της συσκευής - το παραδοσιακό υλικό ηλιακών συλλεκτών - ήταν θερμότερο από την οροφή του κτιρίου. Ωστόσο, το κάτω στρώμα ήταν πολύ πιο δροσερό, επιβεβαιώνοντας τις προσδοκίες τους. Αυτό δείχνει ότι η θερμότητα ακτινοβολείται από το κάτω μέρος, μέσω του πάνω στρώματος στο διάστημα.

Το 2013, ο Fan, ο καθηγητής Eli Goldstein και ο Aaswath Raman, ανέπτυξαν επιτυχώς ένα πάνελ που θα μπορούσε, τα επόμενα χρόνια, να έχει διττό σκοπό. Έχουν αναπτύξει ένα νέο τύπο δομής που αντανάκλα τη συντριπτική πλειοψηφία του ηλιακού φωτός, ενώ ταυτόχρονα στέλνει θερμότητα σε αυτή την ψυχρότητα, η οποία δροσίζει τεχνητές δομές ακόμη και κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η ομάδα ανέπτυξε ένα υλικό που δεν θα αντικατοπτρίζει μόνο τη θερμότητα που προέρχεται από τον ήλιο, αλλά θα κάνει χρήση της ακτινοβολίας ψύξης. Χρησιμοποιώντας κατασκευασμένα νάνο-δομημένα φωτονικά υλικά και πάνελ που μοιάζουν με καθρέφτη, ήταν σε θέση να στείλουν υπερβολική θερμότητα στο διάστημα. Το

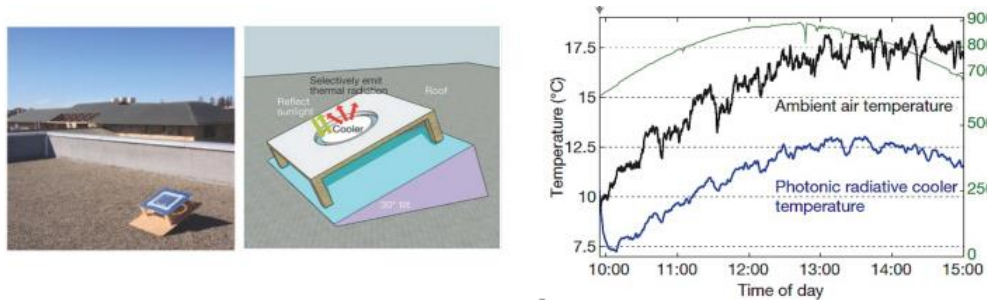
εξαιρετικά λεπτό αλλά πολυεπίπεδο υλικό, μετατρέπει τη θερμότητα που βγαίνει από ένα κτίριο σε ένα υπέρυθρο μήκος κύματος αόρατου φωτός. Αυτό το μήκος κύματος αποφεύγει να παγιδευτεί από την ατμόσφαιρα της Γης, εκμεταλλευόμενοι αυτό που η ομάδα λέει ότι είναι τρύπες στην ατμόσφαιρα που μπορεί να ξεφύγει η θερμότητα. Το υλικό αυτό είναι μια οπτική μεμβράνη πάχους μόλις 1,8 μm, κατασκευασμένη από χαλαζία και καρβίδιο πυριτίου, η οποία μπορεί να αντανακλά έως και το 97% του ηλιακού φωτός, ενώ εκπέμπει τη θερμική ενέργεια του κτιρίου στο οποίο τοποθετείται. Η ακτινοβολία ψύξης μπορεί να μειώσει τη θερμότητα κατά 5°C, ακόμα και όταν ο ήλιος λάμπει όλη την ημέρα (Andrew Tunncliffe, SkyCool Systems 2020).

Το έργο τους ήταν σημαντικό, διότι αν και πολλές έρευνες είχαν διεξαχθεί για την κατανόηση της νυχτερινής ακτινοβολούμενης ψύξης, η ικανότητα ψύξης κατά τη διάρκεια της ημέρας ήταν μια πολύ μεγαλύτερη πρόκληση. Υιοθετήθηκε μια πολύ διαφορετική προσέγγιση σε σύγκριση με προηγούμενες προσπάθειες σε αυτόν τον τομέα, συνδυάστηκαν ο θερμικός πομπός και ο ηλιακός ανακλαστήρας σε μία συσκευή, καθιστώντας την υψηλότερη απόδοση και πολύ πιο ισχυρή και πρακτικά σχετική.

Μέχρι το 2017, ο Fan και οι συνεργάτες του είχαν καταφέρει να αποδείξουν ότι το υλικό δεν μπορούσε να αντανακλά μόνο το φως του ήλιου και να ακτινοβολεί θερμότητα στο διάστημα, και ότι θα μπορούσε να δροσίσει το ρέον νερό σε ένα επίπεδο κάτω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Εφαρμόζοντας το σωστά, αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να ψύξει ένα κτίριο χωρίς καμία παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτή η έρευνα βασίζεται στην προηγούμενη εργασία τους με την ακτινοβολία ψύξης ουρανού αλλά την περνάει στο επόμενο επίπεδο. Παρέχει, για πρώτη φορά, μια επίδειξη τεχνολογίας υψηλής πιστότητας για το πώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ακτινοβολία ψύξης ουρανού για να δροσιστεί παθητικά ένα ρευστό και, με αυτόν τον τρόπο, να συνδεθεί με τα συστήματα ψύξης για εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας (Shanhui Fan, 2017).

Σήμερα μία από τις προκλήσεις που απομένουν για τον Fan και την ερευνητική του ομάδα είναι να χρησιμοποιήσουν το ηλιακό υλικό για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μιας νέας συσκευής για την οποία εργάζονται. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, το ανώτερο στρώμα – το ηλιακό υλικό και τα κύτταρα – δεν είχε το απαιτούμενο φύλλο αλουμινίου που απαιτείται για την παραγωγή ενέργειας. Η

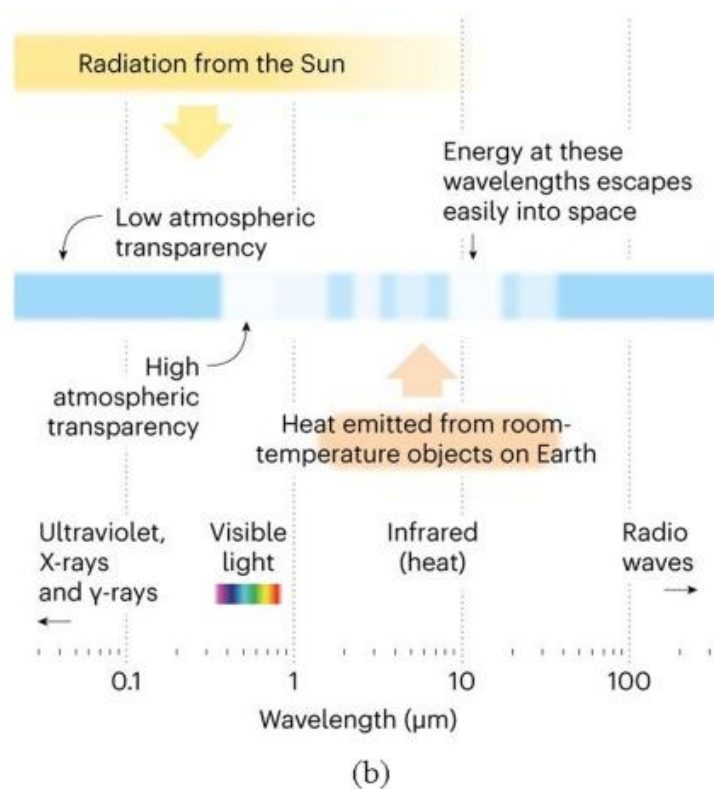
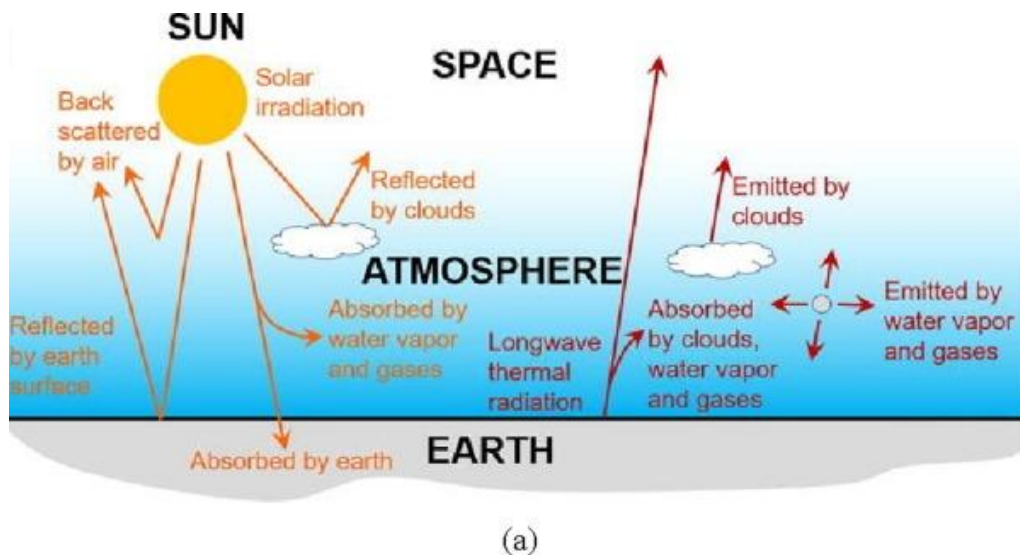
απόφαση ελήφθη επειδή τα φύλλα αλουμινίου είναι γνωστό ότι εμποδίζουν την υπέρυθρη δέσμη, η οποία θα είχε ως αποτέλεσμα την ακτινική θερμότητα που παγιδεύεται. Η έρευνα συνεχίζεται με στόχο την ανάπτυξη κυττάρων που δεν χρειάζονται το φύλλο αλουμινίου (Shanhui Fan, 2017)



Εικόνα 1: Η πρώτη συσκευή radiative cooling σχεδιασμένη από τον Shanhui Fan. (Πηγή:K-T.Lin et al, 2021)

3.1 Παράθυρο ατμοσφαιρικής διαφάνειας

Η ψύξη με ακτινοβολία κάτω από τη θερμοκρασία του αέρα περιβάλλοντος έχει ήδη επιτευχθεί εκμεταλλευόμενη το παράθυρο ατμοσφαιρικής διαφάνειας. Η ατμόσφαιρα είναι διαφανής για ακτινοβολία στο εύρος μήκους κύματος μεταξύ 8 και 13 μm , που επικαλύπτει επίσης το φασματικό πεδίο της μέγιστης θερμικής ακτινοβολίας σε τυπική θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επομένως, οι επίγειοι πομποί μπορούν αποτελεσματικά να ανταλλάξουν ενέργεια με τον μεγαλύτερο ψύκτη θερμότητας, το σύμπαν, με θερμική ακτινοβολία μέσω του ατμοσφαιρικού παραθύρου διαφάνειας. Για να κατανοήσουμε καλύτερα αυτό το φαινόμενο ψύξης, πρέπει να διερευνήσουμε τα συστατικά ροής θερμότητας του εκπομπού.



Εικόνα 2: Απεικόνιση ηλιακής ακτινοβολίας. (Πηγή: Zhao et al, 2019)

3.2 Μοντελοποίηση θερμοκρασιών σταθερής κατάστασης ηλιακών απορροφητών

Θεωρούμε έναν ηλιακό απορροφητή σε θερμοκρασία T , με φασματική γωνιακή εκπομπή $\varepsilon(\lambda, \Omega)$. Όταν ο ηλιακός απορροφητής εκτίθεται σε έναν καθαρό ουρανό κατά την διάρκεια της ημέρας, υπόκειται τόσο σε ηλιακή ακτινοβολία όσο και σε θερμική ακτινοβολία από την ατμόσφαιρα (που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb}). Η θερμοκρασία σταθερής κατάστασης T του ηλιακού απορροφητή καθορίζεται από την εξίσωση (1)

$$P_{rad}(T) - P_{atm}(T_{amb}) - P_{sun} + P_{cond+conv} = 0 \quad (1).$$

Παρακάτω αναλύεται ο κάθε όρος της εξίσωσης 1.

$$P_{rad}(T) = \int d\Omega \cos\theta \int_0^\infty d\lambda I_{BB}(T, \lambda) \varepsilon(\lambda, \Omega) \quad (2)$$

όπου

$$\int d\Omega = \int_0^{\pi/2} d\theta \sin\theta \int_0^{2\pi} d\varphi, \text{ η ακέραιη γωνία πάνω από ένα ημισφαίριο}$$

$$I_{BB}(T, \lambda) = \frac{\left(\frac{2hc^2}{\lambda^5}\right)}{\left[e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1\right]}, \text{ η φασματική ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος σε}$$

θερμοκρασία T

h , η σταθερά του Planck ($h=6.626 \times 10^{-34}$ J s)

c , η ταχύτητα του φωτός ($m \text{ s}^{-1}$)

k_B , η σταθερά Boltzmann ($k_B= 1.381 \times 10^{-23}$ J K⁻¹)

λ , το μήκος κύματος .

$$P_{atm}(T_{amb}) = \int d\Omega \cos\theta \int_0^\infty d\lambda I_{BB}(T_{amb}, \lambda) \varepsilon(\lambda, \Omega) \varepsilon_{atm}(\lambda, \Omega) \quad (3),$$

η θερμική ακτινοβολία που απορροφήθηκε από την ατμόσφαιρα.

$$P_{sun} = \int_0^\infty d\lambda \varepsilon(\lambda, \theta_{sun}) I_{AM1,5}(\lambda) \cos(\theta_{sun}) \quad (4),$$

η ηλιακή απορροφητική ισχύς .

Στις εξισώσεις 3 και 4 χρησιμοποιήθηκε ο νόμος του Kirchhoff για να αντικατασταθεί η απορροφητικότητα με την εκπομπή $\varepsilon(\lambda, \Omega)$.

Η γωνία που εξαρτάται από την εκπομπή της ατμόσφαιρας δίνεται:

$$\varepsilon_{atm}(\lambda, \Omega) = 1 - t(\lambda)^{1/\cos\theta} \quad (5).$$

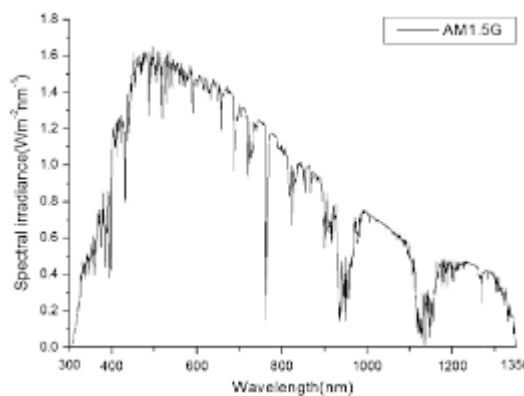
Όπου $t(\lambda)$ η ατμοσφαιρική διαπερατότητα στην κατεύθυνση ζενίθ.

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι AM1,5.

$$P_{cond+conv} = h_c(T - T_{amb}) \quad (6),$$

είναι η απώλεια θερμότητας λόγω της μη ακτινοβολούμενης θερμικής ανταλλαγής.

h_c είναι συνδυαστικά ο μη ακτινοβολούμενος συντελεστής θερμότητας λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις αγωγίμες όσο και τις μεταγωγικές διεργασίες λόγω της επαφής του ηλιακού απορροφητή με εξωτερικές επιφάνειες και του αέρα που βρίσκεται δίπλα στον ηλιακό απορροφητή.



Εικόνα 3: Ηλιακό φάσμα AM1.5.

3.3 Θερμική εκπομπή- απορρόφηση- διαπερατότητα

Εκπομπή

Κάθε υλικό σώμα ακτινοβολεί ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Το φαινόμενο αυτό καλείται εκπομπή ακτινοβολίας. Η ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος. Όσο πιο θερμό είναι ένα σώμα τόσο πιο έντονα ακτινοβολεί και μάλιστα σε πιο μικρά μήκη κύματος. Εκτός όμως από τη θερμοκρασία η ένταση της ακτινοβολίας ενός σώματος εξαρτάται και από τη φύση του σώματος. Για τη μελέτη της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα υλικό σώμα χρησιμοποιείται η έννοια του μέλανος (μαύρου) σώματος. Μέλαν σώμα (blackbody) είναι το υποθετικό σώμα το οποίου η ένταση της

εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, σε κάθε μήκος κύματος και σε κάθε θερμοκρασία, είναι η μέγιστη δυνατή. Το μέλαν σώμα απορροφά πλήρως την ακτινοβολία όλων των μηκών κύματος που προσπίπτει σε αυτό και είναι ισότροπη πηγή δηλαδή εκπέμπει σταθερή ένταση ακτινοβολίας προς όλες τις διευθύνσεις. Τα περισσότερα υλικά σώματα δεν συμπεριφέρονται ως μέλανα σώματα. Για το λόγο αυτό εισάγεται η έννοια του συντελεστή εκπομπής, ο οποίος εκφράζει την ικανότητα του πραγματικού σώματος να εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε σχέση με αυτή του μέλανος σώματος. Ο συντελεστής εκπομπής $\varepsilon(\lambda)$ (emissivity) ενός πραγματικού σώματος για ένα ορισμένο μήκος κύματος λ , ορίζεται από το πηλίκο της έντασης ακτινοβολίας $I_{(\lambda)}$ που εκπέμπει το σώμα σε θερμοκρασία T , προς την ένταση ακτινοβολίας $I_{M(\lambda)}$ του ίδιου μήκους κύματος που εκπέμπει το μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία. Ο συντελεστής εκπομπής εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος, το μήκος κύματος και τη διεύθυνση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Το εύρος των τιμών του κυμαίνεται από 0 έως 1. Ορίζουμε ως φαιό σώμα (graybody) ένα πραγματικό σώμα το οποίο έχει σταθερή ικανότητα εκπομπής $\varepsilon(\lambda)$ για όλα τα μήκη κύματος, με τιμή μικρότερη της μονάδας. Ο ολικός συντελεστής εκπομπής $\varepsilon_{ολ}$ αναφέρεται στην ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα πραγματικό σώμα θερμοκρασίας T σε όλα τα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_{ολ} = \frac{\int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{M(\lambda)} d\lambda} = \frac{I}{I_M} \quad (7)$$

όπου I η ολική ένταση ακτινοβολίας που εκπέμπει το πραγματικό σώμα δηλαδή για όλα τα μήκη κύματος σε θερμοκρασία T , και I_M η ολική ένταση ακτινοβολίας που εκπέμπει το μέλαν σώμα, στην ίδια θερμοκρασία. Στην πραγματικότητα τα υλικά σώματα δεν συμπεριφέρονται ως μέλανα σώματα, καθώς έχουν συντελεστή εκπομπής η τιμή του οποίου είναι μικρότερη της μονάδας σε διάφορα μήκη κύματος. Ανάλογα όμως με την περίπτωση μπορούν να γίνουν ορισμένες προσεγγίσεις. Για παράδειγμα, ο ήλιος μπορεί να θεωρηθεί μέλαν σώμα. Ένα πραγματικό όμως σώμα μπορεί να συμπεριφέρεται ως μέλαν σώμα σε ορισμένα μόνο μήκη κύματος. Για παράδειγμα, τα περισσότερα σώματα στη γη συμπεριφέρονται ως μέλανα σώματα στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου (10-12 μm).

Απορρόφηση

Όταν η ακτινοβολία προσπίπτει σε ένα σώμα, τότε ένα μέρος αυτής απορροφάται με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του σώματος να αυξάνεται. Το φαινόμενο αυτό καλείται απορρόφηση (absorption) της ακτινοβολίας. Το ποσό της ακτινοβολίας που απορροφάται από ένα σώμα εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος, τη φύση του υλικού και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Το μέλαν σώμα απορροφά πλήρως την ακτινοβολία όλων των μηκών κύματος. Τα πετρώματα της γης είναι καλοί απορροφητές σε αντίθεση με το χιόνι και τον πάγο. Ιδιαίτερα, το χρώμα του σώματος παίζει σημαντικό ρόλο στην απορρόφηση της ακτινοβολίας στο ορατό φάσμα. Είναι γνωστό ότι τα σώματα με σκούρο χρώμα είναι καλύτεροι απορροφητές της ορατής ακτινοβολίας από ότι τα σώματα με ανοικτά χρώματα. Ο συντελεστής απορρόφησης $\alpha_{(\lambda)}$ (absorptivity) ενός πραγματικού σώματος, για ένα ορισμένο μήκος κύματος λ , εκφράζει το ποσοστό της ακτινοβολίας που απορροφά το σώμα, όταν η ακτινοβολία προσπέσει σε αυτό. Ορίζεται από το πηλίκο της έντασης ακτινοβολίας $I_{\alpha(\lambda)}$ που απορροφά το σώμα, προς την ένταση της προσπίπτουσας σε αυτό ακτινοβολίας $I_{\pi(\lambda)}$:

$$\alpha_{\lambda} = \frac{I_{\alpha(\lambda)}}{I_{\pi(\lambda)}} \quad (8).$$

Κατ' αναλογία με τον ολικό συντελεστή εκπομπής ορίζεται και ο ολικός ή ολοφασματικός συντελεστής απορρόφησης $\alpha_{ολ}$ ο οποίος αναφέρεται στο ποσοστό της ακτινοβολίας που απορροφάται από ένα πραγματικό σώμα σε όλα τα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος:

$$\alpha_{ολ} = \frac{\int_0^{\infty} I_{\alpha(\lambda)} d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\pi(\lambda)} d\lambda} = \frac{I_{\alpha}}{I_{\pi}} \quad (9),$$

όπου I_{π} η ολική ένταση ακτινοβολίας που προσπίπτει στο σώμα δηλαδή για όλα τα μήκη κύματος, και I_{α} η ολική ένταση ακτινοβολίας που απορροφά το σώμα.

Διαπερατότητα

Στην περίπτωση που το σώμα είναι διαφανές στην προσπίπτουσα ακτινοβολία τότε ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας διέρχεται μέσα από το σώμα. Το φαινόμενο αυτό καλείται διαπερατότητα (transmission). Η διαπερατότητα ενός σώματος μετράται με το συντελεστή διαπερατότητας $t(\lambda)$ ο οποίος εκφράζει το ποσοστό της ακτινοβολίας που διαπερνά ένα σώμα, σε σχέση με την ακτινοβολία που δέχεται.

Ορίζεται ως:

$$\alpha_{\lambda} = \frac{I_{t(\lambda)}}{I_{\pi(\lambda)} - I_{r(\lambda)}} \quad (10),$$

όπου $I_{\pi(\lambda)}$ η προσπίπτουσα στο σώμα ακτινοβολία και $I_{r(\lambda)}$ η ανακλώμενη ακτινοβολία. Η διαπερατότητα ενός σώματος εξαρτάται εκτός από τη φύση του σώματος και από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Η ατμόσφαιρα, για παράδειγμα, είναι αρκετά διαπερατή στην ηλιακή ακτινοβολία ενώ αντίθετα η διαπερατότητα της σε ορισμένα μήκη κύματος στην περιοχή του θερμικού υπερύθρου είναι μηδενική. Οι συντελεστές εκπομπής ε , διαπερατότητας t και ανάκλασης r συνδέονται με τη σχέση:

$$\varepsilon = (1 - t) * (1 - r) \quad (11)$$

Για πλήρως αδιαφανή σώματα, όπως είναι η επιφάνεια της γης, είναι $t = 0$, οπότε ισχύει:

$$\varepsilon = 1 - r \quad (12).$$

Η προηγούμενη σχέση ερμηνεύεται ως ότι ένας καλός ανακλαστήρας είναι κακός πομπός ακτινοβολίας και το αντίστροφο.

3.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την ακτινοβολούμενη ψύξη

Στη γη, οι διαφορετικές τοποθεσίες, εποχές και κλίματα έχουν διαφορετικές απαιτήσεις για εσωτερική θερμική άνεση. Για παράδειγμα, η ανάγκη για ψύξη είναι υψηλότερη το καλοκαίρι παρά τον χειμώνα. Οι έρημοι και οι παράκτιες περιοχές έχουν μεγάλες διαφορές στις απαιτήσεις ψύξης λόγω των διαφορών στις κατακρημνίσεις. Ακόμη για περιοχές κοντά στον ισημερινό, οι υψηλότερες θερμοκρασίες και η υγρασία αυξάνουν την ανάγκη και τη δυσκολία ψύξης σε σύγκριση με τις περιοχές σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη.

