



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συνδυασμός ψυχρών υλικών με φωτοβολταϊκά



ΚΟΤΕΝΙΔΗΣ Γ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ – ΑΝΔΡΕΑΣ

(Α.Μ.: 2014050004)

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθ. Κολοκοτσά Διονυσία (Επιβλέπουσα)

Καθ. Λαζαρίδης Μιχαήλ

Καθ. Τσούτσος Θεοχάρης

Χανιά, Σεπτέμβριος 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 τον 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.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει στόχο τη μελέτη των ψυχρών υλικών οροφής και ο συνδυασμός τους με φωτοβολταϊκά. Αναλυτικότερα, οι ψυχρές οροφές προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα στο υπό μελέτη κτίριο καθώς επίσης αναδεικνύεται η ικανότητά τους στο να μειώνουν τη θερμοκρασία της οροφής, επομένως και το κόστος για ψύξη των θερμικών ζωνών οι οποίες βρίσκονται υπό των οροφών αυτών, καθώς ταυτόχρονα επεκτείνουν το χρόνο ζωής της οροφής, αφού δρουν ως αδιάβροχες μεμβράνες και προλαμβάνουν πολλά προβλήματα που προκαλεί. Επίσης φαίνεται πως δρουν θετικά ως προς τα φωτοβολταϊκά πάνελ, μειώνουν δηλαδή τη θερμοκρασία τους μέσω της ψύξης του γύρω περιβάλλοντος και λόγω αυτής της μείωσης τα φωτοβολταϊκά παράγουν περισσότερη ισχύ από αυτή που παράγουν όταν είναι τοποθετημένα σε κάποια συνηθισμένη οροφή.

Αρχικά, για την κατασκευή των μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά OpenStudio και EnergyPlus, στα οποία έγινε κατασκευή μιας απλής οροφής, μιας οροφής με προσθήκη του ψυχρού υλικό Elastokryl και τέλος έγινε η κατασκευή του μοντέλο μιας οροφής που είχε ως προσθήκη στην εξωτερική της επιφάνεια το ψυχρό υλικό Sikalastic-560. Από αυτά τα τρία μοντέλα έγινε η πρώτη εκτίμηση για την δράση των δύο αυτών υλικών. Έπειτα, τα ίδια μοντέλα έγιναν με τη χρήση του λογισμικού TRNSYS (Transient System Simulation Tool), όπου στην κάθε οροφή έγινε η προσθήκη τεσσάρων διαφορετικών φωτοβολταϊκών και έγινε η προσομοίωση για το καθένα ξεχωριστά. Τα τέσσερα φωτοβολταϊκά που χρησιμοποιήθηκαν είναι το SPR-X21-345 της εταιρίας SunPower, το REC350TP2S της εταιρίας REC Solar, το MiaSolé FLEX-03 500W της εταιρίας MiaSolé και τέλος το FS-6450A της εταιρίας First Solar.

Έπειτα έγινε η σύγκριση των αποτελεσμάτων για κάθε οροφή ξεχωριστά και για το κάθε φωτοβολταϊκό επίσης ξεχωριστά και το πώς αντέδρασε με την οροφή με την οποία αλληλεπιδρούσε για τρεις διαφορετικές ημέρες του χρόνου, μια ημέρα κατά τη διάρκεια του χειμώνα, μια ημέρα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και τέλος κατά τη διάρκειας μιας ημέρα όπου παρατηρήθηκε η μέγιστη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία πάνω στο οριζόντιο επίπεδο, όπου για την κάθε περίπτωση παρουσιάζεται και η ποσοστιαία σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων.

Τέλος, κατασκευάστηκαν τα μαθηματικά μοντέλα των τεσσάρων αυτών φωτοβολταϊκών στο λογισμικό MATLAB/Simulink, με το οποίο έγινε η προσομοίωση για κάθε θερμοκρασία αυτών και κάθε τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας από τον ήλιο, οι οποίες εξήχθησαν από το λογισμικό TRNSYS, καθώς επίσης παρουσιάζονται και οι συγκρίσεις μεταξύ της κάθε προσομοίωσης, οι οποίες δίνουν θετικά αποτελέσματα για την χειμερινή ημέρα, την εαρινή ζεστή ημέρα και για την ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια.

Abstract

The present thesis, aims at the study of cool roof materials and their combination with photovoltaic cells. More specifically, cool roofs are able to offer many advantages to the building, which is under study, as well as is shown of their ability to reduce the roof temperature, and therefore the outcome is the cost reduction of the thermal zones underneath them, while in addition they extend the roof's lifespan. It also seems, they have a positive effect on photovoltaic panels, they reduce their temperature by cooling the surrounding environment and due to this reduction, photovoltaics can produce more power of the power which is produced when they are mounted on a conventional roof.

Initially, OpenStudio and EnergyPlus were used to build the models, in which a simple concrete roof was built, a roof with the addition of Elastokryl and finally the third model was a roof with the addition of Sikalastic-560. Through these three models, the first assessment was made of the effect of these two cool materials. Then, the same models were moved and made from the beginning in TRNSYS software (Transient System Simulation Tool), where four different photovoltaic modules were added on each roof and the simulation was done for each one separately. The four different modules of the photovoltaic cells which were used are from SunPower Corporation the SPR-X21-345 module, the REC350TP2S-72 module of REC Solar Holdings SA, the MiaSolé FLEX-03 500W of MiaSolé company and the last one is a product of First Solar, Inc., the FS-6450A.

After these simulations, the results were compared for each roof separately and for each module also separately and how these four photovoltaics were affected by each roof material for three different days of the year, one during winter, one during summer and one where the maximum irradiance on the horizontal was measured, and for each comparison is presented the percentage in addition to the graphical comparison.

The last part of this thesis is the mathematical modelling of these four modules in MATLAB/Simulink, where is simulated the power production for each of their temperatures and for each value of the incident radiation, which values were extracted from TRNSYS. In addition, their comparisons are presented and for each simulation the results are positive for winter day, summer day and for the day with the maximum incidence of irradiance is measured.

Πρόλογος και ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια, κυρία Κολοκοτσά Διονυσία, τόσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε για την ανάθεση αυτής της διπλωματικής εργασίας, καθώς επίσης για το χρόνο και την υπομονή που ανέθεσε για την καθοδήγηση και την εκπόνησή της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γομπάκη Κωνσταντίνο και την κα. Τσέκερη Ελισάβετ για τις πληροφορίες και τις συμβουλές τους για τη σωστή εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας αυτής.

Επιπροσθέτως ευχαριστώ τον κ. Τσούτσο Θεοχάρη και τον κ. Λαζαρίδη Μιχαήλ για τον χρόνο που αφιέρωσαν για τη μελέτη και την παρουσίαση της διπλωματικής μου, καθώς επίσης και για τις διευκρινήσεις που πρότειναν για την βελτίωση αυτής.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρία Sika και την εταιρία Χρωτέξ, όπου τα παραρτήματα των καταστημάτων τους στα Χανιά μου έδωσαν διευκρινήσεις πάνω στα υλικά καθώς επίσης και εύχρηστες πληροφορίες.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. McDowell Alastair τον συν-διευθυντή της εταιρίας EnergyAE στην Αυστραλία, ο οποίος μου έδωσε εύχρηστες πληροφορίες για το λογισμικό TRNSYS και εκπονήθηκε η διπλωματική αυτή σωστά.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Γεώργιο και Ελένη καθώς επίσης και την αδερφή μου Λυδία, για τις θυσίες, την προσπάθειά τους και την αμέριστη στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια για να πετύχω τους στόχους μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
Abstract.....	3
Πρόλογος και ευχαριστίες.....	4
Περιεχόμενα.....	5
Κατάλογος Εικόνων.....	6
Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	7
Κατάλογος Πινάκων.....	9
1. Εισαγωγή.....	10
1.1. Σκοπός της εργασίας.....	10
1.2. Εισαγωγή στις οροφές και τα ψυχρά υλικά.....	10
1.2.1. Ιδιότητες ψυχρών υλικών.....	11
1.2.2. Πλεονεκτήματα ψυχρών υλικών.....	13
1.3. Φωτοβολταϊκή τεχνολογία.....	14
1.4. Χαρακτηριστική καμπύλη φωτοβολταϊκών.....	17
1.5. Σχέση απόδοσης και θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	18
2. Μεθοδολογία.....	19
2.1. OpenStudio.....	20
2.2. EnergyPlus.....	21
2.2.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων OpenStudio και EnergyPlus.....	21
2.3. System Advisor Model (SAM) και PVsyst.....	28
2.4. TRNSYS (Transient System Simulation).....	30
2.4.1. Simulation Studio και TRNBuild.....	30
2.5. MATLAB και Simulink.....	32
3. Σενάρια και αποτελέσματα.....	33
3.1. Απλό σενάριο.....	53
3.1.1. Απλό σενάριο σε συνδυασμό με το Φ/Β SPR-X21-345.....	53
3.1.2. Απλό σενάριο σε συνδυασμό με το Φ/Β REC350TP2S-72.....	54
3.1.3. Απλό σενάριο σε συνδυασμό με το Φ/Β MiaSolé FLEX-03 500W.....	55
3.1.4. Απλό σενάριο σε συνδυασμό με το Φ/Β FS-6450A.....	55
3.2. Σενάριο με το ψυχρό υλικό Elastokryl.....	56
3.2.1. Elastokryl σε συνδυασμό με το Φ/Β SPR-X21-345.....	57
3.2.2. Elastokryl σε συνδυασμό με το Φ/Β REC350TP2S-72.....	57
3.2.3. Elastokryl σε συνδυασμό με το Φ/Β MiaSolé FLEX-03 500W.....	58
3.2.4. Elastokryl σε συνδυασμό με το Φ/Β FS-6450A.....	58
3.3. Σενάριο με το ψυχρό υλικό Sikalastic-560.....	59

3.3.1.	Sikalastic-560 σε συνδυασμό με το Φ/Β SPR-X21-345.....	60
3.3.2.	Sikalastic-560 σε συνδυασμό με το Φ/Β REC350TP2S-72.....	61
3.3.3.	Sikalastic-560 σε συνδυασμό με το Φ/Β MiaSolé FLEX-03 500W.....	61
3.3.4.	Sikalastic-560 σε συνδυασμό με το Φ/Β FS-6450A.....	62
4.	Σύγκριση αποτελεσμάτων	62
4.1.	Πλεονεκτήματα φωτοβολταϊκών σε κτίρια	99
4.2.	Αποθήκευση ενέργειας.....	100
5.	Συμπεράσματα	100
6.	Βιβλιογραφία.....	103

