



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΚΑΙ
ΒΙΩΣΙΜΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΨΥΞΗ ΜΕ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΚΑΙΝΟΤΟΜΑ ΥΛΙΚΑ ΚΤΙΡΙΩΝ ΚΑΙ ΔΑΠΕΔΟΣΤΡΩΣΗΣ

ΜΑΡΙΑ ΜΕΣΣΑΡΙΤΑΚΗ

ΧΑΝΙΑ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2021

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΚΑΙ
ΒΙΩΣΙΜΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΨΥΞΗ ΜΕ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΕ ΚΑΙΝΟΤΟΜΑ ΥΛΙΚΑ ΚΤΙΡΙΩΝ ΚΑΙ ΔΑΠΕΔΟΣΤΡΩΣΗΣ

ΜΑΡΙΑ ΜΕΣΣΑΡΙΤΑΚΗ

Τριμελής Επιτροπή:

1. Κολοκοτσά Διονυσία (Επιβλέπουσα)
 2. Λαζαρίδης Μιχαήλ
 3. Τσούτσος Θεοχάρης
-

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ψύξη με ακτινοβολία είναι μια τεχνολογία παθητικής ψύξης που μπορεί να δροσίσει ένα χώρο χωρίς τη χρήση κάποιας εξωτερικής πηγής ενέργειας. Με τη χρήση κατάλληλων υλικών επιτυγχάνεται η αντανάκλαση του φωτός του ήλιου και ακτινοβολείται θερμότητα στο απώτερο διάστημα, το οποίο λειτουργεί σαν μια μεγάλη αποθήκη θερμότητας. Στόχος του φαινομένου είναι η ψύξη του υλικού και ό,τι αυτό περιβάλλει. Για το σκοπό αυτό μοντελοποιήθηκαν τρία διαφορετικά υλικά, στο περιβάλλον εργασίας της MATLAB και 11 διαφορετικές ατμόσφαιρες στο περιβάλλον εργασίας της MODTRAN. Πρώτο υλικό, μια επίστρωση που συγκροτείται από στρώσεις διοξειδίου του αφνίου (HfO_2) και διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2). Δεύτερο υλικό, μια επίστρωση πολυ(βινυλιδενο-φθοριούχο-συν-εξαφθοροπροπενίου) (P(VDF-HFP)). Και τρίτο υλικό, μια επίστρωση αποτελούμενη από δύο στρώσεις διοξειδίου του αλουμινίου (Al_2O_3) και άργυρο (Ag). Αφού μελετήθηκαν τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής επιλέχθηκαν τρεις αντιπροσωπευτικές μέρες, στις οποίες ελέγχθηκε η απόδοση των υλικών. Με την βοήθεια των απαραίτητων εξισώσεων υπολογίστηκε η ψυκτική ισχύς, καθώς και η θερμοκρασία του υλικού καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας για κάθε ένα από τα σενάρια μας. Αναλύθηκε η συμπεριφορά της θερμοκρασίας του κάθε υλικού σε διαφορετικές ατμόσφαιρες και πως αυτή μεταβάλλεται όταν αλλάζουν βασικά χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας, όπως η υγρασία.

ABSTRACT

Radiation cooling is a passive cooling technology that can cool a room without the use of an external energy source. With the use of suitable materials, the reflection of sunlight and the radiation of heat in the outer space is achieved, which functions as a large storehouse of heat. The purpose of the phenomenon is to cool the material and whatever surrounds it. For this purpose, three different materials were modeled in the MATLAB work environment and 11 different atmospheres in the MODTRAN work environment. The first material, a coating consisting of layers of hafnium dioxide (HfO_2) and silicon dioxide (SiO_2). Second material, a coating of poly (vinylidene-fluoride-co-hexafluoropropene) (P(VDF-HFP)) and the third material, a coating consisting of two layers of aluminum dioxide (Al_2O_3) and silver (Ag). After studying the meteorological data of the area, three representative days were selected, in which we would check the performance of the materials. With the help of the necessary equations the cooling power and the temperature of the material was calculated throughout the day for each of our scenarios. The temperature of each material in different atmospheres was analyzed as well as the behavior of it when basic atmospheric characteristics change, such as humidity.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΚΑΙ ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια κυρία Κολοκοτσά Διονυσία για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε πάνω στο θέμα της διπλωματικής και για τον χρόνο που αφιέρωσε για να με καθοδηγήσει.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κύριο Κώστα Γομπάκη για την αμέριστη προσοχή, την υπομονή, τη βοήθεια και την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Φυσικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Λαζαρίδη Μιχαήλ και τον κύριο Τσούτσο Θεοχάρη για την παρουσία τους στην επιτροπή και για τον χρόνο που αφιέρωσαν τόσο για την μελέτη της εργασίας αυτής όσο και για την παρουσίαση της.

Τέλος, να ευχαριστήσω την μαμά μου Ελευθερία Σκαλιδάκη, που είναι δίπλα μου πάντα και δείχνει αμέριστη στήριξη και εμπιστοσύνη σε ό,τι βάλω στόχο στη ζωή μου.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
ABSTRACT	2
ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΚΑΙ ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	7
1.2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	9
1.2.1 Ακτινοβολία και μέλαν σώμα	9
1.2.2 Νόμοι Ακτινοβολίας μέλανος σώματος	10
1.2.3 Εκπομπή- Απορροφητικότητα.....	12
1.3 ΨΥΞΗ ΜΕ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	13
1.3.1 Αρχές Ψύξης με Ακτινοβολία.....	17
1.4 ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	21
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	22
.....	22
2.1 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	22
2.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΕΙΣ	24
2.2.1 MATLAB.....	24
2.2.2 MODTRAN.....	24
2.3 ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ.....	29
2.3.1 Διοξείδιο του αφνίου και διοξείδιο του πυριτίου	29
2.3.2 Πολυ(βινυλιδενο-φθοριούχο-συν-εξαφθοροπρωπένιο)	31
2.3.3 Οξείδιο του Αργιλίου και Άργυρος	32
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ	33
3.1 ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΦΝΙΟΥ ΚΑΙ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ	33
3.1.1 Επιβεβαίωση μοντέλου της MATLAB.....	33
3.1.2 Αποτελέσματα.....	35
3.2 ΠΟΛΥ(ΒΙΝΥΛΙΔΕΝΟ-ΦΘΟΡΙΟΥΧΟ-ΣΥΝ-ΕΞΑΦΘΟΡΟΠΡΩΠΕΝΙΟ).....	39
3.3 ΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΡΓΙΛΙΟΥ ΚΑΙ ΑΡΓΥΡΟΣ.....	43
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	47
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	50
6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	53
6.1 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ ΣΤΗ MODTRAN.....	53

Εικόνες

Εικόνα 1 Κατανάλωση Ενέργειας ανά χώρες Ευρώπης.[“Χτίζοντας το Μέλλον”, Πρόγραμμα εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια 2011-2020] -----	8
Εικόνα 2 Φασματική κατανομή ακτινοβολίας μέλανος σώματος σε διάφορες θερμοκρασίες -----	10
Εικόνα 3 Απεικόνιση «ατμοσφαιρικού παραθύρου» και θερμικής ακτινοβολίας μαύρου σώματος (Hossain & Gu, 2016)-----	13
Εικόνα 4 Ικανότητα εκπομπής / απορρόφησης του ψύκτη με ένα ρεαλιστικό μοντέλο ατμοσφαιρικής μετάδοσης (Raman et al., 2014) -----	14
Εικόνα 5 Φασματική Κατανομή Ηλιακής Ακτινοβολίας-----	19
Εικόνα 6 Σχηματική Απεικόνιση των Αρχών Ψύξης με Ακτινοβολία (Πηγή: Zhao et al., 2019) -----	20
Εικόνα 7 Σχηματική Απεικόνιση Μεθοδολογίας-----	22
Εικόνα 8 Περιβάλλον εργασίας MODTRAN [http://modtran.spectral.com] -----	25
Εικόνα 9 Μορφή Αποτελέσματος της MODTRAN [http://modtran.spectral.com]-----	27
Εικόνα 10 Σύσταση Διοξειδίου του αφνίου και διοξειδίου του πυριτίου [Raman et al., 2014] -----	29
Εικόνα 11 Πλεονεκτήματα Διοξειδίου του αφνίου και διοξειδίου του πυριτίου -----	49
Εικόνα 12 Πλεονεκτήματα οξειδίου του Αργιλίου και Αργύρου-----	49
Εικόνα 13 Πλεονεκτήματα Πολυ(βινυλιδενο-φθοριούχο-συν-εξαφθοροπροπενίου) -----	49

Πίνακες

Πίνακας 1 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	9
Πίνακας 2 Τιμές για κάθε ατμοσφαιρικό μοντέλο της MODTRAN [http://modtran.spectral.com].....	26
Πίνακας 3 Βασικά χαρακτηριστικά των μοντέλων ατμόσφαιρας που δημιουργήσαμε [http://modtran.spectral.com].....	28
Πίνακας 4 Μετατροπή τιμών Modtran Water Column από atm-cm σε gr/cm ²	28

Διαγράμματα

Διάγραμμα 1 Μετεωρολογικά Δεδομένα της περιοχής για 17 Ιανουαρίου	23
Διάγραμμα 2 Μετεωρολογικά Δεδομένα της περιοχής για 05 Μαρτίου.....	23
Διάγραμμα 3 Μετεωρολογικά Δεδομένα της περιοχής για 01 Ιουνίου.....	23
Διάγραμμα 4 Μετρημένη εκπομπή του υλικού σε μήκος κύματος $0,3 \leq \lambda \leq 2,5$	30
Διάγραμμα 5 Μετρημένη εκπομπή του υλικού σε μήκος κύματος $2,5 \leq \lambda \leq 22,5$	30
Διάγραμμα 6 Μετρημένη εκπομπή PVDF σε μήκος κύματος $2,5 \leq \lambda \leq 20$	31
Διάγραμμα 7 Μετρημένη εκπομπή PVDF σε μήκος κύματος $0,3 \leq \lambda \leq 2$	31
Διάγραμμα 8 Μετρημένη εκπομπή Al ₂ O ₃ σε μήκος κύματος $2,5 \leq \lambda \leq 18$	32
Διάγραμμα 9 Μετρημένη εκπομπή Al ₂ O ₃ σε μήκος κύματος $0,5 \leq \lambda \leq 2,5$	32
Διάγραμμα 10 Σύγκριση μέσης θερμοκρασίας υλικού ανά προσομοίωση Raman[Raman et al., 2014] και 17/01.	33
Διάγραμμα 11 Σύγκριση μέσης ψυκτικής ισχύς ανά προσομοίωση Raman[Raman et al., 2014] και 17/01.	33
Διάγραμμα 12 Ψυκτική Ισχύς αποδοτικότερου μοντέλου ατμόσφαιρας συγκριτικά με αυτή του Raman[Raman et al., 2014] και 17 Ιανουαρίου.....	34
Διάγραμμα 13 Μέση διαφορά θερμοκρασίας περιβάλλοντος και υλικού για κάθε ένα διαφορετικό μοντέλο ατμόσφαιρας	35
Διάγραμμα 14 Ισχύς για την προσομοίωση 6 την 1 ^η Ιουνίου.....	36
Διάγραμμα 15 Σύγκριση θερμοκρασίας υλικού και θερμοκρασίας του αέρα για την προσομοίωση 6 την 1 ^η Ιουνίου.....	36

Διάγραμμα 16 Αποτελέσματα ψυκτικής ισχύς του υλικού για κάθε ένα διαφορετικό μοντέλο ατμόσφαιρας...	37
Διάγραμμα 17 Αποτελέσματα στην απόδοση ψύξης του υλικού συναρτήσει της ποσότητας νερού που υπάρχει στην ατμόσφαιρα για κάθε ένα διαφορετικό μοντέλο ατμόσφαιρας.....	38
Διάγραμμα 18 Μέση διαφορά θερμοκρασίας περιβάλλοντος και PVDF για κάθε ένα διαφορετικό μοντέλο ατμόσφαιρας	39
Διάγραμμα 19 Σύγκριση θερμοκρασίας PVDF και θερμοκρασίας του αέρα για την προσομοίωση 6 την 17 ^η Ιανουαρίου	40
Διάγραμμα 20 Ισχύς για την προσομοίωση 6 την 17 ^η Ιανουαρίου.....	41
Διάγραμμα 21 Αποτελέσματα ψυκτικής ισχύς PVDF για κάθε ένα διαφορετικό μοντέλο ατμόσφαιρας.....	42
Διάγραμμα 22 Αποτελέσματα στην απόδοση ψύξης του PVDF συναρτήσει της ποσότητας νερού που υπάρχει στην ατμόσφαιρα για κάθε ένα διαφορετικό μοντέλο ατμόσφαιρας.....	42
Διάγραμμα 23 Μέση διαφορά θερμοκρασίας περιβάλλοντος και Al_2O_3 για κάθε ένα διαφορετικό μοντέλο ατμόσφαιρας	43
Διάγραμμα 24 Ισχύς για την προσομοίωση 6 την 17 ^η Ιανουαρίου.....	44
Διάγραμμα 25 Σύγκριση θερμοκρασίας Al_2O_3 και θερμοκρασίας του αέρα για την προσομοίωση 6 την 17 ^η Ιανουαρίου	44
Διάγραμμα 26 Αποτελέσματα ψυκτικής ισχύς Al_2O_3 για κάθε ένα διαφορετικό μοντέλο ατμόσφαιρας.....	45
Διάγραμμα 27 Αποτελέσματα στην απόδοση ψύξης του Al_2O_3 συναρτήσει της ποσότητας νερού που υπάρχει στην ατμόσφαιρα για κάθε ένα διαφορετικό μοντέλο ατμόσφαιρας.....	46
Διάγραμμα 28 Εκπομπές του κάθε υλικού σε εύρος μήκος κύματος $2,5 \leq \lambda \leq 18$	47
Διάγραμμα 29 Η βέλτιστη απόδοση των τριών διαφορετικών υλικών που μελετήθηκαν.....	48
Διάγραμμα 30 Συνολική ψυκτική ισχύς P_{cool} τις βέλτιστες ημέρες προσομοίωσης	49
Διάγραμμα 31 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 1.....	53
Διάγραμμα 32 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 2.....	53
Διάγραμμα 33 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 3.....	54
Διάγραμμα 34 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 4.....	54
Διάγραμμα 35 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 5.....	55
Διάγραμμα 36 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 6.....	55
Διάγραμμα 37 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 7.....	56
Διάγραμμα 38 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 8.....	56
Διάγραμμα 39 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 9.....	57
Διάγραμμα 40 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 10.....	57
Διάγραμμα 41 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 11.....	58

1.Εισαγωγή

1.1 Κατανάλωση Ενέργειας

Ο τρόπος ζωής των Ευρωπαίων καθιστά την ενέργεια ζωτικής σημασίας για τις καθημερινές τους δραστηριότητες. Τόσο οι άνθρωποι όσο και οι επιχειρήσεις χρειάζονται ενέργεια για φωτισμό, θέρμανση, βιομηχανική παραγωγή καθώς και για τις ηλεκτρικές συσκευές που εξυπηρετούν τις ανάγκες τους. Ωστόσο, η εξασφάλιση της απαιτούμενης αυτής ενέργειας, τόσο τώρα όσο και στο μέλλον, δεν είναι εύκολη. Αν και η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) καταναλώνει το ένα πέμπτο της παγκόσμιας ενέργειας, διαθέτει φτωχά αποθέματα αυτής. Προκειμένου λοιπόν, να καλύψει τις ανάγκες της σε ενέργεια, εισάγει το 53 % της ενέργειας της με ετήσιο κόστος περίπου 400 δισεκατομμύρια ευρώ. Αυτό έχει τεράστιο αντίκτυπο στην οικονομία της. Ένας καλός τρόπος για τη μείωση των δαπανών της Ευρώπης από την εισαγωγή ενέργειας είναι η μείωση της κατανάλωσης και η χρησιμοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Το 2009, η οδηγία για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έθεσε δεσμευτικούς στόχους για όλα τα κράτη μέλη της ΕΕ. Στόχος της έως το 2020 είναι η αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κατά τουλάχιστον 20%, η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 20% και η επίτευξη ενεργειακής εξοικονόμησης της τάξης του 20% ή και περισσότερο. Με την επίτευξη αυτών η ΕΕ καταφέρνει μείωση της εξάρτησής της από τις εισαγωγές ορυκτών καυσίμων και διατήρηση της οικονομικά προσιτής παροχής ενέργειας για τους καταναλωτές και τις επιχειρήσεις. Μέχρι το 2014, το μερίδιο της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ήταν 16% στην ΕΕ, ενώ εννέα κράτη μέλη είχαν ήδη επιτύχει τους στόχους τους για το 2020. Μέχρι το 2018, αυτό είχε αυξηθεί στο 18% με δώδεκα κράτη μέλη να έχουν επιτύχει τους στόχους τους πριν το 2020. Έτσι, ξεκίνησαν διαπραγματεύσεις για τους στόχους της ΕΕ για την ενέργεια και το κλίμα έως το 2030. [Πηγή: Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2017]

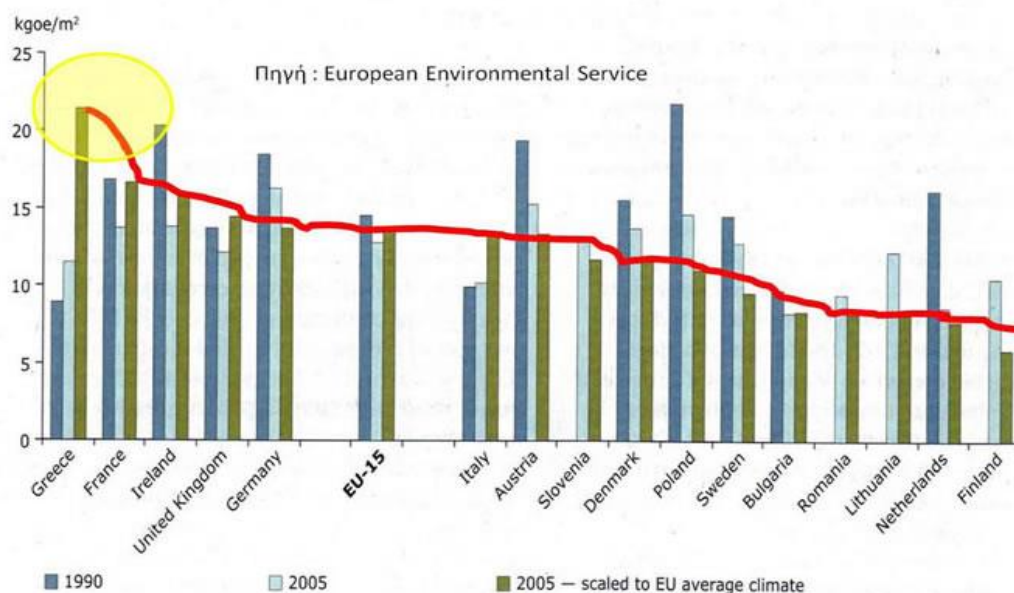
Συνοπτικά, οι στόχοι της ΕΕ έως το 2030 είναι:

- Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 40%.
- Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά τουλάχιστον 27%.
- Αύξηση της αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κατά τουλάχιστον 27%.

Στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης ο κτιριακός τομέας απορροφά περίπου το 40% της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης. Στην Ελλάδα, η τελική κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια του τριτογενή και του οικιακού τομέα αντιπροσωπεύει περίπου το 30% του ενεργειακού ισοζυγίου της χώρας. Η ενέργεια που καταναλώνεται στα κτίρια διατίθεται για τη θέρμανση, την ψύξη, τον φωτισμό και τις άλλες εγκατεστημένες συσκευές ή μηχανήματα. Η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και θερινό κλιματισμό εξαρτάται από τον τύπο και την κατασκευή του κτιρίου, από τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής, από τις ώρες λειτουργίας του κτιρίου, από τα συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού, από τις συσκευές και τον υπόλοιπο ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό αλλά σε σημαντικό βαθμό και από την συμπεριφορά των χρηστών.

Τα αίτια του προβλήματος της μεγάλης ενεργειακής κατανάλωσης των κτιρίων, είναι:

- Η μεγάλη πλειοψηφία των κτιρίων που κατασκευάστηκαν πριν το 1980, τα οποία δεν είναι θερμομονωμένα, απαιτεί πολύ μεγάλα ποσά ενέργειας για να εξασφαλίσει τις συνθήκες άνεσης το χειμώνα.
- Η κατά κανόνα μέτρια κατάσταση των συστημάτων θέρμανσης οδηγεί σε μειωμένους βαθμούς απόδοσης, επομένως, σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και περιβαλλοντική επιβάρυνση.
- Η ολοένα εντονότερη απαίτηση για βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης και εργασίας, ιδίως, το καλοκαίρι, σε συνδυασμό με τη μείωση του κόστους συσκευών, οδήγησε στην εγκατάσταση πάνω από 3.000.000 κλιματιστικών μονάδων, τα τελευταία 25 χρόνια.



Εικόνα 1 Κατανάλωση Ενέργειας ανά χώρες Ευρώπης. [“Χτίζοντας το Μέλλον”, Πρόγραμμα εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια 2011-2020]

Πρέπει να γίνει κατανοητό, ότι η κατανάλωση ενέργειας από τα συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού επιδρά άμεσα, κυρίως, στο κόστος λειτουργίας ενός κτιρίου και έμμεσα σε θέματα περιβάλλοντος, όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Δράσεις που συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου μπορεί να είναι η καύση συμβατικών καυσίμων, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο σε κεντρικές μονάδες θέρμανσης αλλά και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τα κεντρικά συστήματα κλιματισμού ή τις τοπικές κλιματιστικές συσκευές, οι οποίες επιβαρύνουν, κυρίως με CO₂, την ατμόσφαιρα. Η εξοικονόμηση ενέργειας στοχεύει, μεταξύ άλλων, στη βελτίωση της κατάστασης της ατμόσφαιρας και στην αποφυγή της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Η εξοικονόμηση ενέργειας στα συστήματα κλιματισμού είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τον ενεργειακό σχεδιασμό των κτιρίων.

Ο ολοκληρωμένος ενεργειακός σχεδιασμός ενός κτιρίου βασίζεται στις αρχές της βελτιστοποιημένης ενεργειακά αρχιτεκτονικής, και στην ένταξη συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και εξοικονόμησης ενέργειας σε νέα και υφιστάμενα κτίρια. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει τόσο το κτιριακό κέλυφος όσο και οι μέθοδοι κατασκευής. Η επιλογή των δομικών υλικών και συστημάτων για την κατασκευή ενός κτιρίου επηρεάζει τόσο την ενεργειακή του συμπεριφορά, όσο και τις επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η παραγωγική διαδικασία των δομικών προϊόντων επηρεάζει σημαντικά τις εκπομπές των αερίων ρύπων και την ενεργειακή χρήση κατά τον κύκλο ζωής τους. Επιπλέον προσοχή για την κάλυψη των θερμικών και ηλεκτρικών αναγκών των κτιρίων δίνεται στις ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις, στην ενεργειακή διαχείριση και στις τεχνολογίες ΑΠΕ. (Πηγή: www.cres.gr)

1.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

1.2.1 Ακτινοβολία και μέλαν σώμα

Γνωρίζουμε ότι η θερμότητα μπορεί να διαδοθεί όχι μόνο με αγωγή και με μεταφορά αλλά και με τη μορφή ακτινοβολίας. Κατά τη μετάδοση της θερμότητας με ακτινοβολία έχουμε μετατροπή θερμικής ενέργειας του ακτινοβολούντος σώματος σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και στη συνέχεια σε θερμική ακτινοβολία σώματος. Ο όρος θερμική ακτινοβολία, ο οποίος χρησιμοποιείται συχνά προκειμένου να χαρακτηρίσει την εκπεμπόμενη ακτινοβολία, αναφέρεται ουσιαστικά σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η ηλεκτρομαγνητική αυτή ακτινοβολία ανάλογα με τη θερμοκρασία του ακτινοβολούντος σώματος αποτελείται κυρίως από υπέρυθρη, ορατή και υπεριώδη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Ως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χαρακτηρίζεται η μεταφορά ενέργειας μέσω διαταραχών του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, οι οποίες διαδίδονται ακόμη και στον κενό χώρο με τη μορφή κυμάτων, τα οποία χαρακτηρίζονται ως ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στο κενό με την ίδια ταχύτητα c , η οποία είναι γνωστή ως ταχύτητα του φωτός και ισούται με 300.000 km/s περίπου. Οι συχνότητες και τα μήκη κύματος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων καλύπτουν μια ευρύτατη περιοχή, γνωστή και ως «ηλεκτρομαγνητικό φάσμα», η οποία χωρίζεται σε περιοχές, όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 1.

Μήκος κύματος (m)	Είδος κύματος
$10^6 \sim 10^4$	Τηλεγραφικά
$10^4 \sim 1$	Ραδιοφωνικά
$1 \sim 10^{-3}$	Μικροκύματα
$10^{-3} \sim 0.77 \cdot 10^{-6}$	Υπέρυθρο
$(0.77 \sim 0.39) \cdot 10^{-6}$	Ορατό φως
$0.39 \cdot 10^{-6} \sim 10^{-8}$	Υπεριώδες
$10^{-8} \sim 10^{-12}$	Ακτίνες Χ
$10^{-12} \sim 10^{-14}$	Ακτίνες γ
$10^{-14} \sim \dots$	Κοσμική ακτινοβολία

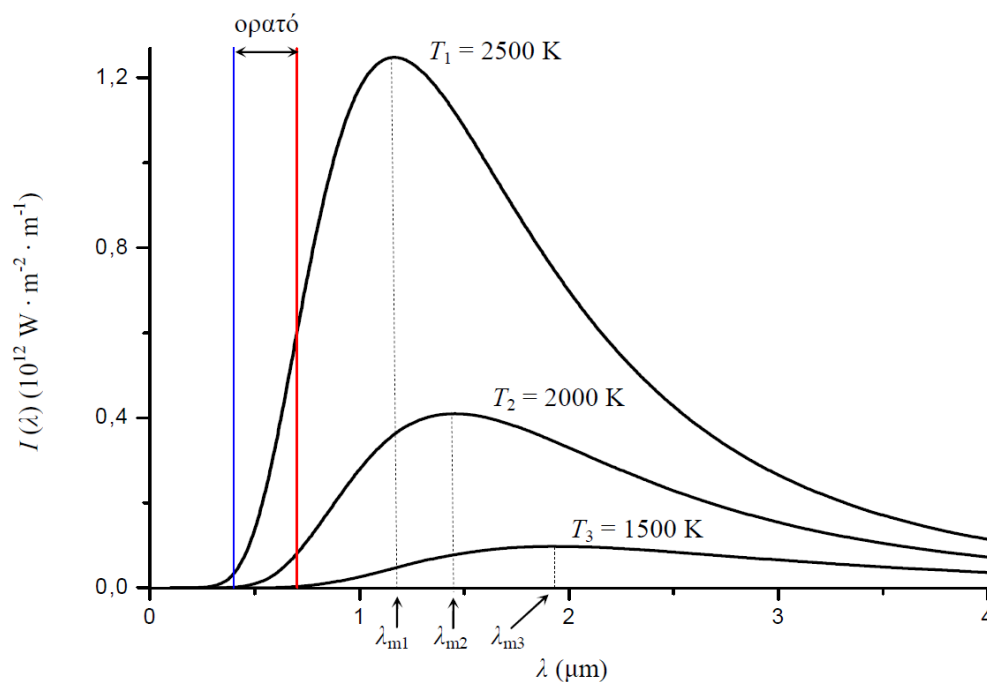
Πίνακας 1 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Κάθε σώμα θερμοκρασίας μεγαλύτερης του απόλυτου μηδενός (0 K) εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η οποία χαρακτηρίζεται ως θερμική ακτινοβολία. Η ενέργεια αυτή αυξάνεται δραστικά με την αύξηση της θερμοκρασίας του. Στην φυσική, το σώμα που έχει την ιδιότητα να απορροφά πλήρως κάθε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, σε οποιοδήποτε μήκος κύματος, λέγεται μέλαν σώμα. Δεδομένου της ικανότητας να απορροφούν όλα τα μήκη κύματος ακόμη και στην ορατή περιοχή τα σώματα αυτά εμφανίζονται μαύρα (μελανά) εξ 'ου και η ονομασία. Ένα μέλαν σώμα εκπέμπει ακτινοβολία, που είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του, και φυσικά ένα μέρος της μπορεί να βρίσκεται και στην ορατή περιοχή του φάσματος, όταν η θερμοκρασία του είναι αρκετά υψηλή.

1.2.2 Νόμοι Ακτινοβολίας μέλανος σώματος

Στα τέλη του 19ου αιώνα ο προσδιορισμός της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος είχε μελετηθεί διεξοδικά και διατυπώθηκαν δύο νόμοι: Ο νόμος των Stefan-Boltzmann και ο νόμος μετατόπισης του Wien.