Γενικά, ο αέρας περιέχει υδρατμούς, ο οποίος διαθέτει υψηλές απορροφήσεις στην υπέρυθη (IR) περιοχή. Επομένως, το κλίμα, η θερμοκρασία και η υγρασία σε μια τοποθεσία θα επηρεάσουν σημαντικά τη μετάδοση της ατμόσφαιρας και την εξαρτώμενη από την γωνία εκπομπή της ατμόσφαιρας, και τελικώς, επηρεάζουν την απόδοση της ακτινοβολούμενης ψύξης. Εδώ, συνοψίζονται συνολικά, οι πειραματικές δοκιμές ψύξης με ακτινοβολία σε διαφορετικές τοποθεσίες και σε διαφορετικές πειραματικές καταστάσεις για να αποκαλυφθεί ο συσχετισμός μεταξύ των ατμοσφαιρικών επιδράσεων και της απόδοσης της ακτινοβολούμενης ψύξης.

Ο Raman πρότεινε και έδειξε πειραματικά την απόδοση ψύξης για ένα φωτονικό ψύκτη ακτινοβολίας που κατασκεύασε ο οποίος βασίζεται σε μία πολυστρωματική λεπτή στοίβα ταινιών μια καθαρή χειμερινή ημέρα στο Στάνφορντ της Καλιφόρνια το 2014 (A.P. Raman et al, 2014). Στο πείραμα, ο σχεδιαζόμενος ψύκτης μπορεί να ψύξει την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου αμέσως κάτω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Μετρήθηκαν οι θερμοκρασίες της ακτινοβολούμενης ψύξης και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος από τις 10 π.μ. έως τις 3 μ.μ. κάτω από το άμεσο ηλιακό φως. Η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας που μετρήθηκε έφτασε τους 4,9 °C, ενώ παρατηρήθηκε ότι μπορούσε να διατηρηθεί σταθερά κάτω από το άμεσο ηλιακό φως.

Το 2017, ο Tso ακολούθησε την ίδια πειραματική διαδικασία χρησιμοποιώντας τον ίδιο φωτονικό ψύκτη ακτινοβολίας όπως αυτός που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα του Στάνφορντ για να δοκιμάσει την απόδοση του στο Χονγκ Κονγκ (C.Y. Tso et al 2017). Το Χονγκ Κονγκ είναι περίπου 19° χαμηλότερο από το Στάνφορντ στο γεωγραφικό πλάτος. Το υποτροπικό κλίμα χαμηλού γεωγραφικού πλάτους φέρνει ζεστό και υγρό καιρό στο Χονγκ Κονγκ. Στο πείραμα, η εγκατάσταση χρησιμοποιήθηκε για δύο ημέρες. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι η θερμοκρασία την νύχτα

μπορεί να πέσει περίπου 7°C . Ωστόσο, σε αντίθεση με τα πειραματικά αποτελέσματα στο Στάνφορντ η θερμοκρασία αυξήθηκε κατά 8°C από την θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας από την ακτινοβολούμενη ψύξη απορροφήθηκε από τους υδρατμούς στον αέρα και δεν μπόρεσε να γίνει εκπομπή έξω από την ατμόσφαιρα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και της υγρασίας στο Χονγκ Κονγκ, επομένως ούτε οι ψύκτες ακτινοβολίας υπό κενό ούτε ο θάλαμος μη κενού θα μπορούσαν να ψύξουν την εσωτερική θερμοκρασία.

Η πειραματική ρύθμιση βελτιώθηκε καλύπτοντας με έναν σάκο αλουμίνιο την κορυφή της επιφάνειας για να μειωθεί η προσπίπτουσα πυκνότητα ισχύος του ηλιακού φωτός μέσα στην εγκατάσταση. Ωστόσο, η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας είναι μόνο 1°C κάτω από το άμεσο ηλιακό φως στο θάλαμο κενού. Με άλλα λόγια, ο έλεγχος απόδοσης της ψύξης με ακτινοβολία που αποκτήθηκε από τη βελτιστοποιημένη πειραματική εγκατάσταση στο Χονγκ Κονγκ δεν μπορούσε να αναπαραγάγει ακριβώς τα αποτελέσματα του προηγούμενου πειράματος στο Στάνφορντ της Καλιφόρνια (A.P. Raman, et al 2014). Ως εκ τούτου, η θερμοκρασία, η υγρασία και ο καιρός μιας τοποθεσίας έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην απόδοση της ακτινοβολούμενης ψύξης. Επομένως ο σχεδιασμός ενός ακτινοβολούμενου ψύκτη θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις ατμοσφαιρικές επιρροές σε μια τοποθεσία.

Για να κατανοηθούν περαιτέρω οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις στην απόδοση της ακτινοβολούμενης ψύξης, ο Mandal διεξήγαγε μεγάλο αριθμό πειραμάτων για να δει την απόδοση της ψύξης σε διάφορες πόλεις της Αμερική (J. Mandal, et al 2018). Επιλέχθηκαν τρεις διαφορετικές πόλεις Phoenix, New York και Chattogram για να πραγματοποιηθούν τα πειράματα επειδή και οι τρεις πόλεις είναι σε διαφορετικά υψόμετρα και με διαφορετικές καιρικές συνθήκες. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, οι ερευνητές προσπάθησαν να αποκαλύψουν τον κύριο παράγοντα ατμοσφαιρικής επιρροής σε διαφορετικές τοποθεσίες, όπως οι καιρικές συνθήκες, το ολικό καθιζήσιμο νερό (TPW), η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ηλιακή ακτινοβολία, η οποία θα μπορούσε να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση ψύξης. Για παράδειγμα, επιλέχθηκαν μία ημέρα καθαρού ουρανού στο Φοίνιξ και μία ημέρα με ομίχλη στο Chattogram για τη διεξαγωγή του πειράματος αφού η ομίχλη και η θολότητα θα εμποδίσουν την είσοδο της ακτινοβολούμενης θερμότητας στο διάστημα. Ως εκ τούτου, η πτώση θερμοκρασίας με ακτινοβολούμενη ψύξη είναι περίπου 6°C στο

Phoenix, ενώ μόνο 3°C στο Chattogram. Οι εκπομπές της ατμόσφαιρας στα δύο παράθυρα ατμοσφαιρικής διαφάνειας (8–13 μm και 16–26 μm) μειώνονται σταδιακά όταν η ποσότητα υδρατμών αυξάνεται στον αέρα. Επομένως οι παράγοντες, όπως γεωγραφικό πλάτος, καιρικές συνθήκες και κλίμα μιας τοποθεσίας, που θα επηρεάζει την ποσότητα υδρατμών στον αέρα, θα επηρεάσει άμεσα τη μετάδοση των παραθύρων ατμοσφαιρικής διαφάνειας και έτσι την η απόδοση ψύξης. Επιπλέον, η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας επηρεάζει επίσης την απόδοση ψύξης με ακτινοβολία. Η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στη Νέα Υόρκη είναι περίπου 200 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ υψηλότερη από αυτή στο Φοίνιξ. Η ψυκτική δύναμη της ακτινοβολούμενης ψύξης που μετριέται στη Νέα Υόρκη είναι περίπου 20 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ χαμηλότερη από αυτή που μετρήθηκε στο Φοίνιξ.

Για τη σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, της σχετικής υγρασίας στο περιβάλλον και την απόδοση ψύξης της ακτινοβολίας, ο Dong και η ομάδα του έχουν υπολογίσει θεωρητικά τη διαπερατότητα της ατμόσφαιρας στην περιοχή μήκους κύματος από 5 έως 25 μm για διαφορετικές υγρασίες, θερμοκρασίες περιβάλλοντος και γωνίες ζενίθ με τη χρήση της μεθόδου ModTran. Η διαφορά στη μετάδοση της ατμόσφαιρας σε διαφορετικές γωνίες ζενίθ είναι πολύ μικρή, ειδικά κάτω από 30°. Σε αντίθεση, η επίδραση από την υγρασία στην ατμοσφαιρική μετάδοση είναι φανερή. Μειώνεται σημαντικά όταν η υγρασία στο περιβάλλον αυξάνεται σταδιακά. Επιπλέον, οι ερευνητές θεώρησαν επίσης τη μετάδοση της ατμόσφαιρας σε διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος με σταθερή υγρασία 70%. Η μετάδοση της ατμόσφαιρας δείχνει μια απότομη φθίνουσα τάση με την αύξηση του θερμοκρασία περιβάλλοντος, ειδικά στην περιοχή μήκους κύματος από 16 έως 26 μm . Σε σύγκριση με χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος 0°C, οι εκπομπές της ατμόσφαιρας στις περιοχές μήκους κύματος από 8 έως 13 μm και από 16 έως 26 μm δείχνουν μείωση κατά περισσότερο από το ήμισυ και σχεδόν μηδέν, αντίστοιχα, όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 30°C σε περιβάλλον υψηλής υγρασίας (> 50%). Επομένως, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η ακτινοβολία ψύξης δεν θα είναι εμφανής στο περιβάλλον με υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος και υγρασία. Όταν η ψύξη ακτινοβολίας λαμβάνει χώρα σε περιβάλλοντα με υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος (π.χ. 30°C), η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ακτινοβολίας ψύξης και θερμοκρασίας περιβάλλοντος (ΔT) θα μειωθεί σημαντικά με την αύξηση της υγρασίας στο περιβάλλον. Επιπλέον, όταν το ακτινοβολητικό

σύστημα ψύξης τοποθετείται σε περιβάλλοντα με χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος (π.χ. 0°C), το ΔT θα μειωθεί σταδιακά με την αύξηση της υγρασίας στο περιβάλλον αλλά η φθίνουσα τάση του ΔT είναι μικρότερη από την περίπτωση που τοποθετήθηκε σε περιβάλλον με υψηλή περιβάλλουσα θερμοκρασία. Για να μετρηθούν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ συστήματος ψύξης ακτινοβολίας ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος κάτω από διαφορετική σχετική υγρασία πραγματοποιήθηκε πείραμα στο οποίο για να ελαχιστοποιηθεί ο αντίκτυπος των περιβαλλοντικών μεταβλητών, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν τη νύχτα. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, η σχετική υγρασία και η θερμοκρασία περιβάλλοντος κυμαίνονταν από 53% έως 100% και από 27°C έως 32°C, αντίστοιχα. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ψυγείου ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος μπορεί να φτάσει έως 5,2°C ακόμη και κάτω από τη σχετική υγρασία 100% και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος 29 °C τη νύχτα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα ψυγεία ακτινοβολίας θα μπορούσαν να λειτουργούν ακόμα και σε περιβάλλοντα με υψηλό επίπεδο υγρασίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Συνοπτικά, οι ατμοσφαιρικές επιρροές μιας τοποθεσίας, όπως οι καιρικές συνθήκες, η υγρασία, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η TPW και η πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας, θα επηρεάσουν άμεσα την απόδοση ψύξης. Επομένως, το ίδιο σύστημα ψύξης ακτινοβολίας θα εμφανίζει ξεχωριστές ψυκτικές επιδόσεις σε διαφορετικές τοποθεσίες στη Γη. Επιπλέον, σε ορισμένες τοποθεσίες με υψηλή θερμοκρασία και υγρασία περιβάλλοντος, η απόδοση ψύξης ενός συστήματος ψύξης με ακτινοβολία δεν θα ήταν προφανές ή ακόμη και δεν θα συμβαίνει λόγω των χαμηλών εκπομπών της ατμόσφαιρας σε αυτές τις τοποθεσίες. Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός του συστήματος ψύξης με ακτινοβολία για χρήση σε διαφορετικές τοποθεσίες στη Γη θα πρέπει να προσαρμοστεί στην εκάστοτε τοποθεσία. Για τις ζεστές και υγρές περιοχές, οι εκπομπές της ατμόσφαιρας είναι χαμηλές ενώ η θερμική ακτινοβολία μπορεί ακόμα να μεταδίδει μέσω ατμόσφαιρας στην περιοχή μήκους κύματος από 8 έως 13 μm . Έτσι, το σύστημα ψύξης με ακτινοβολία πρέπει να είναι σχεδιασμένο για να εμφανίζει υψηλή εκπομπή στην περιοχή μήκους κύματος από 8 έως 13 μm ενώ σχεδόν μηδέν στις άλλες περιοχές μήκους κύματος. Για τις κρύες και ξηρές περιοχές, η μετάδοση της ατμόσφαιρας είναι υψηλή σε μια ευρεία περιοχή μήκους κύματος. Το σύστημα ψύξης με ακτινοβολία θα πρέπει να έχει σχεδιαστεί ως ευρυζωνική εκπομπή, η οποία διαθέτει υψηλή εκπομπή σε ευρεία περιοχή μήκους

κύματος, ενώ σχεδόν μηδένικη στο φάσμα του ηλιακού φάσματος που κυμαίνεται από 0,28 έως 2,5 μm . Οι προκλήσεις που παραμένουν σε αυτόν τον τομέα είναι η κατασκευή ψυγείων με ακτινοβολία, τα οποία μπορούν να διαθέτουν ρυθμιζόμενο φάσμα εκπομπών με υψηλή εκπομπή στο καθεστώς μήκους κύματος ατμοσφαιρικής διαφάνειας που πρέπει να τηρεί τις απαιτήσεις ακτινοβολούμενης ψύξης σε διαφορετικές καιρικές συνθήκες.

3.5 Μέθοδοι ψύξης κτιρίου για εξοικονόμηση ενέργειας

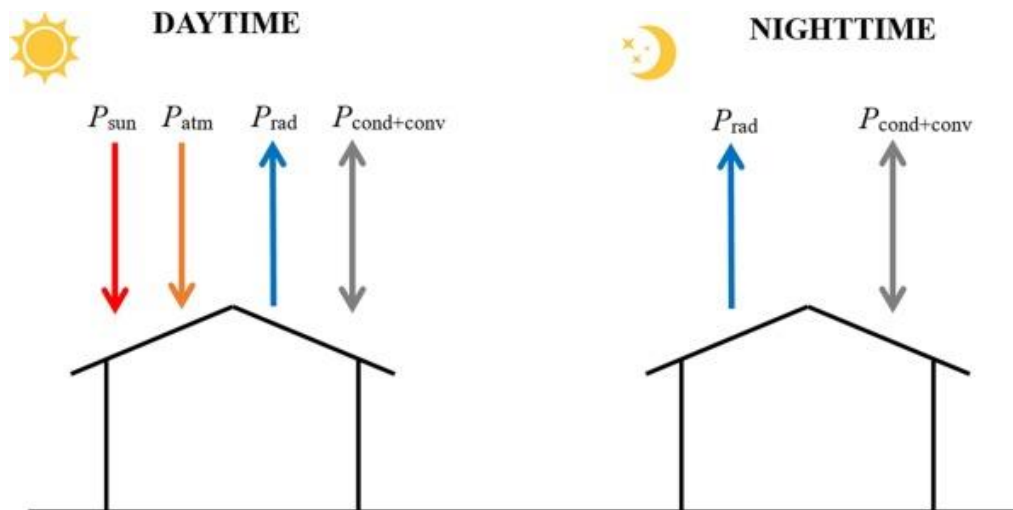
Η οικοδόμηση της ενσωματωμένης παθητικής ακτινοβολίας ψύξης μπορεί να έχει τεράστια συμβολή σε κτίρια χαμηλής ενέργειας. Εκτός από την ευρεία έρευνα για την άμεση ενσωμάτωση με κτίρια, με τη μορφή ακτινοβολίας ψύξης οροφής λαμβάνοντας υπόψη προηγούμενες ολοκληρωμένες μελέτες, τους έμμεσους συνδυασμούς με θερμαντικά πάνελ ψύξης με διάφορα δομικά συστήματα έχουν δει να αυξάνεται η ανάπτυξη, η οποία βασίζεται σε υιοθετημένα μέσα ανταλλαγής θερμότητας, και μπορούν να χωριστούν περαιτέρω σε συστήματα ψύξης με βάση τον αέρα, συστήματα ψύξης με βάση το νερό και υβριδικά (Lu et al., 2016 & Zhao et al., 2019a). Τα συστήματα ακτινοβολίας ψύξης με βάση τον αέρα χρησιμοποιούν τον αέρα ως μέσο ανταλλαγής θερμότητας, αυτοί οι τύποι συστημάτων ψύξης είναι γενικά μικρές δομές με περιορισμούς για περαιτέρω εφαρμογές (Mihalakakou et al., 1998).

Το νερό με υψηλότερη ικανότητα αποθήκευσης θέρμανσης μπορεί δυνητικά να αυξήσει την ικανότητα ακτινοβολίας ψύξης. Βασικά, τα συστήματα ψύξης με βάση το νερό μπορούν να ταξινομηθούν σε ανοιχτά και κλειστά συστήματα (Zhao et al., 2019a). Η λίμνη νερού οροφής είναι ένα τυπικό ανοιχτό σύστημα δουλεύοντας με θερμική ακτινοβολία και εξάτμιση για να διαλύσει τη θερμότητα από το εσωτερικό στο εξωτερικό περιβάλλον, ενώ το απαιτούμενο στεγανό για την δομή της οροφής περιορίζει την εφαρμογή της σε θερμές και ξηρές περιοχές. Το κλειστό σύστημα ψύξης νερού περιλαμβάνει νερό καθώς ο φορέας θερμότητας ρέει μέσω κλειστού σωλήνα που είναι ενσωματωμένος στην επίπεδη πλάκα του συστήματος ακτινοβολίας για την παροχή ψυχρού νερού. Μια αντλία χρησιμοποιείται για την κυκλοφορία του κρύου νερού γύρω από το σωλήνα και μια δεξαμενή αποθήκευσης νερού. Η ενέργεια

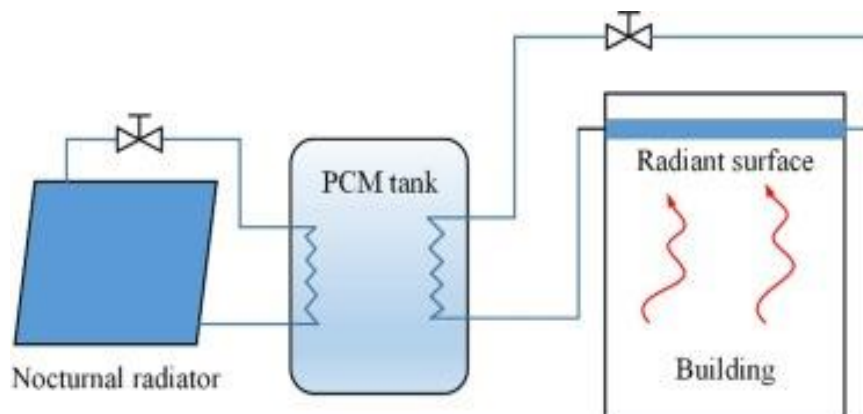
ψύξης που διατηρείται σε υγρό νερό μπορεί να βοηθήσει στην επίτευξη ενός ενεργειακά αποδοτικού κτηρίου.

Ωστόσο, προκειμένου να βελτιωθεί η οικοδόμηση ενεργειακής απόδοσης, τα υβριδικά συστήματα είναι πιο επιθυμητά. Τεχνικά, τα συστήματα ψύξης με ακτινοβολία μπορούν να έχουν καλύτερη απόδοση από την ενοποίηση με συστήματα ενεργειακού εφοδιασμού στα κτίρια. Ο περισσότερο πολλά υποσχόμενος τρόπος είναι να ενσωματωθούν οι ακτινοβολικές μονάδες με το σύστημα κλιματισμού για τη βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας εργασίας. Χάρη στην τελευταία πραγματοποίηση του ημερήσιου ακτινοβολούμενου ψυκτικού υλικού που αποτελείται από ένα διμερές πολυμερές, ένα μη-εξατμίσιμο πάνελ ψύξης νερού αποδείχθηκε αντίστοιχα ότι κρύωσε το νερό παρακάτω από την περιβάλλουσα θερμοκρασία (Gentle and Smith, 2015).

Τρεις μέρες δοκιμών με δύο πάνελ ψύξης συνδεδεμένα σε σειρά έδειξαν ότι έγινε μείωση της θερμοκρασίας νερού 3-5 °C που αντιστοιχούν στην ψύξη ισχύς περίπου 40-70 W / m² με ρυθμό ροής νερού 0,21 L / (min·m²). Αν η προτεινόμενη μονάδα ψύξης είναι ενσωματωμένη με έναν συμπυκνωτή ενός συστήματος κλιματισμού, η αποδοτικότητα του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά σε σύγκριση με ένα τυπικό αερόψυκτο ψυκτικό συγκρότημα. Η προσομοίωση σε διώροφο κτίριο απέδειξε τη μειωμένη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας κατά 21% κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Ομοίως, αλλά πιο ελπιδοφόρο, ένα σύστημα ακτινοβολίας ψύξης που χρησιμοποίησε το υβριδικό μετα-υλικό υάλου-πολυμερούς και προτάθηκε για να παρέχει νερό ψύξης. Κατάφερε να ψύξει το νερό κάτω από την περιβάλλουσα θερμοκρασία κατά 10,6 °C το μεσημέρι υπό άμεσο ηλιακό φως (Zhao et al., 2019c).



Εικόνα 4: Ακτινοβολούμενη ψύξη το πρωί και το βράδυ. (Πηγή: W.Li et al, 2020)



Εικόνα 5: Απεικόνιση κλειστού συστήματος ψύξης νερού. (Πηγή: J.Chen and L.Lu, 2020)

3.6 Εφαρμογές ακτινοβολούμενης ψύξης

Τα τελευταία χρόνια, με την εξερεύνηση του μηχανισμού ακτινοβολούμενης ψύξης και την ανάπτυξη διαφόρων τύπων ψυγείων με ακτινοβολία, η τεχνολογία

ψύξης έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε πολλούς τομείς για ενεργειακή οικονομία. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται μερικές πρακτικές εφαρμογές, όπως ηλιακά κύτταρα, ρούχα και άλλα χωρίς την ανάγκη ηλεκτρικής ενέργειας για την επίτευξη διασποράς θερμότητας μέσω της ακτινοβολίας ψύξης.