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1	Ανακλαστικότητα συνηθισμένης οροφής σε σχέση με ψυχρή οροφή [ΠΗΓΗ: American Modular Systems, Inc, 2021]	11
Εικόνα 1.2	Ανακλώμενη και ροή ενέργειας σε επίπεδη οροφή με και χωρίς χρήση ψυχρού υλικού [ΠΗΓΗ: Sika Corporation, 2021]	12
Εικόνα 1.3	Πίνακας δείκτη SRI [ΠΗΓΗ: Sika Corporation, 2021]	13
Εικόνα 1.4	Θερμοκρασία οροφής με και χωρίς ψυχρό υλικό [ΠΗΓΗ: Sika Corporation, 2021]	13
Εικόνα 1.5	Φωτοβολταϊκά [ΠΗΓΗ: NREL, 2021]	14
Εικόνα 1.6	Φωτοβολταϊκό φαινόμενο [ΠΗΓΗ: Nikolaos F. Voudoukis, 2018]	14
Εικόνα 1.7	Μονοκρυσταλλικό κελί [ΠΗΓΗ: Yakan Lighting, 2021]	15
Εικόνα 1.8	Πολυκρυσταλλικό κελί [ΠΗΓΗ: Yakan Lighting, 2021].....	15
Εικόνα 1.9	Εύκαρπτο thin-film στοιχείο άμορφου πυριτίου [ΠΗΓΗ: PowerFilm Solar, Inc., 2021]	16
Εικόνα 1.10	Στοιχείο σύνθεσης CIGS [ΠΗΓΗ: SolarFeeds Digital, 2021]	16
Εικόνα 1.11	Στοιχείο σύνθεσης CdTe [ΠΗΓΗ: Science X, 2021]	16
Εικόνα 1.12	Καμπύλη I-V και P-V ενός φωτοβολταϊκού [ΠΗΓΗ: Jose A. Ramos, 2013].....	17
Εικόνα 1.13	Καμπύλη I-V σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία [ΠΗΓΗ: Dr M. Mithuramalingam, 2015].....	18
Εικόνα 1.14	Καμπύλη I-V σε σχέση με τη θερμοκρασία του πάνελ [ΠΗΓΗ: Meng-Hui Wang, 2012].....	19
Εικόνα 2.1	Γραφικό περιβάλλον χρήστη (User Interface) OpenStudio	20
Εικόνα 2.2	Γραφικό περιβάλλον EnergyPlus.....	21
Εικόνα 2.3	Θερμική ισορροπία εξωτερικής επιφάνειας [ΠΗΓΗ: Engineering Reference, 2015]	22
Εικόνα 2.4	Γραφικό περιβάλλον SAM.....	28
Εικόνα 2.5	Περιβάλλον χρήστη PVsyst.....	29
Εικόνα 2.6	Γραφικό περιβάλλον του Simulation Studio.....	30
Εικόνα 2.7	Περιβάλλον εργασίας TRNBuild.....	31
Εικόνα 2.8	Περιβάλλον MATLAB.....	32
Εικόνα 2.9	Περιβάλλον χρήστη Simulink	33
Εικόνα 3.1	Ροές θερμότητας και θερμοκρασιών μιας επιφάνειας [ΠΗΓΗ: TRNSYS 17 – Mathematical Reference, 2011]	33

Εικόνα 3.2 Βασικό δείγμα μοντέλου TRNSYS.....	36
Εικόνα 3.3 Ισοδύναμο ηλεκτρικό μοντέλο Type 94 (4-parameter) [ΠΗΓΗ: TRNSYS 17 – Mathematical Reference, 2011]	37
Εικόνα 3.4 SPR-X21-345 [ΠΗΓΗ: SunPower Corporation, 2016]	41
Εικόνα 3.5 REC350TP2S-72 [ΠΗΓΗ: REC Solar Holding AS, 2020].....	41
Εικόνα 3.6 Miasolé FLEX-03 500W [ΠΗΓΗ: MiaSolé, 2019].....	41
Εικόνα 3.7 First Solar FS-6450A [ΠΗΓΗ: First Solar, Inc., 2021].....	42
Εικόνα 3.8 Γραφική αναπαράσταση μέσω Simulink της εξίσωσης (3.27).....	43
Εικόνα 3.9 Γραφική αναπαράσταση μέσω Simulink της εξίσωσης (3.28).....	44
Εικόνα 3.10 Γραφική αναπαράσταση μέσω Simulink της εξίσωσης (3.29)	44
Εικόνα 3.11 Γραφική αναπαράσταση μέσω Simulink της εξίσωσης (3.30)	45
Εικόνα 3.12 Γραφική αναπαράσταση μέσω Simulink της εξίσωσης (3.31)	45
Εικόνα 3.13 Γραφική αναπαράσταση ενός PV Array	46
Εικόνα 3.14 Γραφική αναπαράστασης μέσω Simulink τελικού συστήματος.....	46

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1 Διαφορά θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας της οροφής με και χωρίς ψυχρό υλικό για χειμώνα.....	25
Διάγραμμα 2.2 Διαφορά θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας της οροφής με και χωρίς ψυχρό υλικό για καλοκαίρι.....	27
Διάγραμμα 3.1 SPR-X21-345 I-V curve at reference conditions.....	47
Διάγραμμα 3.2 SPR-X21-345 P-V curve at reference conditions	48
Διάγραμμα 3.3 REC350TP2S-72 I-V curve at reference conditions	48
Διάγραμμα 3.4 REC350TP2S-72 P-V curve at reference conditions.....	49
Διάγραμμα 3.5 MiaSole FLEX-03 500W I-V curve at reference conditions	49
Διάγραμμα 3.6 MiaSole FLEX-03 500W P-V at reference conditions.....	50
Διάγραμμα 3.7 FS-6450A I-V curve at reference conditions	50
Διάγραμμα 3.8 FS-6450A P-V curve at reference conditions	51
Διάγραμμα 3.9 Διάγραμμα θερμοκρασίας για ολόκληρο το έτος.....	52
Διάγραμμα 3.10 Διάγραμμα προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας για ολόκληρο το έτος....	52
Διάγραμμα 3.11 Διάγραμμα εξωτερικής θερμοκρασίας απλής οροφής.....	53
Διάγραμμα 3.12 Θερμοκρασία SPR-X21-345 σε απλή οροφή	54
Διάγραμμα 3.13 Θερμοκρασία REC350TP2S-72 σε απλή οροφή.....	54
Διάγραμμα 3.14 Θερμοκρασία MiaSole FLEX-03 500W σε απλή οροφή.....	55
Διάγραμμα 3.15 Θερμοκρασία FS-6450A σε απλή οροφή.....	56
Διάγραμμα 3.16 Εξωτερική θερμοκρασία οροφής με Elastokryl.....	56
Διάγραμμα 3.17 Θερμοκρασία SPR-X21-345 με Elastokryl.....	57
Διάγραμμα 3.18 Θερμοκρασία REC350TP2S-72 με Elastokryl.....	58
Διάγραμμα 3.19 Θερμοκρασία MiaSole FLEX-03 500W με Elastokryl.....	58
Διάγραμμα 3.20 Θερμοκρασία FS-6450A με Elastokryl.....	59
Διάγραμμα 3.21 Εξωτερική θερμοκρασία οροφής με Sikalastic-560.....	60
Διάγραμμα 3.22 Θερμοκρασία SPR-X21-345 με Sikalastic-560.....	60
Διάγραμμα 3.23 Θερμοκρασία REC350TP2S-72 με Sikalastic-560	61
Διάγραμμα 3.24 Θερμοκρασία MiaSole FLEX-03 500W με Sikalastic-560	62
Διάγραμμα 3.25 Θερμοκρασία FS-6450A με Sikalastic-560	62

Διάγραμμα 4.1 Σύγκριση θερμοκρασίας στην εξωτερική επιφάνεια της οροφής για κάθε σενάριο.....	63
Διάγραμμα 4.2 Θερμοκρασίες οροφής για χειμερινή ημέρα.....	64
Διάγραμμα 4.3 Θερμοκρασίες οροφής για εαρινή ημέρα.....	65
Διάγραμμα 4.4 Θερμοκρασίες οροφής για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια.....	66
Διάγραμμα 4.5 Θερμοκρασίες του SPR-X21-345 με και χωρίς συνδυασμό ψυχρού υλικού για ένα έτος.....	67
Διάγραμμα 4.6 Θερμοκρασίες του REC350TP2S-72 με και χωρίς συνδυασμό ψυχρού υλικού για ένα έτος.....	67
Διάγραμμα 4.7 Θερμοκρασίες MiaSole FLEX-03 500W με και χωρίς συνδυασμό ψυχρού υλικού για ένα έτος.....	68
Διάγραμμα 4.8 Θερμοκρασίες FS-6450A με και χωρίς συνδυασμό με ψυχρό υλικό για ένα έτος.....	68
Διάγραμμα 4.9 Θερμοκρασίες SPR-X21-345 σε συνδυασμό με και χωρίς ψυχρό υλικό για χειμερινή ημέρα.....	69
Διάγραμμα 4.10 Θερμοκρασίες SPR-X21-345 σε συνδυασμό με και χωρίς ψυχρό υλικό για καλοκαιρινή ημέρα.....	70
Διάγραμμα 4.11 Θερμοκρασίες SPR-X21-345 σε συνδυασμό με και χωρίς ψυχρό υλικό για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια.....	71
Διάγραμμα 4.12 Θερμοκρασίες REC350TP2S-72 για χειμερινή ημέρα με και χωρίς ψυχρό υλικό.....	71
Διάγραμμα 4.13 Θερμοκρασίες REC350TP2S-72 για καλοκαιρινή ημέρα με και χωρίς ψυχρό υλικό.....	72
Διάγραμμα 4.14 Θερμοκρασίες REC350TP2S-72 για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια με και χωρίς ψυχρό υλικό.....	73
Διάγραμμα 4.15 Θερμοκρασίες MiaSole FLEX-03 500W για χειμερινή ημέρα σε συνδυασμό με και χωρίς ψυχρό υλικό.....	74
Διάγραμμα 4.16 Θερμοκρασίες MiaSole FLEX-03 500W για εαρινή ημέρα με και χωρίς ψυχρό υλικό.....	74
Διάγραμμα 4.17 Θερμοκρασίες MiaSole FLEX-03 500W με και χωρίς ψυχρό υλικό για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια.....	75
Διάγραμμα 4.18 Θερμοκρασίες FS-6450A με και χωρίς ψυχρό υλικό για χειμερινή ημέρα ...	76
Διάγραμμα 4.19 Θερμοκρασίες FS-6450A με και χωρίς ψυχρό υλικό για ζεστή ημέρα	77
Διάγραμμα 4.20 Θερμοκρασίες FS-6450A με και χωρίς ψυχρό υλικό για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια	78
Διάγραμμα 4.21 Ισχύς SPR-X21-345 για χειμερινή ημέρα.....	79
Διάγραμμα 4.22 Διάγραμμα P-T SPR-X21-345 για χειμώνα.....	79
Διάγραμμα 4.23 Διάγραμμα P-Solar Irradiance για χειμώνα.....	80
Διάγραμμα 4.24 Ισχύς SPR-X21-345 για καλοκαιρινή ημέρα	80
Διάγραμμα 4.25 Διάγραμμα P-T SPR-X21-345 για καλοκαίρι.....	81
Διάγραμμα 4.26 Διάγραμμα P-Solar Irradiance SPR-X21-345 για καλοκαίρι.....	81
Διάγραμμα 4.27 Ισχύς SPR-X21-345 για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια	82
Διάγραμμα 4.28 Διάγραμμα P-T SPR-X21-345 για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια	83
Διάγραμμα 4.29 Διάγραμμα P-Solar Irradiance για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια	83
Διάγραμμα 4.30 Ισχύς REC350TP2S-72 για χειμώνα.....	84
Διάγραμμα 4.31 Διάγραμμα P-T REC350TP2S-72 για χειμώνα.....	85
Διάγραμμα 4.32 Διάγραμμα P-Solar Irradiance REC350TP2S-72 για χειμώνα	85
Διάγραμμα 4.33 Ισχύς REC350TP2S-72 για καλοκαίρι.....	86
Διάγραμμα 4.34 Διάγραμμα P-T REC350TP2S-72 για καλοκαίρι.....	86
Διάγραμμα 4.35 Διάγραμμα P-Solar Irradiance REC350TP2S-72 για καλοκαίρι.....	87
Διάγραμμα 4.36 Ισχύς REC350TP2S-72 για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια	87
Διάγραμμα 4.37 Διάγραμμα P-T REC350TP2S-72 για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια.....	88