Προτού διατυπώσουμε τους δύο αυτούς νόμους, κρίνεται σκόπιμο να οριστεί η συνάρτηση $I(\lambda, T)$ η οποία αποτελεί την φασματική κατανομή του μέλανος σώματος. Στην εικόνα 2 απεικονίζονται τα φάσματα εκπομπής μέλανος σώματος σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες, όπου φαίνεται ότι η ενέργεια που εκπέμπεται δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλα τα μήκη κύματος. Παρατηρούμε ότι, καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, αυξάνεται και η ολική εκπεμπόμενη ένταση, $I(T)$, ενώ η θέση της κορυφής του $I(\lambda)$ μετατοπίζεται προς τα μικρότερα μήκη κύματος.



Εικόνα 2 Φασματική κατανομή ακτινοβολίας μέλανος σώματος σε διάφορες θερμοκρασίες (Πηγή: Department of Physics-National Technical University of Athens)

Η εκπεμπόμενη ενέργεια μπορεί να περιγραφεί από τη συνάρτηση $I(\lambda, T)$ για την οποία το γινόμενο $I(\lambda, T) \cdot d\lambda$ δίνει την εκπεμπόμενη ενέργεια ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας που αντιστοιχεί σε μήκη κύματος μεταξύ λ και $(\lambda+d\lambda)$. Η ολική εκπεμπόμενη ενέργεια ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας $I(T)$, για κάθε θερμοκρασία T , δίνεται ως το εμβαδόν κάτω από κάθε καμπύλη $I(\lambda, T)$, άρα από το ολοκλήρωμα της $I(\lambda, T)$ για όλα τα μήκη κύματος:

$$I(T) = \int_0^{\infty} I(\lambda, T) d\lambda \quad (\text{Εξ.1})$$

Ο νόμος των Stefan-Boltzmann αναφέρει ότι στο μέλαν σώμα η ολική εκπεμπόμενη ένταση είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας, T , όπως περιγράφεται από τη σχέση:

$$I(T) = k \cdot T^4 \quad (\text{Εξ.2})$$

όπου k είναι μια θεμελιώδης φυσική σταθερά, γνωστή ως σταθερά Stefan-Boltzmann, η οποία έχει τιμή $\sigma = 5.6705 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

Στην πράξη, ο νόμος των Stefan-Boltzmann μας λέει ότι σε οποιαδήποτε θερμοκρασία T και αν βρίσκεται ένα σώμα θα εκπέμπει ακτινοβολία σε κάποια περιοχή του φάσματος. Βέβαια κάθε σώμα όχι μόνο εκπέμπει αλλά και απορροφά ακτινοβολία. Έτσι, αν η θερμοκρασία του σώματος T είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία του περιβάλλοντός του τότε το σώμα τελικώς εκπέμπει ακτινοβολία. Αν συμβαίνει το αντίθετο, τότε απορροφά. Και εδώ πάλι το πηλίκο της απορροφώμενης ακτινοβολίας προς το εμβαδόν της επιφάνειας είναι ανάλογο της τέταρτης δύναμης της θερμοκρασίας του σώματος σε Kelvin. Αν όμως η θερμοκρασία T του σώματος είναι ίση με την θερμοκρασία του περιβάλλοντος τότε όση ακτινοβολία απορροφά το σώμα τόση και εκπέμπει. Άρα σε αυτή τη περίπτωση δεν μπορεί να ψυχθεί.

Η ακτινοβολία μέλανος σώματος κατανέμεται στα διάφορα μήκη κύματος σύμφωνα με τις χαρακτηριστικές καμπύλες της εικόνας 2. Καθεμία από αυτές έχει ένα μήκος κύματος λ στο οποίο η συνάρτηση $I(\lambda, T)$ παρουσιάζει μέγιστο και είχε βρεθεί πειραματικά ότι είναι αντιστρόφως ανάλογο της θερμοκρασίας T . Πιο συγκεκριμένα, ισχύει ότι:

$$\lambda_{\max} T = \text{σταθερά} = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (\text{Εξ.3})$$

Η Εξ.3 αποτελεί το νόμο μετατόπισης του Wien, ο οποίος αναφέρει ότι καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, το σημείο μεγίστου της συνάρτησης $I(\lambda, T)$ μετατοπίζεται προς μικρότερα μήκη κύματος.

Οι Rayleigh και Jeans, μελέτησαν και αυτοί το πρόβλημα του προσδιορισμού της φασματικής κατανομής της ακτινοβολίας μέλανος σώματος και κατέληξαν στην σχέση:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT \quad (\text{Εξ.4})$$

όπου k είναι η σταθερά του Boltzmann και c η ταχύτητα του φωτός.

Η σχέση αυτή είναι γνωστή ως νόμος Rayleigh-Jeans και αποτελεί την κλασσική πρόβλεψη για τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας μέλανος σώματος. Η έκφραση αυτή βασίστηκε στην παραδοχή ότι, κατά τις ταλαντώσεις μέσα στην κοιλότητα του μέλανος σώματος, οι ταλαντωτές έχουν ένα συνεχές ενεργειακό φάσμα. Αν και η

πρόβλεψη αυτή, συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα σε μεγάλα μήκη κύματος, διαφέρει σε μικρά μήκη κύματος. Αυτό συμβαίνει, διότι, προβλέπει ότι η εκπεμπόμενη ακτινοβολία αυξάνει απεριόριστα όσο μειώνεται το μήκος κύματος, κάτι που δεν συνάδει με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Το 1900, ο Max Planck, ένας γερμανός φυσικός, εφηύρε έναν τύπο για το παρατηρούμενο φάσμα, ο οποίος ταίριαζε απόλυτα με τις πειραματικές καμπύλες και έγινε γνωστός ως ο νόμος ακτινοβολίας του Planck. Υποθέτοντας ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μπορεί να εκπέμπεται μόνο σε κβαντισμένη μορφή, (σε «κβάντα» ή αλλιώς πακέτα) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η ποσότητα της ενέργειας που είχε το καθένα από αυτά τα «κβάντα» ήταν ακέραιο πολλαπλάσιο μιας στοιχειώδους ποσότητας. Η στοιχειώδης αυτή ποσότητα είναι ανάλογη της συχνότητας της ακτινοβολίας, $E = h \cdot \nu$, όπου h η σταθερά του Planck. Ο Planck πρότεινε την ακόλουθη σχέση για την φασματική κατανομή της ακτινοβολίας μέλανος σώματος:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (\text{Εξ.5})$$

Όπου h η σταθερά του Planck, σε μονάδες $J \cdot s$, η οποία είναι ίση με $6.25 \times 10^{-34} J \cdot s$, k η σταθερά Stefan-Boltzmann και c η ταχύτητα του φωτός.

Ο νόμος του Planck συμφωνεί απόλυτα με τις πειραματικές καμπύλες και εμπεριέχει τόσο το νόμο μετατόπισης του Wien όσο και το νόμο του Stefan-Boltzmann. Αν ολοκληρώσουμε την εξίσωση για όλα τα μήκη κύματος θα καταλήξουμε στο νόμο Stefan-Boltzmann, ενώ αν την παραγωγίσουμε ως προς το μήκος κύματος, και θέσουμε την παράγωγο ίση με το μηδέν, θα προκύψει ο νόμος μετατόπισης του Wien.

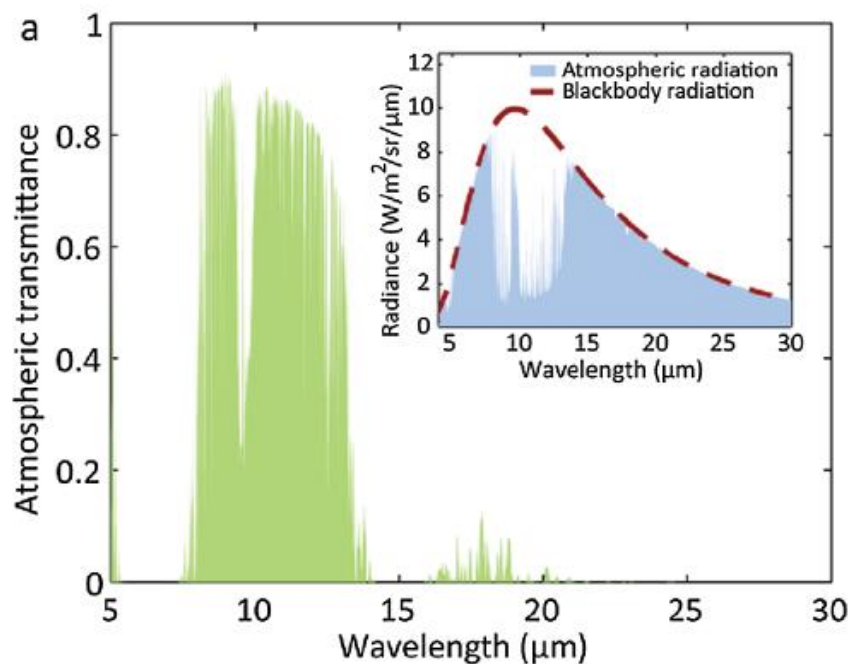
1.2.3 Εκπομπή- Απορροφητικότητα

Η εκπομπή, ϵ , της επιφάνειας ενός υλικού είναι η αποτελεσματικότητά του υλικού ως προς την εκπομπή ενέργειας ως θερμική ακτινοβολία και κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1. Εξ ορισμού, ένα μαύρο σώμα σε θερμική ισορροπία έχει εκπομπή $\epsilon = 1$. Άλλα αντικείμενα δεν εκπέμπουν τόσο θερμότητα όσο ένα τέλειο μαύρο σώμα. Ποσοτικά, η εκπομπή είναι ο λόγος της θερμικής ακτινοβολίας από μια επιφάνεια προς την ακτινοβολία από μια ιδανική μαύρη επιφάνεια στην ίδια θερμοκρασία όπως δίνεται από τον νόμο Stefan-Boltzmann. Η επιφάνεια ενός μαύρου σώματος εκπέμπει θερμική ακτινοβολία με ρυθμό περίπου 448 W/m^2 σε θερμοκρασία δωματίου (25°C). Τα αντικείμενα, με εκπομπή μικρότερη του 1, εκπέμπουν ακτινοβολία σε αντίστοιχα χαμηλότερους ρυθμούς. Η εκπομπή παίζει σημαντικό ρόλο στα προβλήματα μεταφοράς θερμότητας. Για παράδειγμα, οι ηλιακοί συλλέκτες θερμότητας ενσωματώνουν επιλεκτικές επιφάνειες που έχουν πολύ χαμηλή εκπομπή. Αυτοί οι συλλέκτες σπαταλούν πολύ λίγη ηλιακή ενέργεια μέσω εκπομπών θερμικής ακτινοβολίας.

Μια άλλη σημαντική ιδιότητα ακτινοβολίας μιας επιφάνειας είναι η απορροφητικότητα, που είναι το κλάσμα της ενέργειας ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια που απορροφάται από την επιφάνεια. Όπως η εκπομπή, η τιμή απορροφητικότητας κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1. Από τον ορισμό του, ένα μαύρο σώμα είναι ένας τέλειος απορροφητής. Γενικά, η απορροφητικότητα και η εκπομπή συνδέονται μεταξύ τους με τον Νόμο της θερμικής ακτινοβολίας του Kirchhoff. Σύμφωνα με αυτόν, σε ένα αυθαίρετο σώμα που εκπέμπει και απορροφά θερμική ακτινοβολία σε θερμοδυναμική ισορροπία, η εκπομπή είναι ίση με την απορροφητικότητα.

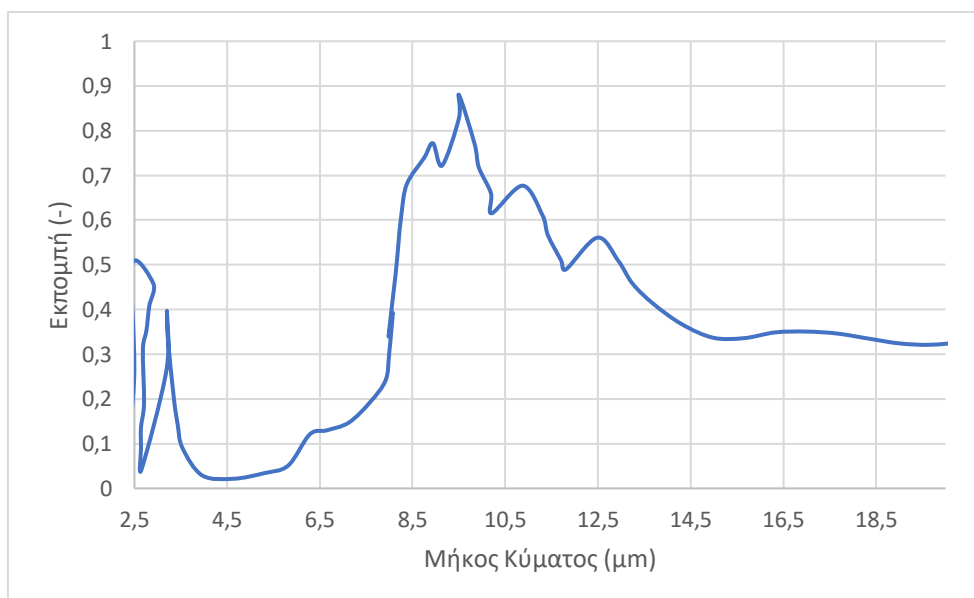
1.3 Ψύξη με ακτινοβολία

Μια εναλλακτική λύση στα απαιτητικά σε ενέργεια συστήματα κλιματισμού είναι η ψύξη με ακτινοβολία. Η ψύξη με ακτινοβολία αναφέρεται στη φυσική διαδικασία με την οποία ένα σώμα «μετατρέπεται» σε ένα άλλο σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας μέσω ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος. Πιο αναλυτικά, στην ατμόσφαιρα της Γης υπάρχει ένα «παράθυρο» στο υπέρυθρο μήκος κύματος μεταξύ 8 και 13 μm , στο οποίο η εκπομπή ακτινοβολίας της ατμόσφαιρας είναι πολύ αδύναμη. Έξω από αυτό το «ατμοσφαιρικό παράθυρο» η ατμόσφαιρα είναι εξαιρετικά εκπνευμένη. Στην εικόνα 3, παρατηρείται ότι το «παράθυρο» αυτό συμπίπτει με τη μέγιστη θερμική ακτινοβολία ενός μαύρου σώματος που καθορίζεται από το Νόμο του Planck σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (περίπου 300K).



Εικόνα 3 Απεικόνιση «ατμοσφαιρικού παραθύρου» και θερμικής ακτινοβολίας μαύρου σώματος (Hossain & Gu, 2016)

Έτσι ένα σώμα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος καταφέρει να εξαλείψει θερμότητα μέσω εκπομπής ακτινοβολίας διαμέσου του «ατμοσφαιρικού παραθύρου», χρησιμοποιώντας ένα παθητικό μηχανισμό ψύξης. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία απομακρύνεται από την ατμόσφαιρα της Γης στο απώτερο διάστημα, που λειτουργεί σαν μια μεγάλη αποθήκη θερμότητας. Καταληκτικά, το «ατμοσφαιρικό παράθυρο» επιτρέπει στην εξερχόμενη εκπομπή ακτινοβολίας του σώματος να ξεπεράσει την εισερχόμενη απορροφημένη ατμοσφαιρική ακτινοβολία και συνεπακόλουθα να ψυχθεί κάτω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Υπάρχει ωστόσο ένα δεύτερο «ατμοσφαιρικό παράθυρο», μεταξύ 16 και 23 μm , το οποίο όμως είναι αρκετά αδύναμο και η επίδραση του στην ψύξη με ακτινοβολία θεωρείται μηδαμινή. Στην περίπτωση των κτιρίων, η ακτινοβολία ψύξης προκύπτει από την ανταλλαγή θερμικής ακτινοβολίας μεταξύ των επιφανειών του κτιρίου και των ψυχρότερων ατμοσφαιρικών στρωμάτων στον ουρανό.



Εικόνα 4 Ικανότητα εκπομπής / απορρόφησης του ψύκτη με ένα ρεαλιστικό μοντέλο ατμοσφαιρικής μετάδοσης (Raman et al., 2014)

Τα παθητικά συστήματα ψύξης έχουν σημαντικές επιπτώσεις ως "συσκευές" εξοικονόμησης ενέργειας λόγω της ικανότητάς τους να λειτουργούν χωρίς εξωτερική πηγή ενέργειας. Η σημασία της ακτινοβολίας με ψύξη και η πιθανή εφαρμογή της μελετήθηκε διεξοδικά πριν από λίγες δεκαετίες όπως επίσης και η ψύξη κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ωστόσο, η ακτινοβολία με ψύξη ήταν κατά κύριο λόγο περιορισμένη κατά τη διάρκεια της νύχτας, αφού κατάλληλα υλικά με υψηλή εκπομπή IR στο «ατμοσφαιρικό παράθυρο» και με ικανοποιητική απόδοση κατά τη διάρκεια της ημέρας, δεν λειτουργούσαν το ίδιο κατά την διάρκεια της νύχτας.

Η επίτευξη της ψύξης με ακτινοβολία τη νύχτα είναι σχετικά απλή. Η υψηλή εκπομπή στο εύρος υπέρυθρων μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί. Η πλειονότητα των ερευνητικών εργασιών για υλικά στην νυχτερινή ψύξη με ακτινοβολία έχουν επικεντρωθεί σε επιλεκτικές επιφάνειες εντός του ατμοσφαιρικού παραθύρου για την επίτευξη της καλύτερης ψύξης. Αυτά τα υλικά μπορούν γενικά να κατηγοριοποιηθούν στις ακόλουθες ομάδες όπως συζητείται παρακάτω: (1) υλικά με βάση το πολυμερές πολυβινυλοχλωρίδιο, πολυμεθύλιο μεθακρυλικό (PMMA), τροποποιημένη ρητίνη πολυφαινολενοξειδίου (PPO), σύνθετα πολυμερή υλικά και χρώματα με βάση πολυμερές συνδετικό με διάφορες χρωστικές (2) ανόργανες λεπτές μεμβράνες επικάλυψης υλικά [μονοξειδίο του πυριτίου (SiO), 54 διοξειδίο του πυριτίου (SiO_2), λευκά χρωματισμένα χρώματα (3) αέριο πλάκα [αμμωνία (NH_3), αιθυλένιο (C_2H_4), αιθυλενοξειδίο ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$) και μίγματα αυτών]. (Zhao et al., 2019) Τα ψυκτικά υλικά με βάση το πολυμερές αποτελούνται γενικά από μια λεπτή στρώση πολυμερούς και κάποιο ανακλαστικό μέταλλο, π.χ. αλουμίνιο. Για παράδειγμα, ο Catalanotti (Catalanotti et al., 1975) ανέπτυξε ένα πολυβινυλο-φθορίδιο (PVF) φιλμ με επίστρωση από αλουμίνιο που έχει ισχυρή εκπομπή εντός του «ατμοσφαιρικού παραθύρου» και υψηλή υπέρυθρη ανακλαστικότητα εκτός αυτού. Αυτή η «συσκευή» ψύχθηκε κατά 15°C , όταν τοποθετήθηκε σε θερμομονωτικό κουτί καλυμμένο με υπέρυθρη διαφανή μεμβράνη.

Σε σύγκριση με τη νυχτερινή ψύξη, η ψύξη με ακτινοβολία την ημέρα είναι πολύ πιο επιθυμητή καθώς τη μέρα υπάρχει ανάγκη για ένα πιο «άνετο» θερμοκρασιακά περιβάλλον. Ωστόσο, και για τις δύο περιπτώσεις ψύξης υπάρχει σημαντική πρόκληση για την επίτευξη υψηλής ηλιακής ανάκλασης ταυτόχρονα με υψηλή εκπομπή πάνω από το «ατμοσφαιρικό παράθυρο». Η αυστηρή αυτή απαίτηση φαίνεται να είναι μεγάλο κίνητρο τις τελευταίες δεκαετίες. Τα υλικά που αναζητούνται είναι κυρίως οξειδία και ανθρακικά άλατα τιτανίου, αλουμίνιο, ασβέστιο και ψευδάργυρος, λόγω της υψηλής ανακλαστικότητάς τους στο ηλιακό φάσμα. Το 2014 ο Raman (Raman et al., 2014), παρουσίασε πειραματικά δεδομένα ακτινοβολίας ψύξης ενός υλικού που αποτελείται από επτά στρώσεις των HfO_2 και SiO_2 και αντανάκλα 97% του προσπίπτοντος ηλιακού φωτός ενώ εκπέμπει έντονα και επιλεκτικά στο «ατμοσφαιρικό παράθυρο». Τοποθέτησε το υλικό σε μια τσάντα και ανακάλυψε ότι το υλικό ψύχεται κατά 5°C σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος όταν εκτεθεί σε ισχύ ηλιακής ακτινοβολίας ανώτερη των $850\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Αρκετά χρόνια αργότερα ο Chen (Chen et al., 2020), παρασκεύασε ένα υλικό βασισμένο στο πολυ(βινυλιδενοφθοριούχο-συν-εξαφθοροπροπένιο), στις μοριακές δονήσεις των οξειδίων του θείου (SiO_x), στο πυριτικό άλας και σε νανοσωματίδια μόλυβδου. Ως υπόστρωμα του υλικού αυτού χρησιμοποίησε ένα φιλμ πολυαιθυλενίου. Σε αντίθεση με το Raman, ο Chen τοποθέτησε το υλικό μέσα σε ένα κύβο και εξέτασε την απόδοση ψύξης του χώρου στην τσάντα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ψύξη του υλικού κατά 1°C στην διάρκεια της μέρας και ψύξη κατά 4°C κατά τη διάρκεια της νύχτας. Αργότερα, μελετήθηκε και η χρήση υλικών τα οποία περιλαμβάνουν ενδογενείς εκπομπές υπέρυθρων (IR) και συμβάλουν σημαντικά στην ψύξη με ακτινοβολία.

Ορισμένα υλικά παρουσιάζουν δυνατότητες περιορισμένης επιλεκτικότητας, ιδίως πολυμερή υλικά, διοξείδια του τιτανίου, νιτρίδια του πυριτίου και μονοξείδιο του πυριτίου. Αν και τα φυσικά υλικά που αναφέρονται παραπάνω μπορούν να ενισχύσουν την ψύξη με ακτινοβολία, επιτυγχάνοντας το καλύτερο δυνατό σενάριο, απαιτούν τον συνδυασμό υψηλών επιπέδων εκπομπών σε όλο το «ατμοσφαιρικό παράθυρο». Μέχρι στιγμής δεν υπάρχει απλό υλικό, που να έχει αναφερθεί ότι παρέχει αυτή την ιδανική εκπομπή φάσματος, και επομένως, μέγιστη ακτινοβολία ψύξης. Με την εμφάνιση εκπομπής νέων επιλεκτικών υπερύθρων, βασισμένοι σε φωτονικές αρχές σχεδιασμού, το ενδιαφέρον για την ακτινοβολία ψύξης αυξήθηκε σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Η ανάπτυξη της νανοφωτονικής συνέβαλλε ενεργά στην έρευνα για την ψύξη με ακτινοβολία. Προσφάτως έχει υπολογιστεί, ότι η 2D νανοφωτονική δομή μπορεί να παράγει ψυκτική ισχύ μεγαλύτερη από 100 W/m^2 σε λογικές θερμοκρασίες. (Rephaeli et al., 2013) Το πλαστικό έχει μελετηθεί και αυτό εκτενώς για την συμπεριφορά του στο φαινόμενο της ψύξης με ακτινοβολία. Αποδείχθηκε ότι το χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC), το φθοριούχο πολυβινύλιο (PVF) και το πολυμεθυλοπεντένιο (TPX) έχουν υψηλά επίπεδα εκπομπής στο «ατμοσφαιρικό παράθυρο». Μετέπειτα, η χρήση των προηγμένων νανοφωτονικών οδήγησε σε αποτελεσματική ψύξη κατά τη διάρκεια της ημέρας κάτω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ψύκτες ακτινοβολίας με φωτονικούς σχεδιασμούς μπορούν, ταυτόχρονα, να διαθέτουν υψηλή ανακλαστική ικανότητα έως και 97% και ισχυρή εκπομπή υπερύθρων μέσα στο «ατμοσφαιρικό παράθυρο». Αυτές οι αναδυόμενες φωτονικές συσκευές, προσφέρουν σημαντική παθητική ψύξη κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας, και μονοπωλούν το ερευνητικό ενδιαφέρον.

Τα βασισμένα σε πολυμερή μεταϋλικά είναι πιθανό να χρησιμοποιούνται συνηθέστερα στο μέλλον λόγω του σημαντικού τους πλεονεκτήματος σε σχέση με άλλα μη πολυμερή νανοφωτονικά υλικά όσον αφορά την κατασκευαστικότητα και το κόστος τους. Η διατήρηση υψηλής υπέρυθρης εκπομπής στο «ατμοσφαιρικό παράθυρο» μπορεί να μην αποτελεί πρόκληση, ωστόσο, η διατήρηση της υψηλής ηλιακής ανακλαστικότητας αποδεικνύεται πολύ πιο δύσκολη λόγω της αποικοδόμησης του ίδιου του πολυμερούς και του μεταλλικού ανακλαστικού στρώματος. Μπορούν να ληφθούν αρκετές προσεγγίσεις για να αντιμετωπιστεί αυτό πρόβλημα. Για παράδειγμα, αύξηση του πάχους του στρώματος πολυμερούς και χρήση ενός πολυμερούς φραγμού, όπως το χλωριούχο πολυβινυλιδένιο (PVDC) και το πολυχλωροτριφθοροαιθυλένιο (PCTFE), στο μεταλλικό στρώμα. Εναλλακτικά, ένα λεπτό στρώμα από το υλικό μόνωσης μπορεί να επικαλυφθεί πάνω στο στρώμα πολυμερούς και στο στρώμα του μετάλλου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πρόσφατη μελέτη του Mandal, (Mandal et al., 2018), δείχνει ότι είναι δυνατή η επίτευξη υψηλής ηλιακής ανακλαστικότητας χωρίς υποστήριξη του πολυμερούς στρώματος με ανακλαστικό μεταλλικό στρώμα. Προτείνει μια μέθοδο αντιστροφής φάσης για την κατασκευή πορωδών επιστρώσεων από πολυμερή που παρουσιάζουν εξαιρετική ηλιακή ανάκλαση και θερμική εκπομπή. Οι επιστρώσεις αυτές μπορούν να εφαρμοστούν με συμβατικές μεθόδους, όπως βαφή και ψεκασμό σε διάφορες επιφάνειες όπως πλαστικά, μέταλλα και ξύλο. Η μέθοδος αυτή είναι συμβατή με μια μεγάλη ποικιλία πολυμερών και αποτελεί μια βιώσιμη λύση για την παραγωγή επιστρώσεων ψύξης με ακτινοβολία.

Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες παίζουν σημαντικό ρόλο στην όλη διαδικασία. Για την ατμοσφαιρική ακτινοβολία, τα ατμοσφαιρικά συστατικά, όπως H_2O, CO_2, O_3, CH_4 και N_2O συμβάλλουν ενεργά. Ωστόσο, για την μετάδοση μέσα στο «ατμοσφαιρικό παράθυρο» σημαντικότερο ρόλο διαδραματίζει η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε H_2O . Το ποσό των υδρατμών της ατμόσφαιρας μπορεί να συσχετιστεί με την θερμοκρασία επιφάνειας και την σχετική υγρασία του εδάφους. Σε τροπικά κλίματα, η υγρασία είναι γενικά υψηλή και η ουσιαστική ψύξη είναι εφικτή μόνο κατά την χειμερινή περίοδο. Πειραματικά δεδομένα μελετών έχουν δείξει ότι η ψύξη που παράγεται μειώνεται σε περιβάλλοντα με αυξημένη υγρασία με καθορισμένο τρόπο. Με την αύξηση της συνολικής στήλης υδρατμών, η ισχύς ψύξης μειώνεται. Ως εκ τούτου, η γεωγραφική θέση με ορισμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο σε πρακτικές εφαρμογές ψύξης με ακτινοβολία. Επιπλέον, για ένα θολό ουρανό, η ατμόσφαιρα θα είναι εντελώς αδιαφανή για την υπέρυθη ακτινοβολία και έτσι η ψύξη δεν θα είναι αποτελεσματική. Είναι γνωστό ότι η ατμοσφαιρική ακτινοβολία αυξάνεται εντός της περιοχής μήκους κύματος 8-13 μm για αυξημένες γωνίες του ζενίθ. Τρόποι παρεμπόδισης της εισερχόμενης ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας σε ένα θερμαντικό σώμα πλήρως ανοικτό στον ουρανό είναι η χρήση αντανάκλαστών ή ανοιγμάτων με ακτινοβολία προς το ουρανό σε μια μικρή στερεά γωνία. Αυτό οδηγεί στην πρόληψη της εισερχόμενης ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας για μεγάλες γωνίες ζενίθ.