3.6.1 Ρούχα

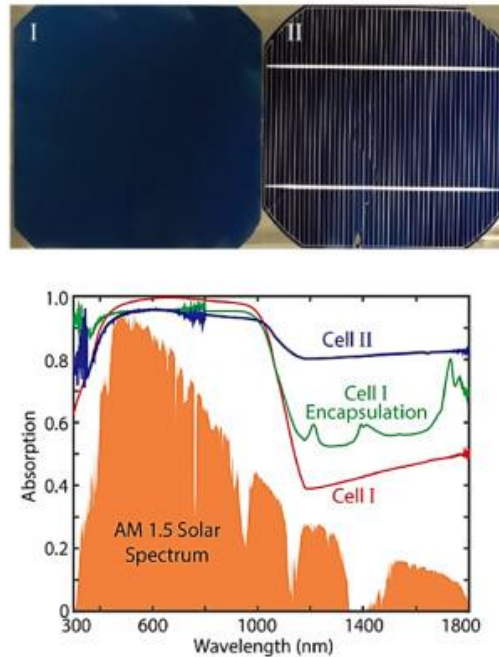
Πρόσφατα, η έννοια της προσωπικής θερμικής διαχείρισης (Personal Thermal Managment) μέσω των πολυμερών ρούχων έχει προσελκύσει τεράστια προσοχή και αντλεί διάφορα ερευνητικά θέματα, τα οποία σχετίζονται στενά με την εξοικονόμηση ενέργειας, προώθηση της ποιότητας ζωής (W. Wei et al 2020). Σε γενικές γραμμές, η μείωση της θερμοκρασίας κατά 4°C μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας σε ψύξη ενός χώρου περίπου 45% (T. Hoyt, et al 2015) . Το 2015, ο Tong πρότεινε μια ιδέα χρήσης του υπέρυθρου διαφανούς ορατού-αδιαφανούς υφάσματος (ITVOF) για PTM, στην οποία η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από το ανθρώπινο σώμα θα μπορούσε να μεταδωθεί μέσω του στρώματος ITVOF για να επιτύχει παθητική ακτινοβολία ψύξης για προσωπική ψύξη. Ως εκ τούτου, προτάθηκε ότι τα υλικά, όπως το εξαιρετικά υψηλού μοριακού βάρους πολυαιθυλένιο (UHMWPE) και η πολυκαπρολακτάμη (νάιλον), τα οποία παρουσιάζουν υψηλή μετάδοση στο καθεστώς υπέρυθρων, έχουν μεγάλες δυνατότητες για προσωπική ψύξη. Το 2016, ο Hsu πρότεινε και έδειξε πειραματικά ότι η δημιουργία νανοπόρων μέσα στο φιλμ πολυαιθυλενίου (PE) θα μπορούσε να χειριστεί αποτελεσματικά τις οπτικές ιδιότητες της μεμβράνης PE στο UV, ορατό και IR σύστημα για προσωπική ψύξη. Το νανοπορώδες πολυαιθυλένιο (nanoPE) διαθέτει διασυνδεδεμένους πόρους με διαμέτρους που κυμαίνονται από 50 έως 1000 nm, τα οποία είναι συγκρίσιμα με τα μήκη κύματος ορατών και σχεδόν υπέρυθρων φωτών (NIR). Κατά συνέπεια, η ταινία nanoPE είναι αδιαφανή στα ανθρώπινα μάτια λόγω των ισχυρών χαρακτηριστικών σκέδασης της ταινίας nanoPE στην ορατή περιοχή, ενώ εκτελεί υψηλές μεταδόσεις στο καθεστώς υπέρυθρων. Αυτές οι ελκυστικές ιδιότητες της μεμβράνης nanoPE της επιτρέπει να έχει πολύ καλύτερη απόδοση ψύξης από ό, τι ύφασμα από βαμβάκι και ινώδη PE (Tyvek), γεγονός που υποδηλώνει πολλά υποσχόμενα για την εφαρμογή σε ρούχα για προσωπική ψύξη και εξοικονόμηση ενέργειας. Στη συνέχεια, ένας αριθμός κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων που βασίζονται σε πολυμερή που έχουν

προσβληθεί με διαφορετικά υλικά, συμπεριλαμβανομένων των νανοπορώδων διπλής στιβάδας Ag / nanoPE, των νανοσωματιδίων ZnO (NPs) που ενσωματώνονται σε νανοπορώδη μεμβράνη PE και της διασποράς Al₂O₃ σε οξική κυτταρίνη, αναπτύχθηκαν για χρήση σε ρούχα (L. Cai, et al 2018). Επομένως, η έννοια της χρήσης νανοδομών για τον χειρισμό των οπτικών συμπεριφορών των πολυμερών όχι μόνο ανοίγει νέους τομείς έρευνας, αλλά έχει επίσης μια μεγάλη δυνατότητα άμεσης εφαρμογής στις πραγματικές εφαρμογές. Συνοπτικά, διάφορες συσκευές εξοπλισμένες με παθητικά ψυγεία ακτινοβολίας έχουν προταθεί και αποδειχθεί πειραματικά ότι επιτυγχάνουν αξιοσημείωτη απόδοση ψύξης. Για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπως συστήματα ψύξης υγρών και ρούχων, τα υλικά που βασίζονται σε πολυμερή παρουσιάζουν σημαντικά οφέλη σε σύγκριση με άλλα υλικά. Επιπλέον, ακτινοβολούμενοι ψύκτες με λεπτό υμένιο και με βάση τα μετα-υλικά έχουν ενσωματωθεί επιτυχώς σε ηλιακούς συλλέκτες ώστε να μειώσουν την θερμοκρασία των ηλιακών κυψελών για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητάς τους. Κατά συνέπεια, η διερεύνηση των φωτοθερμικών χαρακτηριστικών με υλικά με πολυμερή βάση και πώς να ενσωματωθούν αποτελεσματικά οι συσκευές ακτινοβολούμενης ψύξης σε συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας βελτιώνοντας παράλληλα την απόδοση των συσκευών είναι ένα συνεχές θέμα, το οποίο αξίζει να εξερευνηθεί. Επιπλέον, το πεδίο εφαρμογής της τεχνολογίας ακτινοβολίας ψύξης εξακολουθεί να έχει μεγάλες δυνατότητες ανάπτυξης και έρευνας στο μέλλον.

3.6.2 Ηλιακά κύτταρα

Τα ηλιακά κύτταρα έχουν δει μεγάλη ανάπτυξη τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Σε γενικές γραμμές, τα ηλιακά κύτταρα λειτουργούν κάτω από το άμεσο ηλιακό φως για να απορροφήσουν την ηλιακή ακτινοβολία και στη συνέχεια να μετατρέψουν την ενέργεια του φωτονίου σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία συμβάλλει στη μείωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ορυκτά καύσιμα. Η αποτελεσματικότητα των ηλιακών κυψελών με βάση το πυρίτιο κυμαίνεται γενικά από 15% έως 22% (W. Li, et al 2017). Η πλεονάζουσα απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας δεν θα αυξήσει μόνο την θερμοκρασία των ηλιακών κυττάρων αλλά προκαλεί επίσης παρασιτικές απώλειες θερμότητας, όπου και τα δύο θα επηρεάσουν

την αποτελεσματικότητα των ηλιακών κυττάρων. Συνήθως, τα ηλιακά κύτταρα έχουν αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας περίπου 0,45%, το οποίο σημαίνει ότι με αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C, η απόδοση μειώνεται περίπου κατά 0,1% για μια ηλιακή κυψέλη με αποδοτικότητα 22% (E. Skoplaki, et al 2009). Επομένως, διατηρώντας τη λειτουργία χαμηλής θερμοκρασίας ενός ηλιακού κυτταρικού συστήματος είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της βέλτιστης παραγωγής ενέργειας. Το 2017, ο Li πρότεινε και έδειξε πειραματικά τη σημασία της ανταλλαγής ακτινοβολούμενης θερμότητας στη θερμική ισορροπία του ηλιακού κυττάρου, το οποίο θα μπορούσε να συμβάλλει άμεσα στην εξοικονόμηση ενέργειας. Για να κατανοηθεί η κυρίαρχη επιρροή του θερμικού ελέγχου μεταξύ ηλιακής εκπομπής και θερμικής ακτινοβολίας στα ηλιακά κύτταρα, κατασκευάστηκαν δύο τύποι ηλιακών κυττάρων με βάση την τυπική τεχνολογία ηλιακών κυψελών εμπορικού πυριτίου. Το κύτταρο I και το κύτταρο II είναι ηλιακά κύτταρα με βάση το Si με πίσω διασυνδεδεμένες συνδέσεις και με τυπωμένο ασημί μπροστά και οπίσθιες επαφές αλουμινίου. Επίπλέον, το κύτταρο I ενθυλακώθηκε από δύο στρώματα EVA 0,46 mm και στην κορυφή και από κάτω στην αρχή και στη συνέχεια, με γυαλί 3,2 mm και φθοριούχο πολυβινύλιο (Tedlar) 0,5 mm στο εμπρός και πίσω μέρος, αντίστοιχα. Το κύτταρο I, το εγκλεισμένο κύτταρο I και το κύτταρο II παρουσίασαν εξαιρετικές ηλιακές ιδιότητες απορρόφησης στην ηλιακή φασματική περιοχή. Τα γυμνά ηλιακά κύτταρα (I και II) παρουσίασαν υψηλή απορροφητική ικανότητα στην ηλιακή φασματική περιοχή. Επιπλέον, η εκπομπή του ενθυλακωμένου κυττάρου I ήταν σχεδόν ενότητα μεταξύ 2 και 25 μm εκτός από τη βουτιά μεταξύ 8 και 13 μm λόγω του καλυμμένου γυαλιού 3,2 mm στρώμα που περιέχει 70-80% διοξείδιο του πυριτίου, το οποίο είναι καλύτερο από το κύτταρο I και II (L. Zhu, et al 2014). Επομένως, η ενθυλάκωση των ηλιακών κυττάρων δεν μπορούσε μόνο ενισχύσει την ηλιακή απορρόφηση του κενού υποζώνης αλλά επίσης βελτιώνει τη θερμική ακτινοβολία στο IR σε σύγκριση με τα γυμνά ηλιακά κύτταρα.



Εικόνα 6: Ηλιακά κύτταρα τύπου I και II. (Πηγή: K-T.Lin et al, 2021)

3.6.3 Cool roofs- Δροσερές στέγες

Η δροσερή οροφή είναι ένα σύστημα στέγης που παρέχει υψηλότερη ηλιακή ανάκλαση (ικανότητα ανάκλασης των ορατών, υπέρυθρων και υπεριωδών μηκών κύματος του ήλιου, μείωση της μεταφοράς θερμότητας στο κτίριο) και υψηλότερη θερμική εκπομπή (η ικανότητα ακτινοβολίας απορροφούμενης ή μη ανακλώμενης ηλιακής ενέργειας) από τα τυπικά σχεδιασμένα προϊόντα στέγης.

Ακριβώς όπως το να φοράτε ανοιχτόχρωμα ρούχα μπορεί να σας βοηθήσει να σας κρατήσει δροσερούς σε μια ηλιόλουστη ημέρα, το δροσερό υλικό στέγης που έχει σχεδιαστεί για να αντανακλά περισσότερο φως του ήλιου και απορροφά λιγότερη θερμότητα από μια τυπική στέγη. Οι δροσερές στέγες μπορούν να κατασκευαστούν από έναν εξαιρετικά αντανακλαστικό τύπο χρώματος, ένα κάλυμμα φύλλων ή από πολύ ανακλαστικά πλακάκια ή βότσαλα.

Ιστορικά, οι δροσερές στέγες είναι είτε λευκές είτε κάποιες άλλες ελαφρύτερες αποχρώσεις. Οι περισσότερες στέγες στον κόσμο (συμπεριλαμβανομένου του 90% των στεγών στις Ηνωμένες Πολιτείες) είναι σκούρου χρώματος. Στη ζέστη του ήλιου, η επιφάνεια μιας μαύρης οροφής μπορεί να αυξηθεί σε θερμοκρασία πάνω από

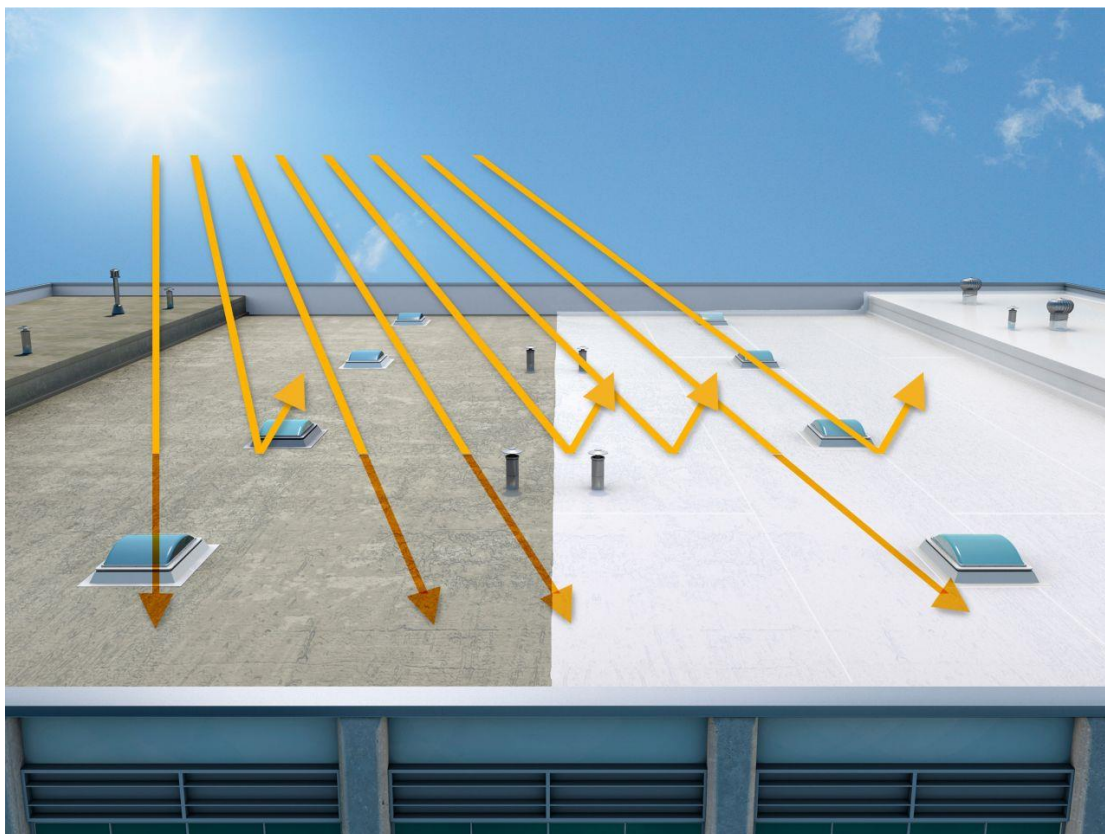
100 °F πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, φτάνοντας σε θερμοκρασίες έως 190 °F. Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας μπορεί να συμβάλει στην αυξημένη χρήση ενέργειας ψύξης και σε υψηλότερους λογαριασμούς κοινής ωφέλειας, σε μειωμένη εσωτερική άνεση και ταχεία φθορά των υλικών της στέγης, αυξημένο κόστος συντήρησης στέγης και υψηλά επίπεδα αποβλήτων στέγης που αποστέλλονται σε χώρους υγειονομικής ταφής.

Μια δροσερή οροφή μπορεί να ωφελήσει ένα κτίριο και τους ανθρώπους που είναι μέσα σε αυτό:

- Μειώνοντας τις ανάγκες κλιματισμού επομένως μειώνεται αισθητά και ο λογαριασμός ενέργειας.
- Βελτιώνοντας την εσωτερική άνεση για χώρους που δεν είναι κλιματιζόμενοι, όπως γκαράζ ή σκεπαστές βεράντες.
- Μειώνοντας την θερμοκρασία της οροφής και έτσι παρατείνεται η διάρκεια ζωής της.

Πέρα από το ίδιο το κτίριο, οι δροσερές στέγες μπορούν επίσης να ωφελήσουν το περιβάλλον, ειδικά όταν έχουν πολλά κτίρια σε μια κοινότητα. Οι δροσερές στέγες μπορούν:

- Να μειώσουν τις τοπικές θερμοκρασίες του αέρα (μείωση του φαινομένου αστικής νησίδας).
- Να μειώσουν τις εκπομπές στα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων διοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του θείου, οξειδίων του αζώτου και υδραργύρου, μειώνοντας τη χρήση ενέργειας ψύξης στα κτίρια.



Εικόνα 7: Ηλιακή ακτινοβολία σε ταράτσα με ή χωρίς λευκή επίστρωση.



Εικόνα 8: Λευκό χρώμα σε ταράτσα για μείωση της θερμοκρασίας.

3.6.4 Δροσερά πεζοδρόμια

Δροσερά υλικά επίστρωσης

Τα πεζοδρόμια (δρόμοι, θέσεις στάθμευσης κ.λπ.) καλύπτουν ένα σημαντικό ποσοστό αστικών και προαστιακών επιφανειών. Απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία, αποθηκεύουν αυτήν την ενέργεια στο πεζοδρόμιο κάτω από την επιφάνεια, και την απελευθερώνουν ως υπέρυθρη ακτινοβολία και μέσω μεταγωγής στη γύρω περιοχή κατά τη διάρκεια του απογεύματος και τη νύχτα. Κατά συνέπεια τα θερμικά χαρακτηριστικά τους είναι πολύ σημαντικά καθώς επηρεάζουν τη θερμοκρασία του αέρα των χαμηλότερων στρωμάτων της αστικής ατμόσφαιρας συμβάλλοντας στο σχηματισμό της αστικής θερμικής νησίδας.

Τεχνολογίες και ιδιότητες δροσερών υλικών επίστρωσης

Τα συμβατικά πεζοδρόμια είναι συνήθως αδιαπέραστα από σκυρόδεμα και άσφαλτο με τιμές ηλιακής ανάκλασης που κυμαίνονται από 0,04 έως 0,45. Άλλα υλικά χρησιμοποιούνται επίσης για την επίστρωση επιφανειών του αστικού περιβάλλοντος όπως πέτρα, καουτσούκ, γρανίτης, μάρμαρο, βότσαλο αλλά δεν είναι τόσο κοινά. Τα συμβατικά υλικά επίστρωσης μπορούν να φτάσουν σε επιφανειακές θερμοκρασίες από 48–67 °C (EPA, 2009b; Santamouris, 2001; Doulos et al., 2001; Pomerantz et al., 2000a). Ωστόσο, η ενεργειακή ισορροπία μιας επιφάνειας σε επαφή με το έδαφος είναι πιο περίπλοκη και παράμετροι εκτός της ηλιακής ανάκλασης (και το κλάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια σε μια πολύπλοκη αστική γεωμετρία) και την εκπομπή, όπως διαπερατότητα, θερμική αγωγιμότητα, θερμότητα ικανότητα, και μεταφορά, πρέπει να ληφθούν υπόψη για την αξιολόγηση της απόδοσής τους. Τα δροσερά πεζοδρόμια αναφέρονται σε μια σειρά υπαρχόντων και νέων υλικών που τείνουν να αποθηκεύουν λιγότερη θερμότητα και ενδέχεται να έχουν χαμηλότερη επιφανειακή θερμοκρασία σε σύγκριση με συμβατικά προϊόντα.

Όπως αναφέρεται στην Cambridge Systematics, Inc. (2005), πιθανοί μηχανισμοί για τη δημιουργία ενός δροσερού πεζοδρομίου που έχουν μέχρι σήμερα μελετηθεί είναι:

(α) η αυξημένη ανάκλαση της επιφάνειας, που μειώνει την ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από το πεζοδρόμιο.

(β) η αυξημένη διαπερατότητα, η οποία ψύχει το πεζοδρόμιο μέσω εξάτμισης νερού

(γ) μια σύνθετη δομή για τη μείωση του θορύβου, η οποία έχει επίσης βρεθεί ότι εκπέμπει χαμηλότερα επίπεδα θερμότητας τη νύχτα.

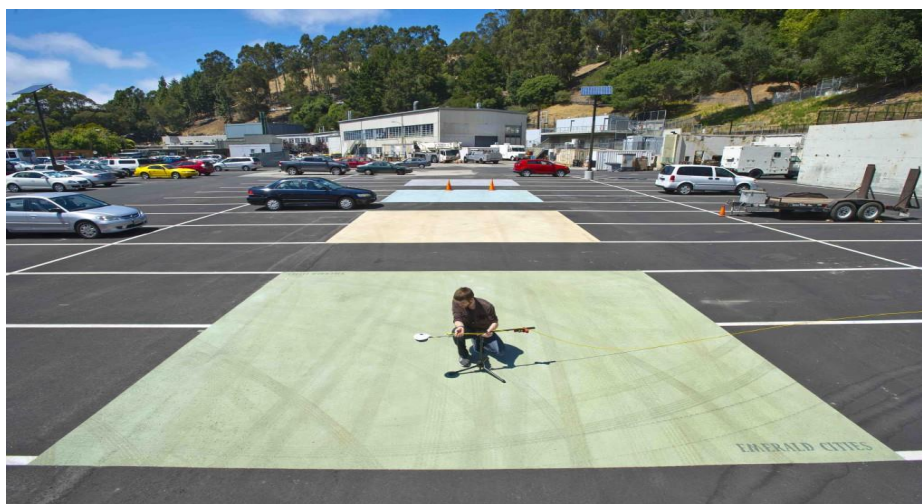
Ο Golden το 2007 πρότεινε την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών θόλων για σκίαση πεζοδρομίων σε χώρους στάθμευσης και επίσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Golden et al. 2007). Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι τα φωτοβολταϊκά πάνελ παρέχουν ένα μεγαλύτερο όφελος θερμικής μείωσης σε σύγκριση με την αστική δασοκομία παρέχοντας παράλληλα τα πρόσθετα οφέλη από την υποστήριξη της αιχμής ενεργειακής ζήτησης, τη διατήρηση των υδάτινων πόρων και αξιοποιώντας μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Αυτό το άρθρο επικεντρώνεται σχετικά με τον μηχανισμό αύξησης της ηλιακής ανάκλασης. Προκειμένου να αυξηθεί η ηλιακή ανάκλαση ενός πεζοδρομίου έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι. Για ασφαλικά οδοστρώματα, μια τεχνική είναι η χρήση λευκού ή ανοιχτού χρώματος αδρανούς (χαλίκι, λευκή πέτρα κ.λπ.) ή ανάμιξη χρωστικής στην άσφαλτο, αυξάνοντας την ηλιακή ανάκλαση κατά περίπου 0,3. Στις Η.Π.Α κυρίως, δύο άλλες τεχνικές που ονομάζονται white topping και chip seals έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί. Το λευκό κάλυμμα (white topping) αποτελείται από επικάλυψη ενός λεπτού στρώματος σκυροδέματος πάνω από το υπάρχον πεζοδρόμιο (συνήθως άσφαλτος) αυξάνοντας την ηλιακή του ανάκλαση σε (0,3-0,45). Η τεχνική chip seals είναι μια τεχνική συντήρησης που αποτελείται από συμπίεση πετρώδους chip πάνω από την άσφαλτο έτσι ώστε η ηλιακή ανάκλαση του δρόμου να καθορίζεται από την ανάκλαση του αθροίσματος ανοιχτού χρώματος. Η αύξηση της ηλιακής ανάκλασης των οδοστρωμάτων μπορεί δυνητικά να προκαλέσει προβλήματα θολότητας, όταν οδηγείτε για παράδειγμα, μειώνοντας επίσης την ορατότητα της λευκής γραμμής · ή μπορεί να μην είναι κατάλληλο σε μέρη όπου οι άνθρωποι θα είναι άβολα εκτεθειμένοι στην ανακλώμενη ακτινοβολία για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Για αυτό το λόγο υπάρχει μια προσπάθεια να αναπτυχθούν δροσερά χρωματιστά πεζοδρόμια, δηλαδή πεζοδρόμια που απορροφούν σε ορατό μέρος του φάσματος για να είναι σκοτεινό στην εμφάνιση αλλά να παρουσιάζει υψηλή αντανάκλαση στο τμήμα NIR του ηλιακού φάσματος (παρόμοια με την ψύξη υλικά στεγών).

Πιο συγκεκριμένα, ο Kinouchi και η ομάδα του το 2004 είχαν αναπτύξει έναν νέο τύπο πεζοδρομίου που ικανοποιεί τόσο την υψηλή λευκαύγεια (albedo) όσο και την χαμηλή φωτεινότητα με βάση την εφαρμογή μιας καινοτόμου βαφής σε συμβατικό ασφαλτόδρομο (Kinouchi et al. 2004). Το ανεπτυγμένο οδόστρωμα χαρακτηρίζεται από χαμηλή ανακλαστικότητα στο το ορατό μέρος του φάσματος (23%) και υψηλή ανακλαστικότητα κοντά στο υπέρυθρο (86%). Οι πειραματικές δοκιμές έχουν δείξει ότι η μέγιστη θερμοκρασία επιφάνειας του βαμμένου χρώματος στο πεζοδρόμιο ασφάλτου είναι περίπου 15 °C χαμηλότερη από αυτή του συμβατικού πεζοδρομίου ασφάλτου. Οι Synnefa και άλλοι το 2011 αναφέρουν ότι πέντε δείγματα που είναι χρωματιστά λεπτά στρώματα ασφάλτου μπορούν να εφαρμοστούν σε νέα και υπάρχοντα πεζοδρόμια (Synnefa et al. 2011). Έχει αναπτυχθεί και διαπιστωθεί ότι έχουν σημαντικά υψηλότερες τιμές ηλιακής ανάκλασης σε σύγκριση με τη συμβατική άσφαλτο, η οποία οφείλεται κυρίως στην υψηλή σχεδόν υπέρυθρη ηλιακή ανάκλαση κοντά στο υπέρυθρο. Πιο συγκεκριμένα, η ανακλαστικότητα του λεπτού χρωματιστού στρώματος-δείγματος ασφάλτου βρέθηκε να είναι υψηλότερη από την ανακλαστικότητα της συμβατικής μαύρης ασφάλτου σε όλες τις περιπτώσεις μεταξύ 0,27 (κόκκινα και πράσινα δείγματα) και 0,55 (υπόλευκα δείγμα), ενώ η ηλιακή ανάκλαση της συμβατικής μαύρης ασφάλτου είναι 0,04. Η μετρούμενη θερμοκρασία επιφάνειας διαφέρει λόγω των διαφορών στην ηλιακή ανάκλαση, έφτασε τους 12 °C (μεταξύ του υπόλευκου λεπτού στρώματος ασφάλτου δείγμα και τη συμβατική μαύρη άσφαλτο). Μια προσομοίωση CFD που πραγματοποιήθηκε έδειξε ότι η αντικατάσταση της συμβατικής ασφάλτου σε δρόμο με την δροσερή λεπτή στρώση ασφάλτου θα μπορούσε να οδηγήσει σε μέση μείωση της θερμοκρασίας του αέρα κατά 5 °C υπό συνθήκες χαμηλής ταχύτητας ανέμου το καλοκαίρι.