Διάγραμμα 4.38 Διάγραμμα P-Solar Irradiance REC350TP2S-72 για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια	88
Διάγραμμα 4.39 Ισχύς MiaSole FLEX-03 500W για χειμώνα.....	89
Διάγραμμα 4.40 Διάγραμμα P-T MiaSole FLEX-03 500W για χειμώνα.....	90
Διάγραμμα 4.41 Διάγραμμα P-Solar Irradiance MiaSole FLEX-03 500W για χειμώνα	90
Διάγραμμα 4.42 Διάγραμμα P-T MiaSole FLEX-03 500W για καλοκαίρι.....	91
Διάγραμμα 4.43 Διάγραμμα P-Solar Irradiance MiaSole FLEX-03 500W για καλοκαίρι.....	92
Διάγραμμα 4.44 Ισχύς MiaSole FLEX-03 500W για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια	92
Διάγραμμα 4.45 Διάγραμμα P-T MiaSole FLEX-03 500W για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια.....	93
Διάγραμμα 4.46 Διάγραμμα P-Solar Irradiance MiaSole FLEX-03 500W για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια	93
Διάγραμμα 4.47 Ισχύς FS-6450A για χειμώνα.....	94
Διάγραμμα 4.48 Διάγραμμα P-T FS-6450A για χειμώνα.....	95
Διάγραμμα 4.49 Διάγραμμα P-Solar Irradiance FS-6450A για χειμώνα	95
Διάγραμμα 4.50 Ισχύς FS-6450A για καλοκαίρι	96
Διάγραμμα 4.51 Διάγραμμα P-T FS-6450A για καλοκαίρι.....	97
Διάγραμμα 4.52 Διάγραμμα P-Solar Irradiance FS-6450A για καλοκαίρι.....	97
Διάγραμμα 4.53 Ισχύς FS-6450A για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια	98
Διάγραμμα 4.54 Διάγραμμα P-T FS-6450A για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια.....	98
Διάγραμμα 4.55 Διάγραμμα P-Solar Irradiance FS-6450A για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια 99	

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5.1 Τιμές για την εξωτερική επιφάνεια της οροφής για χειμώνα	26
Πίνακας 5.2 Τιμές θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας της οροφής για καλοκαίρι.....	28
Πίνακας 5.1 Ποσοστιαίες μεταβολές θερμοκρασίας οροφής από τα υλικά	100
Πίνακας 5.2 Ποσοστά μεταβολής θερμοκρασίας και παραγωγής SPR-X21-345	101
Πίνακας 5.3 Ποσοστά μεταβολής θερμοκρασίας και παραγωγής REC350TP2S-72.....	101
Πίνακας 5.4 Ποσοστά μεταβολής θερμοκρασίας και παραγωγής MiaSole FLEX-03 500W.....	102
Πίνακας 5.5 Ποσοστά μεταβολή θερμοκρασίας και παραγωγής FS-6450A	102

1. Εισαγωγή

1.1. Σκοπός της εργασίας

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να μελετηθεί η αντίδραση των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε συνδυασμό με ψυχρά υλικά στην οροφή ενός κτιρίου. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα OpenStudio και EnergyPlus για την κατασκευή του αρχικού μοντέλου, έπειτα το λογισμικό TRNSYS για την εξαγωγή της θερμοκρασίας του κάθε πάνελ και τέλος χρησιμοποιήθηκε το Simulink του λογισμικού MATLAB, όπου κατασκευάστηκε το μοντέλο ενός φωτοβολταϊκού μέσω των εξισώσεων που αποτελούν το αποτέλεσμα και είχαν ως ορίσματα εισαγωγής από τον χρήστη την ηλιακή ακτινοβολία και την θερμοκρασία του.

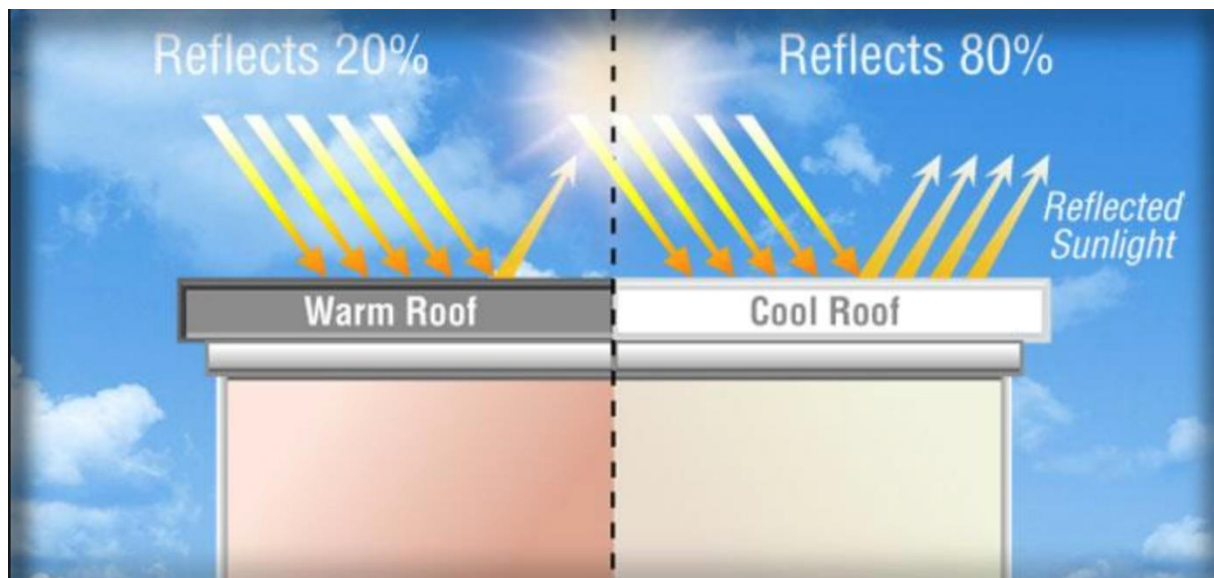
1.2. Εισαγωγή στις οροφές και τα ψυχρά υλικά

Αρχικά ως οροφή ή αλλιώς σκεπή ή στέγη ορίζεται το τμήμα του κτιρίου το οποίο βρίσκεται στη ψηλότερο τμήμα αυτού και προστατεύει το υπόλοιπο κτίριο από τα καιρικά φαινόμενα και άλλους εξωτερικούς παράγοντες που επιδρούν με αυτό. Σύμφωνα με τον σχεδιασμό των οροφών, αυτές χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Επίπεδες, οι οποίες και κατά κύριο λόγο αποκαλούνται ταράτσες
- Επικλινείς, οι οποίες συνήθως είναι κατασκευασμένες από κεραμίδια και έχουν κατά κύριο λόγο τέσσερις επικλινείς επιφάνειες, όμως υπάρχουν και με μία επικλινή επιφάνεια, δύο, τρεις, αλλά ακόμα και πάνω από τέσσερις επικλινείς επιφάνειες σε πιο σύνθετα κτίρια
- Καμπύλες, οι οποίες είναι συνήθως οι θολωτές στέγες.

Τα υλικά κατασκευής των σκεπών στη σημερινή εποχή είναι τσιμέντο ή τούβλα ή ακόμα και ο συνδυασμών των δύο για τις επίπεδες στέγες. Για τις κεκλιμένες στέγες υπάρχει μεγαλύτερη ποικιλία υλικών, όπως κεραμίδια που προαναφέρθηκαν, επίσης συναντώνται και πιο ελαφρά υλικά όπως φύλλα σιδήρου, γαλβανισμένου σιδήρου, φύλλα PVC και άλλα, και το πλεονέκτημα τους είναι η μείωση βάρους του κτιρίου. [P.C. Varghese 2006, *Building Materials*]

Όπως είναι γνωστό, ένα μεγάλο ποσοστό ενέργειας που χάνεται από ένα σπίτι είναι από την οροφή του. Για αυτό και έχουν βρεθεί αρκετοί τρόποι να γίνει εξοικονόμηση ενέργειας από τις απώλειες της οροφής. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία μελετάται η χρήση ψυχρών υλικών δηλαδή υλικών που έχουν την ιδιότητα να αντανακλούν μεγάλο ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας πίσω στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 1.1 Ανακλαστικότητα συνηθισμένης οροφής σε σχέση με ψυχρή οροφή [ΠΗΓΗ: American Modular Systems, Inc, 2021]

1.2.1. Ιδιότητες ψυχρών υλικών

Στην Ελλάδα παρατηρείται συχνά πως οι οροφές των σπιτιών είναι κυρίως ανοιχτόχρωμες και κατά κύριο λόγο άσπρες. Αυτή είναι μια τεχνική αρκετών ετών από τις οποίες μπορούν να χαρακτηριστούν ως ψυχρές οροφές. Όμως ψυχρές οροφές (cool roofs) ονομάζονται έτσι διότι εφαρμόζονται πάνω τους ψυχρά υλικά και στόχος τους είναι να μειώσουν τις εσωτερικές θερμοκρασίες του κτιρίου κυρίως κατά την περίοδο των καλοκαιρινών μηνών.

Όπως προαναφέρθηκε η πιο σημαντική ιδιότητα των ψυχρών υλικών είναι να αντανακλούν την προσπίπτουσα ακτινοβολία πίσω στην ατμόσφαιρα. Αυτό σημαίνει ότι δεν συσσωρεύουν μεγάλο ποσοστό θερμότητας, επομένως αυτό έχει ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία της οροφής να είναι αρκετά χαμηλότερη σε σχέση από μια συνηθισμένη οροφή η οποία δεν περιλαμβάνει κάποια προστασία.