1.3.1 Αρχές Ψύξης με Ακτινοβολία

Προκειμένου να κατανοήσουμε το φαινόμενο της ψύξης με ακτινοβολία θεωρούμε ένα υλικό εμβαδού A σε θερμοκρασία T , του οποίου η φασματική και γωνιακή εκπομπή είναι $\varepsilon(\lambda, \theta)$. Όταν το υλικό αυτό εκτεθεί στο φως της ημέρας, με θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb} , υπόκειται τόσο στην ηλιακή ακτινοβολία όσο και στην ατμοσφαιρική θερμική ακτινοβολία.

Η καθαρή ισχύς ψύξης του υλικού, P_{cool} , δίνεται από τη σχέση:

$$P_{cool}(T) = P_{rad}(T) - P_{atm}(T_{amb}) - P_{sun} - P_{cond+conv} \quad (\text{Εξ. 6})$$

Στην εξίσωση (6) η ισχύς που ακτινοβολείται από τη δομή είναι:

$$Prad(T) = A \int d\Omega \cos\theta \int_0^\infty d\lambda I_{BB}(T, \lambda) \varepsilon(\lambda, \theta) \quad (\text{Εξ. 7})$$

Στην Εξ. 7 αυτή ο όρος $\int d\Omega = 2\pi \int_0^{\pi/2} d\theta \sin\theta$ είναι το γωνιακό ολοκλήρωμα πάνω από ένα ημισφαίριο και ο όρος $I_{BB}(T, \lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda k_B T)} - 1}$ είναι η φασματική ακτινοβολία ενός μαύρου σώματος σε θερμοκρασία T , όπου h είναι η σταθερά του Planck, k_B είναι η σταθερά του Boltzmann, c είναι η ταχύτητα του φωτός και λ είναι το μήκος κύματος.

Υπό συνθήκες καθαρού ουρανού, η ατμοσφαιρική ακτινοβολία είναι ένα «σύνολο» αλληλεπιδράσεων από διαφορετικές πηγές ακτινοβολίας, διαφορετικό μέρη του αέρα και αεροδιαλύματα (aerosol). Αν και τα κύρια συστατικά της ατμόσφαιρας είναι το άζωτο (N_2) και το οξυγόνο (O_2), παρουσιάζουν αρκετά χαμηλότερη απορροφητικότητα/εκπομπή στα υπέρυθρα φάσματα σε σύγκριση με τους κύριους υπαίτιους της ατμοσφαιρικής απορρόφησης, που είναι οι υδρατμοί (H_2O), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και το όζον (O_3). Η απορροφητικότητα της ατμόσφαιρας στο μήκος κύματος από 0.3 μm έως 2.5 μm επηρεάζει την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του εδάφους, ενώ η απορροφητικότητα της ατμόσφαιρας στο μήκος κύματος από 2.5 μm έως 50 μm επηρεάζει τη διέλευση θερμικής ακτινοβολίας εδάφους μέσω της ατμόσφαιρας στο σύμπαν. (Zhao et al., 2019)

Η απορροφούμενη ισχύς λόγω προσπίπτουσας ατμοσφαιρικής θερμικής ακτινοβολίας δίνεται από τη σχέση:

$$P_{atm}(T_{amb}) = A \int d\Omega \cos\theta \int_0^\infty d\lambda I_{BB}(T_{amb}, \lambda) \varepsilon(\lambda, \theta) \varepsilon_{atm}(\lambda, \theta) \quad (\text{Εξ. 8})$$

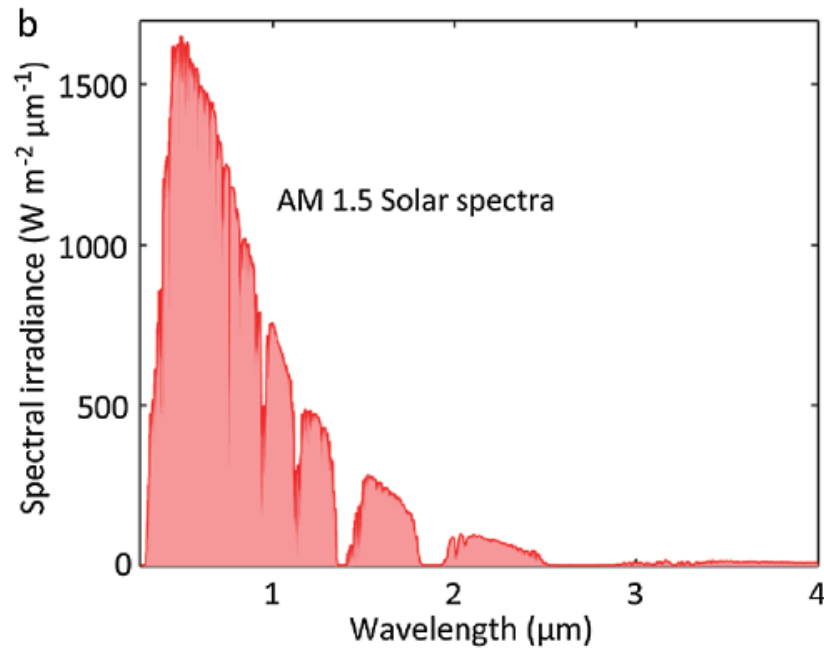
Για μεγάλο χρονικό διάστημα, η απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας δεν εξετάζονταν σε εφαρμογές ακτινοβολίας ψύξης επειδή είχαν επικεντρωθεί στη νυχτερινή απόδοση του φαινομένου. Ωστόσο, για την εφαρμογή της ακτινοβολίας ψύξης κατά τη διάρκεια της ημέρας υπό άμεσο ηλιακό φως, η ηλιακή απορρόφηση σε μια επιφάνεια δεν μπορεί να παραληφθεί. Στόχος είναι να δημιουργηθεί μια φασματικά επιλεκτική επιφάνεια που έχει σχεδόν μηδενική εκπομπή στο ηλιακό φάσμα, διατηρώντας παράλληλα υψηλή εκπομπή στην υπέρυθρη περιοχή για ψύξη με ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας. (Zhao et al., 2019)

Η προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από τη δομή είναι:

$$P_{sun} = A \int_0^\infty d\lambda \varepsilon(\lambda, \theta_{sun}) I_{AM1.5}(\lambda) \quad (\text{Εξ. 9})$$

Χρησιμοποιώντας τον νόμο ακτινοβολίας του Kirchhoff φτάνουμε στις εξισώσεις (8) και (9) για να αντικαταστήσουμε την απορροφητικότητα της δομής με την εκπομπή $\varepsilon(\lambda, \theta)$. Η εξαρτώμενη από την γωνία εκπομπή της ατμόσφαιρας δίνεται από τη σχέση: $\varepsilon_{atm}(\lambda, \theta) = 1 - t(\lambda)^{1-\cos\theta}$, όπου $t(\lambda)$ είναι η ατμοσφαιρική διαπερατότητα στη ζενίθια κατεύθυνση. Στην Εξ. 9, ο ηλιακός φωτισμός αντιπροσωπεύεται από το $I_{AM1.5}(\lambda)$, το φάσμα AM1.5. Ο συντελεστής μάζας αέρα (AM) χρησιμοποιείται ευρέως για τον χαρακτηρισμό του ηλιακού φάσματος αφότου το φως του ήλιου έχει διανύσει την ατμόσφαιρα, η οποία εκφράζεται ως μια αναλογία σχετική με το μήκος της διαδρομής κάθετα προς τα πάνω, δηλαδή το ζενίθ. Η φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας AM1.5 αντιστοιχεί σε ηλιακό ζενίθ γωνίας 48.2°. Στο συγκεκριμένο φάσμα, όπως αυτό απεικονίζεται στην εικόνα 5, η ηλιακή ακτινοβολία είναι κυρίως συμπυκνωμένη στην

περιοχή μικρού μήκους κύματος (0.3-2.5 μm) με την αιχμή να εμφανίζεται στα περίπου 0.5 μm στην ορατή περιοχή.



Εικόνα 5 Φασματική Κατανομή Ηλιακής Ακτινοβολίας

Υποθέτουμε ότι η δομή μας είναι στραμμένη προς τον ήλιο σε σταθερή γωνία θ_{sun} . Έτσι, ο όρος P_{sun} δεν έχει γωνιακό ολοκλήρωμα, και η εκπομπή της δομής αντιπροσωπεύεται από την τιμή της θ_{sun} .

Η ισχύς που χάνεται λόγω μεταφοράς και αγωγής είναι:

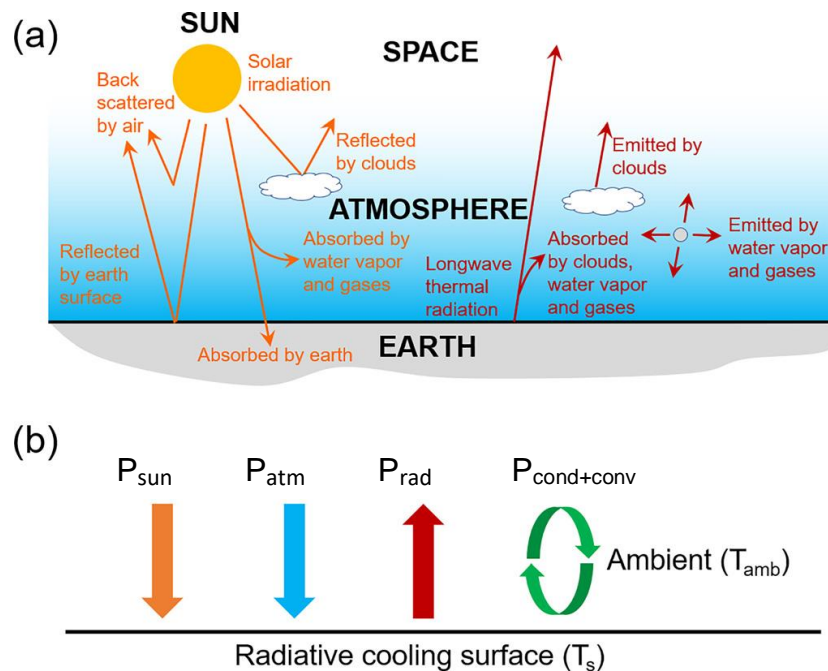
$$P_{\text{cond+conv}}(T, T_{\text{amb}}) = Ah_c(T_{\text{amb}} - T) \quad (\text{Εξ. 10})$$

Όπου, $h_c = h_{\text{cond}} + h_{\text{conv}}$, είναι ένας συντελεστής θερμότητας που αποτυπώνει την συνολική επίδραση της θερμότητας μέσω μεταφοράς και αγωγής λόγω της επαφής του υλικού με εξωτερικές επιφάνειες και τον αέρα.

Η μεταφορά θερμότητας λόγω μεταφοράς και αγωγής μπορεί να είναι είτε ευεργετική είτε επιζήμια για την ψύξη με ακτινοβολία, ανάλογα με τη θερμοκρασία της επιφάνειας ακτινοβολίας ψύξης (T) σε σύγκριση με θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{amb}). Γενικά, για θερμοκρασία T υψηλότερη του περιβάλλοντος η μεταφορά της θερμότητας αυτής είναι ευεργετική για την ψύξη με ακτινοβολία. Ενώ, για τις εφαρμογές όπου η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη του περιβάλλοντος η μεταφορά θερμότητας αυτή δρα ανασταλτικά. Για μια τυπική συσκευή ψύξης με ακτινοβολία η καταστολή της μεταφοράς θερμότητας από όλες τις πλευρές και την κάτω επιφάνεια είναι απαραίτητη, αλλά επιτυγχάνεται εύκολα χρησιμοποιώντας πολύ μονωτικά υλικά. Ωστόσο, για τη μόνωση της άνω επιφάνειας που βλέπει στον ουρανό το υλικό κάλυψης πρέπει να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: (1) υψηλή μετάδοση σε ολόκληρη την υπέρυθρη περιοχή, ειδικά στο «ατμοσφαιρικό παράθυρο» (8–13 μm),

(2) υψηλή μηχανική αντοχή για επιβίωση σε δυσμενή καιρικά φαινόμενα, (3) χαμηλό κόστος και (4) μακροπρόθεσμη ανθεκτικότητα. (Zhao et al., 2019)

Η Εξ. 6 σχετίζεται με την ισχύ ψύξης P_{cool} της επιφάνειας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Μια τέτοια επιφάνεια γίνεται συσκευή ψύξης κατά τη διάρκεια της ημέρας, εάν εκπέμπει περισσότερη θερμότητα στο διάστημα απ' ότι κερδίζει απορροφώντας ηλιακό φως και ατμοσφαιρική θερμική ακτινοβολία. Η εκροή ισχύος P_{cool} ορίζει την ψυκτική του ισχύ σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία του υλικού θα πρέπει να φτάσει μια θερμοκρασία σταθερής κατάστασης μικρότερη από αυτή του περιβάλλοντος. Η λύση της εξίσωσης 6 με $P_{cool}(T)=0$ ορίζει τη θερμοκρασία σταθερής κατάστασης T_s . Στόχος είναι να πετύχουμε ένα υλικό το οποίο κατά τη διάρκεια της ημέρας θα πετυχαίνει $T_s < T_{amb}$.



Εικόνα 6 Σχηματική Απεικόνιση των Αρχών Ψύξης με Ακτινοβολία (Πηγή: Zhao et al., 2019)

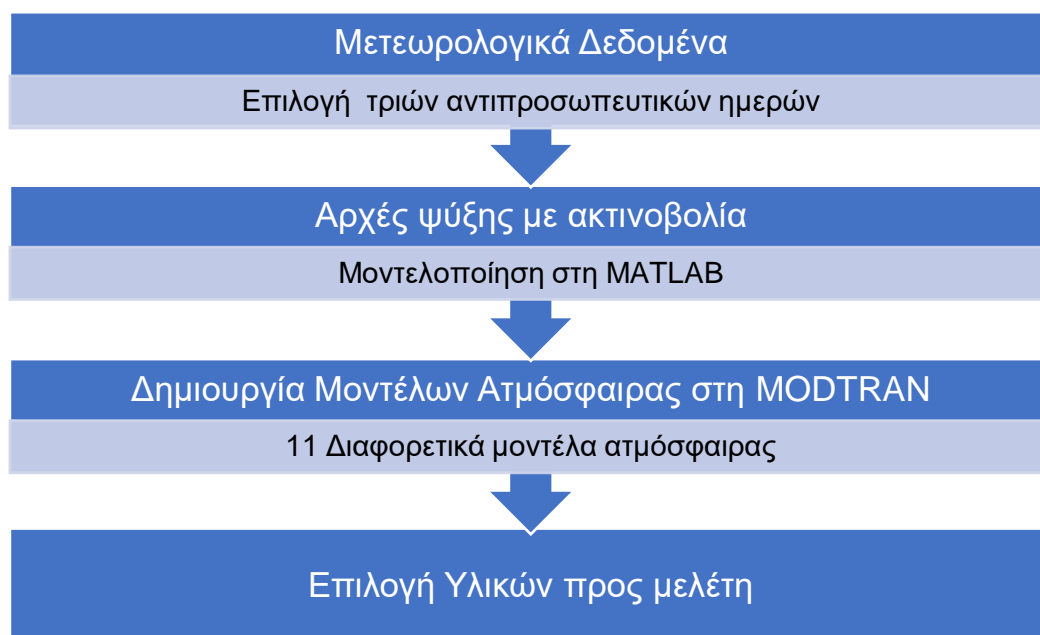
Για να επιτευχθεί ακτινοβολία ψύξης κατά τη διάρκεια της ημέρας, το υλικό πρέπει να ικανοποιεί πολύ αυστηρό σύνολο περιορισμών όπως υπαγορεύεται από την εξίσωση ισορροπίας ισχύος της εξίσωσης 6. Πρώτον, πρέπει να αντανακλά έντονα το ηλιακό φως για να ελαχιστοποιήσει το P_{sun} . Επομένως, πρέπει να αντανακλά έντονα το ορατό και το εύρος του υπέρυθρου μήκους κύματος. Δεύτερον, πρέπει να εκπέμπει έντονα θερμική ακτινοβολία P_{rad} ελαχιστοποιώντας την περιστατική ατμοσφαιρική θερμική ακτινοβολία P_{atm} ελαχιστοποιώντας την εκπομπή του σε μήκη κύματος όπου, η ατμόσφαιρα είναι αδιαφανής. Για αυτό το λόγο, το υλικό πρέπει να εκπέμπει επιλεκτικά και έντονα μόνο μεταξύ 8 μm και 13 μm , όπου η ατμόσφαιρα είναι διαφανής και αντανακλά σε όλα τα άλλα μήκη κύματος. Τέλος, πρέπει να είναι καλά μονωμένο από το περιβάλλον του, έτσι ώστε, να ελαχιστοποιηθεί το h_c και μετέπειτα το $P_{cond+conv}$.

1.4 Σκοπός Εργασίας

Κύριο αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η μελέτη του φαινομένου της ψύξης με ακτινοβολία. Πιο συγκεκριμένα, βασισμένοι στις αρχές της ψύξης με ακτινοβολία αναλύσαμε την συμπεριφορά τριών διαφορετικών υλικών. Πρώτο υλικό, μια επίστρωση που συγκροτείται από στρώσεις διοξειδίου του hafnίου (HfO_2) και διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2). Δεύτερο υλικό, μια επίστρωση πολυ(βινυλιδενο-φθοριούχο-συνεξαφθοροπροπένιο) (P(VDF-HFP)). Και τρίτο υλικό, μια επίστρωση αποτελούμενη από δύο στρώσεις διοξειδίου του αλουμινίου (Al_2O_3) και άργυρο (Ag). Για κάθε ένα από αυτά μελετήθηκε η απόδοση τους σε διαφορετικές ατμόσφαιρες, διαφορετικές εποχές του χρόνου και σε διαφορετικές καιρικές συνθήκες. Στόχος του φαινομένου είναι η μειωμένη θερμοκρασία του υλικού σε σχέση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

2. Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία της παρούσας διπλωματικής εργασίας στηρίζεται στη μοντελοποίηση των αρχών της ψύξης με ακτινοβολία. Η μοντελοποίηση αυτή αξιοποιεί το περιβάλλον εργασίας της MATLAB, που χρησιμοποιείται ευρέως για επαναληπτικές αναλύσεις και διαδικασίες σχεδίασης με τη βοήθεια της γλώσσας του προγραμματισμού.



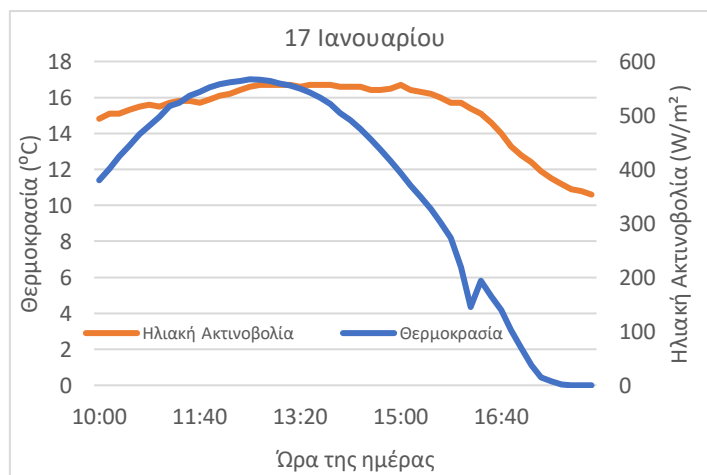
Εικόνα 7 Σχηματική Απεικόνιση Μεθοδολογίας

2.1 Μετεωρολογικά Δεδομένα

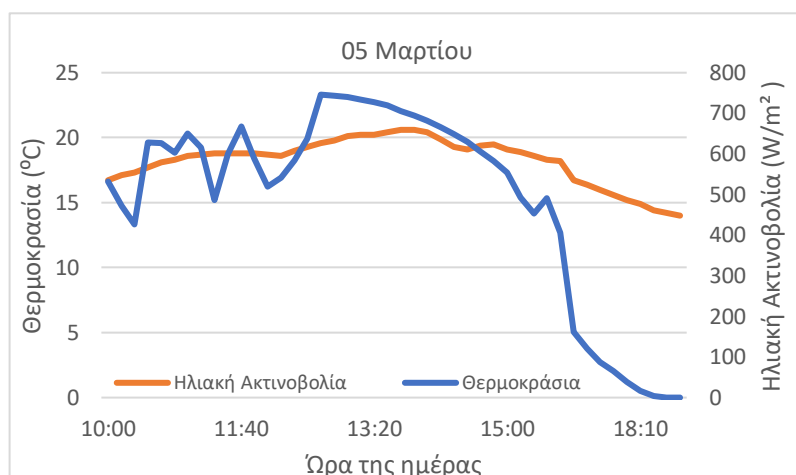
Μελετώντας τα μετεωρολογικά δεδομένα του 2014 για την πόλη των Χανίων, επιλέξαμε τρεις αντιπροσωπευτικές μέρες για χειμώνα, άνοιξη και καλοκαίρι, και εξετάσαμε την απόδοση των υλικών σε αυτές τις μέρες για καθεμία από τις έντεκα διαφορετικές ατμόσφαιρες που δημιουργήσαμε στη MODTRAN.

Οι ημέρες που επιλέχθηκαν είναι:

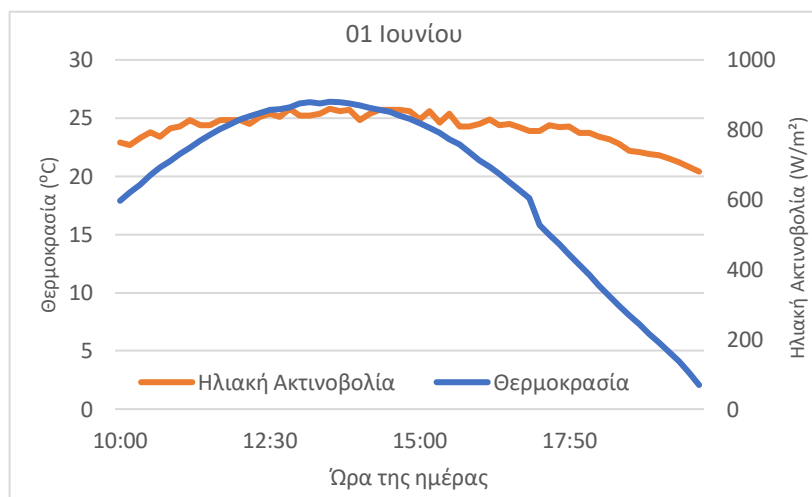
- 17 Ιανουαρίου, όπου $T_{\text{περιβάλλοντος}} = 16.2\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 05 Μαρτίου, όπου $T_{\text{περιβάλλοντος}} = 18.3\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 01 Ιουνίου, όπου $T_{\text{περιβάλλοντος}} = 25.4\text{ }^{\circ}\text{C}$



Διάγραμμα 1 Μετεωρολογικά Δεδομένα της περιοχής για 17 Ιανουαρίου



Διάγραμμα 2 Μετεωρολογικά Δεδομένα της περιοχής για 05 Μαρτίου



Διάγραμμα 3 Μετεωρολογικά Δεδομένα της περιοχής για 01 Ιουνίου

Αναλυτικότερα, από τα διαγράμματα 1,2 και 3, παρατηρείται η μέγιστη ισχύς ηλιακής ακτινοβολίας σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι ημέρες αυτές επιλέχθηκαν λόγω της ομαλής διακύμανσης της θερμοκρασίας με την πάροδο του χρόνου. Αν και στις 05 Μαρτίου η καμπύλη εμφανίζει διακυμάνσεις της θερμοκρασίας επιλέχθηκε για να μελετήσουμε τι συμβαίνει και σε μια τέτοια αντίστοιχη περίπτωση διακύμανσης. Όπως θα ήταν λογικό, την 1^η Ιουνίου εμφανίζονται οι υψηλότερες τιμές σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και σε ισχύ ηλιακής ακτινοβολίας και την 17^η Ιανουαρίου εμφανίζονται οι μικρότερες αντίστοιχες τιμές.

2.2 Μοντελοποιήσεις

2.2.1 MATLAB

Η μοντελοποίηση στην MATLAB δεν περιλαμβάνει τίποτα παραπάνω από τις εξισώσεις που μας συστήθηκαν στην παράγραφο 1.2.1. Λόγω του ότι καθεμία από τις παραμέτρους της εξίσωσης (1) εξαρτάται από την θερμοκρασία απαραίτητο θεωρήθηκε να φτιάξουμε διαφορετικά αρχεία κώδικα προγραμματισμού για καθένα από αυτά. Να σημειωθεί ότι δημιουργήσαμε τον κώδικα θεωρώντας ότι για $P_{cool} < 0$ το υλικό ψύχεται, ενώ για θετικές τιμές ψυκτικής ισχύος το υλικό θερμαίνεται. Αφού λοιπόν, όπως φαίνεται και στην εξ. (1), $P_{cool}(T) = P_{rad}(T) - P_{atm}(T_{amb}) - P_{sun} - P_{cond+conv}$, θα έχουμε 4 διαφορετικά αρχεία για κάθε μία από τις ισχύεις που εξαρτάται η P_{cool} . Εκτός βέβαια από τα 4 αυτά βασικά αρχεία υπολογισμού, δημιουργήσαμε και 2 επιπλέον αρχεία, το ένα εντάσσει στον κώδικα υπολογισμού P_{cool} τις σταθερές που ορίζουμε και το άλλο ορίζει τις συνθήκες περιβάλλοντος που θα τρέχει το μοντέλο μας. Ένας επιπλέον κώδικας αντλεί περιεχόμενο από τα 6 αυτά αρχεία και υπολογίζει με βάση την εξίσωση (1) την ισχύ ψύξης του υλικού. Από αυτούς τους 7 κώδικες μόνο 2 δέχονται input. Υπάρχει ξεχωριστός κώδικας που δέχεται τις σταθερές του Planck, του Boltzmann και τον τύπο υπολογισμού της φασματικής ακτινοβολίας ενός μαύρου σώματος. Ο κώδικας για τις περιβαλλοντικές συνθήκες δέχεται πίνακες για την εκπομπή της ατμόσφαιρας, της επιφάνειας καθώς και δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία.

2.2.2 MODTRAN

Αναγκαία θεωρήθηκε η δημιουργία διαφόρων ατμοσφαιρικών μοντέλων για την μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών. Για το λόγο αυτό επιλέξαμε το περιβάλλον εργασίας της MODTRAN. Η MODTRAN χρησιμοποιείται ευρέως για προβλέψεις και αναλύσεις οπτικών μετρήσεων μέσω της ατμόσφαιρας.

Διαθέτει 6 διαφορετικά μοντέλα ατμόσφαιρας:

- Tropical
- Mid-Latitude Summer
- Mid-Latitude Winter
- Sub-Arctic Summer
- Sub-Arctic Winter
- 1976 U.S. Standard

Mode

☒ Transmittance
☐ Radiance

Atmosphere Model ⓘ

Mid-Latitude Summer ▾

Water Column (atm-cm) ⓘ

3635.9

Ozone Column (atm-cm) ⓘ

0.33176

CO₂ (ppmv) ⓘ

400

CO (ppmv) ⓘ

0.15

CH₄ (ppmv) ⓘ

1.8

Ground Temperature (K) ⓘ

294.2

Ground Albedo ⓘ

0

Aerosol Model ⓘ

Rural ▾

Visibility (km) ⓘ

23.0

Sensor Altitude ⓘ

50 km ▾

Sensor Zenith ⓘ

180 deg ▾

Spectral Units

☐ Wavenumbers (cm⁻¹)
☒ Microns (μm)

Spectral Range

0.4 μm

1.0 μm

Resolution

0.003 μm

Εικόνα 8 Περιβάλλον εργασίας MODTRAN
[<http://modtran.spectral.com>]

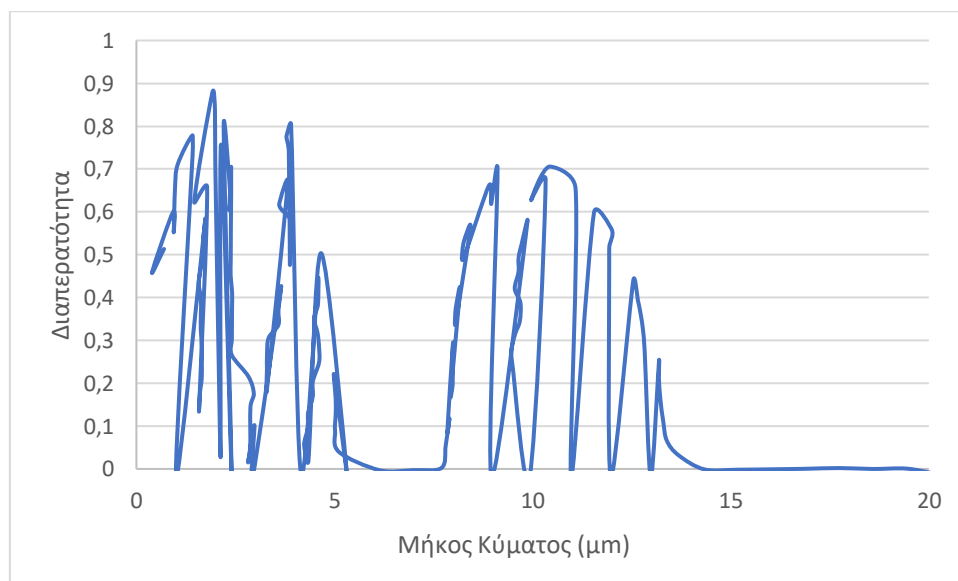
Το περιβάλλον εργασίας, όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 8, διαθέτει διάφορα πεδία, τα οποία αλλάζουν αυτόματα ανάλογα με το μοντέλο ατμόσφαιρας που θα επιλεγθεί. Αυτό βέβαια δεν μας εμποδίζει από το να αλλάξουμε οποιαδήποτε τιμή θέλουμε αν θεωρήσουμε ότι αυτό είναι απαραίτητο. Μια τιμή που έχει περιορισμό είναι η Albedo. Η Albedo χαρακτηρίζει την ανακλαστικότητα οποιασδήποτε επιφάνειας, εκφράζεται ως ο λόγος της ακτινοβολίας που αντανακλάται από την επιφάνεια προς την ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια. Δέχεται τιμές από 0 έως 1. Μια επιφάνεια με υψηλή Albedo αντανακλά μεγάλο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας από τον ήλιο πίσω στην ατμόσφαιρα, ενώ μια επιφάνεια με χαμηλή Albedo αντανακλά μικρότερο ποσοστό αυτής, απορροφώντας την αντί αυτού. Και ακόμα μια τιμή που έχει περιορισμό είναι το εύρος του μήκους κύματος που δέχεται τιμές από 0.4μm έως 20μm. Στον πίνακα 2, παρατίθενται οι τιμές των παραμέτρων για κάθε ατμοσφαιρικό μοντέλο, όπως αυτές εμφανίζονται με την επιλογή του εκάστοτε μοντέλου.