Τα οφέλη των «δροσερών» πεζοδρομίων

Τα οφέλη των δροσερών πεζοδρομίων προκύπτουν από το γεγονός ότι αυξάνοντας την ηλιακή ανάκλαση μιας πλακόστρωτης επιφάνειας το διατηρεί πιο κρύο κάτω από τον ήλιο, μειώνοντας τη μεταφορά θερμότητας από πεζοδρόμιο στον αέρα και επίσης μειώνοντας έτσι την περιβάλλουσα θερμοκρασία του αέρα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες αέρα μειώνουν τη ζήτηση για ενέργεια ψύξης και επιβραδύνεται ο σχηματισμός αστικής αιθαλομίχλης. Σε παγκόσμια κλίμακα, η αύξηση της αστικής λευκαύγειας (albedo) μπορεί να οδηγήσει

σε λιγότερη απορρόφηση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολία από το σύστημα επιφάνειας-τροπόσφαιρας, αντισταθμίζοντας σε κάποιο βαθμό τις επιπτώσεις της παγκόσμιας κλίμακας από την αύξηση συγκέντρωσης αερίων θερμοκηπίου. Εκτός από αυτά τα οφέλη έχει αποδειχθεί, ότι μπορεί να προκύψουν μειωμένες θερμοκρασίες της επιφάνειας του οδοστρώματος αυξάνοντας την ωφέλιμη ζωή (ανθεκτικότητα) των οδοστρωμάτων και μειώνοντας την παραγωγή αποβλήτων. Επιπλέον, τα ανακλαστικά πεζοδρόμια μπορούν να βελτιώσουν την ορατότητα κατά την διάρκεια της νύχτας και ενδεχομένως να μειώσουν τις απαιτήσεις για φωτισμό και εξοικονόμηση χρημάτων και ενέργειας. Πρέπει να επισημανθεί ότι αν και η εφαρμογή των δροσερών πεζοδρομίων μπορεί να συμβάλλει στη μείωση της επιφανειακής θερμοκρασίας, είναι σημαντικό να πραγματοποιηθεί διεξοδική μελέτη προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση τέτοιων επιφανειών σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία και στο μικροκλίμα της περιοχής, αποφεύγοντας αυξημένη αντανάκλαση ή ανεπιθύμητα ηλιακά κέρδη και διασφάλιση της βέλτιστης εφαρμογής τέτοιων υλικών.



Εικόνα 9: Εφαρμογή δροσερών υλικών επίστρωσης σε παρκινγκ αυτοκινήτων.

3.6.5 Θερμοκήπια

Λόγω της αλλαγής του κλίματος, η θερμοκρασία στην επιφάνεια της Γης έχει αυξηθεί, με αποτέλεσμα οι άνθρωποι να χρησιμοποιούν πολλή ενέργεια για ψύξη, αλλά η ενέργεια στη Γη δεν είναι ανεξάντλητη και οι ανησυχίες σχετικά με το περιβάλλον και την εξοικονόμηση ενέργειας έχουν γίνει σημαντικά θέματα

παγκοσμίως. Οι περισσότερες μέθοδοι ψύξης που χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν απαιτούσαν πάντα ενέργεια ή πόρους, ενώ η ακτινοβολία ψύξης είναι μια φυσική μέθοδος ψύξης στη Γη, η οποία εκπέμπει θερμότητα προς το διάστημα μέσω του παραθύρου διαφάνειας στην ατμόσφαιρα που είναι μεταξύ 8 και 13 μικρομέτρων. Αναφέρεται στη διαδικασία διάχυσης της θερμότητας των αντικειμένων στο χώρο του σύμπαντος, έχοντας χαμηλότερη θερμοκρασία μέσω θερμικής ακτινοβολίας. Είναι φιλική προς το περιβάλλον και ένας πιθανός τρόπος για να αντισταθμιστούν τα προβλήματα που προκαλούνται από την υπερθέρμανση του πλανήτη τα τελευταία χρόνια, επειδή αυτή η μέθοδος προσφέρει ένα σημαντικό αντίκτυπο στην εξοικονόμηση ενέργειας, για την ικανότητά του να συμπεριφέρεται χωρίς εξωτερική ενέργεια

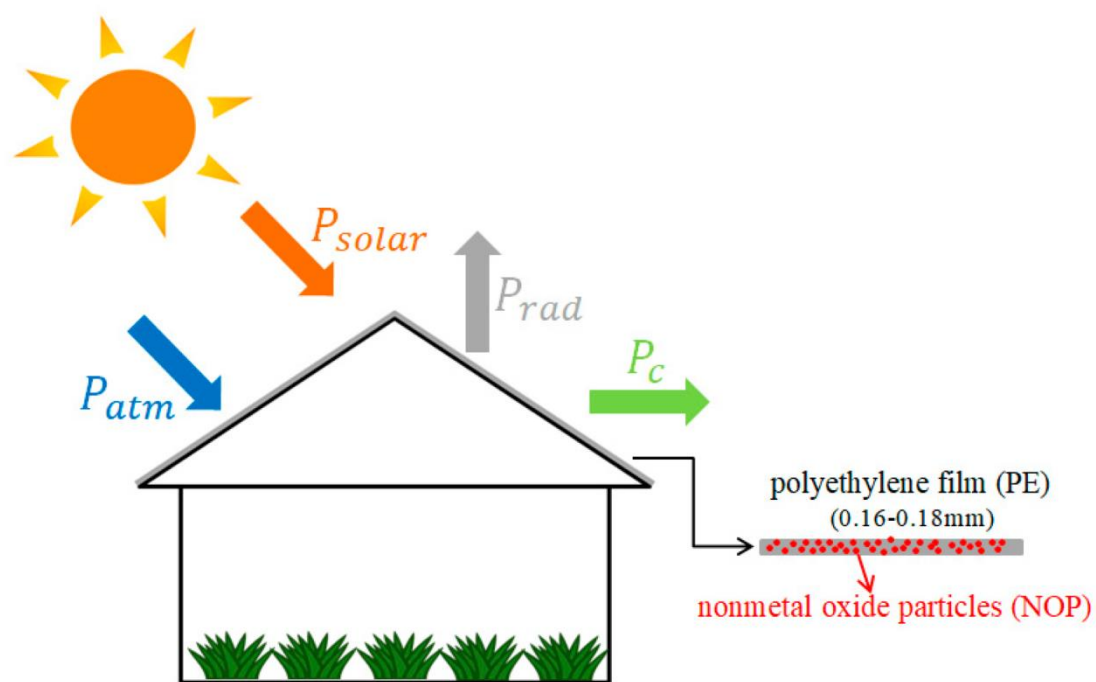
Η ψύξη με ακτινοβολία είναι ένα φυσικό φαινόμενο στην επιφάνεια της Γης. Όταν το φως του ήλιου λάμπει στην επιφάνεια της Γης, θα απορροφηθεί από το έδαφος και η περισσότερη θερμική ακτινοβολία μπορεί να μεταδοθεί μέσα από το ατμοσφαιρικό παράθυρο, όπου είναι πολύ διαφανές. Είναι εκπληκτικό ότι το φάσμα του ατμοσφαιρικού παράθυρου είναι σύμφωνο με το εύρος των μηκών κύματος της θερμικής ακτινοβολίας από αντικείμενα του εδάφους, τα οποία αποτελεί μια καλή εικόνα του τρόπου με τον οποίο η Γη διατηρεί τη θερμική της ισορροπία καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Το θερμοκήπιο είναι ένα τεχνητό κτίριο που προστατεύει τις καλλιέργειες από τις καιρικές συνθήκες. Η ηλιακή ακτινοβολία περιλαμβάνει υπεριώδη ακτινοβολία (UV, 100–400 nm), ορατή ακτινοβολία (VIS, 400–780 nm), και σχεδόν υπέρυθρη ακτινοβολία (NIR, 750–2500 nm) και διεισδύει στο θερμοκήπιο μέσω της επένδυσης για την ενίσχυση των καλλιεργειών να αναπτυχθούν (Wang S. et al, 2015). Μεταξύ αυτών, η υπεριώδης ακτινοβολία υποβαθμίζει το φιλμ και η ακτινοβολία NIR είναι μια άμεση πηγή θερμότητας. Με το φαινόμενο του θερμοκηπίου να είναι επιδεινωμένο, η υπερβολικά υψηλή θερμοκρασία καθιστά δυσμενείς τις συνθήκες για τους ανθρώπους να εργάζονται μέσα στο θερμοκήπιο και τα φυτά είναι δύσκολο να αναπτυχθούν.

Έχουν προταθεί ορισμένες ενεργές και διερχόμενες μέθοδοι ψύξης ώστε να ρυθμίζεται η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Η ενεργή ψύξη, όπως συστήματα ανεμιστήρα rad, συστήματα ψύξης με εξάτμιση και οι αντλίες θερμότητας ενδέχεται να καταναλώνουν ενέργεια και υδάτινους πόρους. Η παθητική

ψύξη περιλαμβάνει φυσικό αερισμό, σκίαση, φίλτρο υγρής ακτινοβολίας (LRF) και πρόσθετα NIR αντανάκλασης. Αυτές οι μέθοδοι έχουν ορισμένα όρια, όπως υψηλό κόστος, είναι δηλητηριώδη και έχουν περιορισμένη αποτελεσματικότητα ψύξης. Το υπέρυθρο ατμοσφαιρικό παράθυρο ταιριάζει με την κορυφή των μακρών κύματος θερμικής ακτινοβολίας στις γενικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, οπότε, εάν τα υλικά μπορούν να εκπέμπουν μήκος κύματος μεταξύ 8–13 μικρομέτρων, η θερμότητα θα μεταφερθεί στο διάστημα με ακτινοβολία, και αυτή είναι μια παθητική ψύξη (Zeyghami M. et al, 2018). Βασισμένο σε αυτήν την ιδέα, η σύνδεση υλικών κάλυψης θερμοκηπίου με την ακτινοβολία ψύξης για εξοικονόμηση ενέργειας, την μείωση των εκπομπών CO₂, και ταυτόχρονα, την ρύθμιση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου είναι ένα θέμα που αξίζει να εξερευνηθεί.

Η μεγαλύτερη διαφορά με τις συσκευές που χρησιμοποιούνται για την ακτινοβολία ψύξης και εκείνες που χρησιμοποιούνται στο θερμοκήπιο είναι υψηλή ηλιακή αντανάκλαση. Το κάλυμμα του θερμοκηπίου χρειάζεται το φως του ήλιου να διεισδύει στο εσωτερικό για να διατηρήσει την ανάπτυξη των φυτών. Επομένως, απαιτεί υψηλή μετάδοση στην ορατή ακτινοβολία και υψηλή εκπομπή το παράθυρο υπέρυθρης ατμόσφαιρας. Από προηγούμενες έρευνες, η ψύξη με ακτινοβολία μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας κάποιο σωματίδιο μη μεταλλικού οξειδίου. Σε αντίθεση με άλλες συσκευές, το κάλυμμα ενός θερμοκηπίου δεν χρειάζεται ούτε υψηλή αντανάκλαση ούτε περίπλοκη συσκευή, επομένως προστίθενται μόνο σωματίδια μη μεταλλικού οξειδίου ως βάση μεμβρανών για ψύξη με ακτινοβολία αντί για σύνθετη σύνθεση (Raman A.P et al ,2014).



Εικόνα 10:Απεικόνιση της ακτινοβολίας που δέχεται ένα θερμοκήπιο. (Πηγή: Sustainability,2019).

4. Υλικά ακτινοβολούμενης ψύξης

Η τέλεια απόδοση ακτινοβολούμενης ψύξης (Radiative Cooling-RC) μπορεί να επιτευχθεί με δομές με ελάχιστη απορρόφηση του άμεσου ηλιακού φωτός και μέγιστη εκπομπή μέσα από το ατμοσφαιρικό παράθυρο του ουρανού, το οποίο χρειάζεται τη νανοφωτονική βελτιστοποίηση των υλικών. Οι νυχτερινές και οι ημερήσιες εφαρμογές αφορούν τις αποστάσεις μήκους κύματος των 2,5-50 μm και 0,3-50 μm , αντίστοιχα. Η εκπομπή πρέπει να προσεγγίσει το 100% στο παράθυρο ουρανού της ατμόσφαιρας (8-13 μm) για εφαρμογές υπό-περιβάλλοντος και περίπου μηδέν εντός του εύρους του ηλιακού φάσματος (0,3-2,5 μm) για εφαρμογές κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Είναι σαφές ότι απαιτούνται διαφορετικά υλικά για διαφορετικό RC: τα ημερήσια υλικά RC πρέπει να έχουν άριστη εκπομπή μέσω της ανακλαστικότητας στο ηλιακό φάσμα και το ατμοσφαιρικό παράθυρο ουρανού, ενώ η νυχτερινή RC απαιτεί μόνο υψηλή εκπομπή.

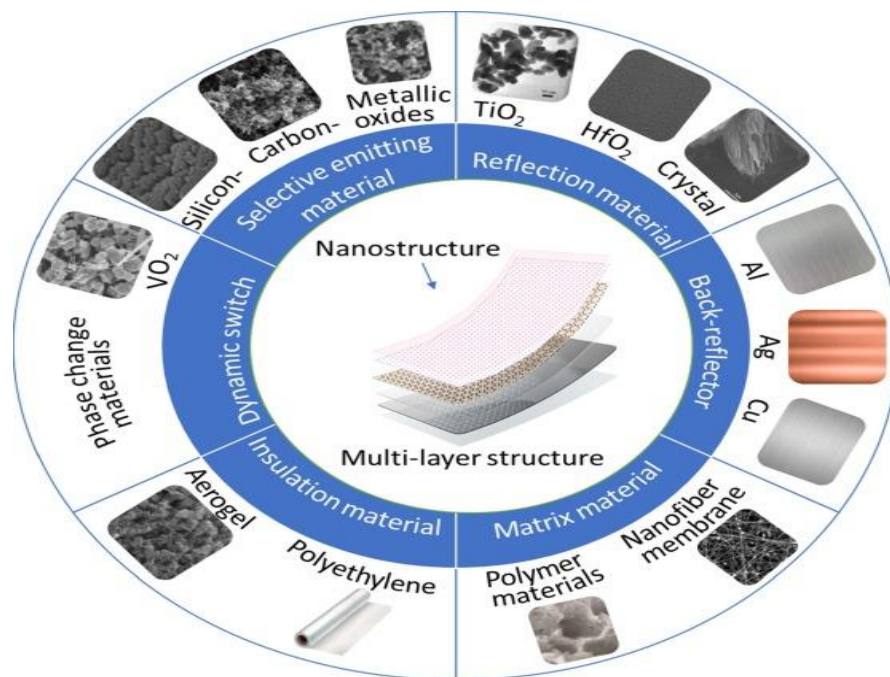
Τα ιδανικά αποτελέσματα ψύξης επιτυγχάνονται με τη βελτιστοποίηση των νανοφωτονικών χαρακτηριστικών αυτών των υλικών και δομών RC. Για μια απλή δομή RC, μέρος της φασματικής ακτινοβολίας εκπέμπεται μέσω υπέρυθρης ακτινοβολίας. Μερική ενέργεια διασποράς θα αντανάκλαται, και η υπόλοιπη θα απορροφηθεί από το υπόστρωμα. Για να επιτευχθεί περισσότερη υπέρυθρη ακτινοβολία και αντανάκλαση, οι δομές RC μπορούν να βελτιστοποιηθούν με την υιοθέτηση νέων υλικών, μετά-επιφανειών, πολυστρωμάτων και άλλων. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας RC, περισσότερες δομές προσπαθούν να είναι πολλαπλών λειτουργιών με τη δομή πολλαπλών επιπέδων για να ενισχύσει τα εφέ RC ή να επιτύχει πρόσθετες λειτουργίες, όπως ο προσαρμοζόμενος έλεγχος. Έτσι, αυτή η μελέτη συνοψίζει τα νανοϋλικά με μια «δομή πολλαπλών στρώσεων», και κάθε στρώμα υποτίθεται ότι έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα RC μπορούν να δημιουργηθούν μέσω διαφορετικών στρωμάτων και όχι μόνο μέσω ενός. Με βάση τα αντιπροσωπευτικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές RC, αυτά τα υλικά μπορούν να ομαδοποιηθούν ως εκλεκτικό υλικό εκπομπής (σε συνδυασμό με υλικό μήτρας), υλικό αντανάκλασης, υλικό αντανάκλασης, μονωτικό υλικό και δυναμικά στρώματα διακοπών

Ειδικά το εκλεκτικό στρώμα υλικού εκπομπής πρέπει να έχει την επιθυμητή εκπομπή στο «παράθυρο του ουρανού», και η απόδοση εκπομπής του μπορεί να επηρεαστεί από το υλικό μήτρας. Το ανακλαστικό στρώμα υλικού στοχεύει να απεικονίσει την ηλιακή ακτινοβολία αποτελεσματικά. Οι περισσότερες δομές υιοθετούν το υλικό πίσω-αντανάκλασης, συνήθως ο καθρέφτης, για να απεικονίσει τη θερμότητα απλά. Στρώμα υλικού μόνωσης τοποθετείται γενικά στην κορυφή για να μειώσει την άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Στις αυτοπροσαρμοζόμενες δομές RC, ο δυναμικός διακόπτης θα μπορούσε να είναι υλικό αλλαγής φάσης, ηλεκτροχρωμικό και θερμοχρωμικό υλικά καθώς και άλλα. Οι περισσότερες υπάρχουσες δομές RC έχουν ενιαία ή πολλαπλά προαναφερθέντα στρώματα, και η ακολουθία τους θα μπορούσε να είναι διαφορετική για να ικανοποιήσει τις διαφορετικές απαιτήσεις σχεδίου. Επιπλέον, οι επιπτώσεις ψύξης αυτών των κατασκευών θα μπορούσαν να ενισχυθούν από τις νανοδομές, ιδίως για την επιλεκτική εκπομπή. Η απόδοση εκπομπής μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με τεχνικές όπως:

- 1) επαναλαμβανόμενα στρώματα στη δομή πολλαπλών στρωμάτων
- 2) βελτιστοποίηση της μορφολογίας στη νανοσωματική δομή.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της ακτινοβολούμενης ψύξης χωρίζονται με βάση τις κύριες λειτουργίες τους που είναι οι εξής:

- 1)Επιλεκτική εκπομπή
- 2)Αντανάκλαση
- 3)Πίσω ανακλαστήρας (στρώμα καθρέφτη)
- 4)Υλικό μήτρας
- 5)Μονωτικό υλικό
- 6)Δυναμικός διακόπτης



Εικόνα 11:Υλικά ακτινοβολούμενης ψύξης. (Πηγή: W.Li, et al, 2020).

4.1 Επιλεκτική εκπομπή

Ο σκοπός του εκλεκτικού-επιλεκτικού πομπού είναι να εκτονώσει αποτελεσματικά θερμότητα στο διάστημα μέσω του ατμοσφαιρικού παραθύρου σε μήκος κύματος 8-13μm. Τα τυπικά υλικά περιλαμβάνουν υλικά με βάση το πυρίτιο (Diatezua et al., 1996 & Zhai et al., 2017), τον άνθρακα (Suryawanshi and Lin, 2009), το διοξείδιο του βαναδίου (Ji et al., 2018) και άλλα μεταλλικά οξείδια (Kecebas et al., 2017 & Yang et al., 2019).

Υλικά με βάση το πυρίτιο

Το οπτικό φωνόνιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα ιοντικά διηλεκτρικά για να επιτύχει υψηλότερη εκπομπή στο ατμοσφαιρικό παράθυρο. Τα υλικά με βάση το πυρίτιο υιοθετήθηκαν ευρέως στις τεχνολογίες RC. Στα αρχικά στάδια της έρευνας (κυρίως για το νυχτερινό RC), οι Granqvist και Hjortsberg το 1981 εισήγαγαν μια υπέρυθρη-επιλεκτική επιφάνεια που συνδυάζει ταινίες SiO και Al, που απέφερε θερμοκρασία 14 °C χαμηλότερη από την θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια μιας καθαρής νύχτας στη Σουηδία. Ο Diatezua το 1996 ανέπτυξε ένα τριστρωματικό οξυνιτρίδιο πυριτίου τοποθετημένο πάνω σε στρώμα Al με επικαλυμμένο γυάλινο υπόστρωμα (Diatezua et al., 1996). Η δομή αυτή έχει

ευρύτερη κορυφή απορρόφησης στο ατμοσφαιρικό παράθυρο, παρουσιάζοντας μέγιστη πτώση θερμοκρασίας 56 °C και ισχύς ψύξης 125 W/m². Οι ανώτερες οπτικές ιδιότητες κάνουν το οξυνιτρίδιο πυριτίου ένα ελκυστικό RC υλικό, και τα πολυστρωματικά οξυνιτρίδιου πυριτίου έχουν ευρύτερο εύρος απορρόφησης εντός μήκους κύματος 8-13 μm.

Νανοσωματίδια όπως το SiC που εκπέμπουν αποκλειστικά εντός 8-13 μm χωρίς καθόλου απορρόφηση από την προεξέχουσα ζώνη μπορούν να δροσίσουν, δηλαδή να ρίξουν τις θερμοκρασίες κάτω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος αποτελεσματικά. Ένα βελτιστοποιημένο σχέδιο RC αποτελούμενο από SiC και χαλαζία προτάθηκε από τον Rephaeli το 2013 για την επίτευξη ημερησίου RC για υπαίθρια περιβάλλοντα (Rephaeli et al., 2013). Η μεταλλική-διηλεκτρική φωτονική δομή μπορεί να αντανakλά το ηλιακό φως και να εκπέμπει ενεργά μέσω του ατμοσφαιρικού παραθύρου στη μέση του IR, με ρυθμό ενεργειακής ψύξης πάνω από 100 W/m². Αυτές οι ψυκτικές επιδράσεις εξακολουθούν να υπάρχουν υπό συνθήκες μη ιδανικής ατμοσφαιρικής και σημαντικής αγωγίμης ανταλλαγής θερμότητας.

Ο χαλαζίας και το SiC είναι πολύ αδύναμοι απορροφητές για τα ορατά και τα υπέρυθρα φώτα ενώ είναι επιθυμητή η λειτουργία κατά την διάρκεια της ημέρας, εξασφαλίζοντας θερμικά ότι τα στρώματα εκπομπής απορροφούν μια ελάχιστη ποσότητα ηλιακής ενέργειας. Εάν τα νανοσωματίδια SiC τοποθετούνται στην κορυφή της ταινίας SiC με ορισμένες περιοδικότητες, η εκπομπή μπορεί να ενισχυθεί σημαντικά, ιδίως στις πολύ υπέρυθρες περιοχές.

Είναι αναγκαίο να επιτευχθεί ημερήσιο RC με ισχυρότερη εκπομπή στο ατμοσφαιρικό παράθυρο. Οι Gentle και Smith το 2010 συνδίασαν νανοσωματίδια SiC και SiO₂ ντοπαρισμένα σε πολυαιθυλένιο πάνω σε πλάκα αλουμινίου. Δεδομένου ότι τα κρυσταλλικά νανοσωματίδια SiC ξεχωρίζουν στο μήκος κύματος που κυμαίνεται από 10,5 έως 13 μm, και τα ηχητικά νανοσωματίδια SiO₂ απορροφούν από 8 έως 10 μm, το μείγμα τους πειραματικά αποδείχθηκε ότι έχει καλή ψυκτική απόδοση με χαμηλό κόστος και με ολόκληρο το ατμοσφαιρικό παράθυρο καλυμμένο.

Ο Raman το 2014 παρουσίασε ένα σύνθετο θερμικό εκπομπό και ανακλαστήρα, μία δομή επτά στρωμάτων SiO₂ και HfO₂ που έχει 97% περιστασιακή ανακλαστικότητα του ηλιακού φωτός και εκπέμπει στο ατμοσφαιρικό παράθυρο. Τα επτά εναλλασσόμενα στρώματα SiO₂ και HfO₂ έχουν ποικίλα πάχη και εναποτίθενται στο στρώμα Ag και στο υπόστρωμα πυριτίου (Raman et al., 2014). Η ηλιακή

απόδοση αντανάκλασης βελτιστοποιήθηκε με τα τέσσερα χαμηλότερα στρώματα HfO_2 και SiO_2 . Ως υλικό υψηλού δείκτη, το HfO_2 παρουσιάζει χαμηλή απορρόφηση στην υπεριώδη ακτινοβολία. Το οπτικά διαφανές SiO_2 χρησιμεύει ως χαμηλός δείκτης στρώματος. Το HfO_2 είναι ακριβό υλικό επομένως μπορεί να αντικατασταθεί με πιο οικονομικό υλικό, όπως είναι το TiO_2 . Για να ακτινοβοληθεί η θερμότητα από το πιο ψυχρό, τα τρία κορυφαία στρώματα έχουν μεγαλύτερο πάχος. Το πείραμα δείχνει ότι το RC θα μπορούσε να μειώσει την περιβάλλουσα θερμοκρασία του αέρα κατά 5°C κάτω από άμεση ηλιακή ακτινοβολία.