Τα σύγχρονα ψυχρά υλικά που κατασκευάζονται και χρησιμοποιούνται είναι συνήθως χρώματος άσπρου, γιατί ως γνωστό, το άσπρο χρώμα είναι αυτό που εκπέμπει τα περισσότερα μήκη κύματος από αυτά που προσπίπτουν πάνω του. Άρα τα ψυχρά υλικά είναι υλικά υψηλής ανακλαστικότητας θερμοπλαστικά και εφαρμόζονται σαν υγρές επιστρώσεις όπως τα απλά χρώματα ή ακόμα και σαν λεπτές μεμβράνες και προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα για αρκετά χρόνια.



Εικόνα 1.2 Ανακλώμενη και ροή ενέργειας σε επίπεδη οροφή με και χωρίς χρήση ψυχρού υλικού [ΠΗΓΗ: Sika Corporation, 2021]

➤ Ηλιακή ανακλαστικότητα (Solar Reflectance (SR))

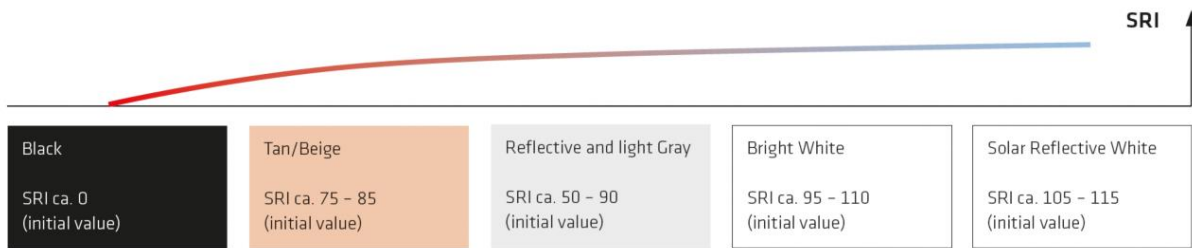
Ως ηλιακή ανακλαστικότητα ορίζεται η ικανότητα μιας επιφάνειας ενός υλικού να ανακλά την ορατή και μη ακτινοβολία, συμπεριλαμβανομένης τόσο της υπεριώδους καθώς και της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Ο δείκτης SR έχει εύρος τιμών από 0 έως 1, όπου με 0 χαρακτηρίζονται οι μαύρες και γενικότερα πολύ σκουρόχρωμες οροφές λόγω της υψηλής απορροφητικότητάς τους ενώ με 1 χαρακτηρίζονται οι άσπρες λόγω της υψηλής ανακλαστικότητάς τους.

➤ Θερμική εκπεμπιμότητα (Thermal Emittance (IE))

Θερμική εκπεμπιμότητα είναι η ιδιότητα μιας επιφάνειας ενός υλικού να εκπέμπει την θερμική ακτινοβολία και ορίζεται ως ο λόγος της ακτινοβολίας του δεδομένου σώματος προς την τιμή της εκπομπής του μέλανος σώματος. Οι τιμές του δείκτη αυτού έχουν εύρος από 0 έως 1, όπου αυτή η τιμή εξαρτάται από το υλικό. Αυτό σημαίνει πως, όσο πιο υψηλή τιμή έχει ο δείκτης IE, τότε τόσο πιο μικρή θα είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας του υλικού.

➤ Δείκτης ηλιακής ανακλαστικότητας (Solar Reflectance Index (SRI))

Ο δείκτης SRI εκφράζει την ικανότητα ενός κατασκευαστικού υλικού οροφής να αντανakλά την ηλιακή ενέργεια. Έχει οριστεί πως ένα σκούρο χρώμα με ιδιότητες SR ίση με 0.05 και IE ίση με 0.90, τότε ο δείκτης SRI θα ισούται με 0, ενώ αντιθέτως ένα απλό λευκό χρώμα με SR ίση με 0.8 και IE ίση με 0.9 θα έχει τιμή SRI ίση με 100. Αυτό σημαίνει πως όσο πιο υψηλή είναι η τιμή του δείκτη αυτού, τότε τόσο πιο κατάλληλο θα είναι αυτό το υλικό για να εφαρμοστεί σε μια οροφή και να οριστεί ως ψυχρή οροφή. Οι τιμές του δείκτη SRI θα μπορούν να ξεπεράσουν το 100, και υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις τιμές των δεικτών SR και IE σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E 1980 “Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces”. Το αντίστοιχο Ευρωπαϊκό πρότυπο εκδόθηκε το 2017 ως: “EN 17190 Flexible sheets for waterproofing – Solar Reflectance Index”. [ΠΗΓΗ: Sika Corporation, 2021]



Εικόνα 1.3 Πίνακας δείκτη SRI [ΠΗΓΗ: Sika Corporation, 2021]

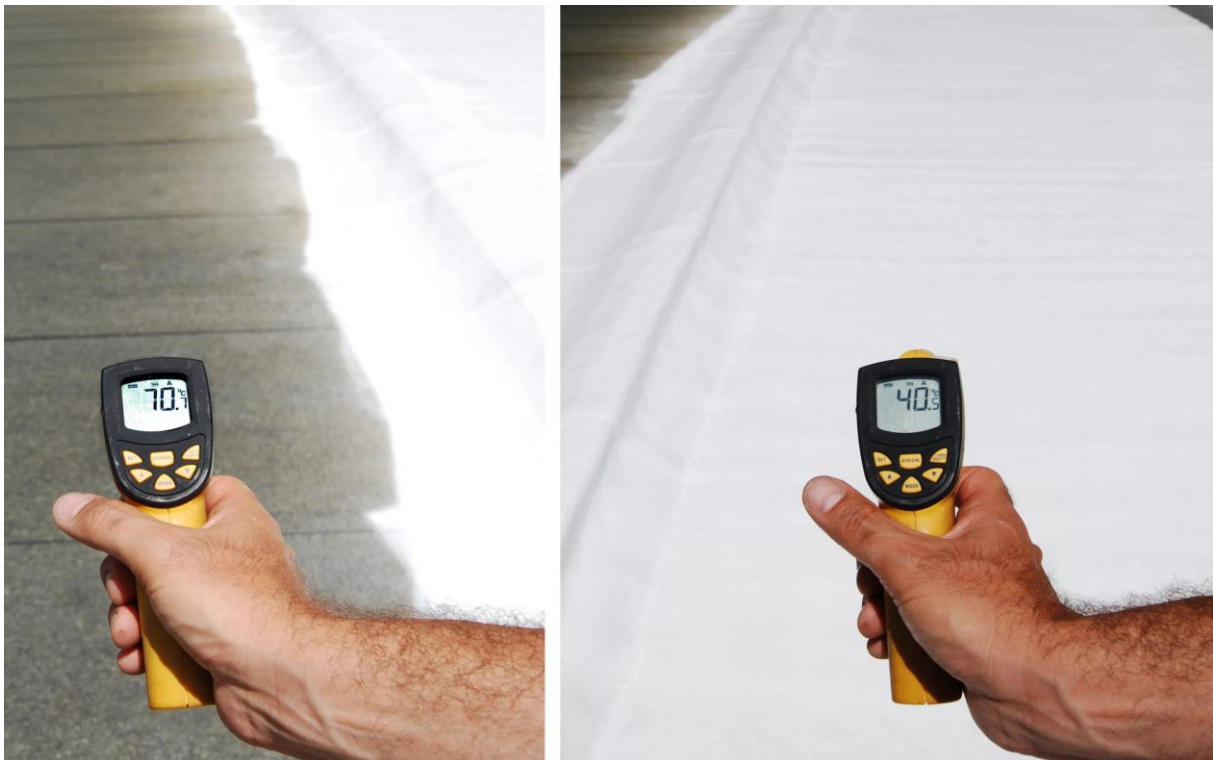
1.2.2. Πλεονεκτήματα ψυχρών υλικών

Τα ψυχρά υλικά έχουν αρκετά πλεονεκτήματα όταν εφαρμόζονται στις οροφές των κτιρίων κυρίως μέρη με ζεστό κλίμα και αρκετό ήλιο, όπως δηλαδή αυτό της Ελλάδας και παρόμοιο γεωγραφικό πλάτος. Σε μια συμβατική οροφή

Τα πλεονεκτήματα, λοιπόν, των ψυχρών οροφών είναι:

- Η μείωση της ανάγκης για χρήση ενός κλιματιστικού
- Η αύξηση της αντοχής των υλικών της οροφής, μέσω των χαμηλότερων θερμοκρασιών στα υλικά αυτά
- Με τη μείωση της θερμοκρασίας στην οροφή, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των θερμοκρασιών στο εσωτερικό του σπιτιού, επομένως υπάρχει βελτίωση της θερμικής άνεσης ακόμα και σε δωμάτια που δεν υπάρχει κλιματισμός, όπως για παράδειγμα γκαράζ και εσωτερικές αυλές

Όπως γίνεται κατανοητό, η σημασία των ψυχρών οροφών είναι μεγάλη για την εξοικονόμηση ενέργειας σε μια κατοικία. [ΠΗΓΗ: Department of energy, 2021]



Εικόνα 1.4 Θερμοκρασία οροφής με και χωρίς ψυχρό υλικό [ΠΗΓΗ: Sika Corporation, 2021]

1.3. Φωτοβολταϊκή τεχνολογία



Εικόνα 1.5 Φωτοβολταϊκά [ΠΗΓΗ: NREL, 2021]

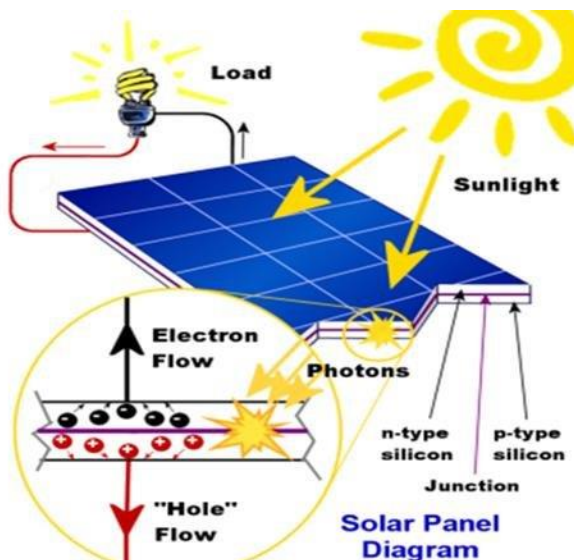
Ως φωτοβολταϊκή τεχνολογία (PV Technology) ονομάζεται αυτή που πραγματοποιεί την απευθείας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω των φωτοβολταϊκών κελιών. Η διαδικασία αυτή είναι μια φυσική διαδικασία που συμβαίνει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο και ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Τα φωτοβολταϊκά κελιά αποτελούνται από ημιαγωγικά

υλικά, τα οποία έχουν την ιδιότητα να απορροφούν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και να μεταδίδουν την ενέργεια που απορρόφησαν σε ηλεκτρόνια. Ένα από τα πιο συχνά υλικά κατασκευής των φωτοβολταϊκών πάνελ αποτελεί το πυρίτιο (Si). Ένα φωτοβολταϊκό κελί κατασκευάζεται από μια λεπτή στρώση πυριτίου σε συνδυασμό με φωσφόρο (P), και σε αυτό το στρώμα εφάπτεται ένα επίσης λεπτό στρώμα πυριτίου συνδυασμένο με βόριο (B).