Mol\Atm	Tropical	Mid Lat Summer	Mid Lat Winter	Sub Arc Summer	Sub Arc Winter	US Standard
H₂O	5119.4	3635.9	1059.7	2589.4	517.73	1762.3
O₃	0.27727	0.33176	0.37681	0.34492	0.3755	0.34356
CO₂	305.87	305.13	305.99	303.47	304.21	304.48
CO	0.087663	0.08774	0.090032	0.088048	0.090924	0.088742
CH₄	1.3243	1.2684	1.2806	1.2556	1.2719	1.3203
N₂O	0.24649	0.23743	0.24037	0.2192	0.23993	0.24593
O₂	168230	167820	168290	166910	167320	167460
NH₃	0.00016986	0.00017121	0.00018032	0.00017393	0.00018409	0.00017517
NO	0.00031691	0.00032271	0.00030953	0.00032243	0.00030233	0.0003139
NO₂	0.00021091	0.00021814	0.00019842	0.00021543	0.00018654	0.00020418
SO₂	0.00010799	0.00010838	0.00011245	0.00010928	0.00011391	0.00010997
HNO₃	0.00037983	0.00038298	0.00035617	0.00037403	0.00033808	0.0003

Πίνακας 2 Τιμές για κάθε ατμοσφαιρικό μοντέλο της MODTRAN [<http://modtran.spectral.com>]

Τα διάφορα μοντέλα διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους περισσότερο στα προφίλ της θερμοκρασίας τους και στα προφίλ H_2O και O_3 . Στη σύγκριση των μοντέλων παρατηρείται μικρή απόκλιση στις τιμές της θερμοκρασίας σε χαμηλά υψόμετρα, ενώ όσο αυξάνεται το υψόμετρο η απόκλιση της θερμοκρασίας από μοντέλο σε μοντέλο διαφέρει αρκετά. Τα προφίλ H_2O και O_3 αναφέρονται στις συγκεντρώσεις νερού και όζοντος αντίστοιχα που συναντάμε στα διάφορα μοντέλα ατμόσφαιρας. Στα προφίλ αυτά παρατηρείται αρκετά μεγάλη διακύμανση των συγκεντρώσεων σε χαμηλά υψόμετρα ενώ σε μεγαλύτερα υψόμετρα τείνουν να ταυτιστούν.

Τα αποτελέσματα της MODTRAN σε καθένα από τα μοντέλα ατμόσφαιρας είναι ένα διάγραμμα που δείχνει πώς μεταβάλλεται η διαπερατότητα σε σχέση με το μήκος κύματος. Η μορφή του διαγράμματος αυτού αποτυπώνεται στην εικόνα 9. Προκειμένου να εξάγουμε αναλυτικά τα δεδομένα του διαγράμματος (Εικόνα 9), χρησιμοποιήσαμε το διαδικτυακό εργαλείο WebPlotDigitizer. [WebPlotDigitizer, <https://apps.automeris.io/wpd/>]. Η εφαρμογή αυτή έχει την δυνατότητα να εξάγει δεδομένα από εικόνες διαγραμμάτων σε αρχεία Excel. Έτσι διαθέτουμε αναλυτικά τα δεδομένα εκπομπής της ατμόσφαιρας που μας ενδιαφέρουν για τον κώδικα της MATLAB.



Εικόνα 9 Μορφή Αποτελέσματος της MODTRAN [<http://modtran.spectral.com>]

Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των 11 διαφορετικών μοντέλων ατμόσφαιρας που δημιουργήθηκαν.

ΜΟΝΤΕΛΟ	ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ	Συγκέντρωση H_2O [mol/atm]	Συγκέντρωση O_3 [mol/atm]	Συγκέντρωση CO_2 [mol/atm]	GroundAlbedo
1	Mid-Latitude Summer	3635.90	0.3	400	0
2	MidLatitude Summer	3635.90	0.	409.95	0.2
3	Tropical	5119.40	0.27	409.95	0.2
4	Tropical	5119.40	0.27	400	0
5	SubArctic Summer	2589.40	0.34	400	0
6	SubArctic Winter	517.73	0.37	400	0
7	Mid-Latitude Winter	1059.70	0.37	400	0
8	US Standard 1976	1762.30	0.34	400	0
9	MidLatitude Summer	1500	0.33	400	0
10	MidLatitude Summer	1200	0.33	400	0
11	MidLatitude Summer	1400	0.33	400	0

Πίνακας 3 Βασικά χαρακτηριστικά των μοντέλων ατμόσφαιρας που δημιουργήσαμε [<http://modtran.spectral.com>]

Η MODTRAN δεν μας δίνει άμεσα πληροφορία για τη σχετική υγρασία για κάθε ένα μοντέλο δίνει όμως την τιμή στήλης νερού (Water Column [mol/atm]). Η τιμή αυτή μεταφράζεται σε grH_2O/cm^2 , και παρουσιάζεται στον πίνακα 4. Όσο περισσότερα grH_2O υπάρχουν στην ατμόσφαιρα τόσο υψηλότερη είναι και η τιμή της σχετικής υγρασίας σε αυτή.

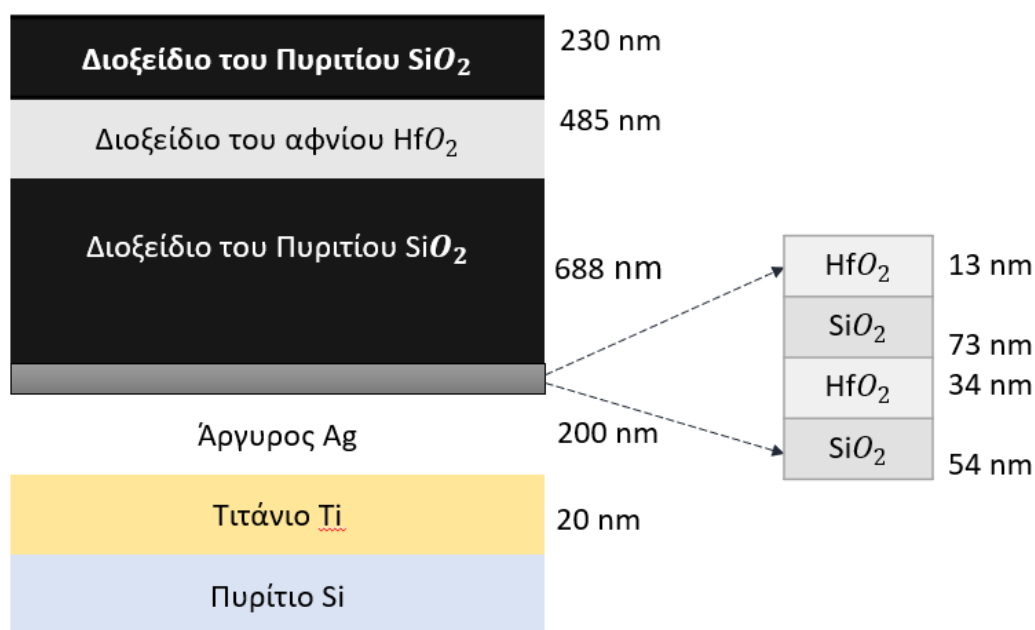
Simulation	Water Column	
	mol/atm	gr/cm ²
1	3635.9	2.923
2	3635.9	2.923
3	5119.4	4.115
4	5119.4	4.115
5	2589.4	2.082
6	517.73	0.416
7	1059.7	0.852
8	1762.3	1.417
9	1500	1.206
10	1200	0.965
11	1400	1.125

Πίνακας 4 Μετατροπή τιμών Modtran Water Column από atm·cm σε gr/cm²

2.3 Υλικά που μοντελοποιήθηκαν

2.3.1 Διοξείδιο του αφνίου και διοξείδιο του πυριτίου

Το $\text{HfO}_2 + \text{SiO}_2$ που θα αναλύσουμε συγκροτείται από στρώσεις διοξειδίου του αφνίου (HfO_2) και διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και αντανακλά το 97 % του προσπίπτοντος ηλιακού φωτός ενώ εκπέμπει έντονα και επιλεκτικά στο «ατμοσφαιρικό παράθυρο».



Εικόνα 10 Σύσταση Διοξειδίου του αφνίου και διοξειδίου του πυριτίου [Raman et al., 2014]

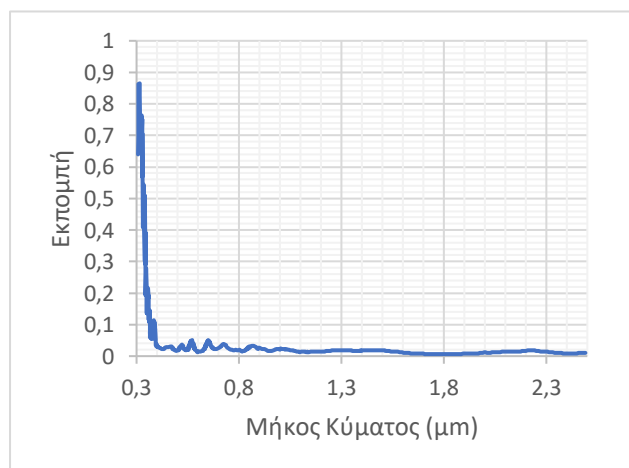
Αναλυτικότερα, αποτελείται από επτά εναλλασσόμενα στρώματα HfO_2 και SiO_2 ποικίλου πάχους, ακολουθεί ένα στρώμα πάχους 200nm ασήμι (Ag), και όλα αυτά είναι κατατεθειμένα πάνω σε μια γκοφρέτα πυριτίου πάχους 200nm. Τα τέσσερα κάτω στρώματα των HfO_2 και SiO_2 έχουν πάχος που είναι μικρότερο των 100nm και βοηθούν στη βελτιστοποίηση της ηλιακής ανάκλασης.

Τα τρία πρώτα στρώματα είναι πολύ παχύτερα και είναι κυρίως υπεύθυνα για τη θερμική ακτινοβολία από το υλικό. Το HfO_2 , είναι ένα υψηλής περιεκτικότητας υλικό και χαμηλής απορρόφησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επικαλύψεις σε ένα μεγάλο εύρος του μήκους κύματος από 250nm (υπεριώδεις ακτινοβολία) έως 10μm (υπέρυθρη ακτινοβολία). Το άφνιο(Hf) είναι το συστατικό υψηλού δείκτη που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με στρώματα διοξειδίου του πυριτίου για την παραγωγή επικαλύψεων με υψηλά όρια ζημιών. Το SiO_2 είναι ένα οπτικά διαφανές υλικό χαμηλού δείκτη και χαμηλής απορρόφησης το οποίο χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με επιστρώσεις οξειδίου υψηλού δείκτη που λειτουργούν στις περιοχές μήκους κύματος από 200nm (υπεριώδεις ακτινοβολία) έως 3μm (υπέρυθρη

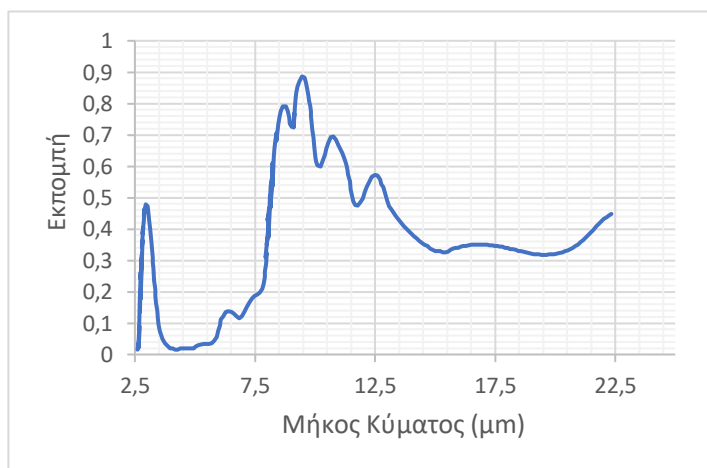
ακτινοβολία). Οι τυπικές εφαρμογές περιλαμβάνουν επικαλύψεις αντι-αντανάκλασης για οπτικά λέιζερ. Το πυρίτιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με συγκεκριμένα στρώματα υψηλού δείκτη, για παράδειγμα Hafnia, Zirconia και Tantalum, για τη δημιουργία πολυστρωματικών δομών με υψηλά όρια ζημιών. Ωστόσο, η χρήση του HfO_2 δεν είναι απαραίτητη και μπορεί να αντικατασταθεί με διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2), το οποίο είναι λιγότερο ακριβό. Ο συνδυασμός όλων αυτών των στρωμάτων έχει ως αποτέλεσμα μια μακροσκοπική επίπεδη και ολοκληρωμένη δομή που επιτυγχάνει συλλογικά υψηλή ηλιακή ανάκλαση και ισχυρές θερμικές εκπομπές.

Στα διαγράμματα 4 και 5 απεικονίζεται το φάσμα εκπομπής του υλικού. Η φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας θεωρείται η AM1.5. Ο συντελεστής μάζας αέρα (AM) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό του ηλιακού φάσματος αφότου το φως του ήλιου έχει διανύσει την ατμόσφαιρα, η οποία εκφράζεται ως μια αναλογία σχετική με το μήκος της διαδρομής κάθετα προς τα πάνω, δηλαδή το ζενίθ. Η φασματική κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας AM1.5 αντιστοιχεί σε ηλιακό ζενίθ γωνίας 48.2° . Στο συγκεκριμένο φάσμα, όπως αυτό απεικονίζεται στην εικόνα 9, η ηλιακή ακτινοβολία είναι κυρίως συμπυκνωμένη στην περιοχή μικρού μήκους κύματος ($0.3\text{--}2.5\ \mu\text{m}$) με την αιχμή να εμφανίζεται στα περίπου $0.5\ \mu\text{m}$ στην ορατή περιοχή.

Στο διάγραμμα 4, το υλικό αντανάκλα περίπου το 97% της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας. Αντίθετα, στο διάγραμμα 5 παρατηρούμε ότι το υλικό έχει ισχυρή και εξαιρετικά επιλεκτική εκπομπή στο «ατμοσφαιρικό παράθυρο» που μας ενδιαφέρει μεταξύ $8\ \mu\text{m}$ και $13\ \mu\text{m}$.



Διάγραμμα 4 Μετρημένη εκπομπή του υλικού σε μήκος κύματος $0,3 \leq \lambda \leq 2,5$.



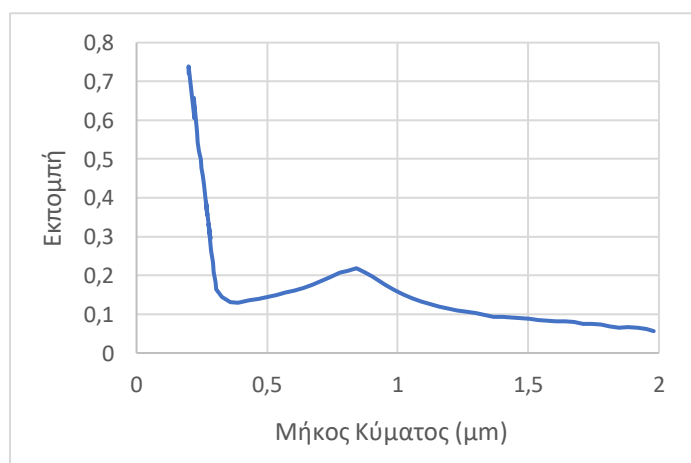
Διάγραμμα 5 Μετρημένη εκπομπή του υλικού σε μήκος κύματος $2,5 \leq \lambda \leq 22,5$.

2.3.2 Πολυ(βινυλιδενο-φθοριούχο-συν-εξαφθοροπροπένιο)

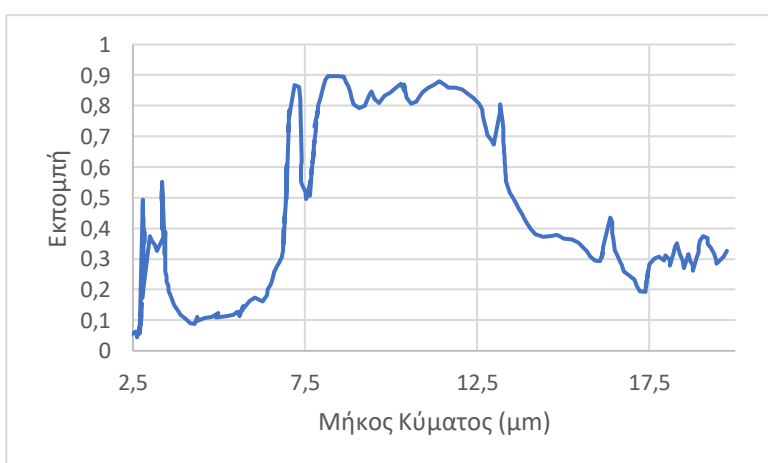
Το πολυ(βινυλιδενο-φθοριούχο-συν-εξαφθοροπροπένιο), (P(VDF-HFP)) αποτελεί μια αποτελεσματική επίστρωση ψύξης με σχεδόν ιδανικό επιλεκτικό φάσμα εκπομπής. Τέσσερα διαφορετικά λειτουργικά νανοσωματίδια ενσωματώθηκαν σε μια επίστρωση πολυ(βινυλιδενο-φθοριούχο-συν-εξαφθοροπροπενίου) (P(VDF-HFP)). Η σύνθετη αυτή επίστρωση P(VDF-HFP) παρουσιάζει εξαιρετικές ιδιότητες, αφού διαθέτει σχεδόν ιδανικό προφίλ εκπομπής και έχει ένα καλό προφίλ ψύξης. Προκειμένου, ένα υλικό να ενταχθεί στην αγορά για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές πρέπει να διαθέτει ένα υπόστρωμα που θα είναι άκαμπτο ή εύκαμπτο, να μπορεί να τεθεί σε εκτεταμένη παραγωγή και η τιμή του να είναι προσιτή. Για το λόγο αυτό, το φιλμ αργιλίου PET επιλέχθηκε ως υπόστρωμα επίστρωσης λόγω του ότι είναι εύκαμπτο, φθινό, μαζικής κατασκευής και έχει ικανότητά εφαρμογής σε διάφορα πεδία.

Το (P(VDF-HFP)) έχει ιδανικές ενδογενείς ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες για εφαρμογές παθητικής ψύξης με ακτινοβολία. Πρώτον, έχει έναν αμελητέο συντελεστή απόσβεσης στα ηλιακά μήκη κύματος ($\lambda=0.3-2.5 \mu\text{m}$), πράγμα που διατηρεί την ηλιακή θέρμανση στο ελάχιστο. Δεύτερον, το πολυμερές έχει πολλαπλές κορυφές έκτασης στα θερμικά μήκη κύματος, συμπεριλαμβανομένων 14 στο «ατμοσφαιρικό παράθυρο», οι οποίες προκύπτουν από τους διαφορετικούς τρόπους δόνησης της μοριακής του δομής. Συνεπώς, το (P(VDF-HFP)) εκπέμπει αποτελεσματικά τη θερμότητα στο «ατμοσφαιρικό παράθυρο».

Στα διαγράμματα 6 και 7 απεικονίζεται το φάσμα εκπομπής του υλικού. Το ηλιακό φάσμα θεωρήθηκε ότι συμπίπτει με το AM1.5. Στο διάγραμμα 7, το υλικό αντανακλά περίπου το 90% της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας, ενώ στο διάγραμμα 6, παρατηρείται ισχυρή και εξαιρετικά επιλεκτική εκπομπή του υλικού στο «ατμοσφαιρικό παράθυρο».



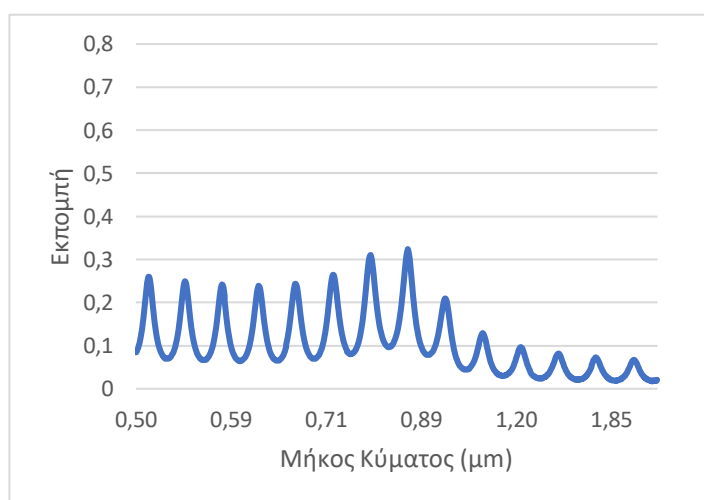
Διάγραμμα 7 Μετρημένη εκπομπή PVDF σε μήκος κύματος $0,3 \leq \lambda \leq 2$



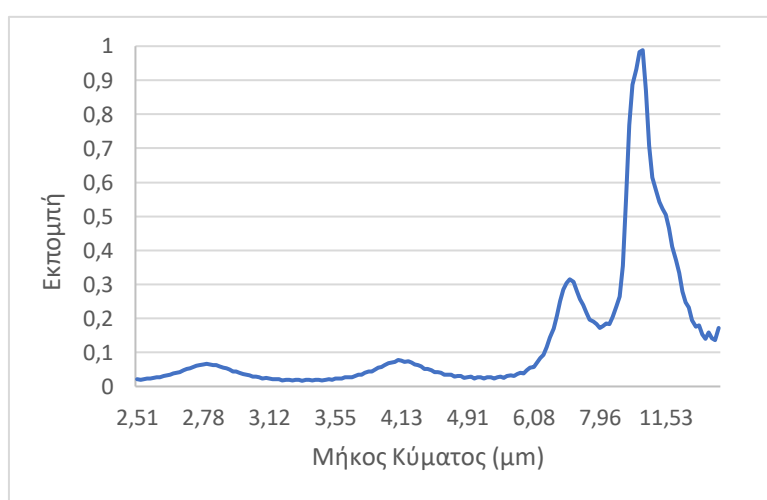
Διάγραμμα 6 Μετρημένη εκπομπή PVDF σε μήκος κύματος $2,5 \leq \lambda \leq 20$

2.3.3 Οξείδιο του Αργιλίου και Άργυρος

Το ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ag}$) αποτελείται από δυο στρώσεις οξειδίου του αργιλίου (Al_2O_3) και άργυρο (Ag). Πιο συγκεκριμένα, έχουμε ένα στρώμα πάχους 3.15 μm Al_2O_3 και ένα στρώμα πάχους 0.2 μm Ag. Στα διαγράμματα 8 και 9, απεικονίζεται το φάσμα εκπομπής του υλικού. Το ηλιακό φάσμα θεωρήθηκε ότι συμπίπτει με το AM1.5. Στο διάγραμμα 9, το υλικό αντανακλά περίπου το 85% της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας. Αντιθέτως, στο διάγραμμα 8, παρατηρείται ισχυρή και εξαιρετικά επιλεκτική εκπομπή του υλικού στο «ατμοσφαιρικό παράθυρο», η οποία φτάνει να εκτοξεύεται μέχρι και το 100%, τιμή που κανένα από τα άλλα υλικά μελέτης δεν κατάφεραν.



Διάγραμμα 9 Μετρημένη εκπομπή Al_2O_3 σε μήκος κύματος $0,5 \leq \lambda \leq 2,5$



Διάγραμμα 8 Μετρημένη εκπομπή Al_2O_3 σε μήκος κύματος $2,5 \leq \lambda \leq 18$

3. Αποτελέσματα - Συζήτηση

Σε αυτό κεφάλαιο, θα γίνει μία επισκόπηση των αποτελεσμάτων, ενώ δε θα παραληφθεί η αναλυτική περιγραφή και ο σχολιασμός τους.

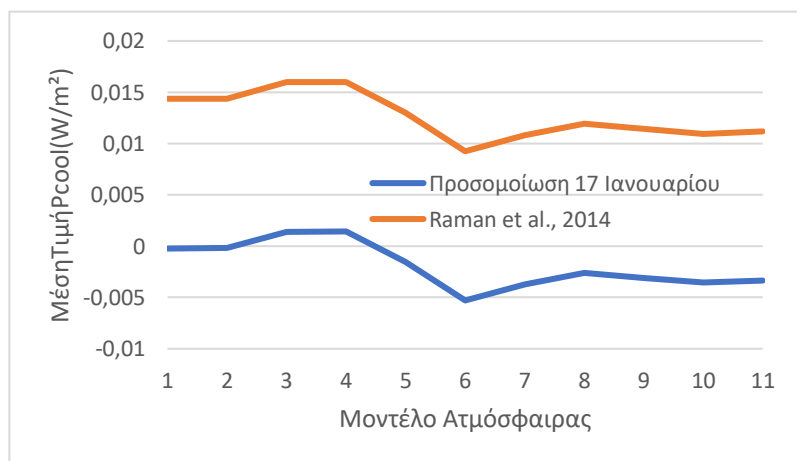
3.1 Διοξείδιο του Αφνίου και διοξείδιο του Πυριτίου

3.1.1 Επιβεβαίωση μοντέλου της MATLAB

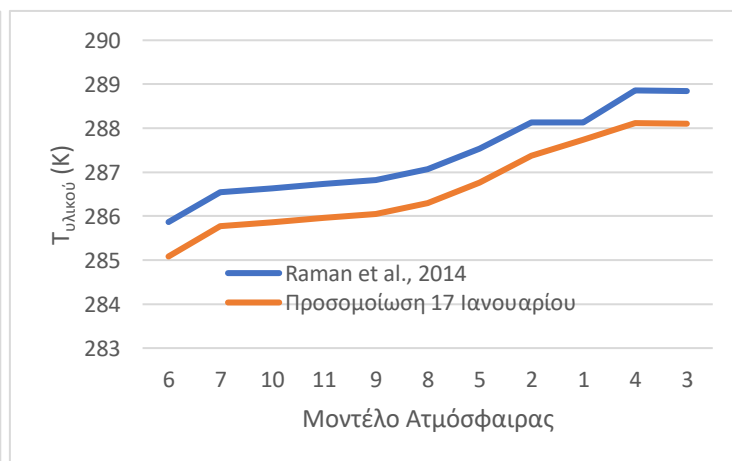
Απαραίτητος θεωρήθηκε ο έλεγχος της μοντελοποίησης στη MATLAB ως προς τα αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, συγκρίναμε τα πρώτα αποτελέσματα του υλικού με αυτά που προέκυψαν από τη δημοσίευση του Raman [Raman et al., 2014].

Αφού τρέξαμε τις προσομοιώσεις μας για την ημέρα του χειμώνα που επιλέχθηκε παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα αυτής, αν και χαμηλότερα σε απόδοση, είναι ανάλογα των αποτελεσμάτων που παίρνουμε από τον Raman [Raman et al., 2014].

Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα 10 και 11, οι διακυμάνσεις των τιμών είναι ίδιες και αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο κώδικας προσομοίωσης που δημιουργήσαμε λειτουργεί ορθά. Έτσι, μπορούμε πια να εκτελέσουμε όλες τις απαραίτητες δοκιμές σε αυτό το υλικό αλλά και στα επόμενα.