Υλικά με βάση τον άνθρακα

Ο μαύρος άνθρακας μπορεί να απορροφήσει αποτελεσματικά τις ακτινοβολίες όπως ένα μαύρο σώμα, η υψηλή του αφθονία και απορροφητικότητα τον καθιστούν ως μία καλή επιλογή για υλικό εκπομπής (Howell et al., 2010). Ο Huang και ο Ruan το 2017 πρότειναν μία δομή διπλού στρώματος διοξειδίου του τιτανίου και σωματιδίων μαύρου άνθρακα, όπου το μαύρο στρώμα άνθρακα ανταποκρίθηκε στην εκπομπή θερμότητας μέσω του διαφανές παραθύρου. Η δομή μπορεί να αντανάκλα την ηλιακή ακτινοβολία πάνω 90% και παρουσιάζει μια μέση εκπομπή της τάξης του 0,9 στις περισσότερες κατευθύνσεις, η οποία συμβάλλει περαιτέρω σε ημερήσιο καθαρό φορτίο ψύξης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος άνω των 100 W/m^2 .

Οι Suryawanshi και Lin το 2009 διασκόρπισαν σκόνη νανοδιαμαντιού, μαύρο άνθρακα και πολύ-τομέα νανοσωλήνα άνθρακα (CNT) σε ακρυλικό γαλάκτωμα ως σύνθετα υλικά. Η σειρά τους για την ποσοτικοποίηση του πλέγματος είναι πολύ-τομέας CNT > μαύρος άνθρακας > σκόνη νανοδιαμαντιού, η οποία συσχετίστηκε καλά με την ενίσχυση της επιφανειακής εκπομπής. Το 1% φορτίο του πολύ-τομέα CNT συμβάλλει στη μείωση της θερμοκρασίας κατά 17°C . Με πιο ενεργά φωνόνια σε μοριακή επίστρωση ανεμιστήρα, η αύξηση του CNT φορτίου θα μειώσει τη θερμοκρασία ισορροπίας του πίνακα (Suryawanshi and Lin, 2009).

Μεταλλικά οξείδια

Υλικά με αξιόπιστη απορρόφηση στο ατμοσφαιρικό παράθυρο μπορούν να προστεθούν ώστε να καταφέρουν καλύτερη απόδοση της εκπομπής. Για παράδειγμα, το Al_2O_3 δείχνει μηδενική απορρόφηση κοντά στο υπέρυθρο και στο ορατό φάσμα, ενώ δείχνει υψηλότερα ποσοστά απορρόφησης πέραν του φάσματος των $10 \mu\text{m}$ σε

σύγκριση με SiO_2 και TiO_2 (Kecebas et al., 2017). Το 2017 βελτίωσε την απόδοση του RC συνδυάζοντας ένα φιλμ Al_2O_3 με συμβατικές δομές επίστρωσης (με πανομοιότυπο συνολικό πάχος). Ο σχεδιασμός του Al_2O_3 αύξησε δραματικά την εκπομπή, βελτιώνοντας τον μέσο όρο εκπομπής από 55% στο 71% στο φάσμα των 8-13 μm .

Το οξείδιο του κασσίτερου (ITO), ένα διαφανές αγωγίμο οξείδιο, είναι ένα από τα πολλά υποσχόμενα πλασμονικό υλικό για επιλεκτική εκπομπή στο υπέρυθρο μήκος κύματος. Ο Dao το 2019 πρότεινε τριστρωματικούς πλασμονικούς απορροφητές ITO- Al_2O_3 -ITO με εξαγωνικούς δίσκους ITO στην κορυφή. Η δομή αυτή έδωσε τέλεια αποτελέσματα απορρόφησης 0,99 στην προσομοίωση και 0,92 στην κατασκευή (Dao et al. 2019).

4.2 Ανακλαστικότητα

Διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2)

Ως τυπικό υλικό ανάκλασης το διοξείδιο του τιτανίου έχει ευρύ χάσμα, σταθερές χημικές ιδιότητες, υψηλό δείκτη διάθλασης και είναι διαφανές στην περισσότερη υπέρυθρη ακτινοβολία. Η ανάταση του υπομικρονίου και τα σωματίδια του ρουτίλιου θα μπορούσαν να είναι ηλιακός ανακλαστήρας για να διασκορπίσουν το φως του ήλιου αποτελεσματικά. Ο Mastai το 2001 χρωμάτισε φύλλα πολυαιθυλενίου με νανοκρυσταλλικό TiO_2 . Το TiO_2 (ρουτίλιο, ~60 nm) κολλοειδές εναιώρημα κατανεμήθηκε μεταξύ δύο φύλλων πολυαιθυλενίου με καυτή συμπίεση. Οι ομοιογενείς ασπίδες έδωσαν υψηλή ηλιακή ανάκλαση και υψηλή μετάδοση υπέρυθρου. Αυτή η απλή και οικονομική κατασκευή νανοκρυσταλλικών ταινιών TiO_2 έχει τη δυνατότητα να γίνει ευρέως διαδεδομένη λόγω των εξαιρετικών οπτικών χαρακτηριστικών της (Bao et al., 2017; Vargas, 2000; Mastai et al. 2001).

Χρησιμοποιώντας ένα ευρύ φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, ο Peoples το 2019 χρησιμοποίησε ιεραρχικά μεγέθη σωματιδίων σε ένα σύστημα TiO_2 ακρυλικών-νανοσωματιδίων για την αύξηση της ηλιακής αντανάκλασης. Μια λεπτή επικάλυψη νανοσωματιδίων (~2nm) κατασκευάστηκε για να μειώσει τα αποτελέσματα φόρτισης. Οι σχεδιασμένοι ιεραρχικοί συνδυασμοί μεγεθών σωματιδίων που κυμαίνονται μεταξύ 50 και 800 nm κατόρθωσαν 91% ηλιακής ανακλαστικότητας, η οποία ήταν υψηλότερη από το ποσοστό μονού μεγέθους για 100 nm που ήταν 78% και για 400 nm 88%. Σε σύγκριση με οποιαδήποτε σωματίδια ενός μεγέθους, τα σωματίδια

ιεραρχικού μεγέθους μπορούν αποτελεσματικά να έχουν διασπορά σε ένα ευρύ φάσμα, το οποίο μπορεί επίσης να εξοικονομήσει το κόστος κατασκευής λόγω της μικρότερης ανάγκης για ακριβή έλεγχο του μεγέθους των σωματιδίων. Επιπλέον, για την ομοιογενή ρουτίλιου ή την πολυμερή ανάταση με χρωστικές δομή, η ηλιακή ανάκλαση θα μπορούσε να βελτιστοποιηθεί με τη ρύθμιση του μεγέθους των χρωστικών ουσιών, το οποίο θα επηρεάσει τους αποτελεσματικούς συντελεστές διασποράς ανά διάρκεια μονάδας. Φαίνεται ότι οι βοηθητικές χρωματισμένες επιστρώσεις με 10% σωματίδια ανά κλάσμα όγκου μπορούν να δώσουν τιμές ηλιακής ανάκλασης της τάξης του 75% .

Ο Qi το 2017 σύγκρινε τις επιδόσεις ψύξης τεσσάρων τύπων TiO_2 σε συνδυασμό με πολύ(ακρυλονιτρίλιο-στυρόλιο-ακρυλίου) (ASA) ρητίνη. Όλα τα υβριδικά υλικά παρουσιάζουν υψηλή θερμική εκπομπή πάνω από 0,86. Η προσθήκη σωματιδίων TiO_2 μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ηλιακή και την NIR αντανάκλαση, μειώνοντας τη θερμοκρασία της ρητίνης ASA έως και 10 °C κάτω από φυσιολογικές συνθήκες και τους 34 °C στη δοκιμή θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου. Μεταξύ διαφορετικών σωματιδίων TiO_2 , τα σωματίδια ρουτίλιου TiO_2 έχουν υψηλότερο δείκτη διάθλασης και παρουσιάζουν καλύτερη NIR και ηλιακή αντανάκλαση από την ανάταση. Πιο συγκεκριμένα, τα σωματίδια του υβριδικό υλικό από υδρόφοβο ρουτίλιο TiO_2 (5 wt%) και η ASA έχουν θερμική εκπομπή 0,87 στην περιοχή των 8-13 μm , των οποίων τα άριστα χαρακτηριστικά της αντοχής στο νερό τα καθιστά ικανά για τις αυστηρές απαιτήσεις στο εξωτερικό περιβάλλον (Qi et al. 2017).

Διοξείδιο του χαφνίου (HfO_2)

Το HfO_2 έχει χαμηλή απορρόφηση υπεριώδους ακτινοβολίας και χρησιμεύει ως ένα υλικό υψηλού δείκτη, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της ηλιακής ανάκλασης, ενώ το οπτικά διαφανές SiO_2 μπορεί να χρησιμεύσει ως το στρώμα χαμηλού δείκτη. Ωστόσο, η χρήση του HfO_2 δεν είναι απαραίτητη και μπορεί να αντικαθίσταται με ένα λιγότερο ακριβό υλικό όπως το TiO_2 . Το HfO_2 εμφανίζει επίσης μη μηδενική εκπομπή και απορρόφηση μέσω του ατμοσφαιρικού παραθύρου (8-13 mm μήκος κύματος) (Bright et al., 2012).

Άλλα κρύσταλλα

Μερικοί κρύσταλλοι εμφανίζουν δυνατότητες ψύξης στις εφαρμογές RC. Ο Xu το 2018 συνέθεσε υδροθερμικά ένα νέο κρύσταλλο $\text{Mg}_{11}(\text{HPO}_3)_8(\text{OH})_6$. Ο κρύσταλλος θα μπορούσε να διαλύσει αποτελεσματικά τη θερμότητα στο διάστημα λόγω του ότι μεταξύ των 2,5 και 25 μm παρουσιάζει 87,57% εκπομπή και αντανάκλα το μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας φωτός που φτάνει το 88,04% μεταξύ των 0,2 και 2,5 μm . Σε μία δοκιμή ψύξης κάτω από άμεσο ηλιακό φως, η επίστρωση $\text{Mg}_{11}(\text{HPO}_3)_8(\text{OH})_6$ μπορεί να είναι 6 έως 8°C μικρότερη από την Al-foil, και 2 έως 4°C χαμηλότερη από τα προϊόντα ηλιακής αντανάκλασης που περιέχουν CaCO_3 καθώς επίσης και TiO_2 (Xu et al. 2018).

4.3 Πίσω ανακλαστήρας (στρώμα καθρέφτη)

Διάφορα υποστρώματα έχουν σημαντικές επιδράσεις στη φασματική εκπομπή των ψυχρών επιστρωμάτων. Η εκπομπή μιας δομής RC αυξάνεται σταδιακά με τη φθίνουσα αντανάκλαση του υποστρώματος. Διαφορετικός από το ανακλαστικό στρώμα υλικού, ο πίσω ανακλαστήρας υπάρχει πιο συχνά στις δομές RC. Εξαιρετικά ανακλαστικό μέταλλο, όπως το αλουμίνιο (Al) (Suryawanshi and Lin, 2009), το ασήμι (Ag) και ο χαλκός (Cu) (Cunha et al., 2020) είναι τυπικοί πίσω ανακλαστήρες. Το αλουμίνιο έχει υψηλότερη μέση ανακλαστικότητα από το ασήμι, που δείχνει μια αυξημένη απορρόφηση στην υπεριώδη ακτινοβολία. Το στρώμα με ασήμι θα μπορούσε να είναι πιο αποτελεσματικό και να επιτύχει υψηλότερη ανακλαστικότητα στο ορατό φάσμα όταν συνδυάζεται με περιοδικά επίπεδα υψηλού δείκτη-χαμηλού δείκτη.

Ο Bao το 2017 πρότεινε μία επεκτάσιμη διπλοστρωματική επίστρωση με SiO_2 , TiO_2 , και νανοσωματίδια SiC για την επίτευξη επιλεκτικών ακτινοβολητικών ιδιοτήτων (Bao et al., 2017).

Οι διπλοστρωματικές επιστρώσεις μπορούν να μειώσουν τη θερμοκρασία μίας σκοτεινής επιφάνειας κατά 30 °C ή περισσότερο κατά τη διάρκεια της ημέρας και να δροσίσουν ένα φύλλο αλουμινίου κατά 5°C τη νύχτα και κατά 8°C κατά τη διάρκεια της ημέρας. Εν τω μεταξύ ο συνδυασμός $\text{TiO}_2 + \text{SiC}$ και ο $\text{TiO}_2 + \text{SiO}_2$ μπορούν να δροσίσουν το υπόστρωμα αλουμινίου πολλούς βαθμούς ενώ αυτό θερμαίνεται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία και να είναι 5°C κάτω από την θερμοκρασία αέρα κατά τη διάρκεια της νύχτας.

4.4 Υλικό μήτρας

Για εφαρμογές μεγάλης έκτασης, τα υλικά από μείγματα νανοσωματιδίων και πολυμερή υλικά είναι οι πρώτες επιλογές λόγω του χαμηλού κόστους και της τεχνολογίας κατασκευής (Fan et al., 2019; Liu et al., 2019c).

Ο Lallich το 2009 μοντελοποίησε τη μεταφορά ακτινοβολίας σε νανοπορώδες διοξείδιο του πυριτίου. Ο Xiao το 2019 χρησιμοποίησε μια μεμβράνη νανοϊνών (NFM) για να ενισχύσει την υπέρυθρη ακτινοβολία για την αποτελεσματική εφαρμογή του RC στο ανθρώπινο σώματος (Lallich et al. 2009; Xiao et al. 2019).

Τέτοια υφάσματα έχουν κατάλληλη επιλεκτική θερμική ακτινοβολία και υπέρυθρη απορρόφηση ώστε να επιτρέψουν την ακτινοβολία από το ανθρώπινο σώμα στο διάστημα. Η συσκευή RC διανέμει τυχαία σφαιρικά υπομικρόνια SiO_2 σε μία μεμβράνη νανοϊνών πολυαμιδίου 6 (PA6) και έχει υψηλότερη υπέρυθρη ακτινοβολία από ότι στην πυκνή μεμβράνη και από ένα παραδοσιακό ύφασμα. Έτσι, η προτεινόμενη μεμβράνη θα μπορούσε να είναι 0,4–1,7 °C πιο δροσερή από τα εμπορικά ενδύματα και 1.0–2.5 °C πιο δροσερή από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα κάτω από απομονωμένη θερμική συναγωγή και κατάσταση αγωγιμότητας, που δείχνει την άνεση θερμικής υγρασίας και την επαρκή διαπερατότητα του αέρα λόγω των μικροπόρων διασύνδεσης και τους νανοπόρους. Σε σύγκριση με την επίστρωση με βάση τη μικροδομή, ο απλός πολυμερισμός θα μπορούσε να είναι λιγότερο ακριβός. Ως εκ τούτου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μητρικό υλικό για μαζικές εφαρμογές. Η πολύ- (ακρυλονιτρίλιο-στυρόλιο-ακρυλικό) (ASA) ρητίνη επιλέχθηκε λόγω της εξαιρετικής αντοχής της στις καιρικές συνθήκες.

Για τις μικρο-σφαίρες SiO_2 που διανέμονται τυχαία στη δομή, το πολυμεθυλοϋδένιο (TPX) χρησιμοποιείται ως υλικό μήτρας λόγω του ότι είναι ελαφρύ και εύκολο να προσαρμοστεί σε καμπυλωτές επιφάνειες, δείχνοντας αμελητέο αντίκτυπο στη συνολική απόδοση. Τα υλικά με βάση τον άνθρακα είναι επίσης διασκορπισμένα σε ακρυλικό γαλάκτωμα ως σύνθετα υλικά. Ο Fan το 2019 εισήγαγε μία δομή διπλής στιβάδας που αποτελείται από ενσωματωμένα μικροσφαιρίδια SiO_2 μέσα σε επίστρωση αργύρου (FPI @ SiO_2 / Ag) και διαφανές φθοριωμένο πολυϊμίδιο. Το φύλλο FPI @ SiO_2 / Ag ντοπαρίστηκε με 3% κ.β. και κατείχε υψηλή εκπομπή ($0,94 \pm 0,03$ σε μήκη κύματος 8-13 μm) και υπερβολικά χαμηλή ηλιακή απορροφητικότητα ($0,07 \pm 0,02$), επιτυγχάνοντας μείωση της

θερμοκρασίας κατά 4,6 °C υπό άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Η προετοιμασία γίνεται μέσω μιας απλής διαδικασίας πολυμερισμού, το φύλλο είναι φθηνότερο από τη μικροδομή με επιστρώσεις (Fan et al. 2019).

4.5 Μονωτικό υλικό

Εκτός από τα επιφανειακά σχέδια με επιλεκτική εκπομπή, επιλεκτική ακτινοβολία μπορεί να επιτευχθεί με συγκεκριμένη μετάδοση μέσω του μονωτικού καλύμματος. Ο Kim και ο Lenert το 2018 διερεύνησαν διάφορα σχέδια υπέρυθρης θερμικής μόνωσης για RC που χρησιμοποιούνται κάτω από τις θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Επιτεύχθηκε εξαιρετική απόδοση RC με μείωση θερμοκρασίας 35 K συνδυάζοντας επιλεκτικά υψηλή διαφάνεια και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα στο ατμοσφαιρικό παράθυρο.

Στη συνέχεια, τα σύγκριναν με τις αποδόσεις των δομών με BaF₂, ZnS και πολυαιθυλένιο (PE). Μεταξύ αυτών, το BaF₂ παρουσίασε την καλύτερη απόδοση RC με μέγιστη ταχύτητα ψύξης έως ~ 120 W / m² και θερμοκρασία κορεσμού κάτω από τους 270 K. Αντίθετα, μπορεί να είναι ελαφρώς υψηλότερος ο ρυθμός μείωσης θερμοκρασίας στο ZnS σε υψηλότερες (πλησίον περιβάλλοντος) θερμοκρασίες. Ο Kou το 2017 εισήγαγε ένα πολυμερές- που μοιάζει με καθρέφτη- με πυρίτιο για παθητικό RC, όπου από πάνω προς τα κάτω τα στρώματα είναι πολύ-διμεθυλο-σιλοξάνιο, ένα ασημένιο στρώμα οπίσθιου ανακλαστήρα και ένα στρώμα συντηγμένου πυριτίου. Λόγω της απορρόφησης του PDMS και του πυριτίου, μια σχεδόν ενιαία εκπομπή μπορεί να βρεθεί σε μήκη κύματος IR μεγαλύτερα από 4,5 μm. Η δομή του RC έδειξε σχεδόν τέλεια αντανάκλαση εντός του ηλιακού φάσματος ως σχεδόν τέλειο μαύρο σώμα εντός της περιοχής IR, θα μπορούσε να μειώσει τη θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά 8,2 ° C υπό άμεση ηλιακή ακτινοβολία και κατά 8,4 ° C τη νύχτα. Αυτή η ικανότητα ψύξης υπερβαίνει τις νανοεπίπεδες δομές με απόθεση κενού κατά περίπου 3 °C. Η ψυκτική ισχύς κατά τη διάρκεια της ημέρας εκτιμάται ότι είναι περίπου 127 W / m². Η μεμβράνη πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας χρησιμοποιείται ευρέως σε συσκευές RC εξαιτίας της υψηλής μετάδοσής της στη συντριπτική πλειοψηφία της φασματικής περιοχής, η οποία επιτρέπει την ηλιακή ακτινοβολία και την υπέρυθρη θερμικής εκπομπή να διαπεράσουν (Kou et al., 2017).

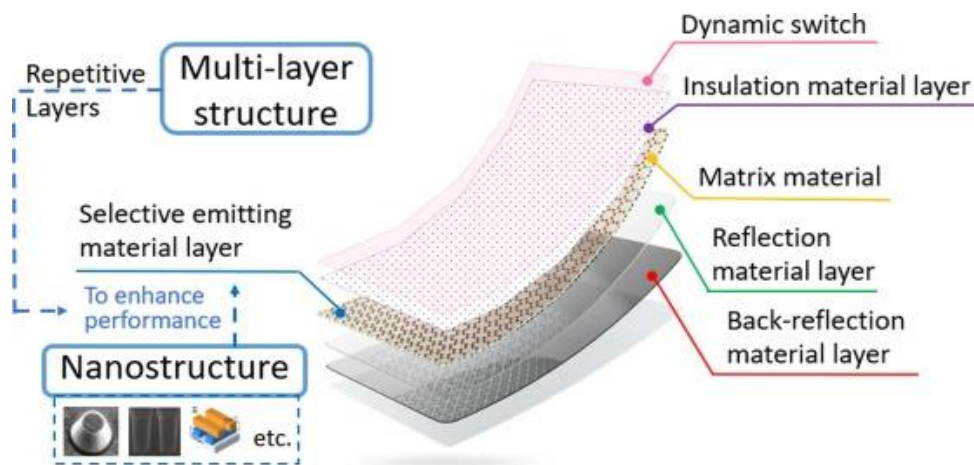
Για παράδειγμα, ο συνδυασμός μίας φωτοθερμικής μονάδας και μίας δομής RC περιλαμβάνει φιλμ πάχους 6 μm ως ‘παρμπρίζ’ και ένα κάλυμμα πάχους 2,8 mm για την προστασία του εκπομπού. Ο Leroy το 2019 ενσωμάτωσε τους υπάρχοντες πομπούς με ένα υλικό πολυαιθυλενίου (PEA). Λόγω της πολύ πορώδους δομής, το PEA έχει θερμική αγωγιμότητα τόσο χαμηλή όσο αυτή του αέρα και διασκορπίζεται έντονα σε μικρότερα μήκη κύματος (0,3-2,5 mm), φέρνοντας υψηλή ανάκλαση 0,922 και μετάδοση 79,9% (8–13 mm). Η δομή αυτή μπορεί να επιτύχει παθητική ψύξη έως και 13 °C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και ημερήσια ισχύ ψύξης 96 W / m² (Leroy et al., 2019).

4.6 Δυναμικός διακόπτης

Ο προσαρμοστικός έλεγχος του ευρυζωνικού φωτός είναι απαραίτητος για τη διαμόρφωση του φωτός και την οικοδόμηση της διαχείρισης ενέργειας, και μπορεί να επιτευχθεί από την αλλαγή φάσης υλικών, συμπεριλαμβανομένων θερμοχρωμικών υλικών (Ji et al., 2018; Ono et al., 2018; Taylor et al., 2017) , ηλεκτροχρωμικών υλικών (Mandal et al., 2018a) και υλικών που επιτυγχάνουν οπτική εναλλαγή μέσω βροχής (Mandal et al., 2019). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν θερμοχρωμικά υλικά όπως διοξείδιο του βαναδίου (VO₂) για την επίτευξη ενός αυτοπροσαρμοσμένου συστήματος RC. Ως επιβλαβές διαφορετικό θερμικό υλικό εκπομπής, το VO₂ μπορεί αλλάζει τη δομή του από μέταλλο σε μονωτή στους 68 °C, ρυθμίζοντας ενεργά την υπέρυθρη εκπομπή και αντιδρώντας στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Είναι ένα προσαρμοστικό υλικό τόσο για τις μεσαίες όσο και για τις πολύ υπέρυθρες περιοχές και μπορεί να εφαρμοστεί με μεγάλα ή πολύπλοκα υποστρώματα. Τα μεταλλικά VO₂ και V₂O₅ μοιράζονται την ίδια εκπομπή, ενώ έχουν σημαντικές διαφορές σε μεσαίες υπέρυθρες περιοχές εάν θερμανθούν πάνω από τη θερμοκρασία μετάβασης φάσης.

Με την υιοθέτηση των υλικών αλλαγής φάσης, το RC μπορεί αυτόματα να ενεργοποιείται ή να απενεργοποιείται με βάση τη θερμοκρασία του χωρίς να χρειάζεται επιπλέον ενέργεια για την εναλλαγή. Με ενσωματωμένο φασματικά επιλεκτικό φίλτρο VO₂, το σύστημα RC λειτουργεί με υψηλότερη θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία μετάβασης του VO₂ και κλείνει αυτόματα όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από το σημείο μετάβασης (Ji et al., 2018).. Χρησιμοποιώντας τον θερμικά εναλλάξιμο τρόπο συντονισμού Fabry-Perot για το ατμοσφαιρικό παράθυρο, ο Wu το 2018 εισήγαγε μια δομή με VO₂ / SiO₂ / VO₂, η οποία θα μπορούσε να

αλλάζει θερμικά την ισχύ RC της προτεινόμενης επιφανειακής επιφάνειας έως τέσσερις φορές θεωρητικά (Wu et al. 2018). Ο Taylor το 2017 πρότεινε έναν ασύμμετρο πομπό Fabry-Perot με ένα αδιαφανές υπόστρωμα αλουμινίου και λεπτές ταινίες VO₂. Όταν το διοξείδιο του βαναδίου είναι διηλεκτρικό κάτω από τους 68 °C, η μεμβράνη έχει λιγότερη απώλεια θερμικής ακτινοβολίας και υψηλή ανάκλαση. Όταν η θερμοκρασία ανεβαίνει στους 72 °C, το μεταλλικό VO₂ έχει μια κοιλότητα συντονισμού Fabry-Perot, η οποία παρέχει εκπομπή ευρείας ζώνης που συμβαίνει σε μήκος κύματος 10 mm και ως εκ τούτου, το φαινόμενο RC έχει αποτέλεσμα (Taylor et al. 2017).