Όταν, λοιπόν, το φως του ήλιου προσπίπτει πάνω στο φωτοβολταϊκό κύτταρο, τότε μέρος της ενέργειας διεγείρει τα ηλεκτρόνια σθένους, τα οποία και μπορούν να κινούνται ελεύθερα μέσα στον ημιαγωγό. Με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια υποχρεώνονται να κινηθούν προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, επομένως παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα, και η ισχύς αυτού του ρεύματος καθορίζεται από τη ροή των ηλεκτρονίων και την εφαρμοζόμενη στο φωτοβολταϊκό κελί. [Θεοχάρης Τσούτσος, 2016]

1.3.1. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο



Εικόνα 1.6 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο [ΠΗΓΗ: Nikolaos F. Voudoukis, 2018]

Στην ένωση δύο ημιαγωγών τύπου-p και τύπου-n, δηλαδή μια ένωση από δύο ημιαγωγούς εκ των οποίων του ενός το πλεονάζον φορτίο είναι αρνητικό, δηλαδή έχει πλεονάζοντα ηλεκτρόνια, και ο άλλος ημιαγωγός έχει πλεονάζον φορτίο θετικό, που σημαίνει η έλλειψη ηλεκτρονίων, τότε δημιουργείται μια επαφή ονομαζόμενη επαφή p-n (positive-negative). Σε αυτή την επαφή όταν προσπίπτει κάποια πηγή φωτός, κυρίως η ηλιακή ακτινοβολία, τότε τα περισσευούμενα ηλεκτρόνια απορροφούν αυτή την ενέργεια και εξαναγκάζονται να κινηθούν από τον από τον ημιαγωγό τύπου-n προς τον ημιαγωγό τύπου-p και μαζί με την αντίθετη κίνηση των οπών, έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό του ηλεκτρικού ρεύματος. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

[Θεοχάρης Τσούτσος, 2016]

1.3.2. Φωτοβολταϊκή τεχνολογία

Όπως έχει προαναφερθεί, το κύριο υλικό από το οποίο αποτελούνται τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι το πυρίτιο (Si), όμως η τεχνολογία έχει φέρει στο φως κι άλλα ακόμα διαφορετικά και καινοτόμα είδη όσον αφορά τα ημιαγώγιμα υλικά. Τα είδη των φωτοβολταϊκών στοιχείων μπορούν να διαχωριστούν σύμφωνα με τα παρακάτω χαρακτηριστικά, όμως δεν θα πρέπει να είναι αυστηρή η κατηγοριοποίησή τους, εφόσον πολλά από αυτά μπορούν να ενταχθούν σε παραπάνω από μία κατηγορίες:

- το βασικό ημιαγώγιμο υλικό
- τον τρόπο κατασκευής τους
- τον τύπο επαφής
- τη διάταξη αξιοποίησης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

Στην παρούσα διπλωματική ο διαχωρισμός των πάνελ θα γίνει σύμφωνα με το βασικό ημιαγώγιμο υλικό από τα οποία είναι κατασκευασμένα.

α. Φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si-mono)

Τα φωτοβολταϊκά αυτού του τύπου το υλικό είναι μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Η τεχνική παραγωγής τους είναι αρκετά παλιά, όμως είναι μια ακριβή διαδικασία, ακριβή αναλογία σχέσης απόδοσης και κόστους, αφού απαιτείται το πυρίτιο να βρίσκεται σε μεγάλο ποσοστό καθαρότητας. Επομένως έχει ως αποτέλεσμα τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά να είναι λίγα στην αγορά. Παρουσιάζουν όμως πολύ υψηλή απόδοση σε συνθήκες εργαστηρίου η οποία ανέρχεται στο εύρος του 20% μέχρι και 24% και συναντώνται συνήθως σε χρώμα μπλε.



**Mono-Crystalline
Solar Cell**

Εικόνα 1.7
Μονοκρυσταλλικό κελί
[ΠΗΓΗ: Yakan
Lighting, 2021]

β. Φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Si-poly)



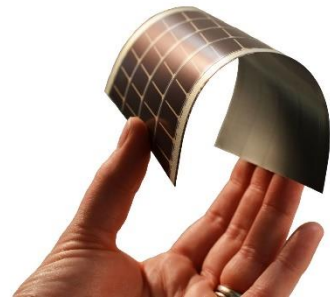
**Poly-Crystalline
Solar Cell**

Εικόνα 1.8
Πολυκρυσταλλικό κελί
[ΠΗΓΗ: Yakan
Lighting, 2021]

Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούν σαν κύριο υλικό κατασκευής το ημιαγώγιμο πολυκρυσταλλικό πυρίτιο. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι αρκετά φθηνότερη σε σχέση με αυτά του μονοκρυσταλλικού πυριτίου καθώς δεν απαιτείται μεγάλη καθαρότητα του βασικού υλικού κατασκευής. Αυτό έχει ως αντίκτυπο την μικρότερη απόδοση αυτών σε σχέση με αυτά του μονοκρυσταλλικού τύπου, η οποία έχει υπολογιστεί σε εργαστηριακές συνθήκες να είναι στο εύρος 17% μέχρι 20%. Το χρώμα τους συνήθως είναι μπλε-γαλάζιο και διακρίνονται οι ασυνέχειες μεταξύ των κρυστάλλων του πυριτίου.

γ. Φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου (Si-a, thin-film)

Στα στοιχεία αυτά το κύριο υλικό κατασκευής είναι το άμορφο πυρίτιο. Λέγεται άμορφο διότι κατά την κατασκευή του χάνει αρκετά από την κρυσταλλική δομή του όμως διατηρούνται οι ημιαγωγίμες ιδιότητές του. Τα στοιχεία αυτά έχουν αρκετά μικρότερη απόδοση σε σύγκριση με αυτά του μονοκρυσταλλικού ακόμα και με αυτά του πολυκρυσταλλικού πυριτίου και σε εργαστηριακές μετρήσεις κυμαίνεται κοντά στο 13%. Όμως ότι χάνεται από την απόδοση κερδίζεται σε άλλες ιδιότητες, όπως την ευκαμψία, την ελάχιστη επιρροή της απόδοσης λόγω της θερμοκρασίας, ευκολία και μικρό κόστος παραγωγής. Το χρώμα τους είναι κατά κύριο λόγο μαύρο.



Εικόνα 1.9 Εύκαμπτο thin-film στοιχείο άμορφου πυριτίου [ΠΗΓΗ: PowerFilm Solar, Inc., 2021]

δ. Φωτοβολταϊκά σύνθεσης χαλκού, ινδίου, γαλλίου, σεληνίου (CIGS)

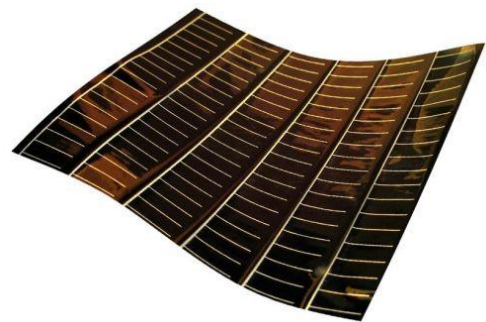


Το υλικό κατασκευής των πάνελ αυτών είναι η σύνθεση των στοιχείων χαλκού (Cu), ινδίου (In), γαλλίου (Ga) και σεληνίου (Se) και η λειτουργία γίνεται μέσω του μεγάλου χάσματος που έχουν τα υλικά αυτά και αξιοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία με μεγάλη δυνατότητα. Οι αποδόσεις που έχουν υπάρξει σε εργαστήρια έχουν φτάσει μέχρι και το 20% και είναι μεγαλύτερες από τα αντίστοιχα του άμορφου πυριτίου, καθώς είναι και αυτά εύκαμπτα.

Εικόνα 1.10 Στοιχείο σύνθεσης CIGS [ΠΗΓΗ: SolarFeeds Digital, 2021]

ε. Φωτοβολταϊκά σύνθεσης καδμίου-τελούριου (CdTe)

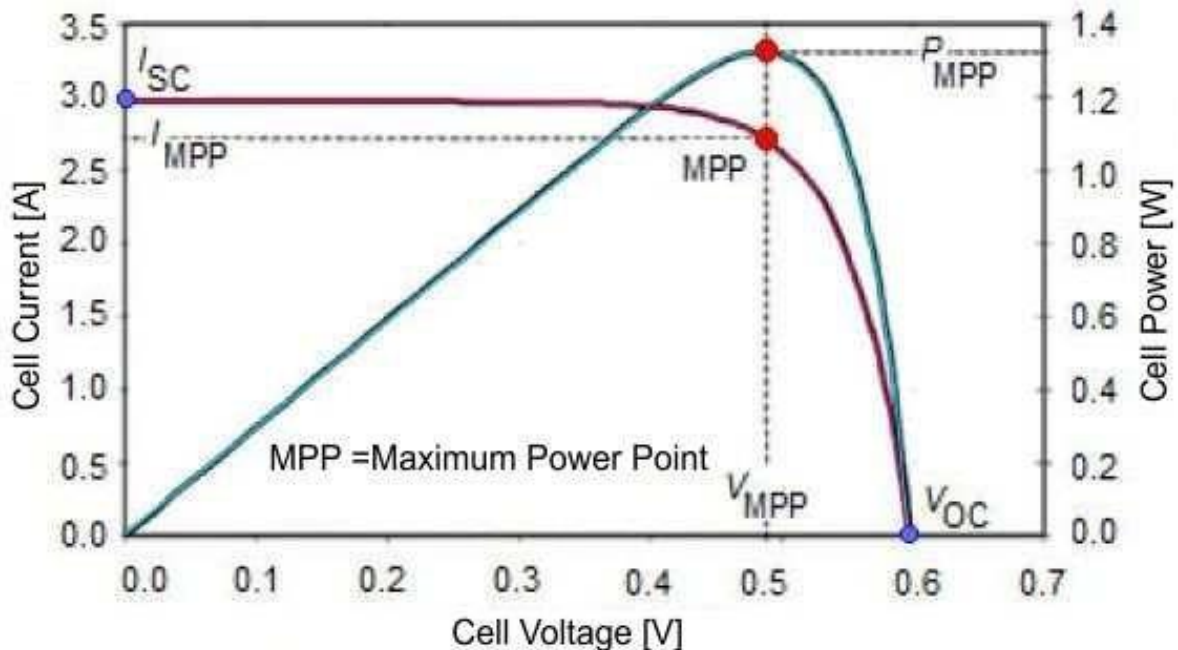
Τα φωτοβολταϊκά αυτής της κατηγορίας δημιουργούνται από την σύνθεση δύο χημικών στοιχείων, του καδμίου (Cd) και του τελούριου (Te). Τα στοιχεία αυτά έχουν απόδοση σε εργαστήριο περίπου 16%. Το πλεονέκτημα που έχουν αυτά τα πάνελ είναι πως η χρήση υλικού για την παραγωγή τους είναι πολύ μικρή σε σχέση με τη χρήση του πυριτίου που γίνεται για την παραγωγή των μονοκρυσταλλικών, πολυκρυσταλλικών και άμορφου πυριτίου. Όμως έχουν σημαντικά αρνητικά χαρακτηριστικά, όπως την αστάθειά τους στην απόδοση, καθώς δεν πρέπει να παραληφθεί ο περιβαλλοντικός κίνδυνος που σχετίζεται με τα χημικά στοιχεία από τα οποία αποτελούνται, που σημαίνει η άσκοπη και η μη υπεύθυνη απόρριψή τους μπορεί να προκαλέσει ρύπανση στο περιβάλλον. [Θεοχάρης Τσούτσος, 2016]



Εικόνα 1.11 Στοιχείο σύνθεσης CdTe [ΠΗΓΗ: Science X, 2021]

1.4. Χαρακτηριστική καμπύλη φωτοβολταϊκών

Η Εικόνα 1.12 δείχνει το πώς εξαρτάται η ένταση I (Ampere) από την τάση V (Voltage) που δημιουργείται στα άκρα ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου καθώς αυτό φωτίζεται. Αυτή ονομάζεται χαρακτηριστική καμπύλη I - V ενός φωτοβολταϊκού και αποτελεί στην ουσία την ταυτότητα αυτού.