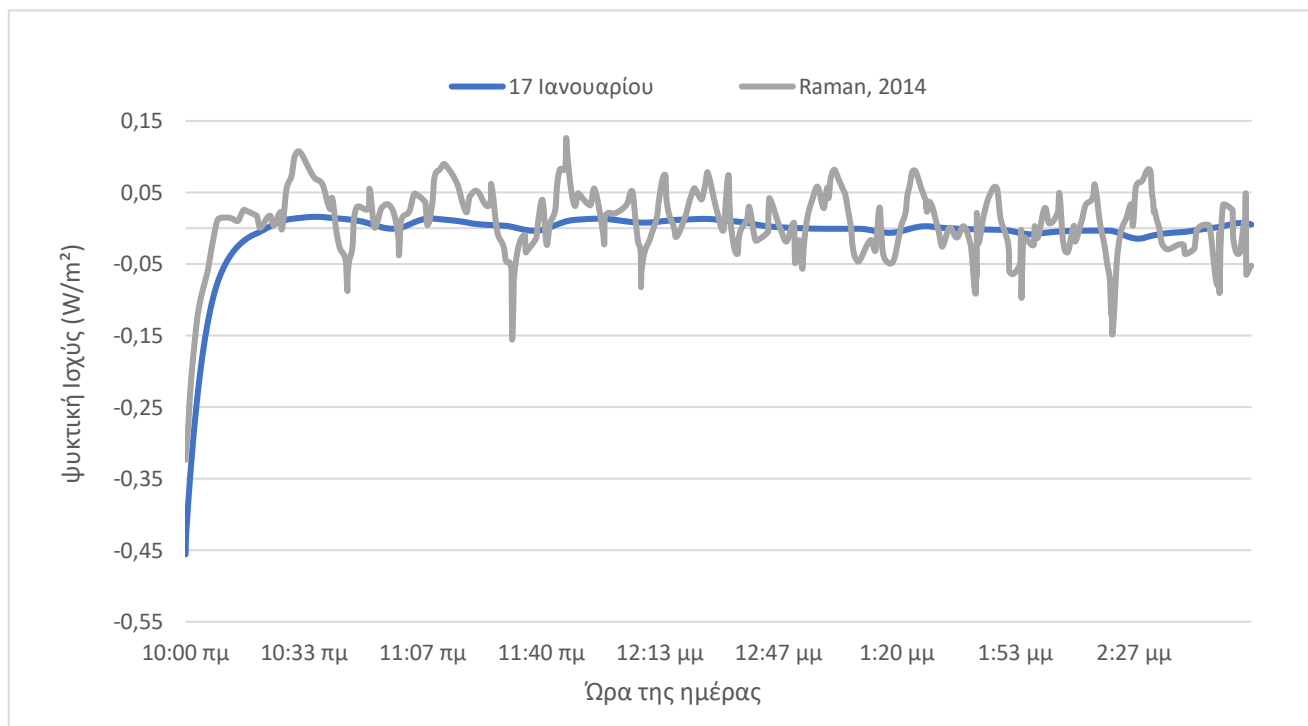


Διάγραμμα 11 Σύγκριση μέσης ψυκτικής ισχύος ανά προσομοίωση Raman [Raman et al., 2014] και 17/01.



Διάγραμμα 10 Σύγκριση μέσης θερμοκρασίας υλικού ανά προσομοίωση Raman [Raman et al., 2014] και 17/01.

Στο διάγραμμα 11 αναλύουμε λίγο περισσότερο την ψυκτική ισχύ του αποδοτικότερου μοντέλου ατμόσφαιρας. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 10 το μοντέλο ατμόσφαιρας 6 είναι το αποδοτικότερο καθώς εμφανίζει την χαμηλότερη θερμοκρασία υλικού. Από τα δεδομένα ψυκτικής ισχύος για αυτό το μοντέλο ατμόσφαιρας στις 17 Ιανουαρίου και στην προσομοίωση του Raman[Raman et al., 2014], παρατηρείται μια αισθητή διαφορά στις καμπύλες. Από τις πρώτες ώρες της ημέρας έχουμε άνοδο της ψυκτικής ισχύος και στις δύο περιπτώσεις. Ωστόσο με την πάροδο του χρόνου παρατηρούνται αυξομειώσεις στο μοντέλο του Raman[Raman et al., 2014], ενώ στο δικό μας μοντέλο έχουμε σχεδόν ευθεία γραμμή από τις 10:30 π.μ. περίπου. Αυτό ίσως οφείλεται στο ότι το μοντέλο του Raman[Raman et al., 2014] αναφέρεται σε πιο ρεαλιστικά δεδομένα, ενώ η δική μας προσομοίωση είναι απόλυτα θεωρητική.



Διάγραμμα 12 Ψυκτική Ισχύς αποδοτικότερου μοντέλου ατμόσφαιρας συγκριτικά με αυτή του Raman[Raman et al., 2014] και 17 Ιανουαρίου

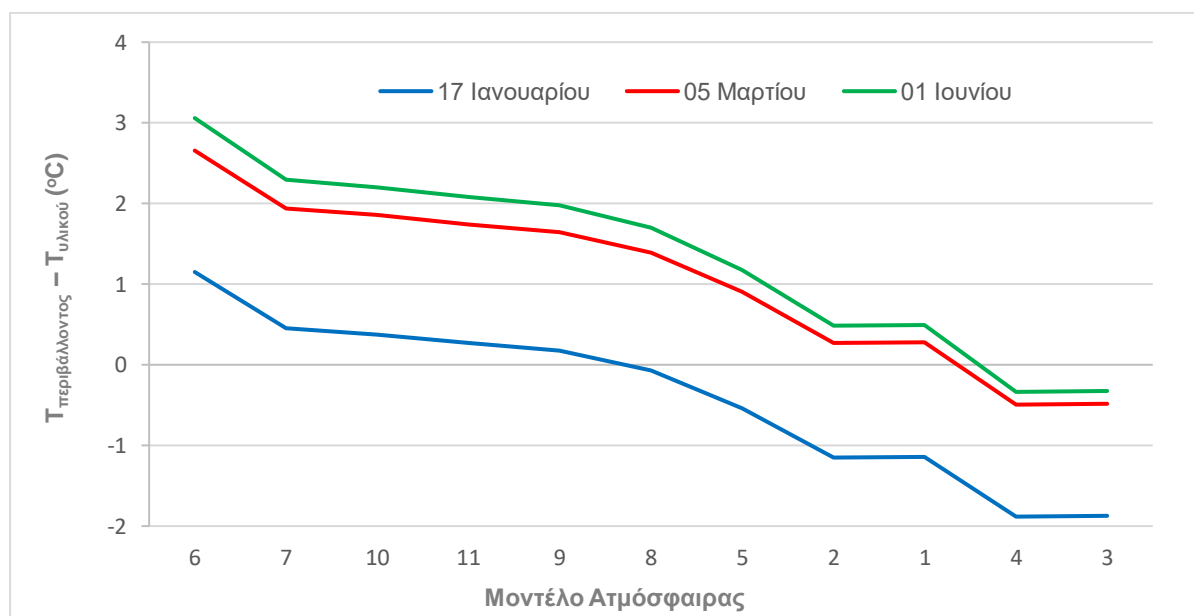
3.1.2 Αποτελέσματα

Έχοντας πραγματοποιήσει όλες τις απαραίτητες δοκιμές στο υλικό μας παραθέτουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.

Όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα 13, παρατηρείται υψηλότερη απόδοση του υλικού στο μοντέλο ατμόσφαιρας 6. Πιο συγκεκριμένα, έχουμε μια θερμοκρασία υλικού περίπου 3 °C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος για την καλοκαιρινή ημέρα που μελετήθηκε. Ακολουθεί η ανοιξιάτικη ημέρα, όπου η θερμοκρασία του υλικού είναι περίπου 2.5 °C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και στη συνέχεια η χειμερινή ημέρα όπου έχουμε μια διαφορά θερμοκρασίας περίπου 1 °C.

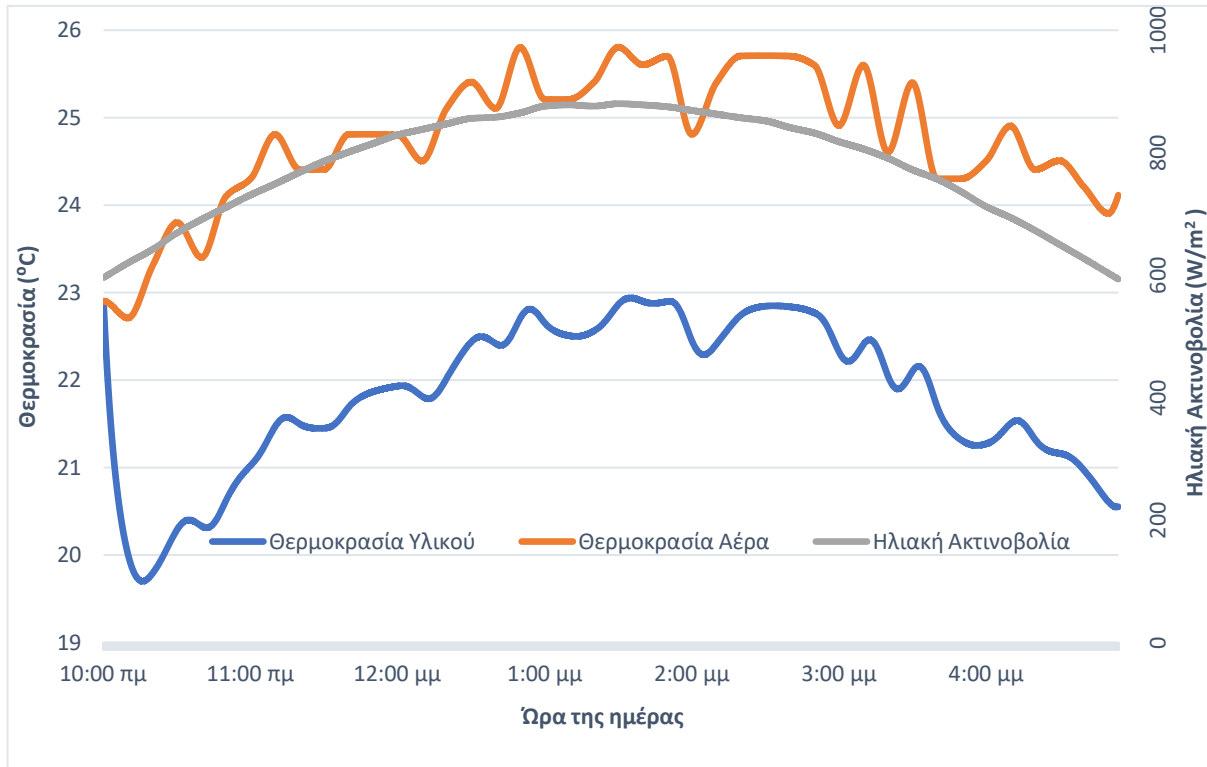
Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την χειμερινή περίοδο, για ορισμένα μοντέλα ατμόσφαιρας προκύπτει η επιφάνεια του υλικού να είναι πιο ψυχρή από το περιβάλλον ($T_{\text{περιβάλλοντος}} > T_{\text{υλικού}}$), ενώ για άλλα μοντέλα το φαινόμενο της ψύξης με ακτινοβολία δρα ανασταλτικά και θερμαίνει το υλικό μας ($T_{\text{περιβάλλοντος}} < T_{\text{υλικού}}$) κάτι που όμως ανταποκρίνεται στις ανάγκες της τρέχουσας περιόδου.

Σε τροπικές ατμόσφαιρες, όπως είναι τα μοντέλα 3 και 4, παρατηρείται θέρμανση του υλικού και στις τρεις διαφορετικές ημερομηνίες μελέτης άρα χαμηλή επίδοση του φαινομένου της ψύξης με ακτινοβολία.

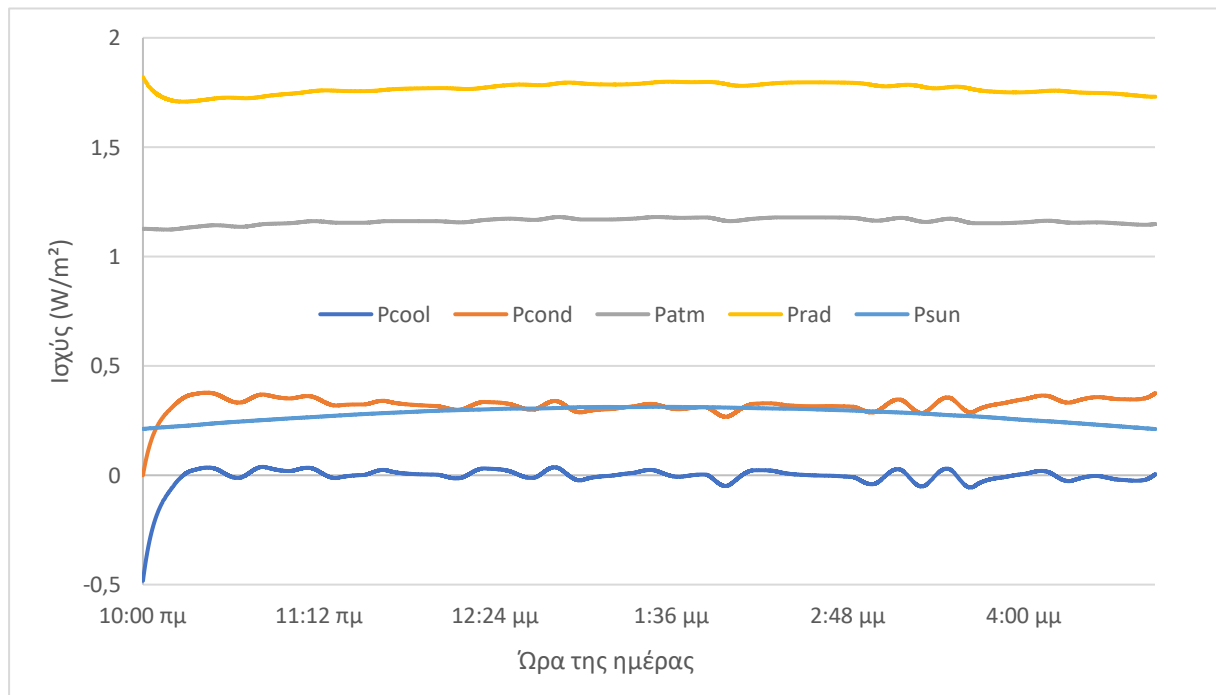


Διάγραμμα 13 Μέση διαφορά θερμοκρασίας περιβάλλοντος και υλικού για κάθε ένα διαφορετικό μοντέλο ατμόσφαιρας

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 14, από την αρχή κιάλας των δοκιμών, παρατηρείται πτώση της θερμοκρασίας του υλικού περίπου 3°C κάτω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Να σημειωθεί ότι για το διάστημα μεταξύ 13:00 και 15:00, όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι μέγιστη, η θερμοκρασία του υλικού παραμένει σχεδόν σταθερά μειωμένη κατά 3°C σε σχέση με αυτή του αέρα.



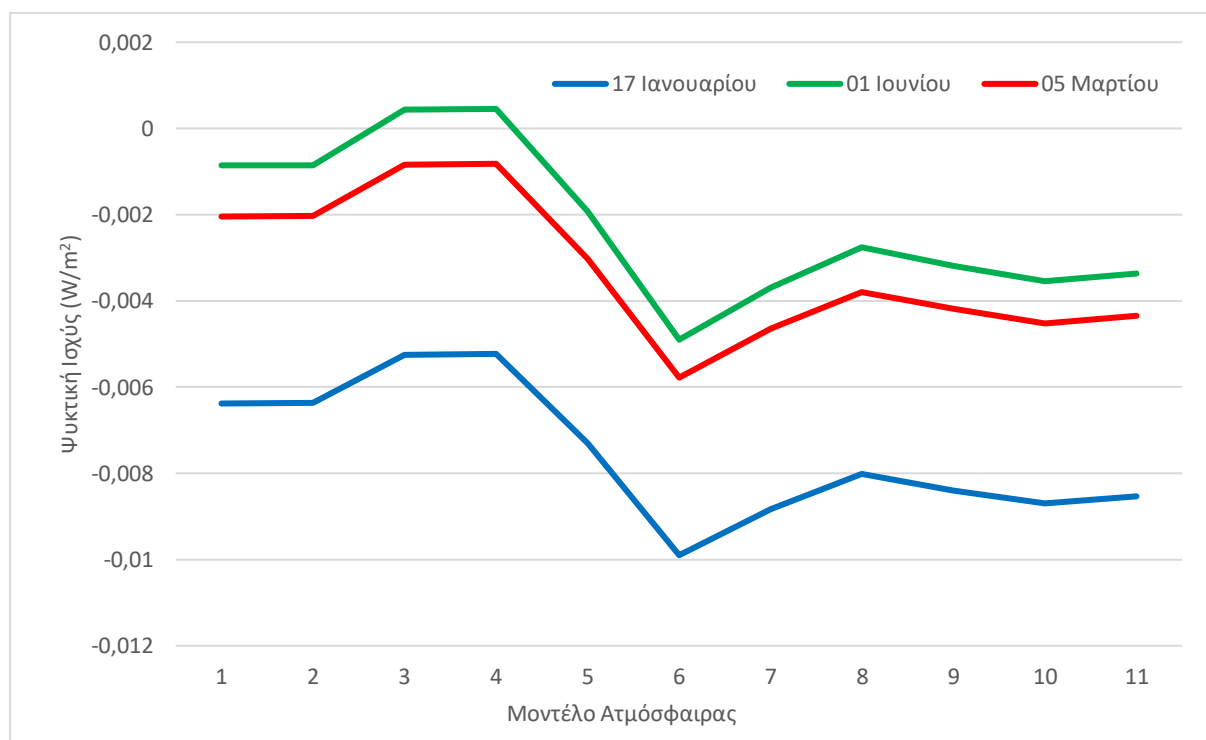
Διάγραμμα 15 Σύγκριση θερμοκρασίας υλικού και θερμοκρασίας του αέρα για την προσομοίωση 6 την 1^η Ιουνίου



Διάγραμμα 14 Ισχύς για την προσομοίωση 6 την 1^η Ιουνίου

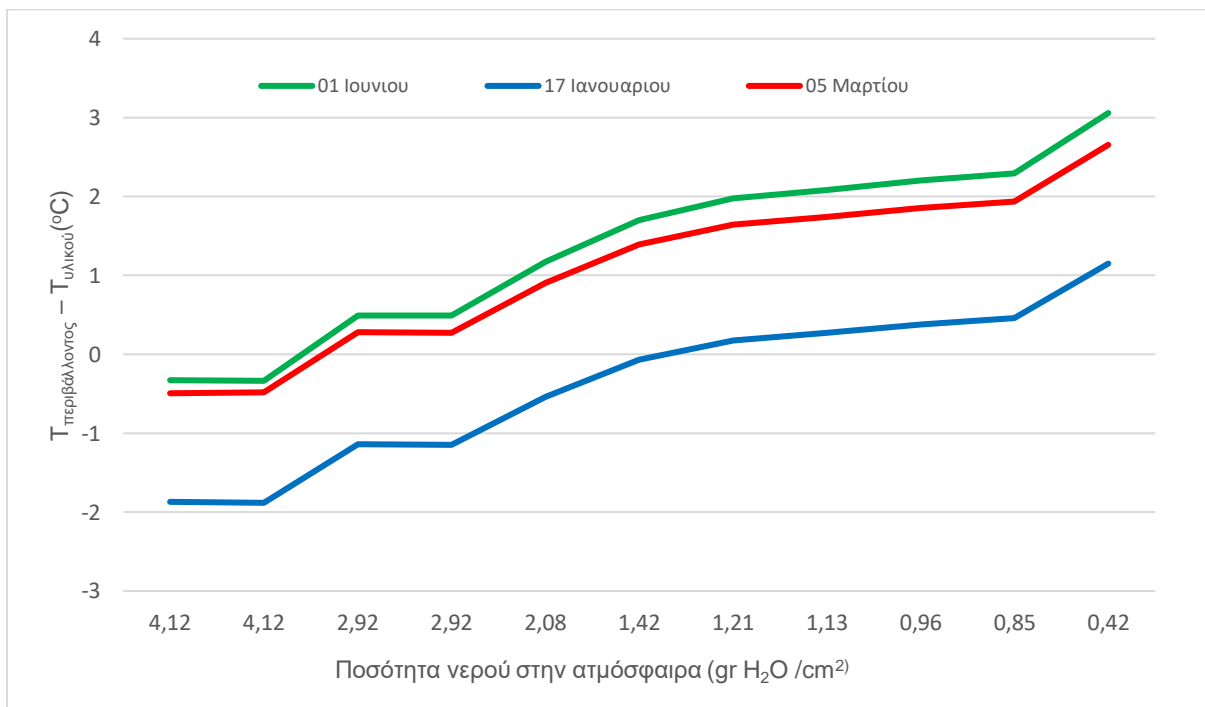
Στο διάγραμμα 15 παρουσιάζουμε πιο αναλυτικά την εξέλιξη της ισχύς στο αποδοτικότερο μοντέλο ατμόσφαιρας και ημέρας για το $\text{HfO}_2 + \text{SiO}_2$. Άμεση επιρροή στην εξέλιξη της συνολικής ψυκτικής ισχύος, P_{cool} , φαίνεται να έχει η ισχύς που ακτινοβολείται από τη δομή, P_{rad} . Μεγάλο αντίκτυπο στο συνολικό αποτέλεσμα της ισχύος έχει και η ισχύς που χάνεται λόγω μεταφοράς και αγωγής, P_{cond} , ο οποίος, βάσει της εξίσωσης (5), εξαρτάται άμεσα από τον συντελεστή θερμότητας h_c και από την επιφάνεια του υλικού. Στην περίπτωση του $\text{HfO}_2 + \text{SiO}_2$ θεωρήθηκε ότι ανταλλάσσει γρήγορα ενέργεια το υλικό με την ατμόσφαιρα και ο συντελεστής θερμότητας τέθηκε $h_c = 6.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$.

Στο διάγραμμα 16 απεικονίζεται η μέση τιμή ψυκτικής ισχύος (P_{cool}), όπως αυτή υπολογίζεται από την εξίσωση (1), ανά μοντέλο ατμόσφαιρας. Παρατηρείται ότι στο μοντέλο ατμόσφαιρας 6 εμφανίζεται η ελάχιστη τιμή για καθεμία από τις τρεις διαφορετικές ημερομηνίες προσομοίωσης. Μελετώντας συνδυαστικά τα διαγράμματα 13 και 16 καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα. Για την περίπτωση της καλοκαιρινής ημέρας, μία μείωση θερμοκρασίας υλικού της τάξης των 3°C απαιτεί μια ψυκτική ισχύς περίπου 0.0049 W/m^2 . Αντίστοιχα, για την μείωση της θερμοκρασίας του υλικού κατά 2.5°C την ανοιξιάτικη ημέρα απαιτείται περίπου 0.006 W/m^2 , ενώ για την χειμερινή ημέρα η μείωση 1°C του υλικού απαιτεί περίπου 0.01 W/m^2 .



Διάγραμμα 16 Αποτελέσματα ψυκτικής ισχύς του υλικού για κάθε ένα διαφορετικό μοντέλο ατμόσφαιρας

Ένας άλλος παράγοντας που παίζει σημαντικό ρόλο στην επίδοση του φαινομένου αποτελεί η περιεκτικότητα σε υγρασία στην ατμόσφαιρα. Δηλαδή, πως αυτή επιδρά στο αντικείμενο μελέτης μας. Παρατηρώντας το διάγραμμα 17 βλέπουμε ότι για υψηλά επίπεδα υγρασίας η διαφορά των θερμοκρασιών είναι αρνητική και για τις τρεις ημέρες που μελετήθηκαν. Αυτό σημαίνει ότι το υλικό θερμαίνεται και συνεπώς το φαινόμενο της ψύξης με ακτινοβολία δεν λειτουργεί όπως θα θέλαμε. Οι επιτυχημένες μειώσεις της θερμοκρασίας, που συμβαίνουν στο μοντέλο ατμόσφαιρας 6 και αναφέρθηκαν παραπάνω, συμπίπτουν με τα χαμηλότερα επίπεδα νερού. Καταληκτικά, θα μπορούσαμε να πούμε ότι όσο μικρότερη είναι η τιμή της σχετικής υγρασίας, τόσο υψηλότερη είναι και η απόδοση της ψύξης στο συγκεκριμένο υλικό που εξετάστηκε.



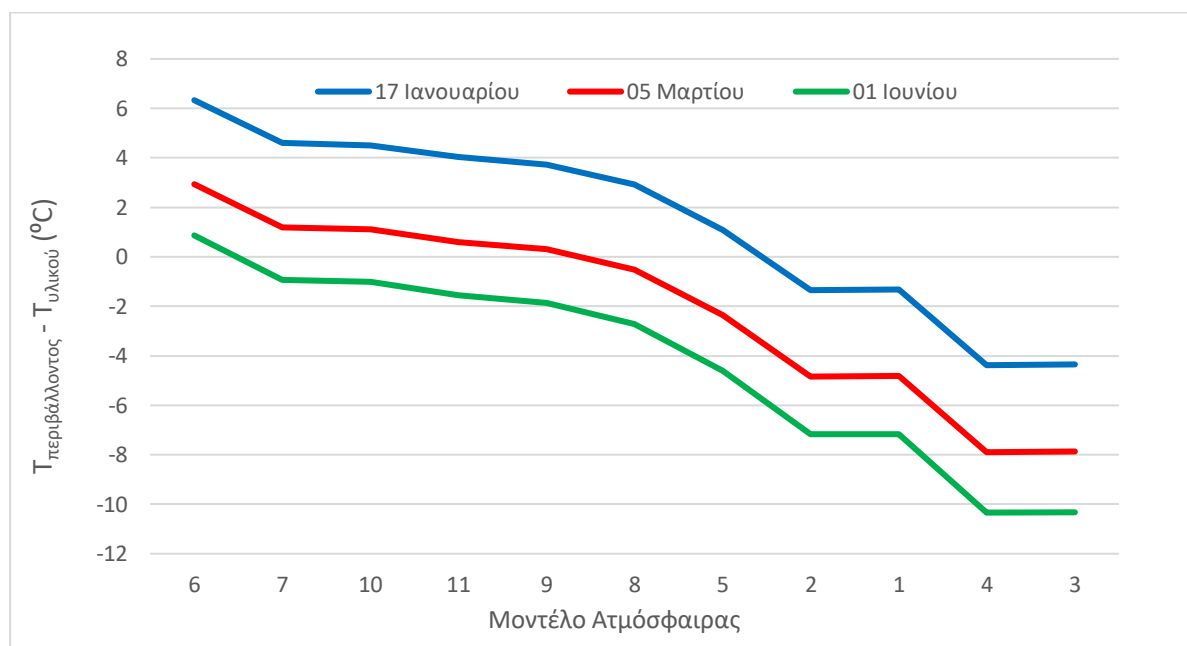
Διάγραμμα 17 Αποτελέσματα στην απόδοση ψύξης του υλικού συναρτήσει της ποσότητας νερού που υπάρχει στην ατμόσφαιρα για κάθε ένα διαφορετικό μοντέλο ατμόσφαιρας

3.2 Πολυ(βινυλιδενο-φθοριούχο-συν-εξαφθοροπρωπένιο)

Παρατηρώντας το διάγραμμα 18, διακρίνει κανείς ότι υπάρχει υψηλότερη απόδοση του υλικού στο μοντέλο ατμόσφαιρας 6. Πιο συγκεκριμένα, έχουμε μια θερμοκρασία υλικού περίπου 6 °C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος για την χειμερινή ημέρα που μελετήθηκε. Ακολουθεί η ανοιξιιάτικη ημέρα, όπου η θερμοκρασία του υλικού είναι περίπου 2.5 °C χαμηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και στη συνέχεια η καλοκαιρινή ημέρα όπου έχουμε μια διαφορά θερμοκρασίας περίπου 1 °C.