Εικόνα 12:Απεικόνιση πολυστρωματικής δομής. (Πηγή: W.Li et al, 2020).

5. Μοντελοποίηση υλικών

5.1 Πειραματική διαδικασία

Το πείραμα βασίστηκε στο παράδειγμα planar silicon solar cell του Lumerical. Αυτό το παράδειγμα περιγράφει την πλήρη οπτικό-ηλεκτρονική προσομοίωση ενός απλού 1D επίπεδου ηλιακού κυττάρου πυριτίου χρησιμοποιώντας την μέθοδο FDTD. Το παράδειγμα διερευνά την επίδραση της θέρμανσης λόγω της οπτικής απορρόφησης στην ηλεκτρική απόδοση της ηλιακής κυψέλης. Υπολογίζει το προφίλ οπτικής απορρόφησης σε ενεργή περιοχή, σε ολόκληρο το ηλιακό φάσμα και ομαλοποιεί τα αποτελέσματα σε ηλιακό φάσμα AM1,5. Επίσης υπολογίζει το ρυθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από δεδομένα χωρικής απορρόφησης υποθέτοντας ότι κάθε φωτόνιο παράγει ένα ζεύγος οπών ηλεκτρονίων.

Το συγκεκριμένο ηλιακό κελί είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να λειτουργεί και να παράγει αποτελέσματα για διαφορετικές γεωμετρίες και υλικά. Επομένως υπήρχε η δυνατότητα αλλαγής υλικών, αλλαγής πάχους ενός στρώματος καθώς και η εναλλαγή των στρώσεων μεταξύ τους. Με βάση αυτή τη συνθήκη, έγιναν αρκετές δοκιμές με διαφορετικά υλικά και διαφορετικά πάχη και παρακάτω θα παρουσιαστούν αυτά που είχαν τα καλύτερα αποτελέσματα.

Κάθε δομή που σχεδιάστηκε αποτελείται από έναν συνδυασμό υλικών ώστε να είναι όσο τον δυνατόν περισσότερο αποτελεσματική. Κάθε υλικό έχει την δική του συμβολή στο τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει. Στην βάση δεδομένων του Lumerical υπάρχουν συγκεκριμένα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης νέου υλικού, με την προϋπόθεση όμως να προστεθούν και πειραματικά δεδομένα ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Επομένως η εργασία πραγματοποιήθηκε με τα διαθέσιμα υλικά τα οποία έχουν δοκιμαστεί ξανά.

Η επιλογή των υλικών έγινε έπειτα από μελέτη των χαρακτηριστικών κάθε υλικού. Συγκεκριμένα, το αλουμίνιο (Al) και το ασήμι (Ag) λειτουργούν ως στρώμα καθρέπτη- πίσω ανακλαστήρα. Το αλουμίνιο έχει υψηλότερη ανακλαστικότητα από το ασήμι, αλλά το ασήμι έχει αυξημένη απορρόφηση στην υπεριώδη ακτινοβολία και είναι πιο αποτελεσματικό όταν συνδυάζεται με στρώματα υψηλού και χαμηλού δείκτη. Χρησιμοποιήθηκαν και τα δύο στις δομές αλλά περισσότερο το ασήμι. Το διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2), το διοξείδιο του χαφνίου (HfO_2) και το διοξείδιο του

πυριτίου (SiO_2) είναι υλικά ανάκλασης. Το TiO_2 έχει υψηλό δείκτη διάθλασης και υψηλή ανακλαστικότητα. Το HfO_2 έχει χαμηλή απορρόφηση στην υπεριώδη ακτινοβολία αλλά είναι ένα ακριβό υλικό επομένως πολύ συχνά αντικαθίσταται από το TiO_2 . Τέλος το SiO_2 έχει χαμηλό κόστος, καλή ψυκτική απόδοση και καλύπτει όλο το φάσμα του ατμοσφαιρικού παραθύρου. Αυτά τα τρία υλικά χρησιμοποιούνται μόνα τους ή σε συνδυασμό μεταξύ τους. Επίσης τα μεταλλικά οξείδια όπως το Al_2O_3 συνεισφέρουν στην επιλεκτική εκπομπή της δομής. Το Al_2O_3 έχει αξιόπιστη απορρόφηση στο ατμοσφαιρικό παράθυρο ενώ δείχνει μηδενική απορρόφηση κοντά στο υπέρυθρο και στο ορατό φάσμα. Όλα τα υλικά που αναφέρθηκαν επιλέχθηκαν για τις δομές σε διάφορους συνδυασμούς.

Για να γίνει έλεγχος αν το αποτέλεσμα της προσομοίωσης μετά την αλλαγή υλικών και γεωμετρίας είναι ορθό, οι πρώτες δύο προσομοιώσεις που έγιναν υπήρχαν στην βιβλιογραφία επομένως και τα αποτελέσματα τους ήταν γνωστά. Ακολουθώντας έγινε σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων τους και από την στιγμή που ταίριαζαν αρκετά όπως θα δείτε και παρακάτω έγιναν περαιτέρω δοκιμές.

Για να προκύψει η γραφική παράσταση, η οποία μας δείχνει την συμπεριφορά της δοκιμής και μας οδηγεί σε ένα τελικό συμπέρασμα είναι απαραίτητη η χρήση ενός αλγορίθμου. Σε αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος υπήρχε στο παράδειγμα planar silicon solar cell (Παράρτημα). Έπειτα από αρκετές προσομοιώσεις με πολλούς συνδυασμούς υλικών επιλέχθηκαν οι έξι προσομοιώσεις με τα καλύτερα αποτελέσματα όπου παρουσιάζονται παρακάτω.

Προσομοίωση 1: διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2), διοξείδιο του πυριτίου(SiO_2), άργυρος (Ag) και πυρίτιο (Si).

Στην πρώτη προσομοίωση τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής: διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2), διοξείδιο του πυριτίου(SiO_2), άργυρος (Ag) και πυρίτιο (Si). Βλέποντας την δομή από κάτω προς τα πάνω το πάχος ανά κάποια στρώματα αλλάζει και στην συγκεκριμένη περίπτωση αυξάνεται. Στο κάτω μέρος βρίσκεται το πυρίτιο και ο άργυρος που λειτουργούν σαν υπόστρωμα με ίδιο πάχος $0.05\mu\text{m}$ και τα δύο. Ακριβώς από πάνω υπάρχουν τέσσερα διαδοχικά στρώματα με TiO_2 και SiO_2 με ίδιο πάχος $0.06\mu\text{m}$. Τέλος ακολουθούν άλλα τρία διαδοχικά στρώματα με TiO_2 και

SiO₂ με πάχος 0.3μm. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχουν κενά μεταξύ των στρωμάτων, κάθε στρώμα ακουμπάει πάνω στο άλλο.

Η διάταξη του μοντέλου είναι η εξής:

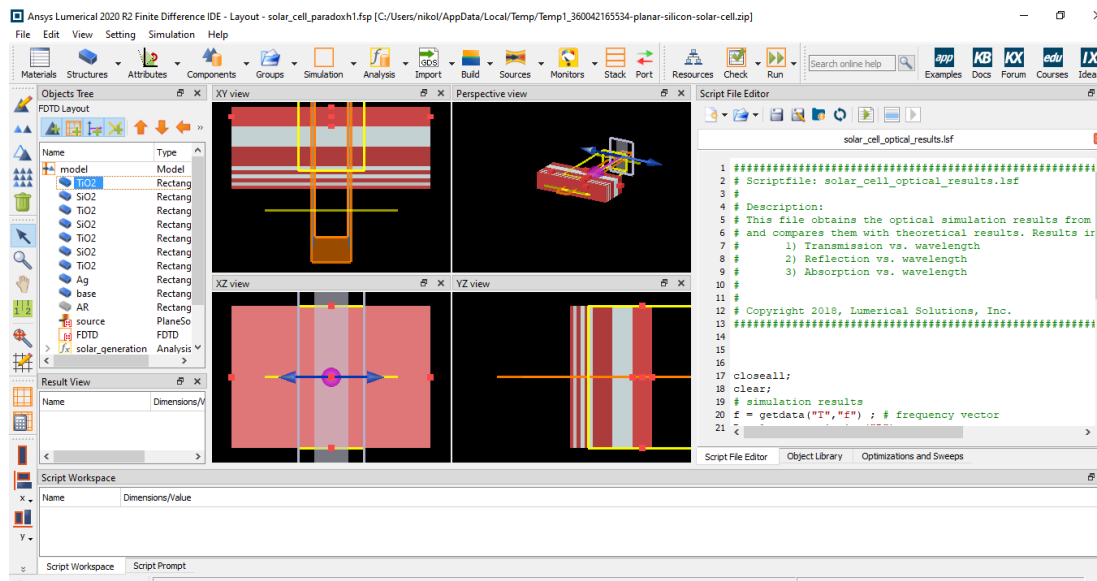
<u>Υλικό</u>	<u>Πάχος μm</u>
TiO ₂	0.3
SiO ₂	0.3
TiO ₂	0.3
SiO ₂	0.06
TiO ₂	0.06
SiO ₂	0.06
TiO ₂	0.06
Ag	0.05
Si	0.05

Πίνακας 2: Διάταξη προσομοίωσης 1.

Η δομή χτίστηκε στον άξονα y μέσα στην περιοχή ελέγχου και το κάθε στρώμα έχει τις δικές του συντεταγμένες που αλλάζουν μόνο σε αυτόν τον άξονα. Η δομή στον x άξονα βρίσκεται x=0, x_{spam}=3 και στον z άξονα βρίσκεται z=0, z_{spam}=3. Οι συντεταγμένες του άξονα y παρουσιάζονται στον πίνακα παρακάτω.

<u>Υλικό</u>	<u>Άξονας y</u>	
	y _{max}	y _{min}
TiO ₂	-0.535	-0.835
SiO ₂	-0.835	-1.135
TiO ₂	-1.135	-1.435
SiO ₂	-1.435	-1.495
TiO ₂	-1.495	-1.555
SiO ₂	-1.555	-1.615
TiO ₂	-1.615	-1.675
Ag	-1.675	-1.725
Si	-1.725	-1.775

Πίνακας 3: Συντεταγμένες y άξονα προσομοίωσης



Εικόνα 13: Η δομή της πρώτης προσομοίωσης στο Lumerical.

Προσομοίωση 2: διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), διοξείδιο του χαφνίου (HfO_2), άργυρος (Ag), τιτάνιο (Ti) και πυρίτιο (Si).

Στην δεύτερη προσομοίωση τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής: διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), διοξείδιο του χαφνίου (HfO_2), άργυρος (Ag), τιτάνιο (Ti) και πυρίτιο (Si). Η διάταξη αυτή υπάρχει στην βιβλιογραφία σε κυκλική δομή αλλά εδώ το πείραμα έχει γίνει με την ίδια διάταξη και υλικά αλλά σε ορθογώνια δομή.

Η διάταξη του μοντέλου είναι η εξής:

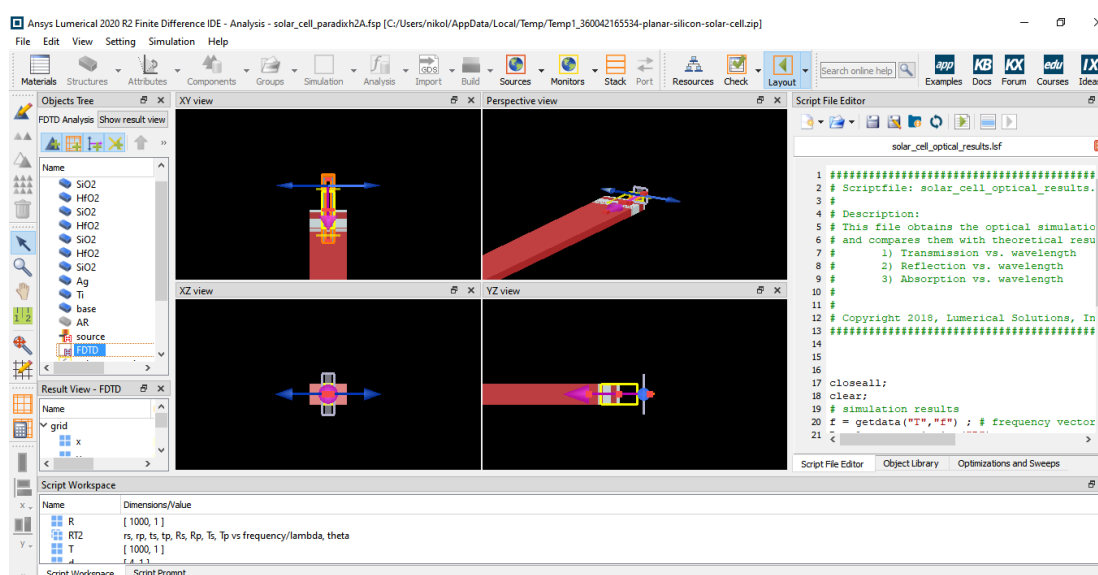
<u>Υλικό</u>	<u>Πάχος μm</u>
SiO_2	0.230
HfO_2	0.485
SiO_2	0.688
HfO_2	0.013
SiO_2	0.073
HfO_2	0.034
SiO_2	0.054
Ag	0.200
Ti	0.020
Si	750

Πίνακας 4: Διάταξη προσομοίωσης 2.

Η δομή χτίστηκε στον άξονα y μέσα στην περιοχή ελέγχου και το κάθε στρώμα έχει τις δικές του συντεταγμένες που αλλάζουν μόνο σε αυτόν τον άξονα. Η δομή στον x άξονα βρίσκεται $x=0$, $x_{\text{spam}}=3$ και στον z άξονα βρίσκεται $z=0$, $z_{\text{spam}}=3$. Οι συντεταγμένες του άξονα y παρουσιάζονται στον πίνακα παρακάτω.

<u>Υλικό</u>	<u>Άξονας y</u>	
	y_{max}	y_{min}
SiO ₂	0.022	-0.208
HfO ₂	-0.208	-0.693
SiO ₂	-0.693	-1.381
HfO ₂	-1.381	-1.394
SiO ₂	-1.394	-1.467
HfO ₂	-1.467	-1.501
SiO ₂	-1.501	-1.555
Ag	-1.555	-1.755
Ti	-1.755	-1.775
Si	-1.775	-751.775

Πίνακας 5: Συντεταγμένες άξονα y προσομοίωσης 2.



Εικόνα 14: Η δομή της δεύτερης προσομοίωσης στο Lumerical.

Προσομοίωση 3: οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3), διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2), διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και άργυρος (Ag).

Στην τρίτη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά υλικά αλλά με το ίδιο πάχος. Τα υλικά αυτά είναι οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3), διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2), διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και άργυρος (Ag).

Σε αυτή την παραδοχή η διάταξη του μοντέλου είναι η εξής :

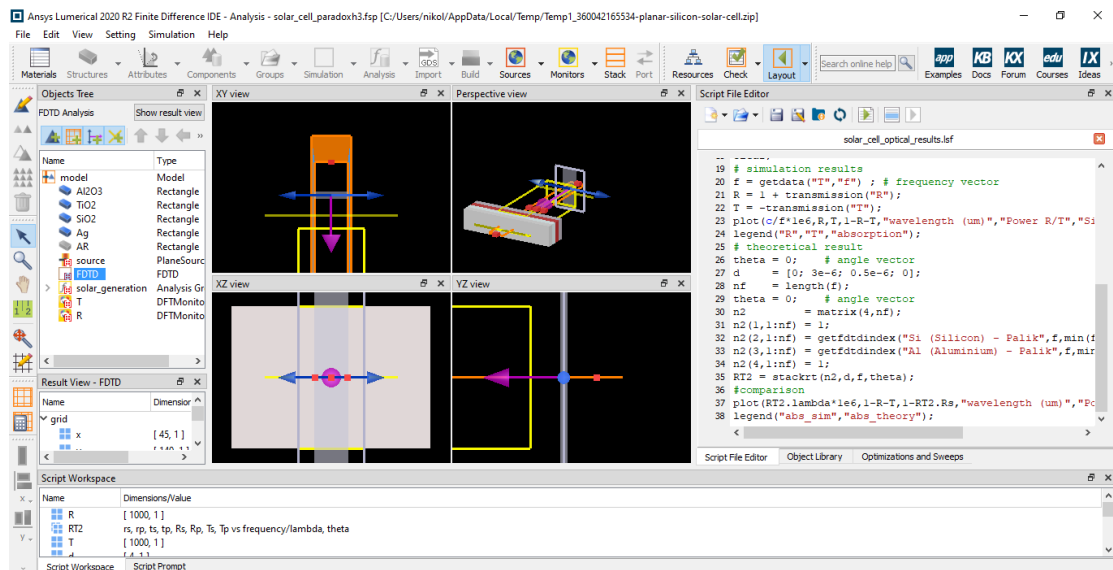
<u>Υλικό</u>	<u>Πάχος μm</u>
Al_2O_3	0.2
TiO_2	0.2
SiO_2	0.2
Ag	0.2

Πίνακας 6: Διάταξη προσομοίωσης 3.

Η δομή χτίστηκε στον άξονα y μέσα στην περιοχή ελέγχου και το κάθε στρώμα έχει τις δικές του συντεταγμένες που αλλάζουν μόνο σε αυτόν τον άξονα. Η δομή στον x άξονα βρίσκεται $x=0$, $x_{\text{spam}}=3$ και στον z άξονα βρίσκεται $z=0$, $z_{\text{spam}}=3$. Οι συντεταγμένες του άξονα y παρουσιάζονται στον πίνακα παρακάτω.

<u>Υλικό</u>	<u>Άξονας y</u>	
	y_{max}	y_{min}
Al_2O_3	-1.85	-1.65
TiO_2	-1.65	-1.45
SiO_2	-1.45	-1.25
Ag	-1.25	-1.05

Πίνακας 7: Συντεταγμένες άξονα y προσομοίωσης 3.



Εικόνα 15: Η δομή της τρίτης προσομοίωσης στο Lumerical.

Προσομοίωση 4: νιτρίδιο του πυριτίου (anti reflection coating) Si_3N_4 , διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και άργυρος (Ag).

Στην τέταρτη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τα υλικά νιτρίδιο του πυριτίου (anti reflection coating) Si_3N_4 , διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και άργυρος (Ag). Κάθε στρώμα έχει διαφορετικό πάχος.

Σε αυτή την παραδοχή η διάταξη του μοντέλου είναι η εξής :

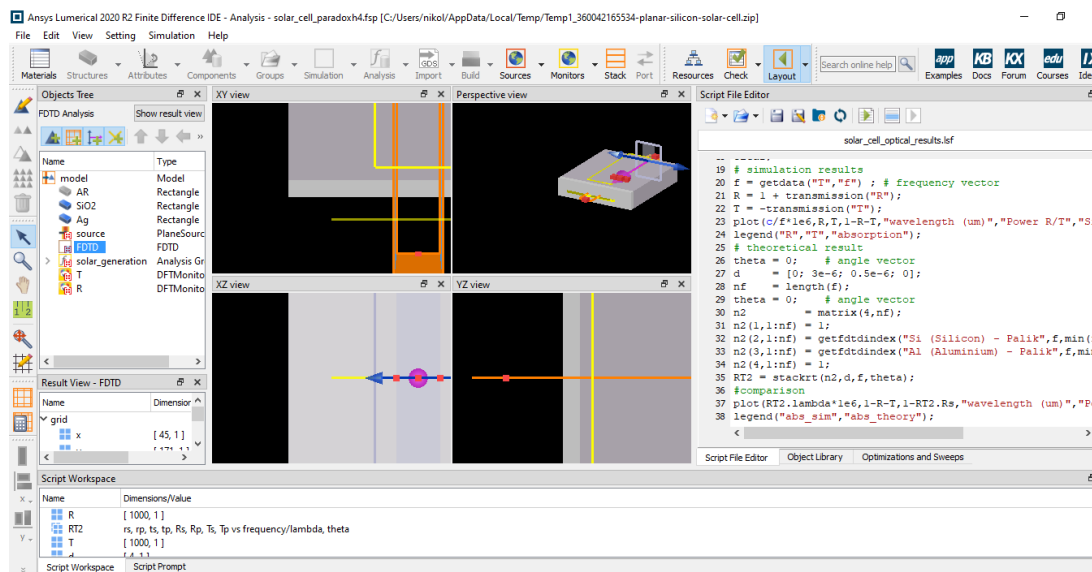
<u>Υλικό</u>	<u>Πάχος μm</u>
Si_3N_4	0.7
SiO_2	3.15
Ag	0.2

Πίνακας 8: Διάταξη προσομοίωσης 4.

Η δομή χτίστηκε στον άξονα y μέσα στην περιοχή ελέγχου και το κάθε στρώμα έχει τις δικές του συντεταγμένες που αλλάζουν μόνο σε αυτόν τον άξονα. Η δομή στον x άξονα βρίσκεται $x=0$, $x_{\text{spam}}=3$ και στον z άξονα βρίσκεται $z=0$, $z_{\text{spam}}=3$. . Οι συντεταγμένες του άξονα y παρουσιάζονται στον πίνακα παρακάτω.

Υλικό	Άξονας y	
	y _{max}	y _{min}
Si ₃ N ₄	1.57	1.5
SiO ₂	1.5	-1.65
Ag	-1.65	-1.85

Πίνακας 9: Συντεταγμένες άξονα y προσομοίωσης 4.



Εικόνα 16: Η δομή της τέταρτης προσομοίωσης στο Lumerical.

Προσομοίωση 5: οξείδιο του αργιλίου (Al₂O₃) και άργυρος (Ag).

Στην πέμπτη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν μόνο δύο υλικά με διαφορετικά πάχη. Τα υλικά είναι οξείδιο του αργιλίου (Al₂O₃) και άργυρος (Ag).

Σε αυτή την παραδοχή η διάταξη του μοντέλου είναι η εξής :

Υλικό	Πάχος μm
Al ₂ O ₃	3.15
Ag	0.2

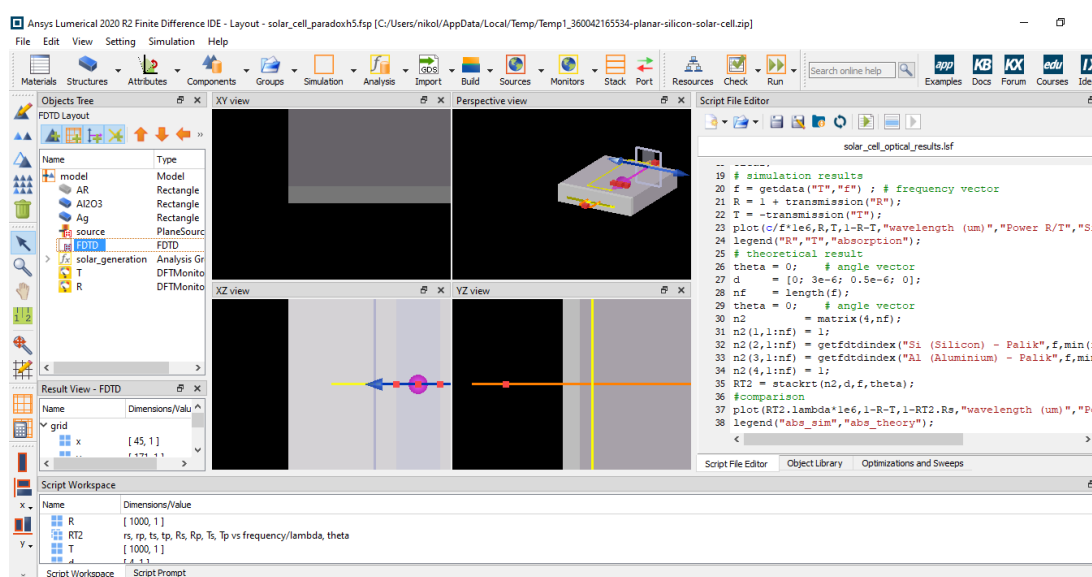
Πίνακας 10: Διάταξη προσομοίωσης 5.

Η δομή χτίστηκε στον άξονα y μέσα στην περιοχή ελέγχου και το κάθε στρώμα έχει τις δικές του συντεταγμένες που αλλάζουν μόνο σε αυτόν τον άξονα. Η δομή

στον x άξονα βρίσκεται $x=0$, $x_{\text{spam}}=3$ και στον z άξονα βρίσκεται $z=0$, $z_{\text{spam}}=3$. . Οι συντεταγμένες του άξονα y παρουσιάζονται στον πίνακα παρακάτω.