Εικόνα 1.12 Καμπύλη I - V και P - V ενός φωτοβολταϊκού [ΠΗΓΗ: Jose A. Ramos, 2013]

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.12, το ρεύμα ξεκινά από την μέγιστη τιμή του, η οποία ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης και συμβολίζεται ως I_{sc} (short circuit). Σε αυτή την κατάσταση η τάση του στοιχείου είναι ίση με 0V. Καθώς η τάση αυξάνεται, η ένταση παραμένει για ένα διάστημα σχεδόν σταθερή στην μέγιστη τιμή της μέχρι το σημείο μέγιστης ισχύος. Στο σημείο μέγιστης ισχύος, παρατηρείται η μέγιστη παραγωγή ενέργειας από το πάνελ, καθώς σε αυτό το σημείο, το ρεύμα και η τάση του συστήματος συμβολίζονται με I_{mp} , V_{mp} (maximum power) αντίστοιχα. Έπειτα από αυτό το σημείο, η ένταση αρχίζει να έχει έντονη πτώση, μέχρι που φτάνει να είναι ίση με 0A, το σημείο αυτό ονομάζεται τάση ανοιχτού κυκλώματος και συμβολίζεται ως V_{oc} (open circuit). Ο πολλαπλασιασμός της τάσης και της έντασης σε κάθε σημείο αποτελεί την χαρακτηριστική καμπύλη της παραγωγής ενέργειας του φωτοβολταϊκού και ονομάζεται χαρακτηριστική καμπύλη P - V ενός φωτιζόμενου φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Αναλυτικότερα η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς ενός φωτοβολταϊκού δίνεται από τη σχέση:

$$P = V \cdot I \quad (1.1)$$

Όπου:

- P : η παραγόμενη ισχύς σε Watt (W)
- V : η τάση (V)
- I : η ένταση (A)

Και στο σημείο μέγιστης ισχύος θέτοντας $P=P_{max}$, $V=V_{mp}$ και $I=I_{mp}$ η εξίσωση (1.1) γίνεται ως εξής:

$$P_{max} = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (1.2)$$

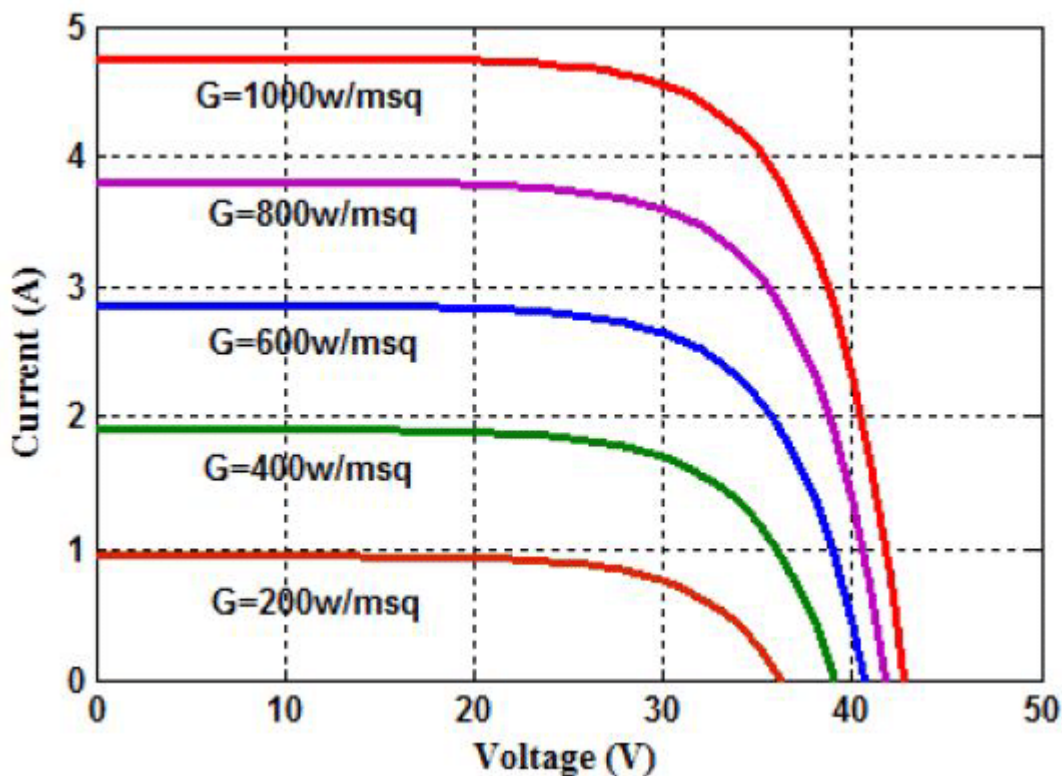
Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά μπορεί να υπολογιστεί ένας αριθμός ο οποίος ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης (Fill Factor), συμβολίζεται με FF και ισούται με:

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1.3)$$

Ο συντελεστής πλήρωσης παίρνει τιμές από 0 έως 1, και είναι ο λόγος της μέγιστης δυνατής παραγόμενης ισχύος από το φωτοβολταϊκό προς την θεωρητικά παραγόμενη ισχύ αν η τάση και η ένταση ήταν στις μέγιστες τιμές τους. Όσο κοντά στη μονάδα είναι ο συντελεστής αυτός, τότε τόσο καλύτερη ενεργειακή απόδοση έχει το φωτοβολταϊκό πάνελ. [Θεοχάρης Τσούτσος, 2016]

1.5. Σχέση απόδοσης και θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων

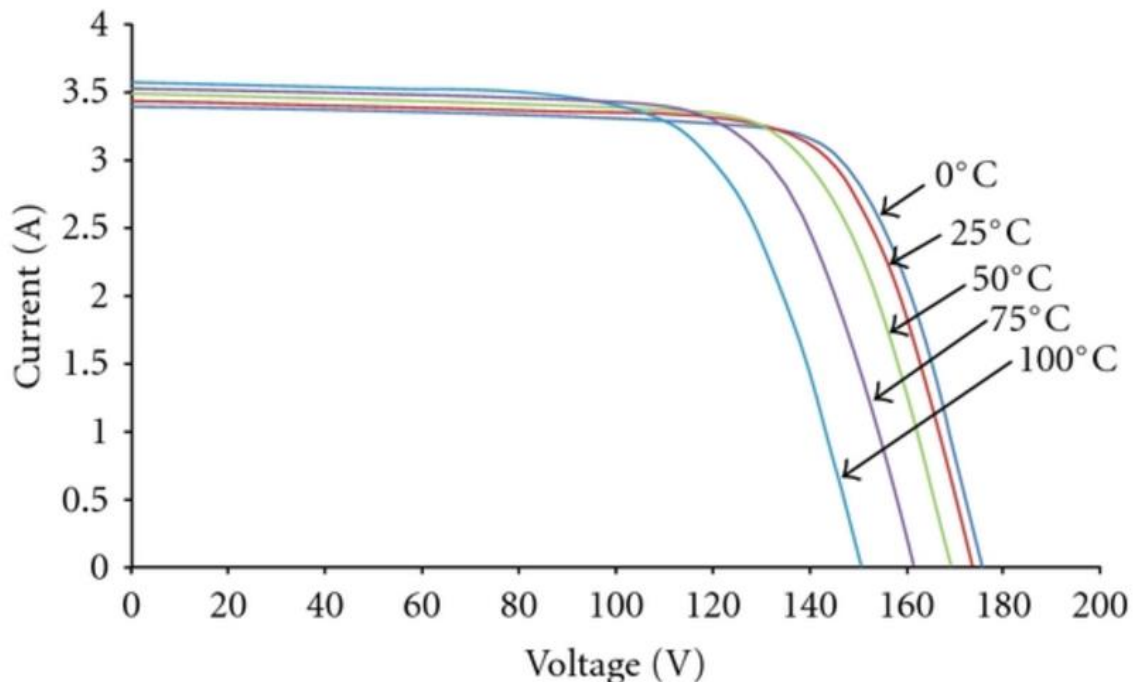
Εφόσον ονομάζεται ένα πάνελ φωτοβολταϊκό, γίνεται πλήρως κατανοητό πως η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος εξαρτάται από την προσπίπτουσα ηλιακή ισχύ πάνω του. Επομένως όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα η καμπύλη I-V αλλάζει σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία.