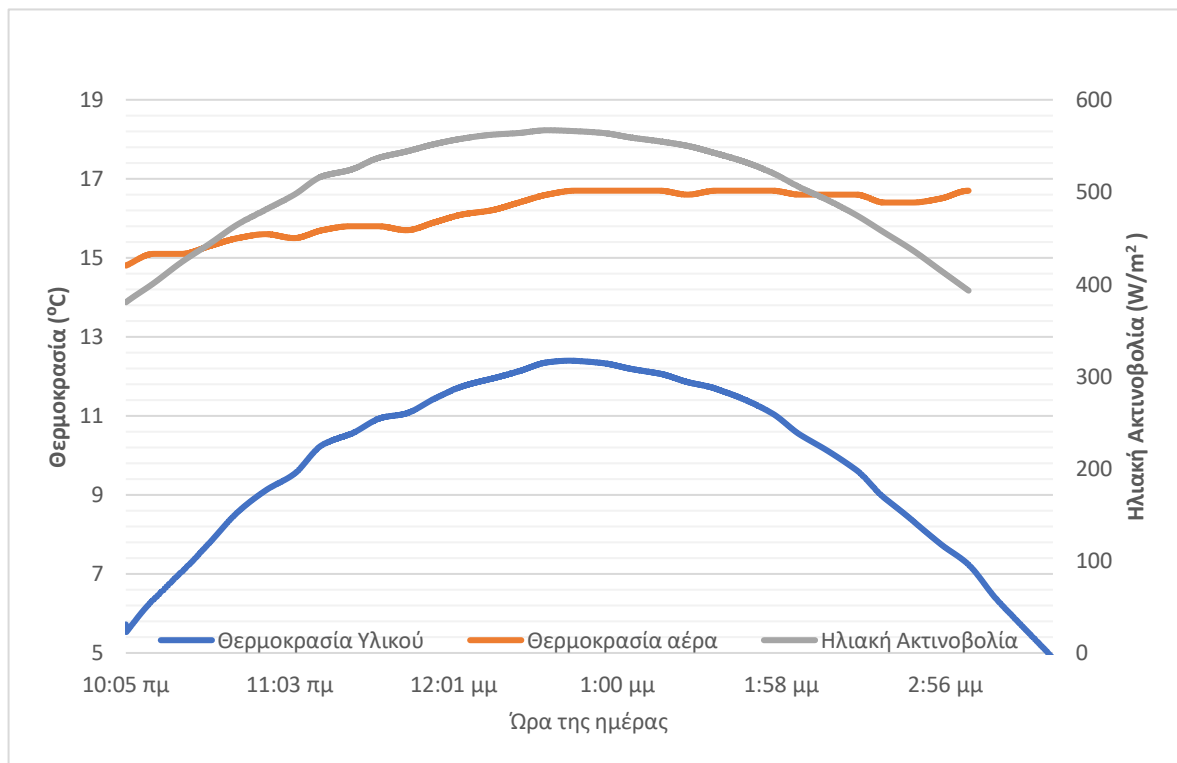
Αξίζει να σημειωθεί ότι και κατά την καλοκαιρινή περίοδο, όπου παρατηρήθηκε η χαμηλότερη απόδοση, για το μοντέλο ατμόσφαιρας 6 παρουσιάζεται η επιφάνεια του υλικού να είναι πιο ψυχρή από το περιβάλλον ($T_{\text{περιβάλλοντος}} > T_{\text{υλικού}}$), ενώ για άλλα μοντέλα το φαινόμενο της ψύξης με ακτινοβολία δρα ανασταλτικά και θερμαίνει το υλικό μας ($T_{\text{περιβάλλοντος}} < T_{\text{υλικού}}$).

Σε τροπικές ατμόσφαιρες, όπως είναι τα μοντέλα 3 και 4, παρατηρείται θέρμανση του υλικού και στις τρεις διαφορετικές ημερομηνίες μελέτης, άρα χαμηλή επίδοση του φαινομένου της ψύξης με ακτινοβολία.



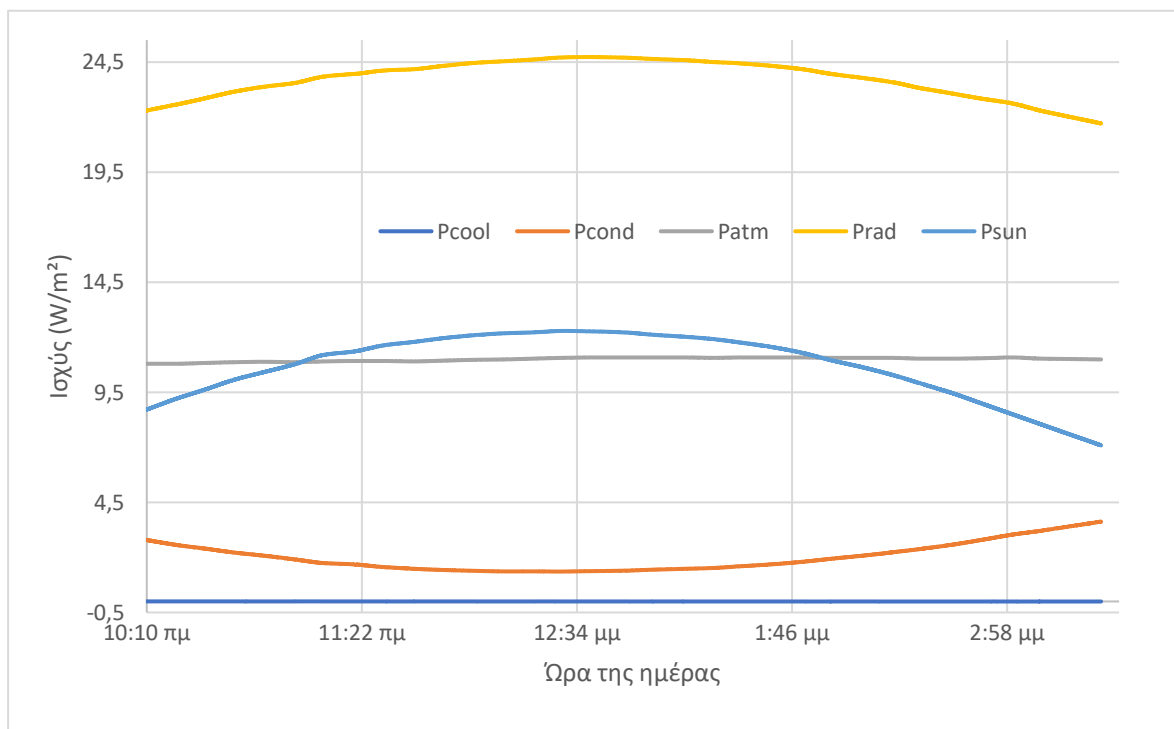
Διάγραμμα 18 Μέση διαφορά θερμοκρασίας περιβάλλοντος και PVDF για κάθε ένα διαφορετικό μοντέλο ατμόσφαιρας

Η μέγιστη σε απόδοση προσομοίωση μελετήθηκε περαιτέρω, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 19, έχουμε άμεση πτώση της θερμοκρασίας του υλικού περίπου 9°C κάτω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επιπλέον, περίπου στη 13:00 το μεσημέρι, όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι μέγιστη, η θερμοκρασία του υλικού εμφανίζει μια θερμοκρασία μειωμένη κατά 4°C σε σχέση με αυτή του αέρα. Η διαφορά αυτή της θερμοκρασίας αυξάνεται μέχρι τις 15:00 το μεσημέρι και φτάνει στο μέγιστο, που είναι οι 11°C .



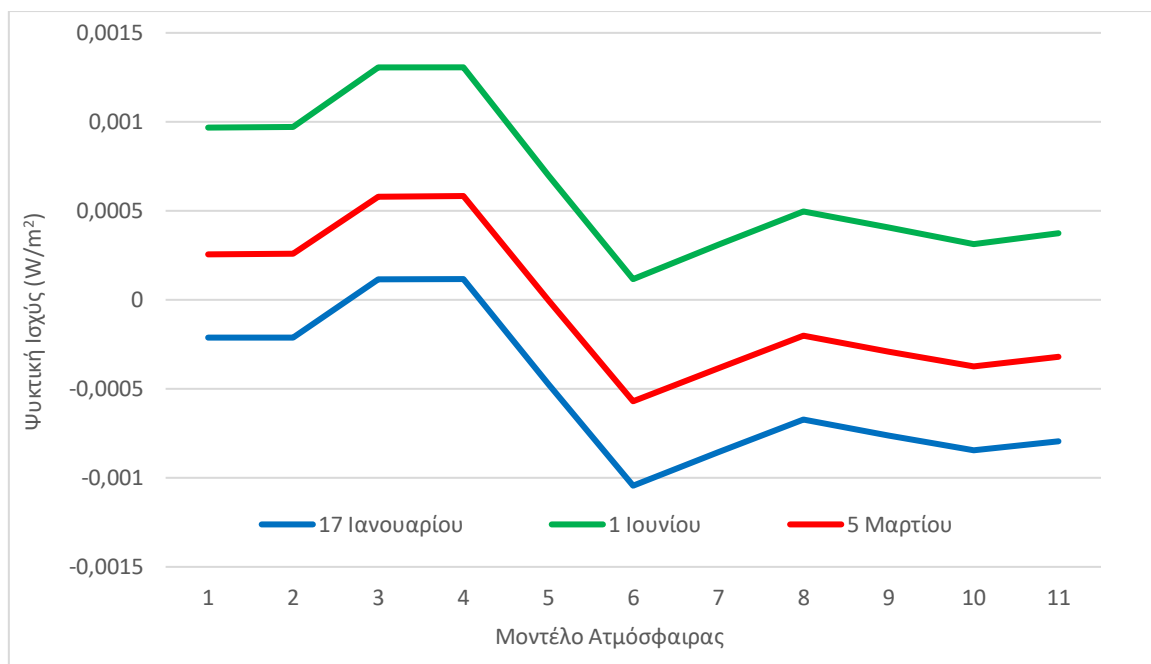
Διάγραμμα 19 Σύγκριση θερμοκρασίας PVDF και θερμοκρασίας του αέρα για την προσομοίωση 6 την 17η Ιανουαρίου

Στο διάγραμμα 20, παρουσιάζουμε πιο αναλυτικά την εξέλιξη της ισχύος στο αποδοτικότερο μοντέλο ατμόσφαιρας και ημέρας για το PVDF. Στην περίπτωση του υλικού αυτού μειώθηκε ο συντελεστής θερμότητας, h_c , από τον οποίο εξαρτάται η ισχύς της εξίσωσης (5), και αυξήθηκε κατά μια τάξη μεγέθους η επιφάνεια του υλικού. Αυτό όπως παρατηρείται επηρέασε αρκετά τις τιμές των επιμέρους ισχύων αφού αυξήθηκαν κατά μεγάλο ποσοστό. Έτσι, καταλήγουμε σε μια συνολική ψυκτική ισχύ σχεδόν σταθερή στο $0.001 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.



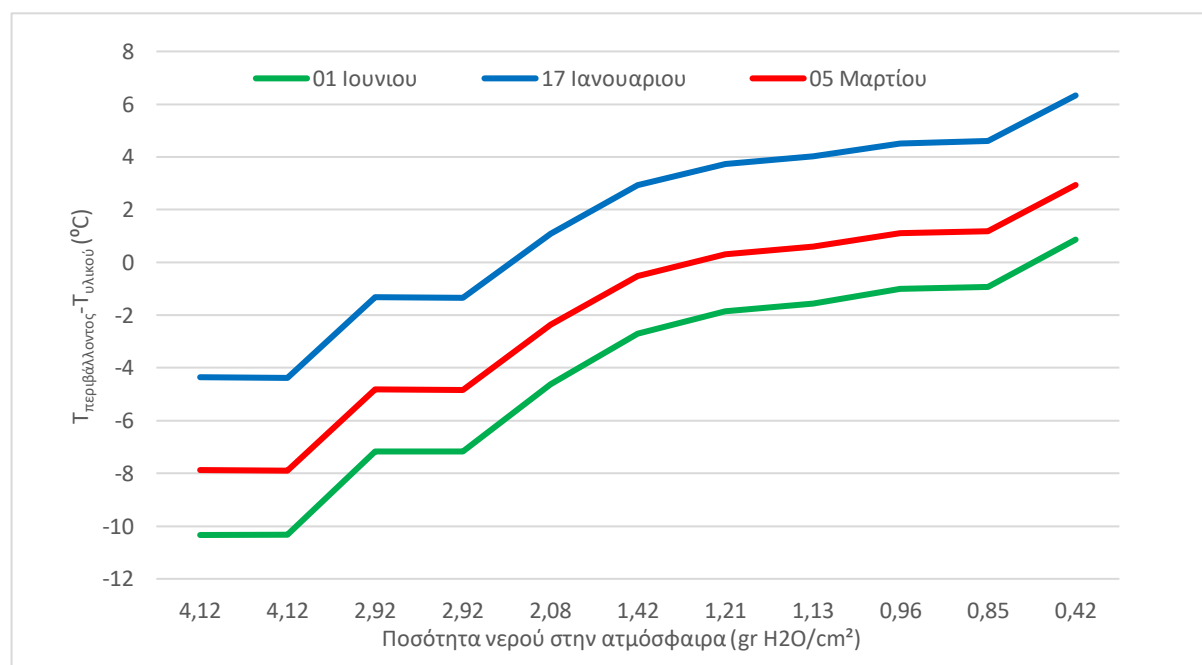
Διάγραμμα 20 Ισχύς για την προσομοίωση 6 την 17^η Ιανουαρίου

Η μέση τιμή ψυκτικής ισχύς (P_{cool}) παρουσιάζεται στο διάγραμμα 21 ανά μοντέλο ατμόσφαιρας. Παρατηρείται ότι στο μοντέλο ατμόσφαιρας 6 εμφανίζεται η ελάχιστη τιμή για καθεμία από τις τρεις διαφορετικές ημερομηνίες προσομοίωσης. Μελετώντας συνδυαστικά τα διαγράμματα 18 και 21 για την περίπτωση της χειμερινής ημέρας, μία μείωση θερμοκρασίας υλικού κατά 6°C απαιτεί μια ψυκτική ισχύς περίπου 0.00104 W/m^2 . Αντίστοιχα, για την μείωση της θερμοκρασίας του υλικού κατά 2.5°C την ανοιξιάτικη ημέρα απαιτείται περίπου 0.00057 W/m^2 , ενώ για την καλοκαιρινή ημέρα η μείωση 1°C του υλικού απαιτεί περίπου 0.00016 W/m^2 .



Διάγραμμα 21 Αποτελέσματα ψυκτικής ισχύς PVDF για κάθε ένα διαφορετικό μοντέλο ατμόσφαιρας

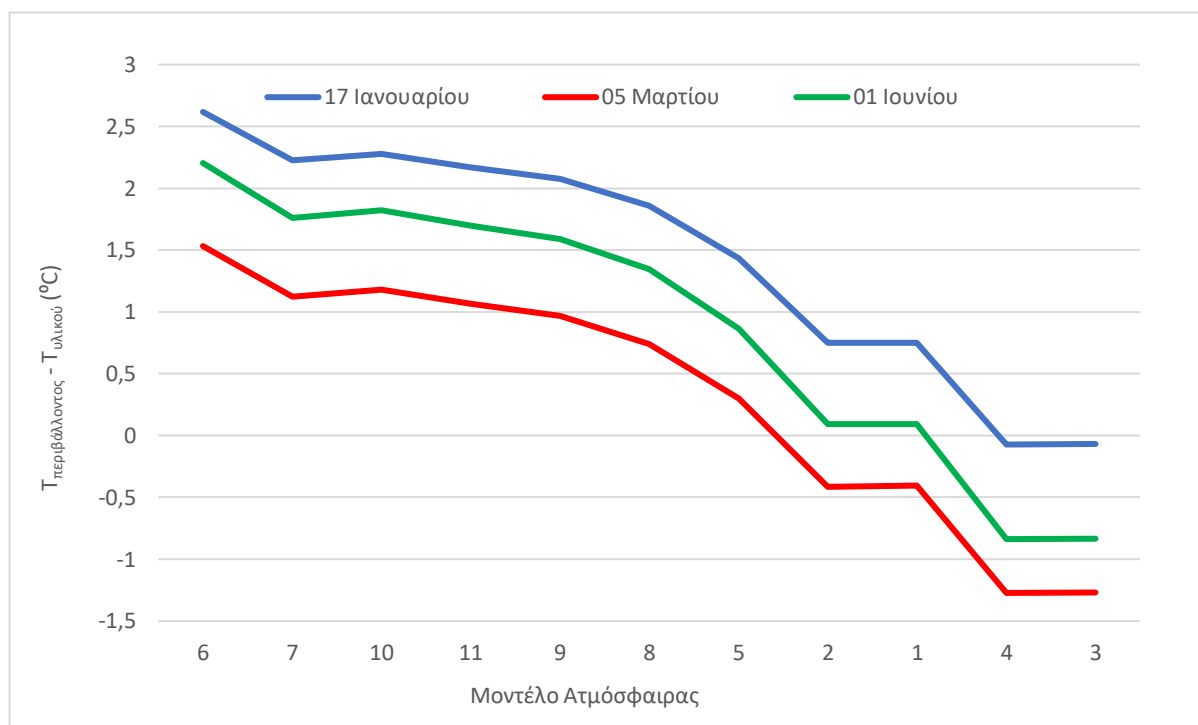
Όσον αφορά στην απόδοση του PVDF υλικού μας, στο διάγραμμα 22 βλέπουμε ότι για υψηλά επίπεδα υγρασίας η διαφορά των θερμοκρασιών είναι αρνητική και για τις τρεις ημέρες που μελετήθηκαν. Αυτό σημαίνει ότι το υλικό θερμαίνεται και συνεπώς το φαινόμενο της ψύξης με ακτινοβολία δεν λειτουργεί όπως θα θέλαμε. Οι επιτυχημένες μειώσεις της θερμοκρασίας, που συμβαίνουν στο μοντέλο ατμόσφαιρας 6 και αναφέρθηκαν παραπάνω, συμπίπτουν με τα χαμηλότερα επίπεδα νερού.



Διάγραμμα 22 Αποτελέσματα στην απόδοση ψύξης του PVDF συναρτήσει της ποσότητας νερού που υπάρχει στην ατμόσφαιρα για κάθε ένα διαφορετικό μοντέλο ατμόσφαιρας

3.3 Οξείδιο του Αργιλίου και Άργυρος

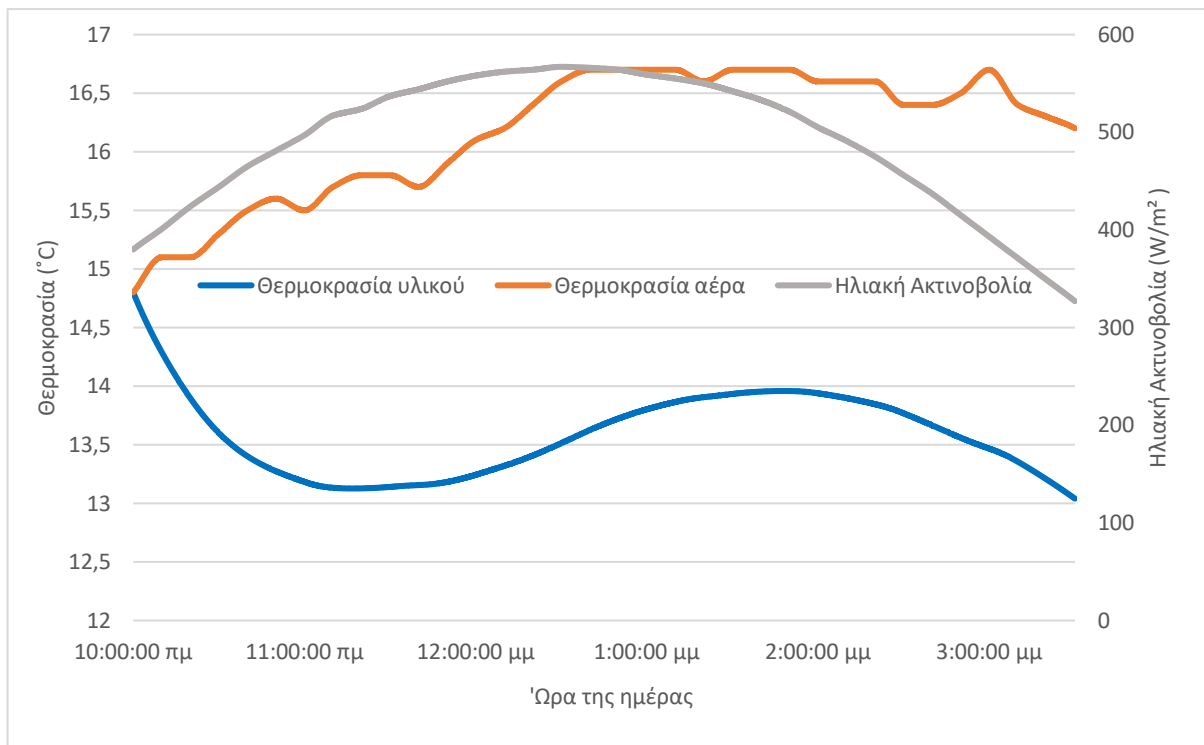
Στο διάγραμμα 23, απεικονίζεται η απόδοση του υλικού στις τρεις διαφορετικές ημέρες προσομοίωσης. Παρατηρείται υψηλότερη απόδοση του υλικού για την χειμερινή ημέρα και πιο συγκεκριμένα στο έκτο μοντέλο προσομοίωσης της ατμόσφαιρας επιτυγχάνεται μείωση της θερμοκρασίας του υλικού κατά 2.5 °C σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.



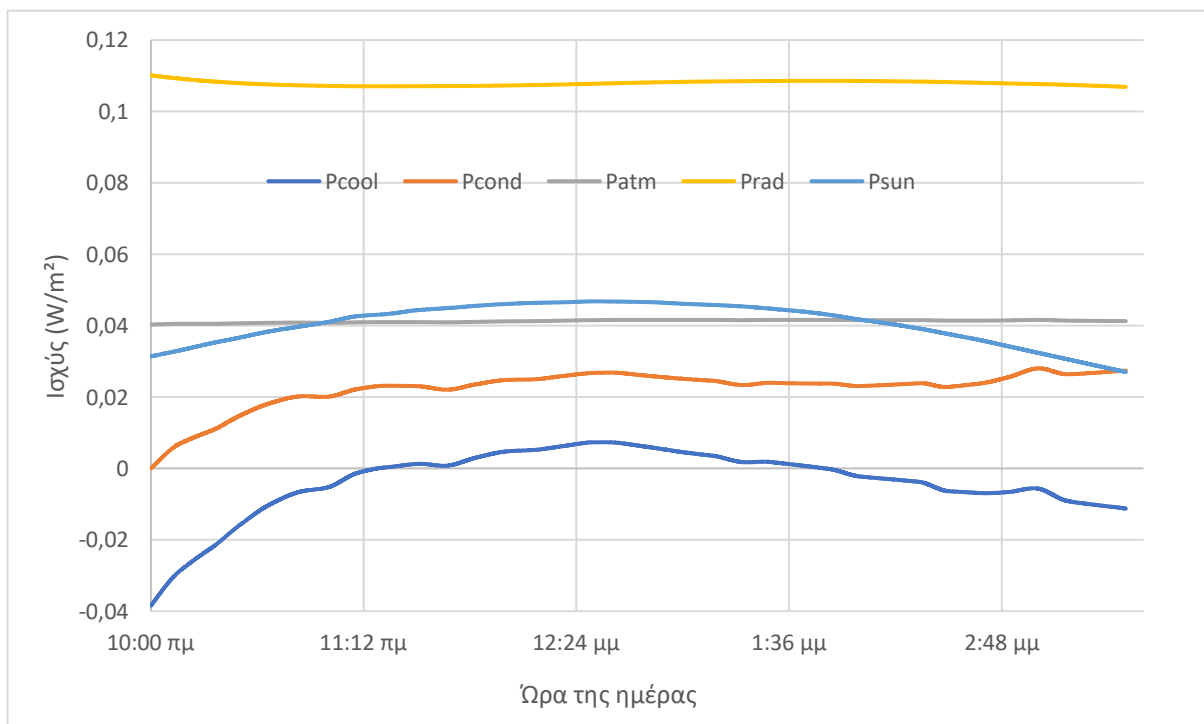
Διάγραμμα 23 Μέση διαφορά θερμοκρασίας περιβάλλοντος και Al₂O₃ για κάθε ένα διαφορετικό μοντέλο ατμόσφαιρας

Στο διάγραμμα 25, αναλύουμε περαιτέρω την απόδοση του υλικού εκείνη την ημέρα. Παρατηρείται αισθητή μείωση της θερμοκρασίας από τις πρώτες κιόλας ώρες της ημέρας με αποκορύφωμα στις 2:00 μ.μ., όπου για ισχύ ηλιακής ακτινοβολίας ίση με 550 W/m², έχουμε και την μέγιστη απόδοση του φαινομένου.

Πιο αναλυτικά, στο διάγραμμα 24, παρουσιάζονται οι ισχύεις στο αποδοτικότερο μοντέλο ατμόσφαιρας και ημέρας για το (Al₂O₃ + Ag). Ο συντελεστής θερμότητας, h_c, από τον οποίο εξαρτάται η ισχύς της εξίσωσης (5), αυξήθηκε και πάλι στο 6.9 W·m⁻² K⁻¹. Επηρεάστηκαν, έτσι, οι τιμές των επιμέρους ισχύων και μειώθηκαν κατά μεγάλο ποσοστό. Καταληκτικά, η συνολική ψυκτική ισχύς εμφανίζει την χαμηλότερη τιμή της τις πρώτες ώρες της ημέρας ενώ στη συνέχεια αυξάνεται.

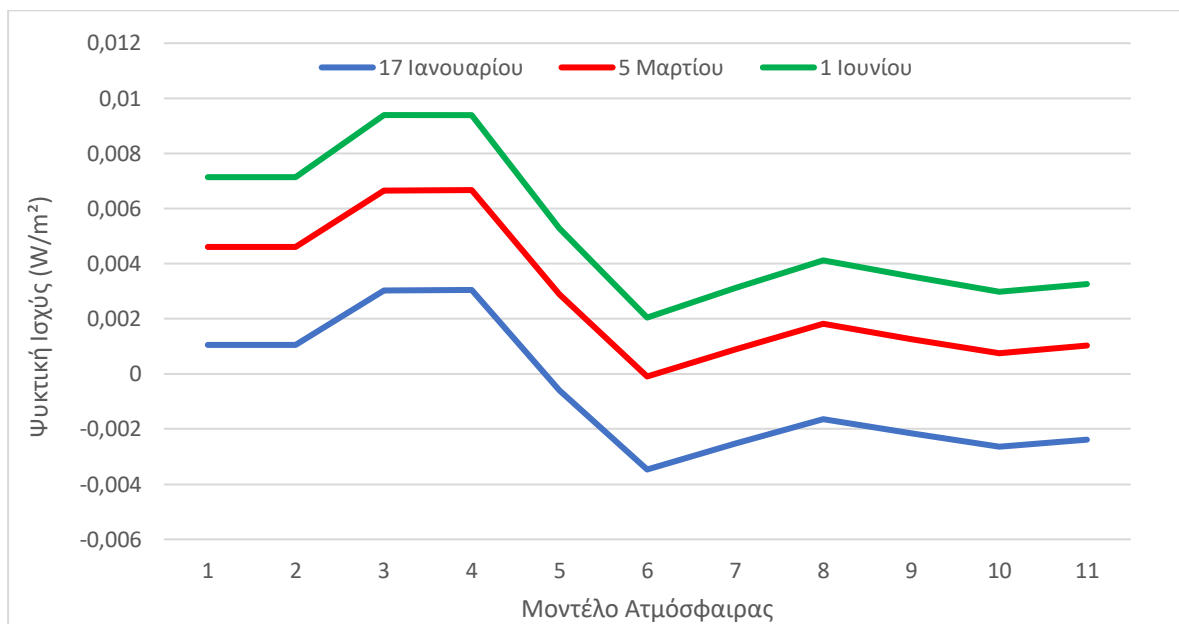


Διάγραμμα 25 Σύγκριση θερμοκρασίας Al_2O_3 και θερμοκρασίας του αέρα για την προσομοίωση 6 την 17^η Ιανουαρίου



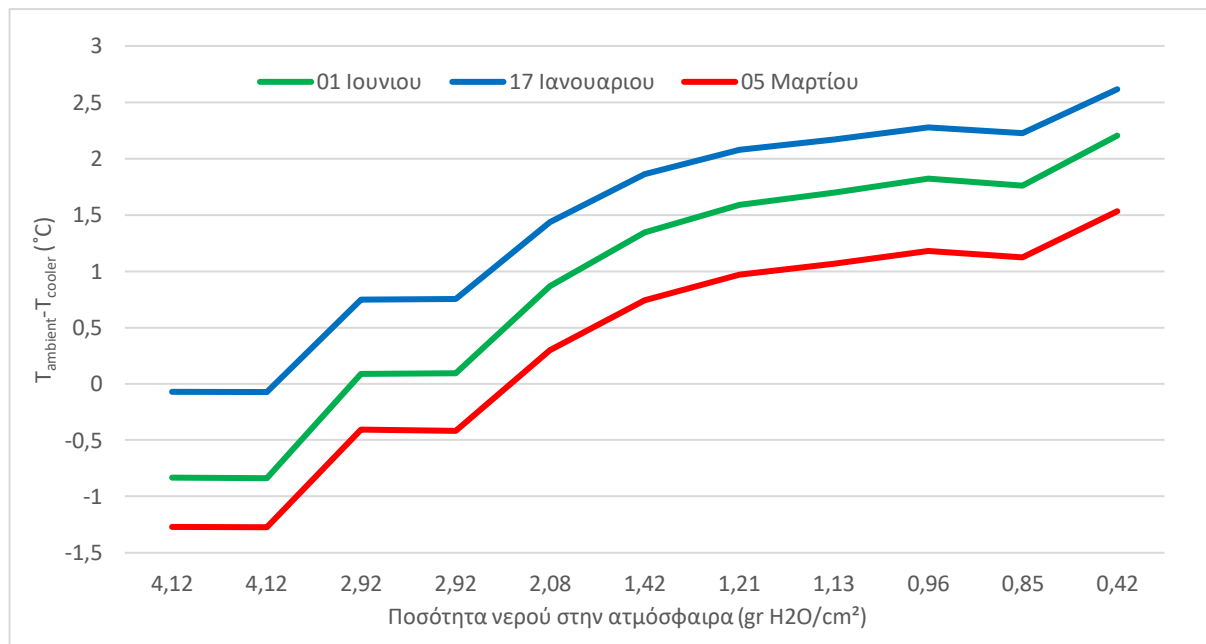
Διάγραμμα 24 Ισχύς για την προσομοίωση 6 την 17^η Ιανουαρίου

Στο διάγραμμα 26, παρουσιάζεται η μέση τιμή ψυκτικής ισχύς, P_{cool} , ανά μοντέλο ατμόσφαιρας. Παρατηρείται ότι στο μοντέλο ατμόσφαιρας 6 εμφανίζεται η ελάχιστη τιμή για κάθε μια από τις τρεις διαφορετικές ημερομηνίες προσομοίωσης. Συνδυαστικά προκύπτει ότι από τα διαγράμματα 23 και 26 στην περίπτωση της χειμερινής ημέρας, μία μείωση θερμοκρασίας υλικού κατά 2.5°C απαιτεί μια ψυκτική ισχύς περίπου 0.0035 W/m^2 . Αντίστοιχα, για την μείωση της θερμοκρασίας του υλικού κατά 1.5°C την ανοιξιιάτικη ημέρα απαιτείται περίπου 0.00009 W/m^2 , ενώ για την καλοκαιρινή ημέρα η μείωση 2°C του υλικού απαιτεί περίπου 0.002 W/m^2 .