<u>Υλικό</u>	<u>Άξονας y</u>	
	y_{max}	y_{min}
Al_2O_3	1,57	-1,58
Ag	-1,58	-1,38

Πίνακας 11: Συντεταγμένες y άξονα προσομοίωσης 5.



Εικόνα 17: Η δομή της πέμπτης προσομοίωσης στο Lumerical.

Προσομοίωση 6: νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4), διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2) , διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και αργίλιο (Al).

Στην έκτη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα υλικά με διαφορετικά πάχη. Τα υλικά είναι νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4), διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2) , διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και αργίλιο (Al).

Σε αυτή την παραδοχή η διάταξη του μοντέλου είναι η εξής:

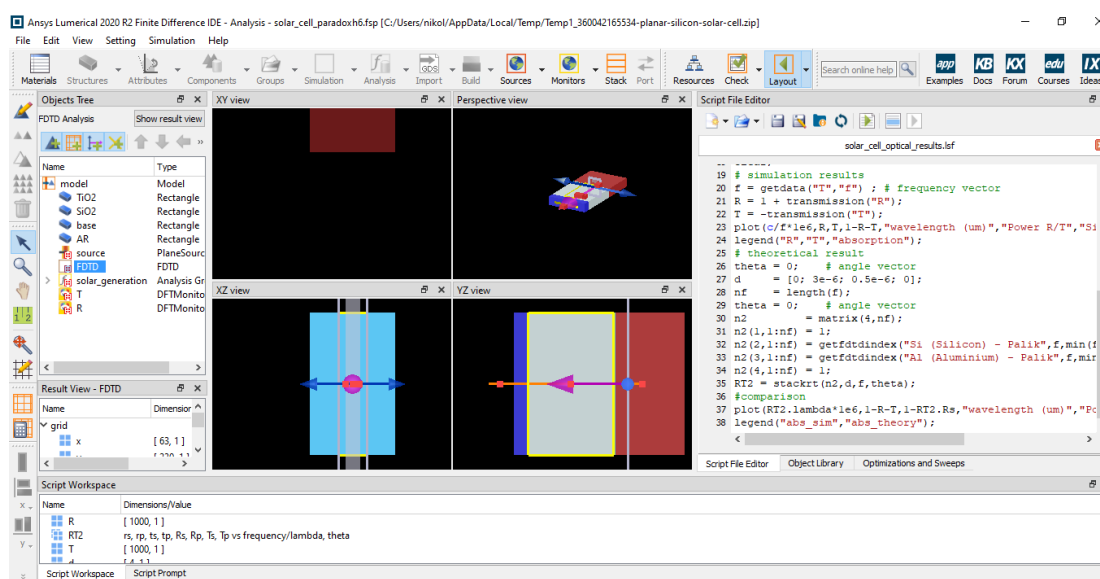
<u>Υλικό</u>	<u>Πάχος μm</u>
Si₃N₄	0.7
TiO₂	2.5
SiO₂	3
Al	0.5

Πίνακας 12: Διάταξη προσομοίωσης 6.

Η δομή χτίστηκε στον άξονα y μέσα στην περιοχή ελέγχου και το κάθε στρώμα έχει τις δικές του συντεταγμένες που αλλάζουν μόνο σε αυτόν τον άξονα. Η δομή στον x άξονα βρίσκεται $x=0$, $x_{\text{spam}}=3$ και στον z άξονα βρίσκεται $z=0$, $z_{\text{spam}}=3$. . Οι συντεταγμένες του άξονα y παρουσιάζονται στον πίνακα παρακάτω.

<u>Υλικό</u>	<u>Άξονας y</u>	
	y_{max}	y_{min}
Si₃N₄	1,57	0,87
TiO₂	0,87	-1,63
SiO₂	-1,63	-4,63
Al	-4,63	-5,13

Πίνακας 13: Συντεταγμένες y άξονα προσομοίωσης 6.



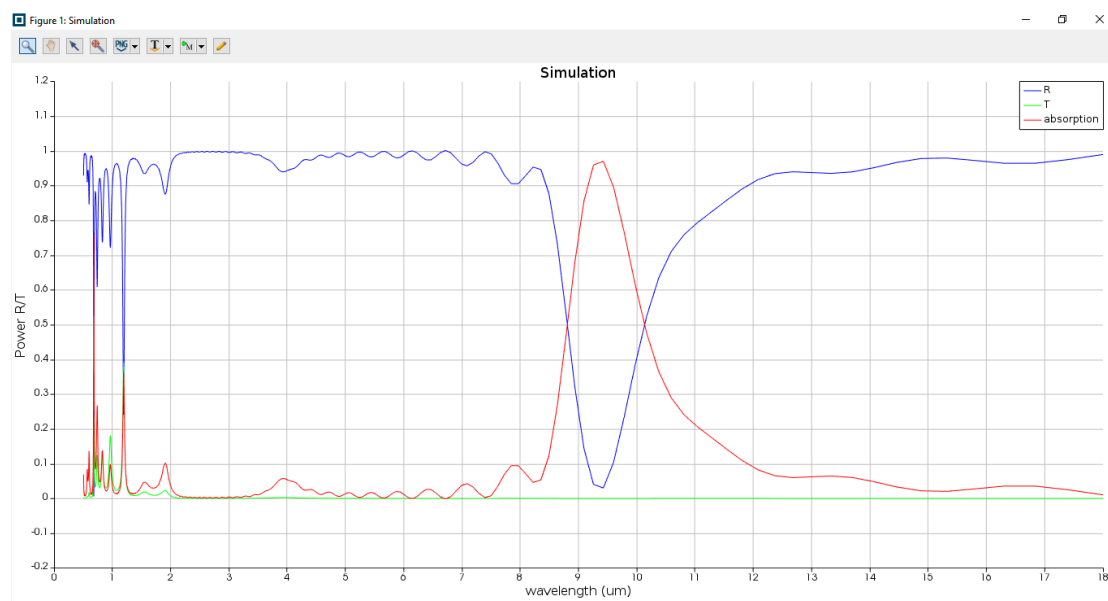
Εικόνα 18: Η δομή της έκτης προσομοίωσης στο Lumerical.

6. Αποτελέσματα- Συζήτηση

6.1 Αποτελέσματα

Μετά την ολοκλήρωση σχεδιασμού της κάθε δομής, έγινε προσομοίωση της κάθε δομής ξεχωριστά. Μετά το τέλος της προσομοίωσης προέκυπτε μία γραφική παράσταση η οποία απεικονίζει την συμπεριφορά της δομής σε ένα ευρύ φάσμα μήκους κύματος. Πιο συγκεκριμένα στην γραφική παράσταση με μπλέ χρώμα παρουσιάζεται η ανάκλαση, με πράσινο η διαπερατότητα και με κόκκινο χρώμα η απορρόφηση. Το μήκος κύματος κυμαίνεται από 0.5 μm έως 18 μm , το κομμάτι όμως που μας αφορά και θέλουμε να ελέγξουμε για να δούμε την αποτελεσματικότητα της δομής είναι στο διαφανές ατμοσφαιρικό παράθυρο που κυμαίνεται από τα 8 έως 13 μm . Σε αυτό το φάσμα θα πρέπει η απορρόφηση να εμφανίζει αρκετά ψηλές τιμές ενώ η ανάκλαση και η διαπερατότητα να είναι σχεδόν μηδενικές. Από την μελέτη της γραφικής παράστασης προκύπτουν τα αποτελέσματα.

Προσομοίωση 1: διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2), διοξείδιο του πυριτίου(SiO_2),
άργυρος (Ag) και πυρίτιο (Si).



Εικόνα 19: Διάγραμμα αποτελεσμάτων της πρώτης προσομοίωσης.

Η πρώτη προσομοίωση άρχισε να εμφανίζει υψηλή απορροφητικότητα από τα 8,5μm με την μεγαλύτερη τιμή στα 9,5μm όπου άρχισε και η πτωτική πορεία της καμπύλης όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της εικόνας 19. Η διαπερατότητα εμφανίζει μία μικρή διακύμανση από 0 έως 0.2 στα μήκη κύματος από 0.5 έως 2μm ενώ από τα 2μm μέχρι τα 18μm είναι μηδενική. Η ανάκλαση είναι αρκετά υψηλή αγγίζει το 1 από το 1,5μm έως 8,5 μm και μετά πάλι από τα 12 μm έως τα 18 μm. Στο κομμάτι 8,5 μm-12 μm μειώνεται αισθητά και πέφτει σε πολύ χαμηλή τιμή που φτάνει το μηδέν.

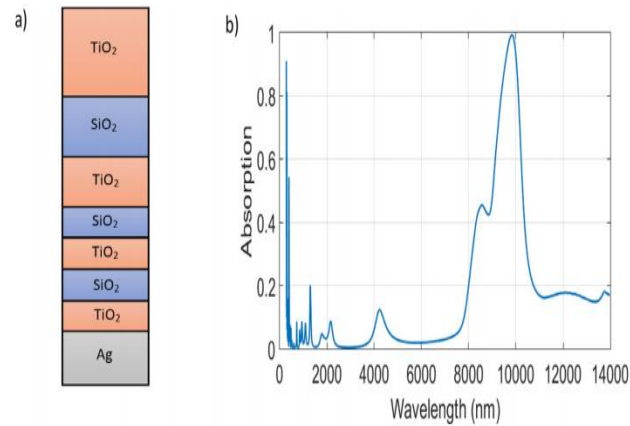


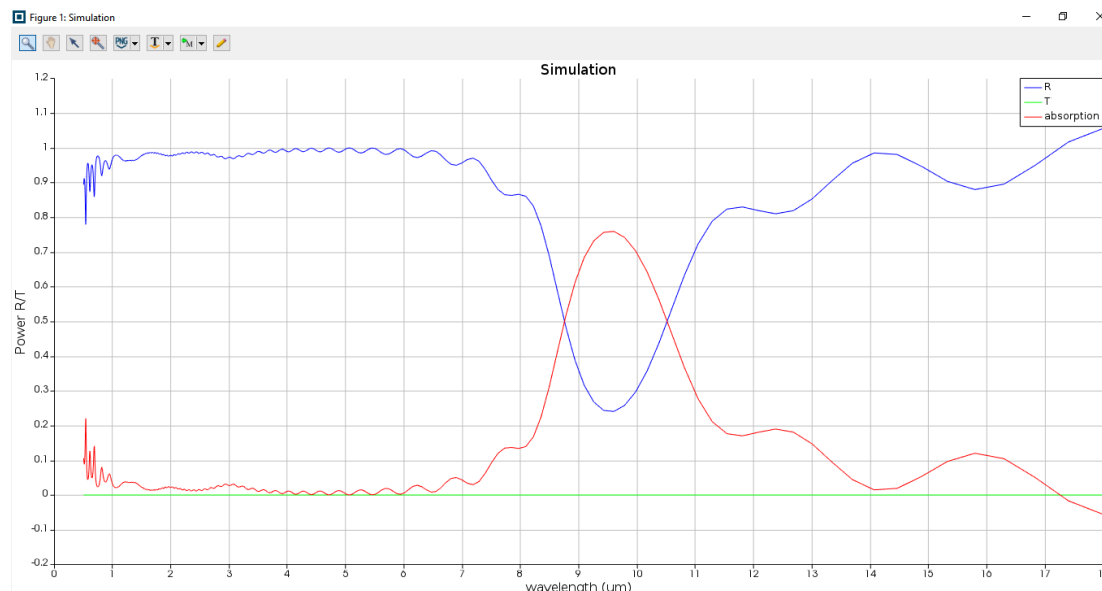
Fig. 2. a) Scheme for the implemented structure. On Si substrate 50 nm thick Ag is coated. Then, 4 layers of TiO₂ and SiO₂, each 60 nm thick, are added. Finally 3 layers of TiO₂ and SiO₂, each 300 nm thick are added. b) Emissivity of the implemented structure is plotted against wavelength. Structure has around 3% absorption when integrated from 280 nm to 4 μ m and it is around 45% in 8–13 μ m.

Εικόνα 20: Γραφική παράσταση απορρόφησης συναρτήσει μήκους κύματος από βιβλιογραφία. (Πηγή: M.A. Kecebas et al,2017).

Η ίδια ακριβώς προσομοίωση είχε πραγματοποιηθεί το 2017 από την M.A Kecebas τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στην εικόνα 20. Φαίνεται ότι η καμπύλη της απορρόφησης είναι όμοια με αυτή της εικόνας 19, παρουσιάζει αύξηση από 8–12 μ m, ενώ σε όλο το υπόλοιπο μήκος κύματος παραμένει κάτω από την τιμή 0.2.

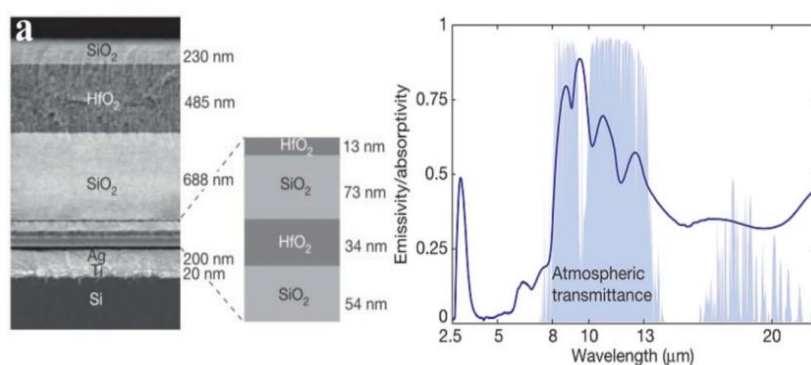
Με βάση αυτή τη σύγκριση προκύπτει το συμπέρασμα ότι το πείραμα που πραγματοποιήσαμε έχει σωστή βάση και μπορεί να συνεχιστεί η επεξεργασία για περαιτέρω δοκιμές.

Προσομοίωση 2: διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), διοξείδιο του χαφνίου (HfO_2), άργυρος (Ag), τιτάνιο (Ti) και πυρίτιο (Si).



Εικόνα 21: Διάγραμμα αποτελεσμάτων της δεύτερης προσομοίωσης.

Στην δεύτερη προσομοίωση η απορρόφηση αρχίζει να αυξάνεται από τα 7,5μm φτάνοντας την μέγιστη τιμή 0,75 όταν φτάνει στα 9,5μm ενώ από τα 11 μm και μετά παρουσιάζει σταδιακή μείωση. Από το διάγραμμα της εικόνας 21 παρατηρείται ότι η διαπερατότητα σε όλο το μήκος κύματος ισούται με μηδέν. Η ανάκλαση είναι υψηλή αγγίζοντας το 1 από το 0,5 μm έως τα 7,5 μm. Από εκεί και μετά παρουσιάζει μία πτώση φτάνοντας στην τιμή 0,25 και αυξάνεται ξανά από τα 11 μm μέχρι τα 18 μm σταδιακά.

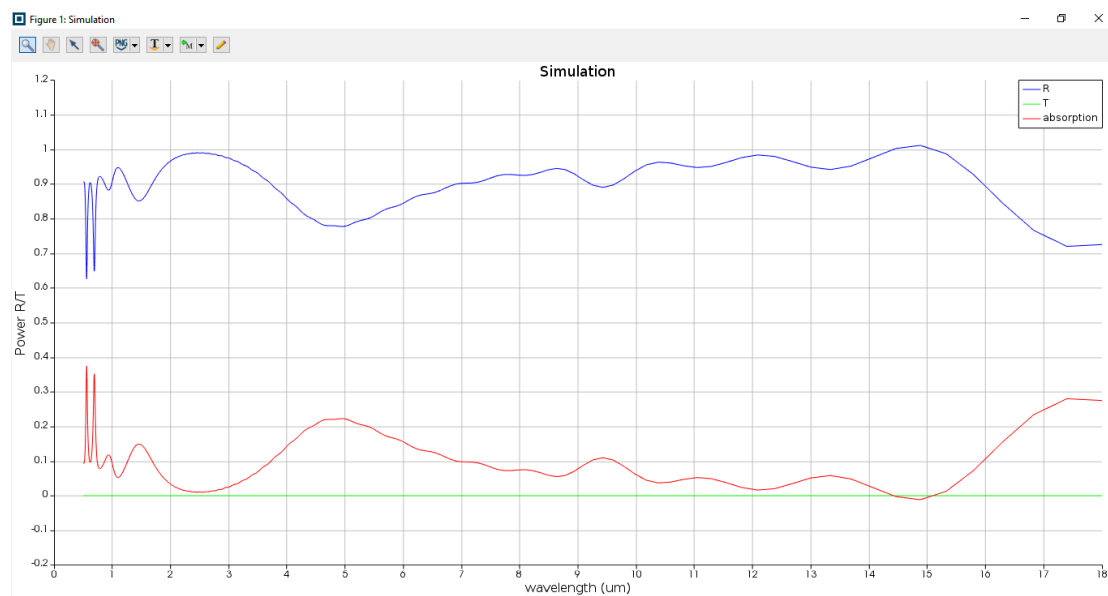


Εικόνα 22:Φωτονική δομή του ψύκτη και τα αποτελέσματα απορρόφησης. (Πηγή: K-T.Lin et al, 2021)

Παρόμοια προσομοίωση σε κυκλική δομή όμως είχε πραγματοποιηθεί από τους Aaswath P. Raman, Marc Abou Anoma, Linxiao Zhu, Eden Rephaeli και Shanhui Fan. Όπως φαίνεται στην εικόνα 22 η απορρόφηση είναι υψηλή από τα 8 μm έως τα 13 μm σημειώνοντας την μεγαλύτερη τιμή γύρω στα 9 μm με μέγιστη τιμή το 0,90.

Υπάρχει μια μικρή απόκλιση μεταξύ των δύο πειραμάτων που ίσως οφείλεται στην γεωμετρία της δομής. Η παραδοχή έγινε σε ορθογωνική δομή σε όλα τα στρώματα ενώ το πείραμα από την βιβλιογραφία έγινε σε κυκλική δομή, επομένως τα αποτελέσματα είναι λογικό να έχουν μία μικρή απόκλιση.

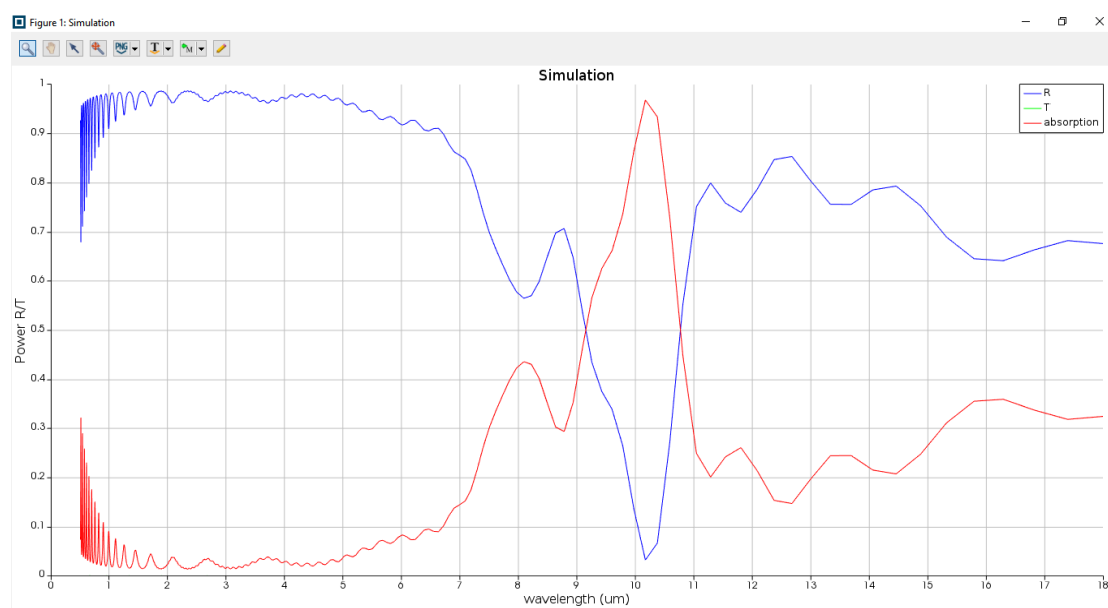
Προσομοίωση 3: οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3), διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2), διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και άργυρος (Ag).



Εικόνα 23: Διάγραμμα αποτελεσμάτων της τρίτης προσομοίωσης.

Στην τρίτη προσομοίωση όλα τα στρώματα είχαν το ίδιο πάχος και χρησιμοποιήθηκε ένα υλικό που δεν είχε χρησιμοποιηθεί στις προηγούμενες προσομοιώσεις. Η διαπερατότητα είναι μηδενική σε όλο το μήκος κύματος. Η απορρόφηση κυμαίνεται σε όλο το μήκος κύματος σε χαμηλές τιμές ενώ αντίθετα η ανάκλαση είναι υψηλή.

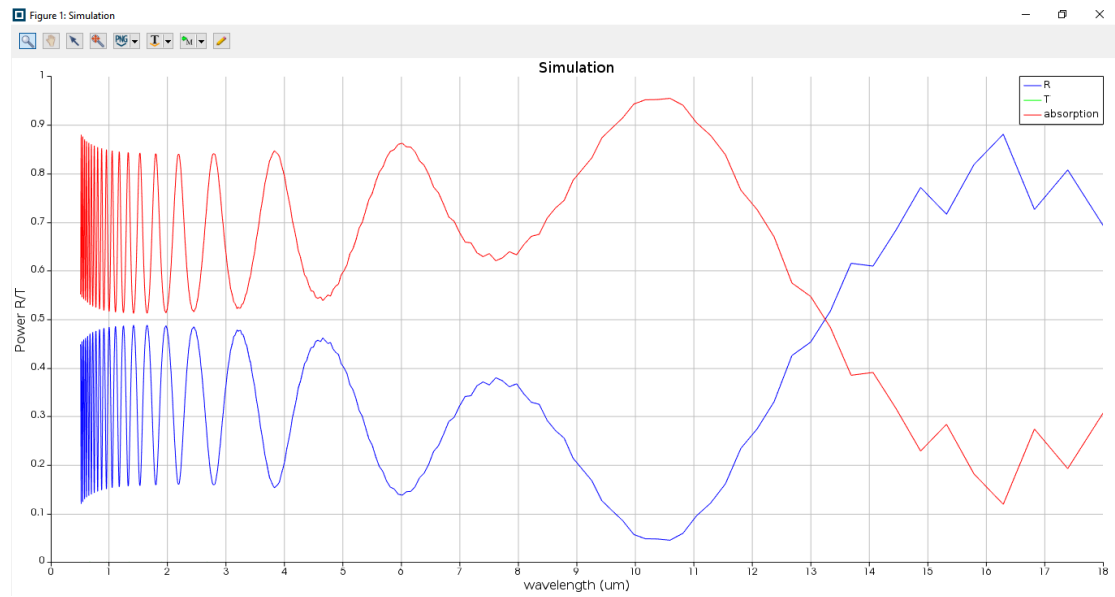
Προσομοίωση 4: νιτρίδιο του πυριτίου (anti reflection coating) Si_3N_4 , διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και άργυρος (Ag).



Εικόνα 24: Διάγραμμα αποτελεσμάτων της τέταρτης προσομοίωσης.

Στην τέταρτη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το υλικό νιτρίδιο του πυριτίου που δρά ως αντι-ανακλαστικό στρώμα. Η καμπύλη της απορρόφησης έχει μία αυξητική συμπεριφορά από τα 7μm με κάποιες διακυμάνσεις φτάνοντας σχεδόν την ολική απορρόφηση στα 10,1 μm. Η διαπερατότητα έχει σχεδόν μηδενική τιμή σε όλο το μήκος κύματος. Η ανάκλαση είναι υψηλή στο μήκος κύματος από 0,5-8,5 μm και από τα 11-18 μm, παρουσιάζοντας μείωση η οποία φτάνει το μηδέν τα 8,5-11 μm όπως φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 24.