Εικόνα 1.13 Καμπύλη I-V σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία [ΠΗΓΗ: Dr M. Mithuramalingam, 2015]

Όμως εκτός από την ηλιακή ακτινοβολία, η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτάται και από την ίδια του τη θερμοκρασία. Καθώς η ηλιακή ενέργεια προσπίπτει πάνω στο φωτοβολταϊκό κελί, τότε η θερμοκρασία του αυξάνεται λόγω του ότι ένα μέρος της φωτεινής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια του ημιαγωγικού υλικού. Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της έντασης βραχυκυκλώματος I_{sc} και την

δραματική μείωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} . Ως αντίκτυπο αυτές οι αντίστροφες μεταβολές έχουν τη μείωση απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου, επομένως και τη μείωση της απόδοσης αυτού. Αναλυτικότερα φαίνεται και στην Εικόνα 1.14. [ΠΗΓΗ: Θεοχάρης Τσούτσος, 2016]



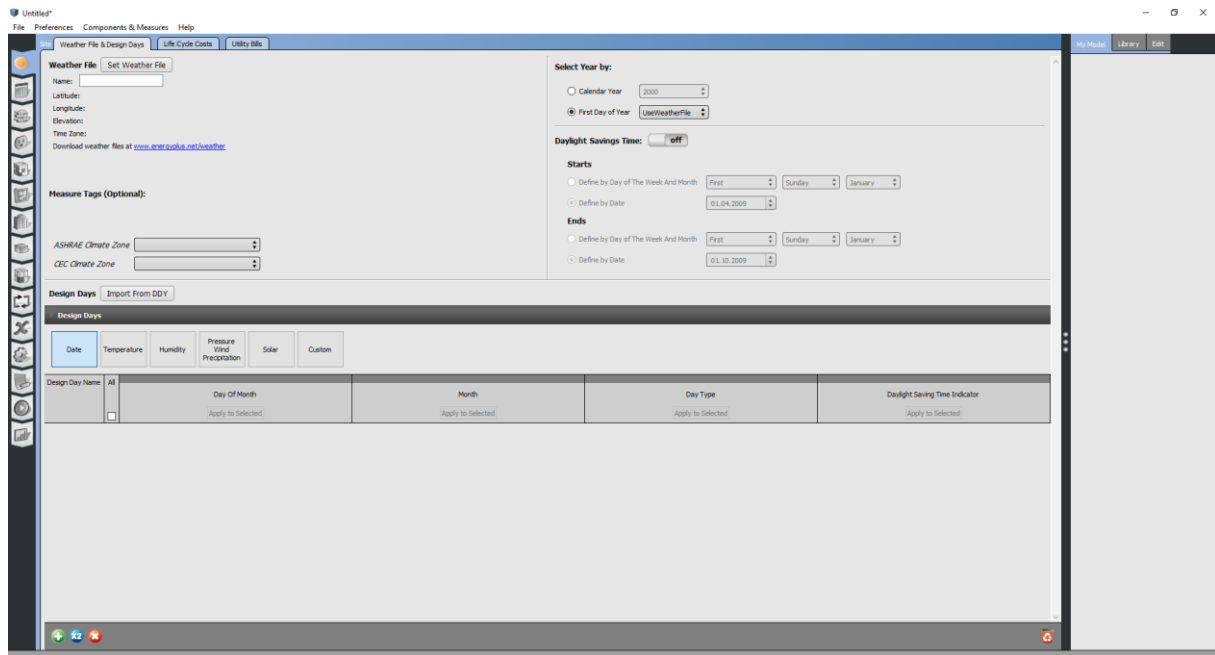
Εικόνα 1.14 Καμπύλη I-V σε σχέση με τη θερμοκρασία του πάνελ [ΠΗΓΗ: Meng-Hui Wang, 2012]

2. Μεθοδολογία

Για την επίτευξη των στόχων και των σκοπών της παρούσας διπλωματικής εργασίας ακολουθήθηκε μια διαδικασία από χρήση αρκετών προγραμμάτων για την επαλήθευση και πιο σωστή προσέγγιση των αποτελεσμάτων. Η αρχή έγινε με το λογισμικό OpenStudio, όπου κατασκευάστηκε η γεωμετρία του κτιρίου και τα υλικά από τα οποία αποτελείται. Έπειτα έγινε η χρήση του λογισμικού EnergyPlus με σκοπό την μοντελοποίηση του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Οι ιδιότητες των φωτοβολταϊκών πάνελ βρέθηκαν μέσω των προγραμμάτων System Advisor Model (SAM) και PVsyst για την έγκαιρη επαλήθευση των καμπύλων I-V και P-V του κάθε φωτοβολταϊκού που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη. Σημαντικό είναι να σημειωθεί πως τα χαρακτηριστικά του κάθε φωτοβολταϊκού στοιχείου βρέθηκαν στα αυθεντικά φυλλάδια της κάθε κατασκευαστικής εταιρίας. Στη συνέχεια έγινε η χρήση του λογισμικού Transient System Simulation ή όπως προφέρεται εν συντομία TRNSYS. Η χρήση του προγράμματος TRNSYS έγινε για την πιο σωστή προσέγγιση των αποτελεσμάτων ως προς την θερμοκρασία της εξεταζόμενης εξωτερικής επιφάνειας και την θερμοκρασία του πάνελ. Τέλος μέσω του λογισμικού MATLAB κάνοντας τη χρήση του Simulink έγινε η γραφική μοντελοποίηση των μαθηματικών εξισώσεων των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

2.1. OpenStudio

Το λογισμικό OpenStudio είναι ένα δωρεάν πρόγραμμα το οποίο υποστηρίζεται και από τις τρεις κεντρικές κατηγορίες λειτουργικών συστημάτων που υπάρχουν, δηλαδή υποστηρίζεται και από τις εκδόσεις των Windows και από τις εκδόσεις των Mac καθώς και από τις διανομές εκδόσεων των πακέτων Linux. Το OpenStudio συμπεριλαμβάνει μια συλλογή από εργαλεία για τη σωστή υποστήριξη της ενεργειακής μοντελοποίησης ενός κτιρίου, χρησιμοποιώντας το λογισμικό EnergyPlus και την προηγμένη τεχνολογία ανάλυσης του ημερήσιου φωτός ονομαζόμενη Radiance.



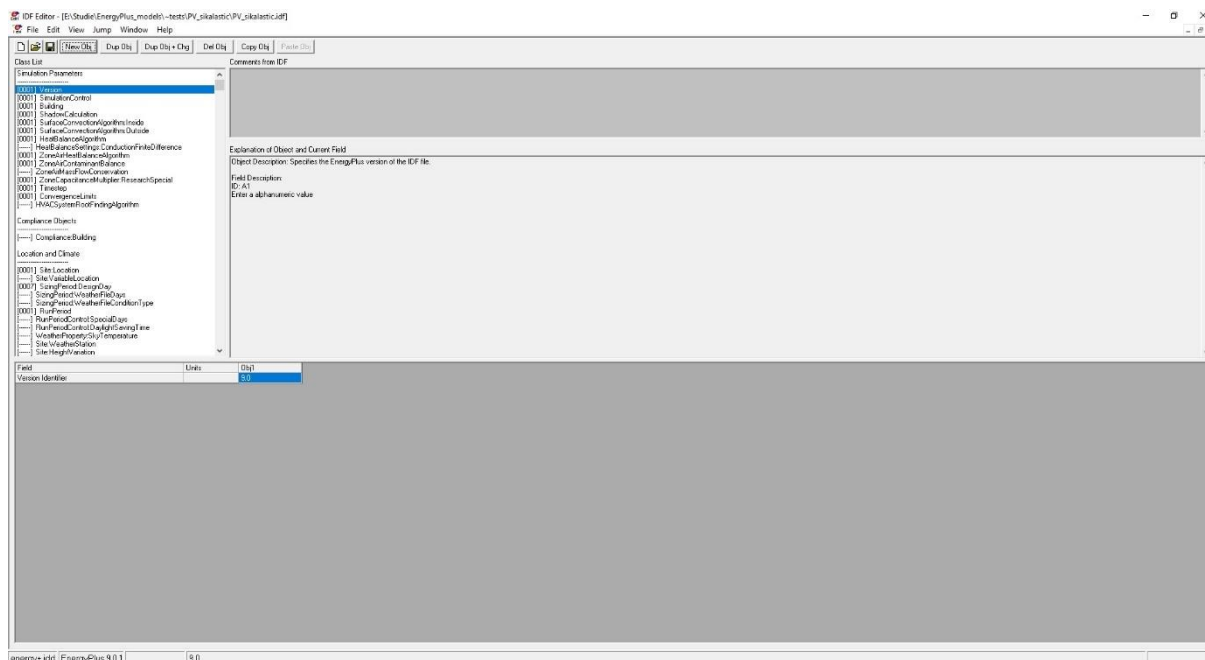
Εικόνα 2.1 Γραφικό περιβάλλον χρήστη (User Interface) OpenStudio

Η εφαρμογή αυτή συμπεριλαμβάνει γραφικό περιβάλλον για την ευκολία χρήσης. Επίσης συμπεριλαμβάνει μερικές προσθήκες παράπλευρων εφαρμογών όπως είναι το OpenStudio SketchUp plug-in το οποίο είναι υπεύθυνο για την γραφική αναπαράσταση της γεωμετρίας του κτιρίου.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1 το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού αυτού είναι εύκολο και κατανοητό στη χρήση ακόμα και για κάποιον αρχάριο. Στην αριστερή στήλη περιλαμβάνονται οι κύριες κατηγορίες που μπορεί να συμπεριλάβει ο χρήστης στην προσομοίωση που επιθυμεί να πραγματοποιήσει. Κάθε λειτουργία συμπεριλαμβάνει υποκατηγορίες οι οποίες βρίσκονται στο πάνω μέρος του κύριου μέρους του γραφικού περιβάλλοντος, όπου ο χρήστης εισάγει πιο ειδικά στοιχεία και τέλος το κύριο μέρος είναι το περιβάλλον στο οποίο αλληλεπιδρά ο χρήστης εισάγοντας στοιχεία για τα μέρη της προσομοίωσης που χρειάζεται. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 2.7.0 για τις αρχικές μοντελοποιήσεις. [ΠΗΓΗ: OpenStudio, 2021]

2.2. EnergyPlus

Όπως προαναφέρθηκε, το λογισμικό EnergyPlus χρησιμοποιείται από το OpenStudio για την προσομοίωση των μοντέλων. Το EnergyPlus είναι ένα εργαλείο το οποίο είναι ικανό να προσομοιώσει την ενεργειακή συμπεριφορά ενός ολόκληρου κτηρίου και άλλων επιπρόσθετων στοιχείων που μπορούν να προστεθούν, και χρησιμοποιείται από πληθώρα χρηστών οι οποίοι μπορεί να είναι μηχανικοί, αρχιτέκτονες και ερευνητές.



Εικόνα 2.2 Γραφικό περιβάλλον EnergyPlus

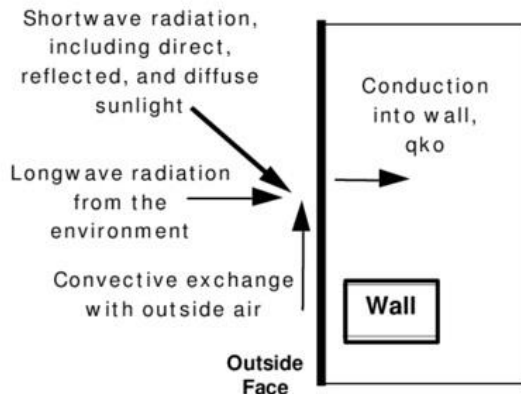
Το EnergyPlus, σε αντίθεση με το OpenStudio δεν είναι εύκολα κατανοητό από κάποιον αρχάριο χρήστη λόγω της έλλειψης του εμπλουτισμένου γραφικού περιβάλλοντος, όπως αυτό του OpenStudio. Το EnergyPlus είναι μια εφαρμογή βασισμένη σε πρόγραμμα εντολών η οποία διαβάζει τις εισαγωγές δεδομένων και εξάγει τα αποτελέσματα σε αρχεία κειμένου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 9.0.1 του λογισμικού. [ΠΗΓΗ: EnergyPlus, 2021]

2.2.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων OpenStudio και EnergyPlus

Αρχικά το υποθετικό κτίριο που μελετήθηκε βρίσκεται στα Χανιά και συγκεκριμένα στο χώρο του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η αρχική προσέγγιση της μελέτης ήταν να γίνει εξοικονόμηση και πιο ενεργειακά αποδοτική η οροφή του κτιρίου. Η διαδικασία αυτή έγινε χρησιμοποιώντας το υλικό Sikalastic-560 της εταιρίας Sika ως υλικό χωρίς μάζα, όπως εφαρμόζονται τα χρώματα και οι επιστρώσεις στα δύο παραπάνω λογισμικά. Τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά καθώς η μοντελοποίηση έδωσε τις αναμενόμενες μειωμένες τιμές στη θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της οροφής.