Διάγραμμα 26 Αποτελέσματα ψυκτικής ισχύς Al_2O_3 για κάθε ένα διαφορετικό μοντέλο ατμόσφαιρας

Η απόδοση του υλικού συνδυαστικά με τα επίπεδα υγρασίας στην ατμόσφαιρα παρουσιάζεται στο διάγραμμα 27. Παρατηρούνται και στις τρεις ημέρες προσομοίωσης αρνητικές τιμές στον άξονα των y , άρα το φαινόμενο μας δεν λειτουργεί όπως θα θέλαμε, αφού αντί για να ψύχει το υλικό το θερμαίνει. Επιβεβαιώνοντας, έτσι, τη θεωρία ότι για υψηλά επίπεδα υγρασίας το φαινόμενο δεν λειτουργεί σωστά.

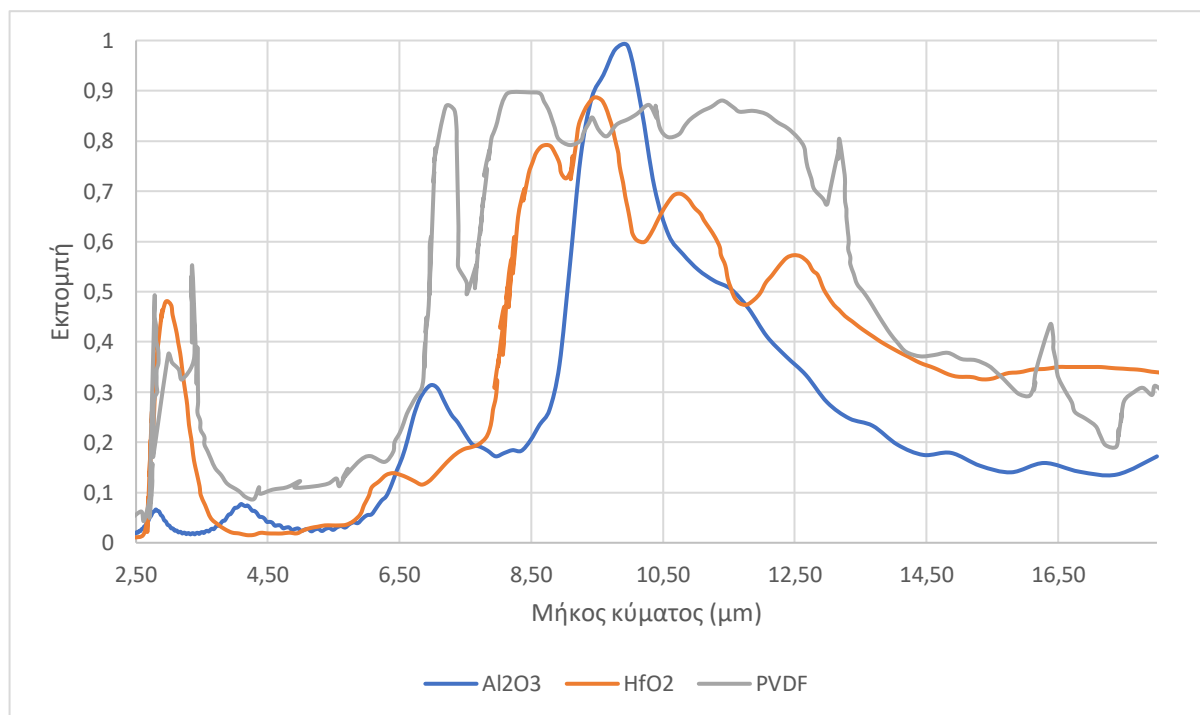


Διάγραμμα 27 Αποτελέσματα στην απόδοση ψύξης του Al_2O_3 συναρτήσει της ποσότητας νερού που υπάρχει στην ατμόσφαιρα για κάθε ένα διαφορετικό μοντέλο ατμόσφαιρας

4. Συμπεράσματα

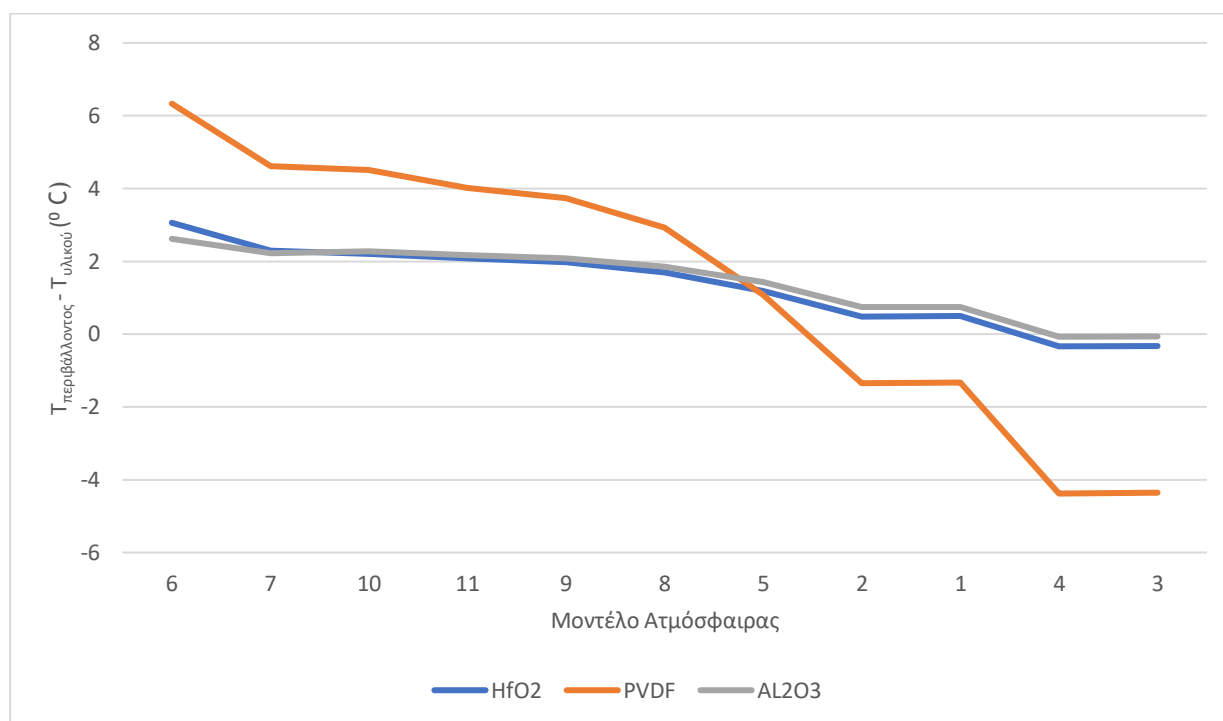
Μελετώντας τα παραπάνω αποτελέσματα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η προσομοίωση ατμόσφαιρας 6 είναι αυτή που πέτυχε τα βέλτιστα αποτελέσματα ψύξης και για τα τρία υλικά που μελετήσαμε. Ιδιαίτερα ενδιαφέρον, βέβαια, είναι το γεγονός ότι αν και το μοντέλο ατμόσφαιρας των βέλτιστων αποτελεσμάτων ήταν ίδιο, οι ημέρες προσομοίωσης διέφεραν και στις τρεις περιπτώσεις. Πιο αναλυτικά, το μοντέλο ατμόσφαιρας 6 προσομοιώνει ένα μοντέλο ατμόσφαιρας με τις πιο κρύες θερμοκρασίες στο υψόμετρο μελέτης, και έχει το χαμηλότερο ποσοστό υδρατμών στην ατμόσφαιρα κάτι που καθιστά το περιβάλλον ιδανικότερο για να πετύχει το φαινόμενο της ψύξης με ακτινοβολία. Για το HfO_2 υλικό που μελετήθηκε βέλτιστα αποτελέσματα πήραμε την 1η Ιουνίου, ενώ και για το PVDF και για το Al_2O_3 βέλτιστη απόδοση παρουσιάστηκε την 17η Ιανουαρίου.

Μελετώντας τις θεωρητικές εκπομπές του κάθε υλικού, στο διάγραμμα 28, διακρίνεται ξεκάθαρα και στα τρία υλικά η υψηλή εκπομπή τους στο «ατμοσφαιρικό παράθυρο», δηλαδή για μήκος κύματος από 8 έως 13 μm . Με μια πρώτη ματιά ξεχωρίζει το Al_2O_3 , λόγω της μέγιστης εκπομπής που παρουσιάζει για μήκος κύματος περίπου ίσο με 10 μm , στο μέσον δηλαδή του «ατμοσφαιρικού παραθύρου». Τέτοια τιμή δεν καταφέρνει κανένα άλλο από τα υλικά που μελετήθηκαν. Ωστόσο, για την καλύτερη επίδοση του φαινομένου που μελετάται αναζητάτε η υψηλότερη δυνατή εκπομπή σε όλο το μήκος του «ατμοσφαιρικού παραθύρου» και όχι απαραίτητα ένα ολικό μέγιστο σε αυτό. Αν και το HfO_2 και το PVDF διαθέτουν και τα δυο υψηλές τιμές εκπομπής σε όλο το «ατμοσφαιρικό παράθυρο», το PVDF εμφανίζει τις καλύτερες τιμές εκ των τριών υλικών. Σε όλο το μήκος του «παραθύρου» παρατηρείται εκπομπή του υλικού από 80 έως και 90 %.



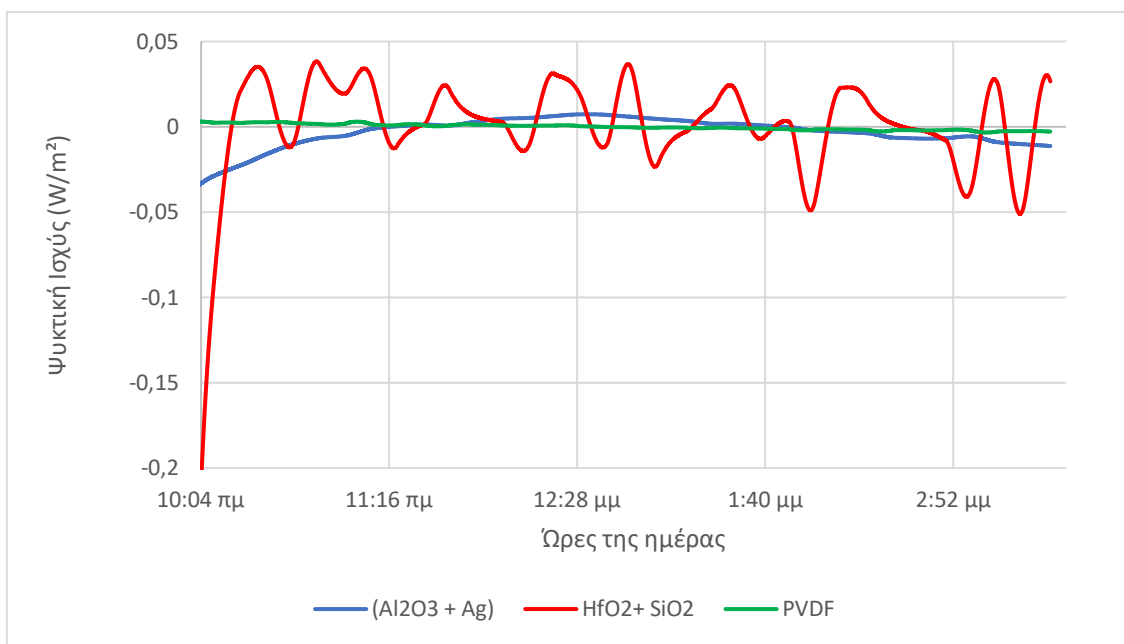
Διάγραμμα 28 Εκπομπές του κάθε υλικού σε εύρος μήκος κύματος $2,5 \leq \lambda \leq 18$

Στο διάγραμμα 29, παρουσιάζεται συνδυαστικά η απόδοση των υλικών την βέλτιστη σε αποτελέσματα ημέρα προσομοίωσης για το καθένα. Όπως φαίνεται το PVDF υλικό έχει την βέλτιστη απόδοση, η οποία φτάνει σχεδόν τους 7 °C κάτω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Ωστόσο, το συγκεκριμένο υλικό δεν διατηρεί την ψύξη του σε όλες τις προσομοιώσεις της ατμόσφαιρας αφού όπως διακρίνεται και από το διάγραμμα στις πρώτες τέσσερις προσομοιώσεις θερμαίνεται και δεν ψύχεται όπως θα θέλαμε. Παράλληλα θα μπορούσε κανείς να παρατηρήσει ότι το HfO₂ και το Al₂O₃ έχουν παρόμοια κλίση και δεν θερμαίνονται, όπως το PVDF. Ενώ αν και το PVDF και το Al₂O₃ παρουσιάζουν βέλτιστη απόδοση τον Ιανουάριο η κλίση των ευθειών τους διαφέρει αρκετά. Αυτό οφείλεται στην τελείως διαφορετική σύσταση που έχουν τα υλικά.

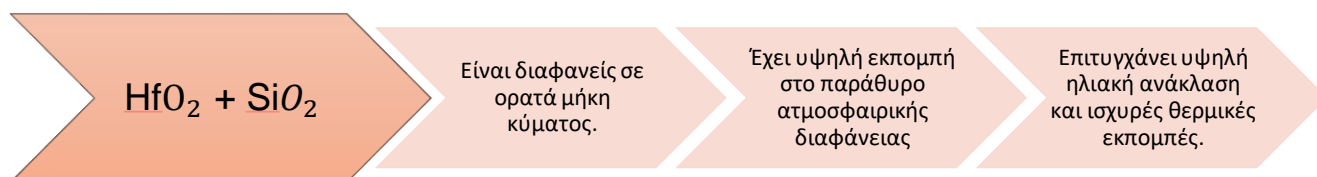


Διάγραμμα 29 Η βέλτιστη απόδοση των τριών διαφορετικών υλικών που μελετήθηκαν

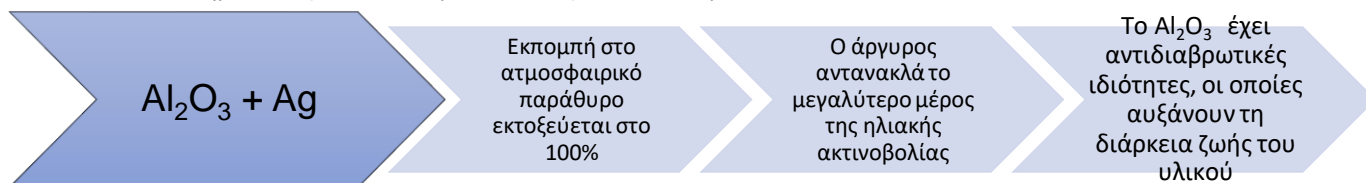
Στο διάγραμμα 30, παρουσιάζονται οι ψυκτικές ισχύς για τα τρία διαφορετικά υλικά τις ημέρες βέλτιστων αποτελεσμάτων. Συνδυαστικά με το διάγραμμα 29, παρατηρούμε ότι το PVDF που εμφανίζει μία μείωση θερμοκρασίας υλικού κατά 6°C εμφανίζει σχετικά σταθερή ψυκτική ισχύ ίση με 0.00104 W/m². Επόμενο σε απόδοση έρχεται το HfO₂+ SiO₂, το οποίο επιτυγχάνει μείωση θερμοκρασίας κατά 3°C και απαιτεί μια μέση ψυκτική ισχύ περίπου 0.0049 W/m². Η καμπύλης της ισχύος του HfO₂+ SiO₂ εμφανίζει ενδιαφέρον διακυμάνσεις στην ψυκτική ισχύ καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας φτάνοντας ένα ελάχιστον 0.2 W/m² και στη συνέχεια αυξομειώνεται και κυμαίνεται σε τιμές από -0.05 έως 0.045 W/m². Τρίτο και τελευταίο σε απόδοση το Al₂O₃ + Ag, το οποίο επιτυγχάνει μείωση θερμοκρασίας κατά 2 °C περίπου και βάση της καμπύλης της ισχύος απαιτεί σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας ψυκτική ισχύ 0.0035 W/m².



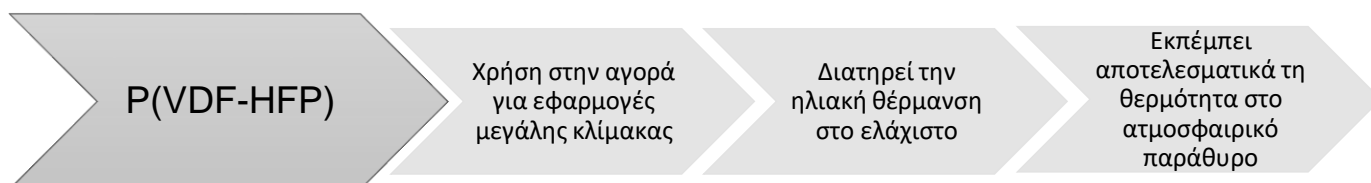
Διάγραμμα 30 Συνολική ψυκτική ισχύς P_{cool} τις βέλτιστες ημέρες προσομοίωσης



Εικόνα 11 Πλεονεκτήματα Διοξειδίου του αφνίου και διοξειδίου του πυριτίου



Εικόνα 12 Πλεονεκτήματα οξειδίου του Αργιλίου και Αργύρου



Εικόνα 13 Πλεονεκτήματα Πολυ(βινυλιδενο-φθοριούχο-συν-εξαφθοροπροπενίου)

Καταληκτικά, αν και το (PVDF-HFP) σε ορισμένα από τα μοντέλα ατμόσφαιρας δεν εμφάνισε καλά αποτελέσματα ψύξης, έχει το πλεονέκτημα της ευελιξίας, του χαμηλού κόστους και των δυνατοτήτων του να κατασκευαστεί μαζικά. Έτσι, η επικάλυψη αυτή μπορεί να εφαρμοστεί στην αγορά για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα του υλικού και την υψηλή απόδοση που εμφάνισε στα μοντέλα επιλέγεται ως το πιο αποτελεσματικό στο φαινόμενο της ψύξης με ακτινοβολία που μελετήθηκε.

5. Βιβλιογραφία

Berdahl, Paul, and Richard Fromberg, 'The Thermal Radiance of Clear Skies', *Solar Energy*, 29.4 (1982), 299–314 [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(82\)90245-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(82)90245-6)

Bell, Ely E., Leonard Eisner, James Young, and Robert A. Oetjen, 'Spectral Radiance of Sky and Terrain at Wavelengths between 1 and 20 Microns II Sky Measurements*', *Journal of the Optical Society of America*, 50.12 (1960), 1313 <https://doi.org/10.1364/josa.50.001313>

Berk, a, G P Anderson, P K Acharya, J H Chetwynd, L S Bernstein, E P Shettle, and others, 'MODTRAN4 USER ' S MANUAL Space Vehicles Directorate AIR FORCE MATERIEL COMMAND', 1999.June (1999)

Berni, A, M Mennig, and H Schmidt, '2.2. 8 Doctor Blade', *Sol-Gel Technologies for Glass* ..., 2004, 8–11
<http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=ONBNBdPyuzAC&oi=fnd&pg=PA89&dq=2.2.8+doctor+blade&ots=UjVyk837zV&sig=kAURdhSUoIRt_nbcgF-lby89Jik>

Chen, Mingxue, Wenqing Li, Shuang Tao, Zhenggang Fang, Chunhua Lu, and Zhongzi Xu, 'A Pragmatic and High-Performance Radiative Cooling Coating with near-Ideal Selective Emissive Spectrum for Passive Cooling', *Coatings*, 10.2 (2020), 1–2
<<https://doi.org/10.3390/coatings10020144>>

Fernandez, N, W Wang, K Alvine, and S Katipamula, *Energy Savings Potential of Radiative Cooling Technologies*, 2015 <<http://www.ntis.gov/ordering.htm>>

Hervé, Armande, Jérémie Dré villon, Younès Ezzahri, and Karl Joulain, 'Radiative Cooling by Tailoring Surfaces with Microstructures: Association of a Grating and a Multi-Layer Structure', *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 221 (2018), 155–63 <<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.09.015>>

Hossain, Md Muntasir, and Min Gu, 'Radiative Cooling: Principles, Progress, and Potentials', *Advanced Science* (Wiley-VCH Verlag, 2016)
<<https://doi.org/10.1002/advs.201500360>>

Jamnia, Ali, 'Radiation Cooling', *Practical Guide to the Packaging of Electronics*, 26.May 1977 (2016), 41–53 <<https://doi.org/10.1201/9781315368092-5>>

Landro, B., and P. G. McCormick, 'Effect of Surface Characteristics and Atmospheric Conditions on Radiative Heat Loss to a Clear Sky', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 23.5 (1980), 613–20 <[https://doi.org/10.1016/0017-9310\(80\)90004-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(80)90004-6)>

Liang, Shunlin, *Quantitative Remote Sensing for Land Surface Characterization*, 2004

Mandal, Jyotirmoy, Yanke Fu, Adam C. Overvig, Mingxin Jia, Kerui Sun, Norman N. Shi, and others, 'Hierarchically Porous Polymer Coatings for Highly Efficient Passive Daytime Radiative Cooling', *Science*, 362.6412 (2018), 315–19
<<https://doi.org/10.1126/science.aat9513>>

MODTRAN MANUAL- Modtran Units Conversion

Myers, Daryl Ronald, Solar Radiation: Practical Modeling for Renewable Energy Applications, Solar Radiation: Practical Modeling for Renewable Energy Applications, 2017 <<https://doi.org/10.1201/b13898>>

Myers, Daryl Ronald, Solar Radiation: Practical Modeling for Renewable Energy Applications, Solar Radiation: Practical Modeling for Renewable Energy Applications, 2017 <https://doi.org/10.1201/b13898>

Catalanotti, S., Cuomo, V., Piro, G., Ruggi, D., Silvestrini, V., & Troise, G. (1975). The radiative cooling of selective surfaces. *Solar Energy*, 17(2), 83–89. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(75\)90062-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(75)90062-6)

Chen, M., Li, W., Tao, S., Fang, Z., Lu, C., & Xu, Z. (2020). A pragmatic and high-performance radiative cooling coating with near-ideal selective emissive spectrum for passive cooling. *Coatings*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/coatings10020144>

Hossain, M. M., & Gu, M. (2016). Radiative cooling: Principles, progress, and potentials. *Advanced Science*, 3(7), 1–10. <https://doi.org/10.1002/advs.201500360>

Mandal, J., Fu, Y., Overvig, A. C., Jia, M., Sun, K., Shi, N. N., Zhou, H., Xiao, X., Yu, N., & Yang, Y. (2018). Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling. *Science*, 362(6412), 315–319. <https://doi.org/10.1126/science.aat9513>

Raman, A. P., Anoma, M. A., Zhu, L., Rephaeli, E., & Fan, S. (2014). Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight. *Nature*, 515(7528), 540–544. <https://doi.org/10.1038/nature13883>

Rephaeli, E., Raman, A., & Fan, S. (2013). Ultrabroadband photonic structures to achieve high-performance daytime radiative cooling. *Nano Letters*, 13(4), 1457–1461. <https://doi.org/10.1021/nl4004283>

Zhao, D., Aili, A., Zhai, Y., Xu, S., Tan, G., Yin, X., & Yang, R. (2019). Radiative sky cooling: Fundamental principles, materials, and applications. *Applied Physics Reviews*, 6(2). <https://doi.org/10.1063/1.5087281>

Effect of atmospheric water vapor on radiative cooling performance of different surfaces, Chenyang Liu, Yizhou Wu, Boxiang Wang, C.Y. Zhao, Hua Bao

Raman, Aaswath P., Marc Abou Anoma, Linxiao Zhu, Eden Rephaeli, and Shanhui Fan, ‘Passive Radiative Cooling below Ambient Air Temperature under Direct Sunlight’, *Nature*, 515.7528 (2014), 540–44 <<https://doi.org/10.1038/nature13883>>

Rephaeli, Eden, Aaswath Raman, and Shanhui Fan, ‘Ultrabroadband Photonic Structures to Achieve High-Performance Daytime Radiative Cooling’, *Nano Letters*, 13.4 (2013), 1457–61 <<https://doi.org/10.1021/nl4004283>>

Sun, Xingshu, Yubo Sun, Zhiguang Zhou, Muhammad Ashraful Alam, and Peter Bermel, ‘Radiative Sky Cooling: Fundamental Physics, Materials, Structures, and Applications’, *Nanophotonics* (Walter de Gruyter GmbH, 2017), 997–1015 <<https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0020>>

Zhao, Bin, Mingke Hu, Xianze Ao, Nuo Chen, Qingdong Xuan, Dongsheng Jiao, and others, ‘Performance Analysis of a Hybrid System Combining Photovoltaic and

Nighttime Radiative Cooling', *Applied Energy*, 252.May (2019), 113432
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113432>

Zhao, D., Aili, A., Zhai, Y., Xu, S., Tan, G., Yin, X., & Yang, R. (2019). Radiative sky cooling: Fundamental principles, materials, and applications. *Applied Physics Reviews*, 6(2). <https://doi.org/10.1063/1.5087281>

Zhao, Dongliang, Ablimit Aili, Yao Zhai, Jiatao Lu, Dillon Kidd, Gang Tan, and others, 'Subambient Cooling of Water: Toward Real-World Applications of Daytime Radiative Cooling', *Joule*, 3.1 (2019), 111–23 <<https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.10.006>>

Zhao, Dongliang, Ablimit Aili, Yao Zhai, Jiatao Lu, Dillon Kidd, Gang Tan, and others, 'Subambient Cooling of Water: Toward Real-World Applications of Daytime Radiative Cooling', *Joule*, 3.1 (2019), 111–23 <<https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.10.006>>

WebPlotDigitizer, <<https://apps.automeris.io/wpd/>>

EarthScience Beta,
<<https://earthscience.stackexchange.com/questions/9868/convert-air-vapor-pressure-to-relative-humidity>>

Θεματολογικά Δελτία για την Ευρωπαϊκή Ένωση,
<https://www.europarl.europa.eu/factsheets/el/sheet/69/%5Bftu-ref:2.5.2%5D>

ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ
Κ. Τ. Παπακώστας, Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός

<http://www.physics4u.gr/articles/2002/blackbody.html>

https://en.wikipedia.org/wiki/Planck%27s_law

<https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/heat-transfer/radiation-heat-transfer/>

The Historical Development of Quantum Theory, Jagdish Mehra, Helmut Rechenberg, Springer-Verlag New York Inc, 1982, volume 1, chapter 1,σελ.24. ISBN 0-387-90642-8 και ISBN 3-540-90642-8.

Σημειώσεις σύγχρονης φυσικής, Χ. Ελευθεριάδης, Α. Λιόλιος, Κ. Ζιούτας, Η. Σαββίδης. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, 1998.