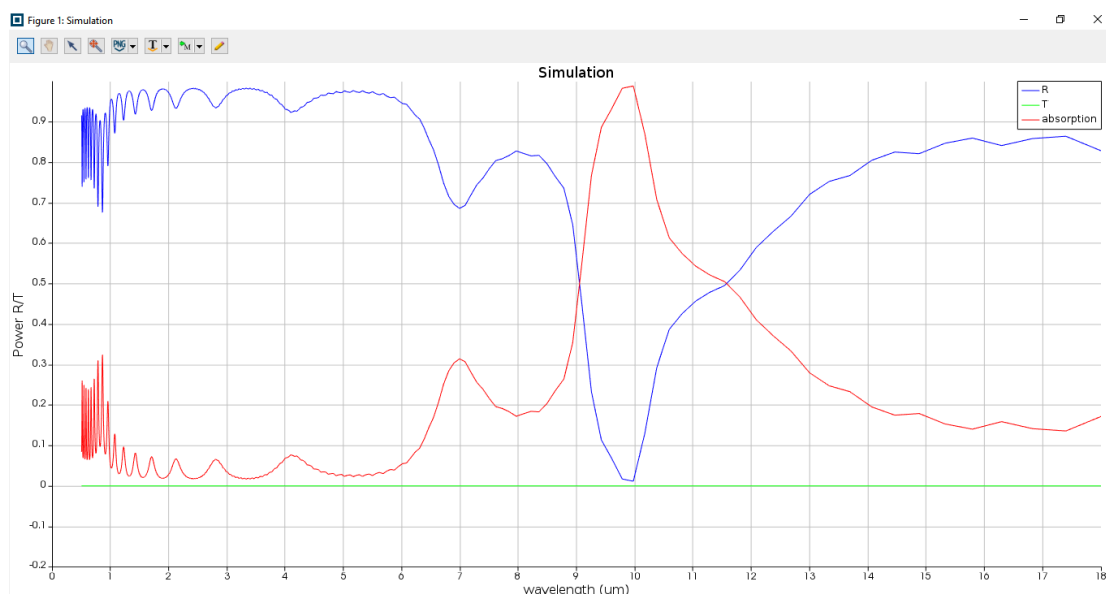
Προσομοίωση 5:οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3) και άργυρος (Ag).



Εικόνα 25: Διάγραμμα αποτελεσμάτων της πέμπτης προσομοίωσης.

Στην πέμπτη προσομοίωση η καμπύλη της απορρόφησης βρίσκεται σε ψηλές τιμές άνω του 0.5 από τα 0 έως τα 13μm. Από τα 8 έως τα 12μm αυξάνεται φτάνοντας την μέγιστη τιμή του 0,95 στα 10,5μm. Η διαπερατότητα είναι σε όλο το μήκος κύματος ίση με το μηδέν ενώ η ανάκλαση είναι υψηλά από τα 14μm και μετά.

Προσομοίωση 6: νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4), διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2), διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και αργίλιο (Al).



Εικόνα 26:Διάγραμμα αποτελεσμάτων της έκτης προσομοίωσης.

Στην τελευταία προσομοίωση η καμπύλη της απορρόφησης αρχίζει να ανεβαίνει από τα 9μm φτάνοντας την μέγιστη τιμή 1 στα 10μm όπου από εκεί και μετά η καμπύλη παίρνει φθίνουσα πορεία. Η ανάκλαση όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα της εικόνας 26 είναι αρκετά υψηλή έως τα 9μm έπειτα μειώνεται και ξανά αυξάνεται από τα 13μm και μετά. Η διαπερατότητα είναι μηδενική σε όλο το μήκος κύματος.

6.2 Συζήτηση

Οι προσομοιώσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω ήταν αυτές που εμφάνισαν τα καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις υπόλοιπες. Οι πρώτες δύο προσομοιώσεις αποτελούνταν από πολλά στρώματα σε σχέση με τις υπόλοιπες τέσσερις που είχαν λιγότερα στρώματα. Τα υλικά SiO_2 και TiO_2 χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις 1,3 και 6. Στην 1 χρησιμοποιήθηκαν πολλαπλές φορές ενώ στην 3 και 6 από μία φορά. Εκτός από την προσομοίωση 3 όλες οι άλλες είχαν καλή συμπεριφορά στα 8-13μm.

Οι προσομοιώσεις 3 και 6 είναι παρόμοιες αλλά παρουσιάζουν πολύ διαφορετικά αποτελέσματα. Επομένως αφού η τρίτη προσομοίωση δεν απέδωσε ίσως οφείλεται ο συνδυασμός με το Al_2O_3 .

Στην πέμπτη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τα υλικά που είχαν χρησιμοποιηθεί και στην τρίτη με την διαφορά ότι δεν τοποθετήθηκαν τα ενδιάμεσα στρώματα. Η πέμπτη παρουσίασε καλύτερα αποτελέσματα.

Στην έκτη και τέταρτη προσομοίωση η δομή μοιάζει αρκετά. Έχουν χρησιμοποιηθεί και στις δύο τα υλικά Si_3N_4 και SiO_2 . Και στα δύο γραφήματα παρατηρείται ότι η αύξηση της καμπύλης της απορρόφησης ξεκινάει από τα $8,5\mu\text{m}$ αλλά στο γράφημα της έκτης προσομοίωσης παραμένει υψηλό για παραπάνω μήκος κύματος. Φτάνει μέχρι τα $13\mu\text{m}$ με τιμή 0,3 ελάχιστα βελτιωμένη σε σχέση με την τέταρτη που στα $13\mu\text{m}$ η τιμή είχε πέσει στα $0,2\mu\text{m}$.

Με εξαίρεση την τρίτη προσομοίωση, όλες οι άλλες παρουσίασαν μία έντονη αύξηση της απορρόφησης στο παράθυρο 8- $13\mu\text{m}$. Γεγονός που σημαίνει ότι τα υλικά που επιλέχθηκαν και ο σχεδιασμός της δομής ήταν αρκετά κοντά με αυτή ενός ακτινοβολούμενου ψύκτη.

7. Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Σε αυτή την εργασία παρουσιάστηκαν έξι διαφορετικές δομές για ακτινοβολούμενη ψύξη . Κάθε μία από αυτές είχε διαφορετική συμπεριφορά όσον αφορά την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας . Αυτό οφείλεται στα διαφορετικά υλικά, τα διαφορετικά πάχη αλλά και τις διαφορετικές θέσεις κάθε υλικού στην εκάστοτε δομή.

Στην πρώτη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν σε ενναλάξ στρώματα το διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2) και το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) ενώ στην βάση τοποθετήθηκε άργυρος (Ag) και πυρίτιο (Si). Από το αποτέλεσμα που προέκυψε φαίνεται ότι η δομή αυτή έχει πολύ καλή απορρόφηση στο διαφανές παράθυρο μεταξύ 8-13 μm φτάνοντας σχεδόν την τιμή 1. Στην δεύτερη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τα υλικά διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2) και διοξείδιο του χαφνίου (HfO_2) και ως βάση ο άργυρος (Ag), το τιτάνιο (Ti) και το πυρίτιο (Si). Τα αποτελέσματα ήταν αρκετά καλά στο παράθυρο 8-13 μm φτάνοντας η απορρόφηση στην τιμή 0.76. Στην τρίτη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά υλικά αλλά με το ίδιο πάχος. Τα υλικά αυτά είναι οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3), διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2), διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και άργυρος (Ag). Η συμπεριφορά αυτής της δομής δεν ήταν καθόλου ικανοποιητική καθώς σε όλο το εύρος του μήκους κύματος οι τιμές της απορρόφησης ήταν πολύ χαμηλές της τάξης κάτω από το 0,4 . Στην τέταρτη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τα υλικά νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4) , διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και άργυρος (Ag). Τρία διαφορετικά υλικά από μία στρώση το καθένα. Το αποτέλεσμα φάνηκε πολύ ικανοποιητικό καθώς η απορρόφηση άρχισε να αυξάνεται από τα 7 μm και να φτάνει την μέγιστη τιμή δηλαδή 1. Η πέμπτη προσομοίωση ήταν η μόνη με μόλις δύο υλικά. Τα υλικά είναι οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3) και άργυρος (Ag). Παρόλα αυτά φάνηκε να συμπεριφέρεται αρκετά καλά φτάνοντας πολύ μεγάλες τιμές έως και 0,95 από τα 8-13 μm . Στην έκτη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τα υλικά νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4), διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2), διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και αργίλιο (Al). Και αυτή η δομή συμπεριφέρεται πολύ ικανοποιητικά στο διαφανές ατμοσφαιρικό παράθυρο μεταξύ 8-13 μm αγγίζοντας την μέγιστη τιμή.

Σε όλες τις δοκιμές εκτός από την συμπεριφορά της απορρόφησης στο σημείο 8-13μm παρατηρήθηκε και η σταθερότητα της απορρόφησης στο υπόλοιπο εύρος. Οι προσομοιώσεις 1,2 και 3 παρουσίασαν μια γενική σταθερότητα χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις, ενώ οι 4,5 και 6 είχαν αρκετές διακυμάνσεις σε διάφορα σημεία.

Με βάση τα παραπάνω και την περαιτέρω έρευνα όλης της εργασίας συμπεραίνουμε ότι η συμπεριφορά ενός υλικού μπορεί να αλλάξει από μία δομή σε άλλη. Αυτή η αλλαγή οφείλεται στον συνδυασμό των υλικών που θα επιλεγθούν να είναι μαζί σε μία δομή αλλά και στην θέση που θα τοποθετηθεί ένα υλικό, αν θα βρίσκεται δηλαδή χαμηλά ή ψηλά σε μία δομή. Επίσης παρατηρήθηκε ότι οι δομές που είχαν πολλά στρώματα υλικών είχαν καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με τις δομές λιγότερων υλικών.

Η σύγκριση των δομών ως προς την μεγαλύτερη απορροφητικότητα που εμφάνισαν, επομένως και καλύτερη απόδοση καθιστά πρώτες την πρώτη, την τέταρτη και την έκτη δομή. Στην συνέχεια λιγότερη καλή απόδοση παρουσίασαν η πέμπτη και η δεύτερη δομή. Τέλος, η δομή που δεν παρουσίασε ικανοποιητικά αποτελέσματα είναι η τρίτη καθώς είχε πολύ χαμηλές τιμές απορροφητικότητας επομένως δεν είναι λειτουργική για ακτινοβολούμενη ψύξη.

Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση της ψύξης μίας συσκευής είναι οι καιρικές συνθήκες. Στην εργασία αυτή ήταν σταθερές οι συνθήκες και δεν επηρέασαν το αποτέλεσμα όμως στην εφαρμογή εμποδίζουν την σωστή λειτουργία της εκάστοτε συσκευής. Το καλύτερο αποτέλεσμα ψύξης μπορεί να βρεθεί κάτω από ξηρό κλίμα και καθαρό ουρανό, ενώ η χειρότερη απόδοση κάτω από συννεφιά ή υγρασία. Επομένως, οι κατάλληλες δομές ακτινοβολούμενης ψύξης που θα έχουν σχεδιαστεί για υψηλή υγρασία θα επιταχύνουν τις εκτεταμένες εφαρμογές. Η τρέχουσα έρευνα είναι κυρίως θεωρητικοί υπολογισμοί ή πειραματικά δεδομένα από μικρά δοκιμαστικά δείγματα σε σύντομο χρονικό διάστημα σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία, καθιστώντας δύσκολο για άμεσες εφαρμογές σε διαφορετικά μέρη και κλίματα. Παρόλα αυτά υπάρχει αισιοδοξία ότι η έλευση νέων υλικών θα προωθήσει τις θεμελιώδεις μελέτες και εφαρμογές και ότι η δυνατότητα εφαρμογής θα διερευνηθεί περαιτέρω.

8.Βιβλιογραφία

S.Y. Jeong, C.Y. Tso, Y.M. Wong and Christopher Y.H. Chao, 2018. FDTD Simulations inspired by the Daytime Passive Radiative Cooling of the Sahara Silver Ant, COBEE2018-Paper026.

Wenxin Lia , Yanru Lib , Kwok Wei Shah, 2020. A materials perspective on radiative cooling structures for buildings. Solar energy, Volume 207, 1 September 2020, Pages 247-269.

Chia-Hsin Liu , Chyung Ay , Chun-Yu Tsai and Maw-Tien Lee. 2019. The Application of Passive Radiative Cooling in Greenhouses. Sustainability 2019, 11, 6703; doi:10.3390/su11236703.

Hua Baoa , Chen Yana , Boxiang Wangb , Xing Fangb , C.Y. Zhaob , Xiulin Ruan, 2017. Solar Energy Materials and Solar Cells 168 (2017) 78–84.

Zizhong Li, Qiyuan Chen, Yan Song, Bin Zhu and Jia Zhu, 2020. Fundamentals, Materials, and Applications for Daytime Radiative Cooling, Adv. Mater. Technol. 2020, 1901007.

Shanhui Fan, 2017. Thermal Photonics and Energy Applications, Joule 1, 264–273, October 11, 2017.

Linxiao Zhua, Aaswath P. Ramanb and Shanhui Fan, 2015. Radiative cooling of solar absorbers using a visibly transparent photonic crystal thermal blackbody, 12282–12287 | PNAS | October 6, 2015 | vol. 112 | no. 40.

Tian Li, Yao Zhai, Shuaiming He, Wentao Gan , Zhiyuan Wei , Mohammad Heidarinejad, Daniel Dalgo , Ruiyu Mi , Xinpeng Zhao , Jianwei Song , Jiaqi Dai , Chaoji Chen , Ablimit Aili , Azhar Vellore , Ashlie Martini , Ronggui Yang, Jelena

Srebric , Xiaobo Yin, Liangbing Hu, 2019. A radiative cooling structural material, Li et al., Science 364, 760–763 (2019) 24 May 2019.

Aaswath P. Raman, Marc Abou Anoma, Linxiao Zhu, Eden Rephaeli & Shanhui Fan, 2014. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight, 540 | NATURE | VOL 515 | 27 NOVEMBER 2014.

Byoungsu Ko , Dasol Lee , Trevon Badloe and Junsuk Rho, 2018. Metamaterial-Based Radiative Cooling: Towards Energy-Free All-Day Cooling, Energies 2019, 12, 89; doi:10.3390/en12010089.

Keng-Te Lin , Jihong Han , Ke Li , Chunsheng Guo , Han Lin , Baohua Jia, 2021. Radiative cooling: Fundamental physics, atmospheric influences, materials and structural engineering, applications and beyond, Nano Energy 80 (2021) 105517.

Jianheng Chen, Lin Lu, 2020. Development of radiative cooling and its integration with buildings: A comprehensive review, Solar Energy 212 (2020) 125–151.

Wang, S. , Zhang J. ,Liu L. , Yang F. , Zhang Y. , Evaluation of cooling property of high density polyethylene (HDPE)/titanium dioxide (TiO₂) composites after accelerated ultraviolet (UV) irradiation. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 2015, 143, 120–127. [CrossRef]).

Zeyghami M. , Goswami D.Y. , Stefanakos E. A review of clear sky radiative cooling developments and applications in renewable power systems and passive building cooling. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 2018, 178, 115–128. [CrossRef]).

Raman, A.P. , Anoma M.A. , Zhu, L. , Rephaeli E. , Fan S. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight. Nature 2014, 515, 540. [CrossRef]).

W. Wei, Y. Zhu, Q. Li, Z. Cheng, Y. Yao, Q. Zhao, P. Zhang, X. Liu, Z. Chen, F. Xu, Y. Gao, An Al₂O₃-cellulose acetate-coated textile for human body cooling, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 211 (2020), 110525.

T. Hoyt, E. Arens, H. Zhang, Extending air temperature setpoints: simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings, *Build. Environ.* 88 (2015) 89–96.

L. Cai, A.Y. Song, W. Li, P.C. Hsu, D. Lin, P.B. Catrysse, Y. Liu, Y. Peng, J. Chen, H. Wang, J. Xu, A. Yang, S. Fan, Y. Cui, Spectrally selective nanocomposite textile for outdoor personal cooling, *Adv. Mater.* 30 (2018), e1802152.

W. Li, Y. Shi, K. Chen, L. Zhu, S. Fan, A comprehensive photonic approach for solar cell cooling, *ACS Photonics* 4 (2017) 774–782.

E. Skoplaki, J.A. Palyvos, On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: a review of efficiency/power correlations, *Sol. Energy* 83 (2009) 614–624.

L. Zhu, A. Raman, K.X. Wang, M.A. Anoma, S. Fan, Radiative cooling of solar cells, *Optica* 1 (2014) 32–38.

C.Y. Tso, K.C. Chan, C.Y.H. Chao, A field investigation of passive radiative cooling under Hong Kong's climate, *Renew. Energy* 106 (2017) 52–61.

J. Mandal, Y. Fu, A. Overvig, M. Jia, K. Sun, N. Shi, H. Zhou, X. Xiao, N. Yu, Y. Yang, Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling, *Science* 362 (2018) 315–319.

Diatezua, D.M., Thiry, P.A., Dereux, A., Caudano, R., 1996. Silicon oxynitride multilayers as spectrally selective material for passive radiative cooling applications. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 40 (3), 253–259.

Yao Zhai, Yaoguang Ma, Sabrina N. David, Dongliang Zhao, Runnan Lou, Gang Tan, Ronggui Yang, Xiaobo Yin 2017. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling. *Science* 355, 1062–1066.

Chetan N. Suryawanshi, Taesam Kim, Chhiu-Tsu Lin. An instrument for evaluation of performance of heat dissipative coatings. *Review of Scientific Instruments* 2010, 81 (3) , 035105. <https://doi.org/10.1063/1.3359856>.

Muhammed Ali Kecebas, M. Pinar Menguc, Ali Kosar, Kursat Sendur. Passive radiative cooling design with broadband optical thin-film filters. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 2017, 198 , 179-186. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.03.046>.

Haining Ji, Dongqing Liu , Haifeng Cheng, Chaoyang Zhang, Lixiang Yang. Vanadium dioxide nanopowders with tunable emissivity for adaptive infrared camouflage in both thermal atmospheric windows. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 175 (2018) 96–101.

Thang Duy Dao, Anh Tung Doan, Dang Hai Ngo, Kai Chen, Satoshi Ishii, Akemi Tamanai, and Tadaaki Nagao. Selective thermal emitters with infrared plasmonic indium tin oxide working in the atmosphere. Vol. 9, Issue 6, pp. 2534-2544 (2019) <https://doi.org/10.1364/OME.9.002534>.

Kecebas, M.A., et al., Passive radiative cooling design with broadband optical thin-film filters. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017. 198: p. 179-186.

Vargas, W.E., Optimization of the diffuse reflectance of pigmented coatings taking into account multiple scattering. *Journal of Applied Physics* Volume 88, Issue 7, October 2000, Pages 4079-4084.

Zhikui Xu, Na Li, Defang Liu, Xia Huang, Junfeng Wang, Wengang Wu, Hui Zhang, Huatao Liu, Zhijie Zhang, Mingfeng Zhong. A new crystal $\text{Mg}_{11}(\text{HPO}_3)_8(\text{OH})_6$ for daytime radiative cooling. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 185 (2018) 536–541.

Sylvain Lallich ,Franck Enguehard ,Dominique Baillis. Experimental Determination and Modeling of the Radiative Properties of Silica Nanoporous Matrices. J.Heat Transfer. Aug 2009, <https://doi.org/10.1115/1.3109999>.

Jyotirmoy Mandal ,Sicen Du ,Martin Dontigny ,Karim Zaghbi ,Nanfang Yu ,Yuan Yang. $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$: A Visible-to-Infrared Broadband Electrochromic Material for Optical and Thermal Management.July 2018, <https://doi.org/10.1002/adfm.201802180>.

Jie Feng and Mattheos Santamouris. Numerical techniques for electromagnetic simulation of daytime radiative cooling: A review. AIMS Materials Science Volume 6, Issue 6, 1049–1064.

EPA, 2009b. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Cool Pavements.

Santamouris, M. (Ed.), 2001. Energy and Climate in the Urban Built Environment. James and James Science Publishers, London.

Santamouris, M., Papanikolaou, N., Livada, I., Koronakis, I., Georgakis, C., Argiriou, A., Assimakopoulos, D.N., 2001. On the impact of urban climate to the energy consumption of buildings. Solar Energy 70 (3), 201–216.

Pomerantz, M., Pon, B., Akbari, H., Chang, S.C., 2000a. The Effect of Pavements' Temperatures on Air Temperatures in Large Cities, LBNL Report-43442.

Doulos, L., Santamouris, M., Livada, I., 2001. Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. Solar Energy 77, 231–249.

Cambridge Systematics, Inc., 2005. Cool Pavements Draft Report.

Synnefa, A., Karlessi, T., Gaitani, N., Santamouris, M., Papakatsikas, D.N. Assimakopoulos., 2011. Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate. Building and Environment 46 (1), 38–44.

Kinouchi, T, Yoshinaka, T., Fukae, N., Kanda, M., 2004, Development of cool pavement with dark colored high albedo coating. In: Fifth Conference for the Urban Environment, Vancouver, Canada.

Golden, J.S., Carlson, J., Kaloush, K., Phelan, P., 2007. A comparative study of the thermal and radiative impacts of photovoltaic canopies on pavement surface temperatures. *Solar Energy* 81 (7), 872–883.

Yee K (1966) Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE T Antenn Propag* 14: 302–307. 1063 *AIMS Materials Science* Volume 6, Issue 6, 1049–1064.

Takayama Y, Klaus W (2002) Reinterpretation of the auxiliary differential equation method for FDTD. *IEEE Microw Wirel Co* 12: 102–104.

Liu V, Fan S (2012) S4: A free electromagnetic solver for layered periodic structures. *Comput Phys Commun* 183: 2233–2244.

Purcell EM, Pennypacker CR (1973) Scattering and absorption of light by nonspherical dielectric grains. *ASTROPHYS J* 186: 705–714.

Harrington RF (1993) *Field Computation By Moment Method*, New York: Wiley-IEEE Press.

Born M, Wolf E (2013) *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, 6 Eds., Oxford: Pergamon Press.

Shi S, Chen C, Prather DW (2004) Plane-wave expansion method for calculating band structure of photonic crystal slabs with perfectly matched layers. *J Opt Soc Am A* 21: 1769–1775.

Antos R, Veis M (2010) Fourier factorization with complex polarization bases in the plane-wave expansion method applied to two-dimensional photonic crystals. *Opt Express* 18: 27511–27524.

Van Roey J, Van der Donk J, Lagasse PE (1981) Beam-propagation method: analysis and assessment. *J Opt Soc Am A* 71: 803–810.

Kabir SMR, Rahman BMA, Agrawal A (2017) Finite element time domain method for photonics, In: Agrawal A, Benson T, De La Rue RM, et al. *Recent Trends in Computational Photonics*, Cham: Springer, 1–37.

Sadiku MNO (1989) A simple introduction to finite element analysis of electromagnetic problems. *IEEE T Educ* 32: 85–93.

John B. Schneider, 2010 *Understanding the FDTD Method*.

<https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/PHYS238/%CE%A5%CF%80%CE%BF%CF%83%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AD%CF%82%20%CF%83%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CE%B9%CF%8E%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82%202017-2018.pdf>

<https://www.energy.gov/energysaver/design/energy-efficient-home-design/cool-roofs>

<https://www.independent.co.uk/climate-change/news/obama-s-climate-guru-paint-your-roof-white-1691209.html>

<https://eecs.wsu.edu/~schneidj/uftdtd/>

<https://www.power-technology.com/features/future-energy-savers-radiative-cooling>

Βιβλιογραφία εικόνων

<https://sika.scene7.com/is/image/sika/glo-cool-roof-reflectance?wid=1280>

<https://kgreen.gr/wp-content/uploads/2019/06/%CE%BB%CE%B5%CF%85%CE%BA%CE%AE-%CE%BF%CF%81%CE%BF%CF%86%CE%AE.jpg>

<https://www.tanea.gr/2009/05/27/world/ta-aspra-spitia-swzoyn-ton-planiti/>

https://www.huffingtonpost.gr/entry/poso-meiono-en-telika-te-thermokratia-toe-spitioe-oi-leekes-taratses_gr_5cf13662e4b0e346ce7cfae7

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ad/U.S. Department of Energy - Science - 391 053 001 %289366745940%29.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ad/U.S._Department_of_Energy_-_Science_-_391_053_001_%289366745940%29.jpg)

9. Παράρτημα

Αλγόριθμος (planar silicon solar cell)

Scriptfile: solar_cell_optical_results.lsf

#

Description:

This file obtains the optical simulation results from solar_cell.fsp

and compares them with theoretical results. Results include:

1) Transmission vs. wavelength

2) Reflection vs. wavelength

3) Absorption vs. wavelength

#

#

Copyright 2018, Lumerical Solutions, Inc.

#####

#####

closeall;

clear;

simulation results

f = getdata("T","f") ; # frequency vector

R = 1 + transmission("R");

T = -transmission("T");

plot(c/f*1e6,R,T,1-R-T,"wavelength (um)","Power R/T","Simulation");

legend("R","T","absorption");

theoretical result

theta = 0; # angle vector

d = [0; 3e-6; 0.5e-6; 0];

nf = length(f);

theta = 0; # angle vector

```

n2 = matrix(4,nf);
n2(1,1:nf) = 1;
n2(2,1:nf) = getfddindex("Si (Silicon) - Palik",f,min(f),max(f));
n2(3,1:nf) = getfddindex("Al (Aluminium) - Palik",f,min(f),max(f));
n2(4,1:nf) = 1;
RT2 = stackrt(n2,d,f,theta);
#comparison
plot(RT2.lambda*1e6,1-R-T,1-RT2.Rs,"wavelength (um)","Power","Theory vs
simulation");
legend("abs_sim","abs_theory");

```