Το μέλαν σώμα και η ακτινοβολία του. Η γένεση μιας επαναστατικής θεωρίας. (2002, Απρίλιος). Ανακτήθηκε από <http://www.physics4u.gr/articles/2002/blackbody.html>

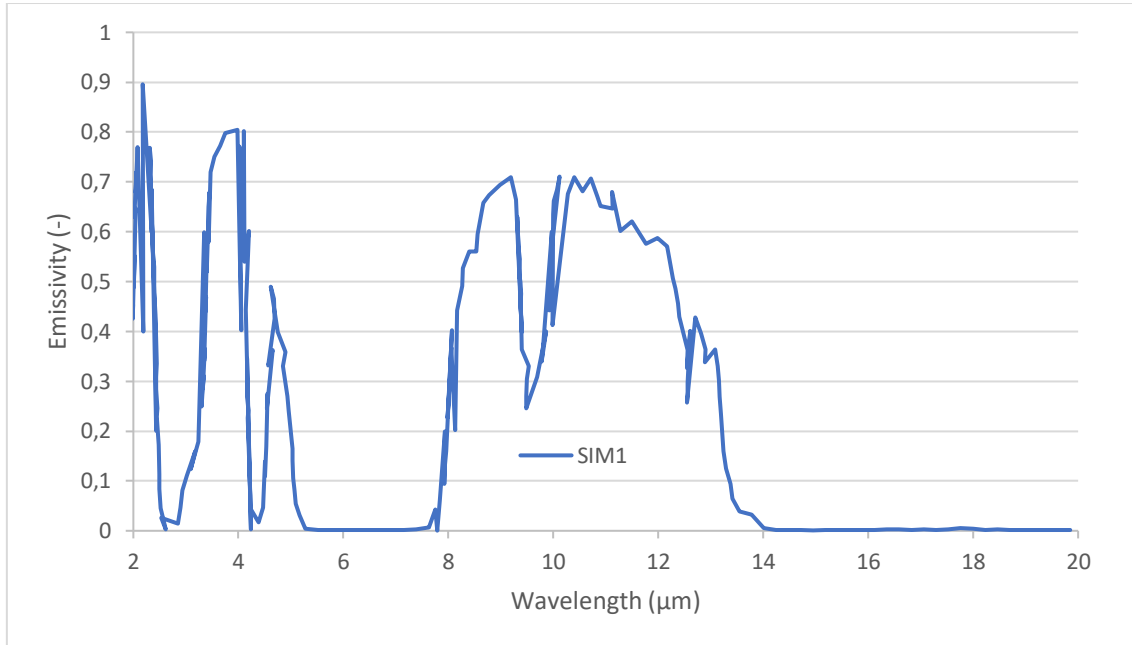
Ε. Η. Wichmann, Μαθήματα Φυσικής του Πανεπιστημίου Berkeley, Τόμος 4: Κβαντική Φυσική, Εργαστήρια Φυσικής ΕΜΠ (Αθήνα 1985), Κεφ. 1: Παράγρ. 1.33-1.40.

Η. D. Young, Πανεπιστημιακή Φυσική, Τόμος Β': Ηλεκτρομαγνητισμός, Οπτική, Σύγχρονη Φυσική, Εκδόσεις Παπαζήση (Αθήνα 1994), Κεφ. 40: Παράγρ. 40.8.

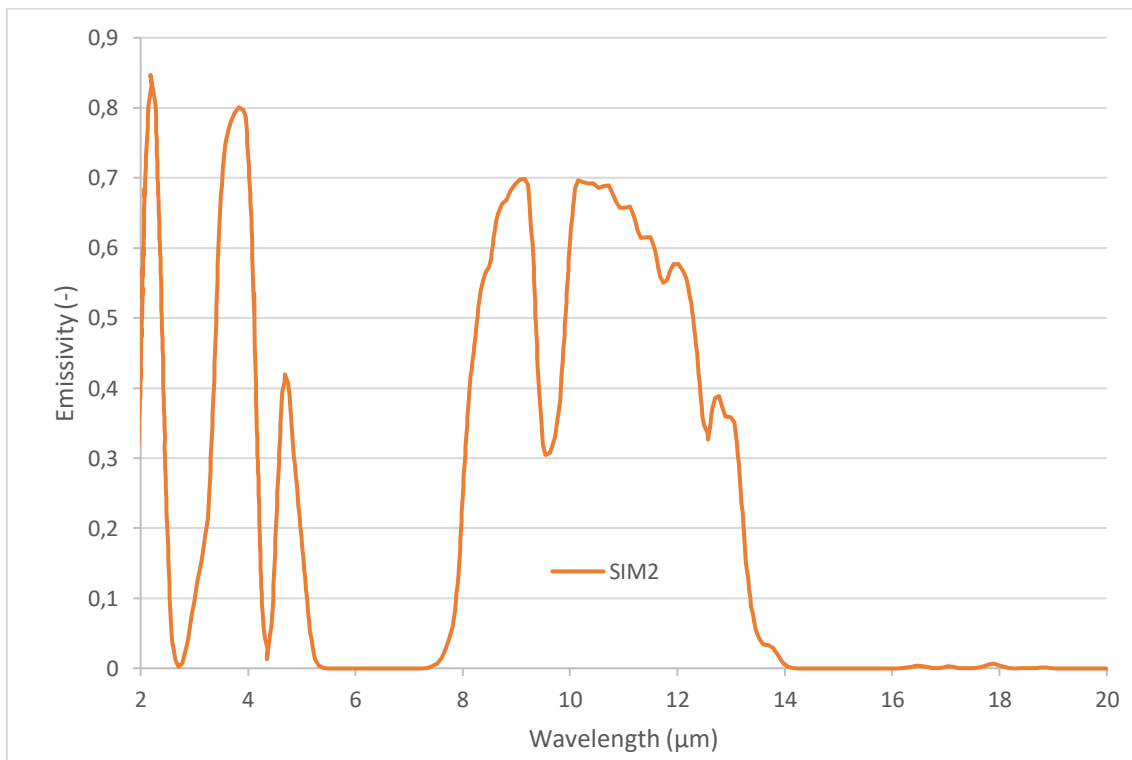
Department of Physics- National Technical University of Athens.-
http://www.physics.ntua.gr/gr/ergasthriakoi_odhgoi.htm

6. Παραρτήματα

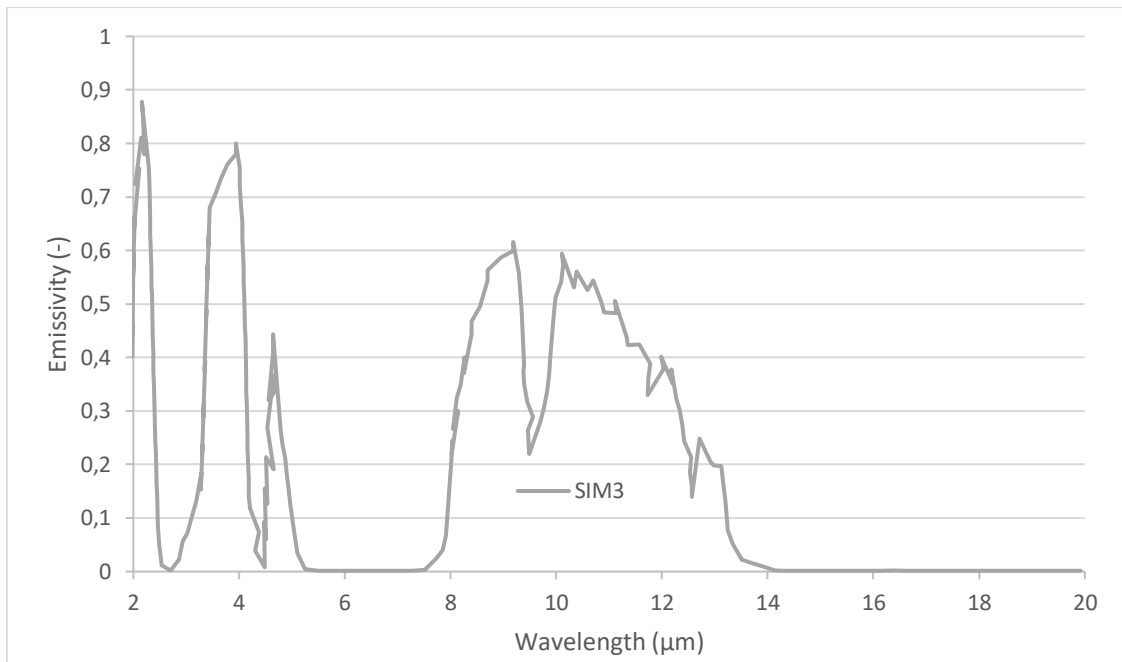
6.1 Εκπομπές των προσομοιώσεων ατμόσφαιρας στη MODTRAN



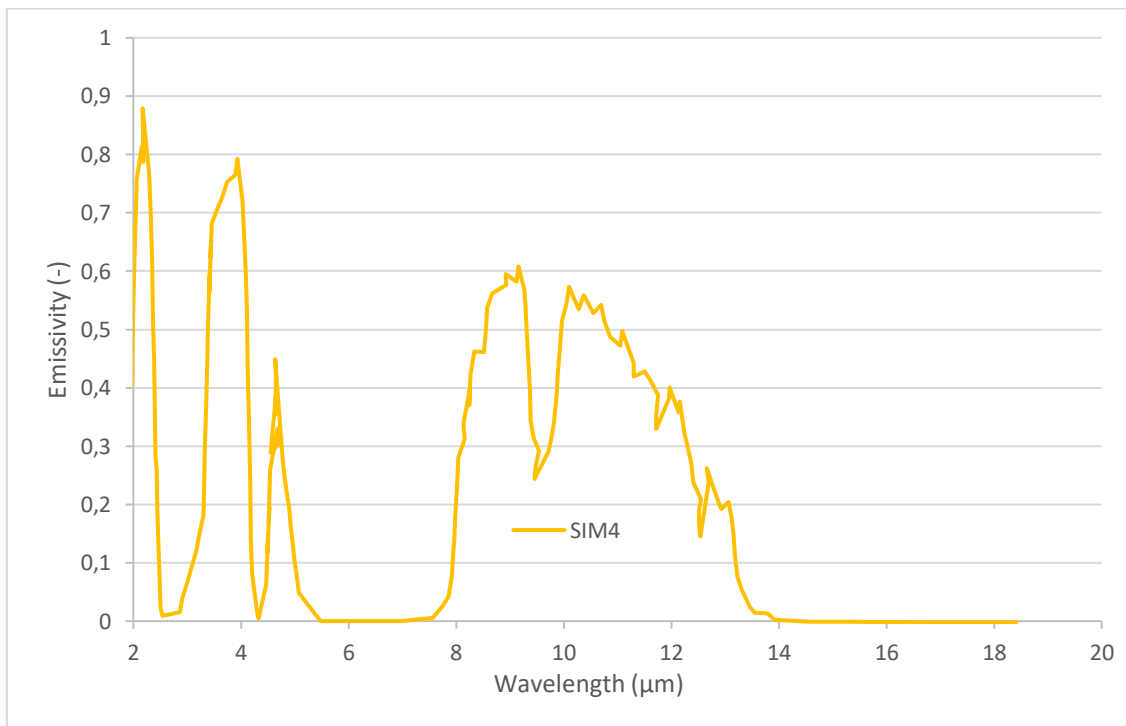
Διάγραμμα 31 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 1



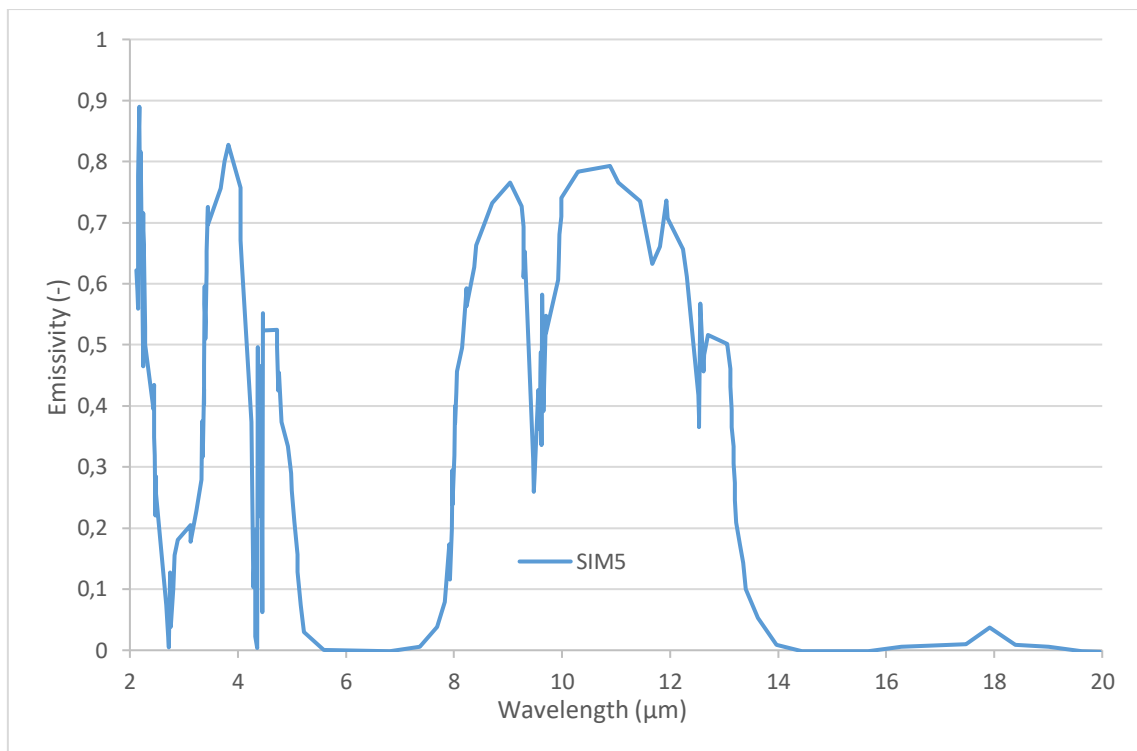
Διάγραμμα 32 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 2



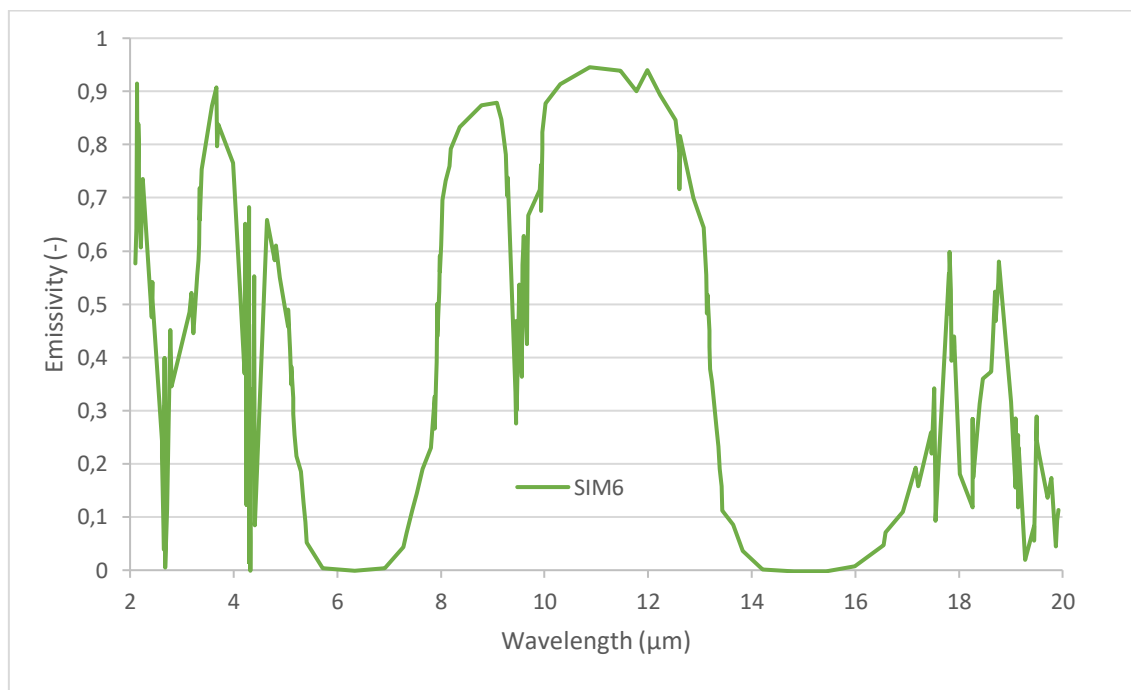
Διάγραμμα 33 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 3



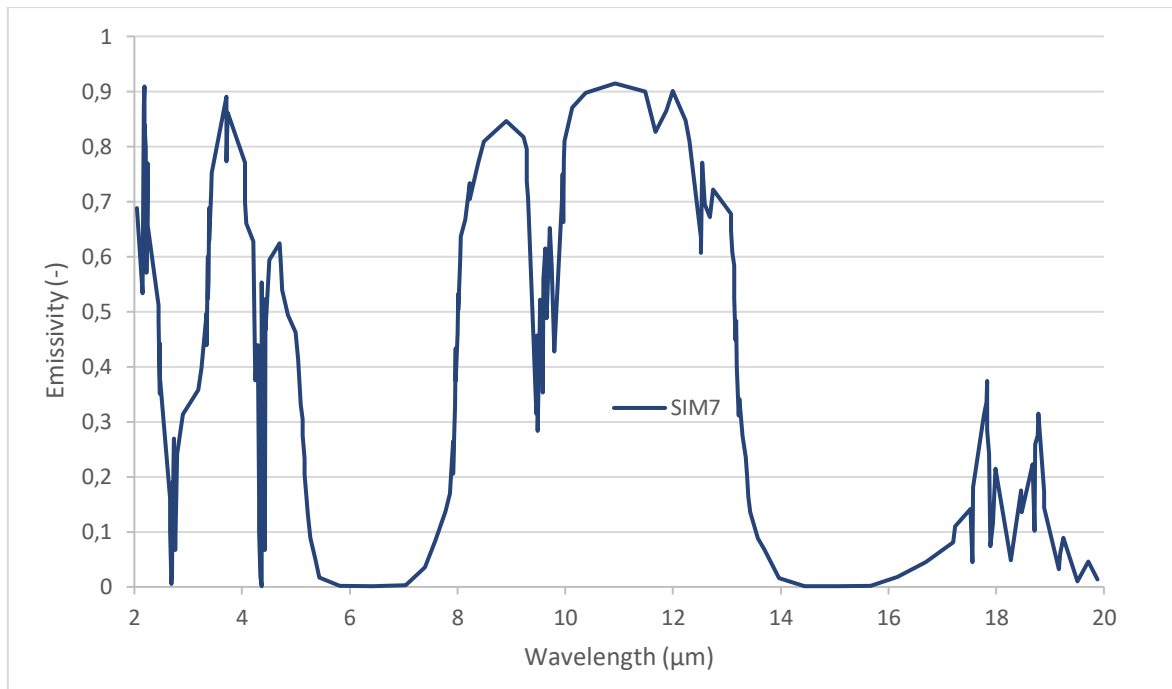
Διάγραμμα 34 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 4



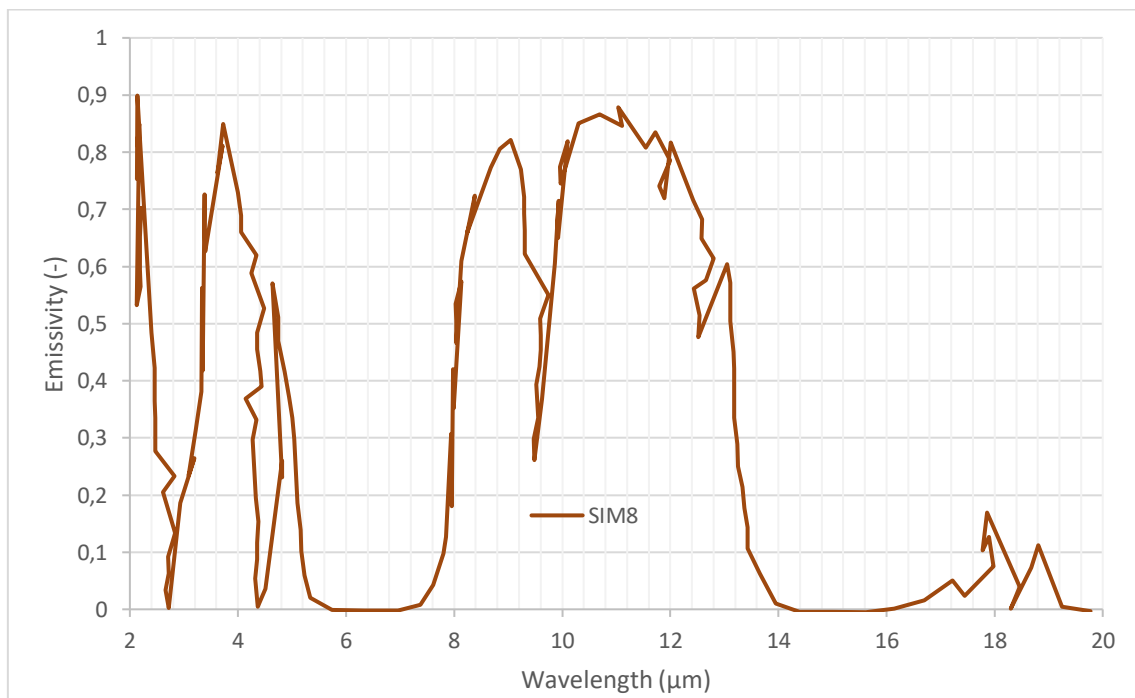
Διάγραμμα 35 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 5



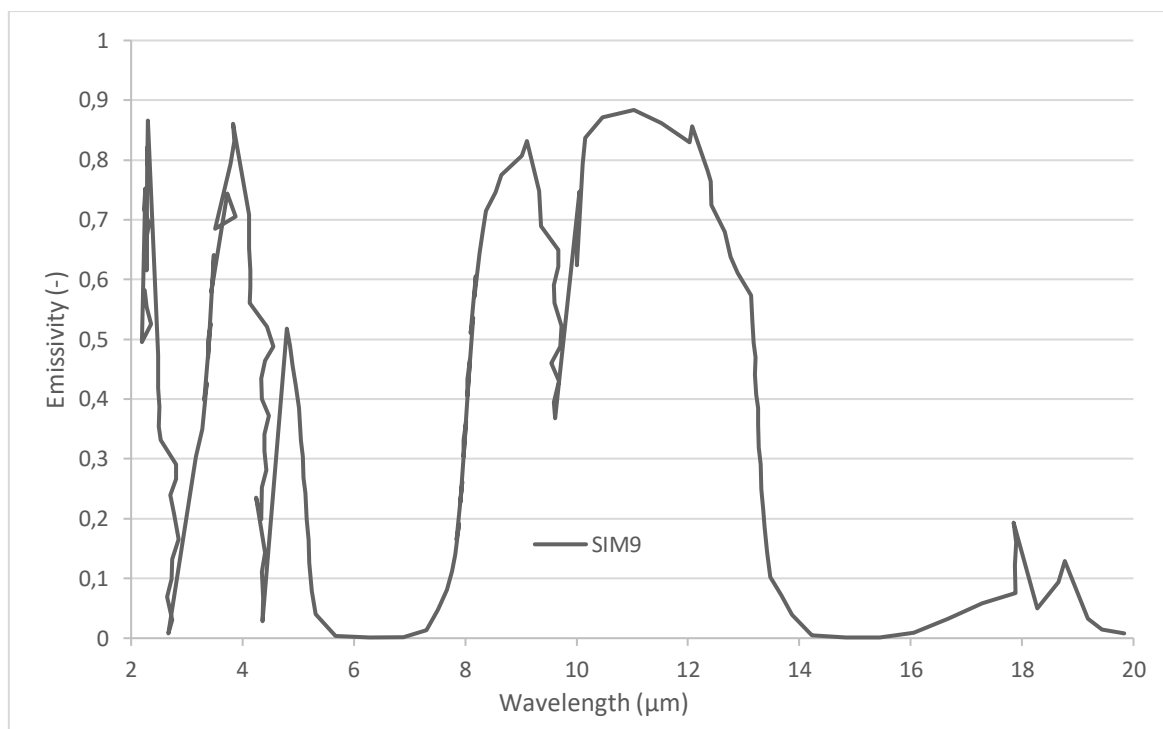
Διάγραμμα 36 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 6



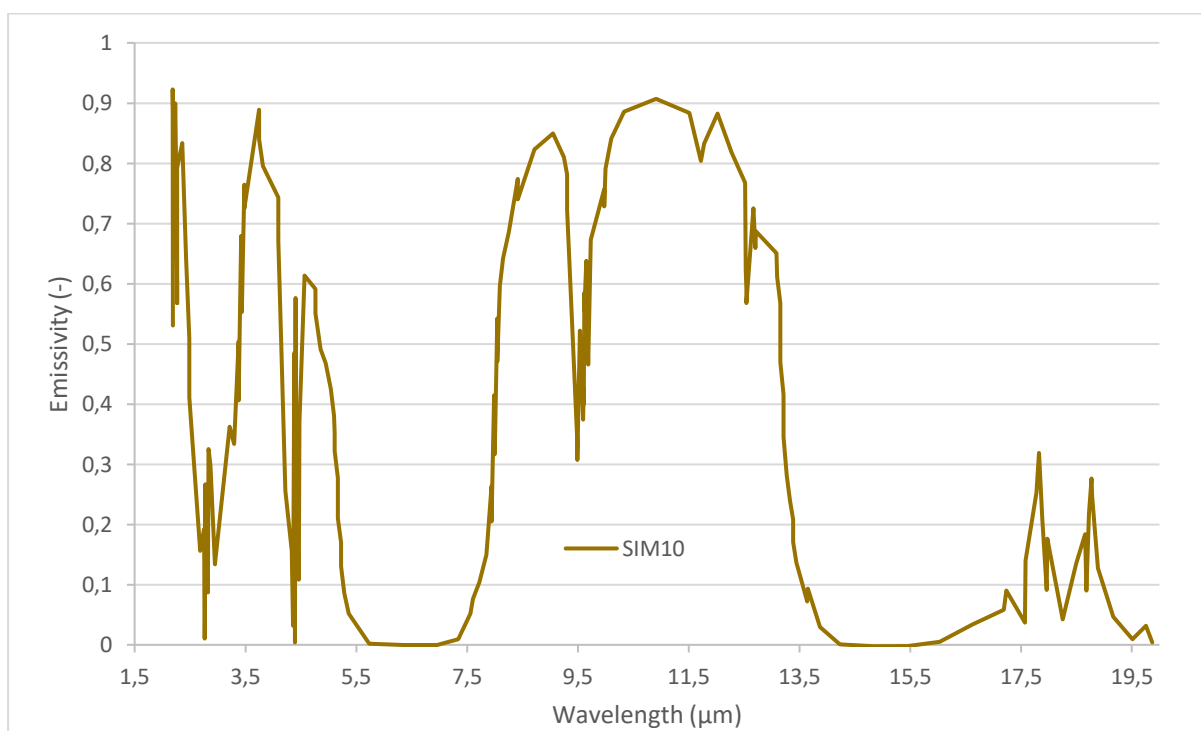
Διάγραμμα 37 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 7



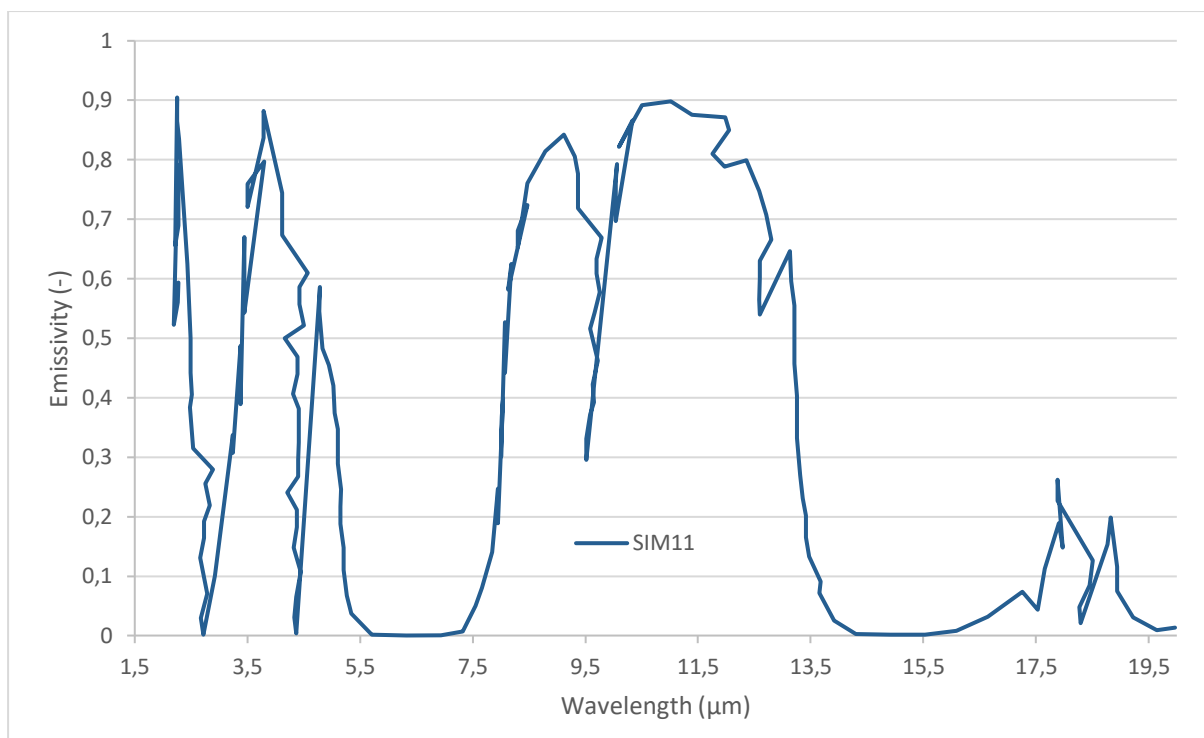
Διάγραμμα 38 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 8



Διάγραμμα 39 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 9



Διάγραμμα 40 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 10



Διάγραμμα 41 Εκπομπή της ατμόσφαιρας- Μοντέλο 11