Το EnergyPlus υπολογίζει την θερμοκρασία αυτή χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση:

$$q_{a,sol}'' + q_{LWR}'' + q_{conv}'' - q_{ko}'' = 0 \quad (2.1)$$



Εικόνα 2.3 Θερμική ισορροπία εξωτερικής επιφάνειας
[ΠΗΓΗ:Engineering Reference, 2015]

Όπου:

- $q_{a,sol}''$: Απορρόφηση άμεσης και διάχυτης ροής της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος
- q_{LWR}'' : Καθαρή ανταλλαγή της ροής της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος με το γύρω περιβάλλον και τον αέρα
- q_{conv}'' : Εναλλαγή μεταφοράς της ροής με τον αέρα
- q_{ko}'' : Ροή θερμικής αγωγιμότητας στον τοίχο

Η εξωτερική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος q_{LWR}'' είναι μια καθορισμένη εναλλαγή ενέργειας μεταξύ της επιφάνειας, του ουρανού και του εδάφους. Υπολογίζεται μέσω της απορροφητικότητας της επιφάνειας, της θερμοκρασίας της επιφάνειας, τη θερμοκρασία του εδάφους και του ουρανού και επίσης από τους συντελεστές προβολής του εδάφους και του ουρανού. Ο υπολογισμός δίνεται από τη σχέση:

$$q_{LWR}'' = q_{gnd}'' + q_{sky}'' + q_{air}'' \quad (2.2)$$

Στη σχέση αυτή αν εφαρμοστεί ο νόμος του Stefan-Boltzmann τότε η σχέση (2.2) γίνεται ως εξής:

$$q_{LWR}'' = \varepsilon \sigma F_{gnd} \cdot (T_{gnd}^4 - T_{surf}^4) + \varepsilon \sigma F_{sky} (T_{sky}^4 - T_{surf}^4) + \varepsilon \sigma F_{air} (T_{air}^4 - T_{air}^4) \quad (2.3)$$

Όπου:

- ε : εκπομπή μεγάλου μήκους κύματος από την επιφάνεια
- σ : σταθερά Stefan-Boltzmann
- F_{gnd} : συντελεστής προβολής από την επιφάνεια του τοίχου προς την θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους
- F_{sky} : συντελεστής προβολής από την επιφάνεια του τοίχου προς την θερμοκρασία του ουρανού
- F_{air} : συντελεστής προβολής από την επιφάνεια του τοίχου προς την θερμοκρασία αέρα
- T_{surf} : εξωτερική θερμοκρασία επιφάνειας
- T_{gnd} : θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους
- T_{sky} : θερμοκρασία ουρανού
- T_{air} : θερμοκρασία αέρα

Σύμφωνα με τους γραμμικούς συντελεστές της ακτινοβολίας μεταφοράς της θερμότητας η εξίσωση (2.3) γίνεται πιο συμβατή με τη σύνθεση του θερμικού ισοζυγίου:

$$q_{LWR}'' = h_{r,gnd}(T_{gnd} - T_{surf}) + h_{r,sky}(T_{sky} - T_{surf}) + h_{r,air}(T_{air} - T_{surf}) \quad (2.4)$$

Όπου:

$$h_{r,gnd} = \frac{\varepsilon \sigma F_{gnd}(T_{surf}^4 - T_{gnd}^4)}{T_{surf} - T_{gnd}}$$

$$h_{r,sky} = \frac{\varepsilon \sigma F_{sky}(T_{surf}^4 - T_{sky}^4)}{T_{surf} - T_{sky}}$$

$$h_{r,air} = \frac{\varepsilon \sigma F_{air}(T_{surf}^4 - T_{air}^4)}{T_{surf} - T_{air}}$$

Οι συντελεστές προβολής υπολογίζονται από τις εξής σχέσεις:

$$F_{gnd} = 0.5(1 - \cos(\varphi))$$

$$F_{sky} = 0.5(1 + \cos(\varphi))$$

Όπου «φ» η γωνία κλίσης της επιφάνειας

Ο υπολογισμός του εξωτερικού αέρα υπολογίζεται σύμφωνα με το μοντέλο U.S Standard Atmosphere (1976). Το μοντέλο αυτό δείχνει τη σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας αέρα και του υψόμετρου σε ένα δεδομένο επίπεδο της ατμόσφαιρας:

$$T_z = T_b + LH_z - H_b \quad (2.5)$$

Όπου:

- T_z : θερμοκρασία αέρα στο δεδομένο υψόμετρο z
- T_b : θερμοκρασία αέρα της βάσης του επιπέδου της ατμόσφαιρας
- L : κλίση θερμοκρασίας αέρα, ισούται με -0.0065K/m στο επίπεδο της τροπόσφαιρας
- H_z : γεωδυναμικό υπόμετρο
- H_b : η αντιστάθμιση είναι ίση με μηδέν στο επίπεδο της τροπόσφαιρας

Η μεταβλητή H_z δίνεται από τη σχέση:

$$H_z = \frac{E \cdot z}{E + z} \quad (2.6)$$

Όπου:

- E : 6,356 km, όπου είναι η ακτίνα της Γης
- z : το δεδομένο υψόμετρο που εξετάζεται

Η θερμοκρασία αέρα στην επιφάνεια του εδάφους T_b υπολογίζεται από το αρχείο καιρού χρησιμοποιώντας την εξής σχέση:

$$T_b = T_{z,met} - L \left(\frac{E \cdot z_{met}}{E + z_{met}} - H_b \right) \quad (2.7)$$

Όπου:

- $T_{z,met}$: θερμοκρασία αέρα από το αρχείο καιρού, η οποία έχει μετρηθεί στον μετεωρολογικό σταθμό
- z_{met} : ύψος πάνω από το έδαφος του αισθητήρα του μετεωρολογικού σταθμού

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ανέμου σε διαφορετικά υψόμετρα από αυτό του μετεωρολογικού σταθμού δίνεται από τη σχέση:

$$V_z = V_{met} \left(\frac{\delta_{met}}{z_{met}} \right)^{\alpha_{met}} \left(\frac{z}{\delta} \right)^{\alpha} \quad (2.8)$$

Όπου:

- z : υψόμετρο πάνω από το έδαφος
- V_z : ταχύτητα ανέμου στο ύψος z
- α : εκθέτης προφίλ της ταχύτητας του ανέμου στην ενδιαφερόμενη τοποθεσία
- δ : προφίλ της ταχύτητας ανέμου του οριακού πάχους στρώματος στην ενδιαφερόμενη τοποθεσία
- z_{met} : υψόμετρο πάνω από το έδαφος του αισθητήρα της ταχύτητας ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού
- V_{met} : μέτρηση ταχύτητας ανέμου στον μετεωρολογικό σταθμό
- α_{met} : εκθέτης του προφίλ της ταχύτητας ανέμου στον μετεωρολογικό σταθμό
- δ_{met} : προφίλ της ταχύτητας ανέμου του οριακού πάχους στρώματος στον μετεωρολογικό σταθμό

Οι μεταβλητές $\alpha, \delta, \alpha_{met}$ και δ_{met} εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά τραχύτητας του περιβάλλοντος εδάφους.

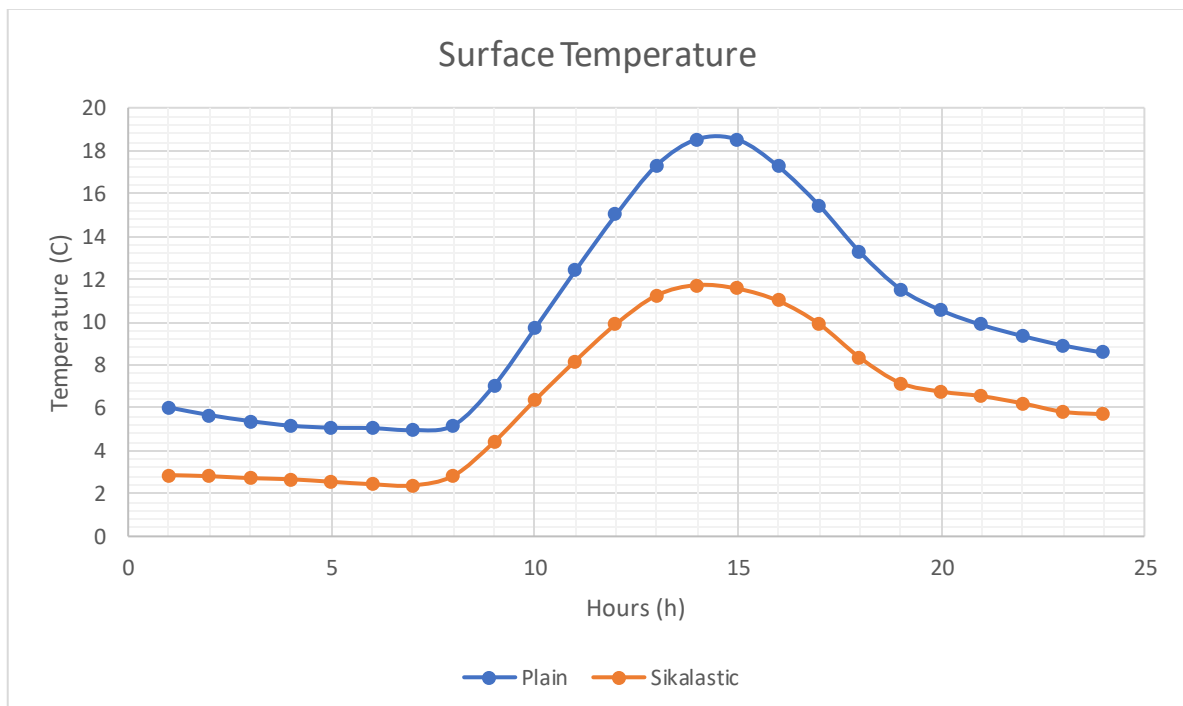
Η εξωτερική μετάδοση θερμότητας της επιφάνειας μοντελοποιείται από την σχέση:

$$Q_c = h_{c,ext} A T_{surf} - T_{air} \quad (2.9)$$

Όπου:

- Q_c : ο ρυθμός της εξωτερικής μετάδοσης της θερμότητας
- $h_{c,ext}$: συντελεστής εξωτερικής μετάδοσης
- A : εμβαδόν της εξωτερικής επιφάνειας
- T_{surf} : θερμοκρασία εξεταζόμενης επιφάνειας
- T_{air} : εξωτερική θερμοκρασία αέρα

Τα αποτελέσματα από τους παραπάνω υπολογισμούς που έγιναν στο ένα εκ των δύο χρησιμοποιούμενων ψυχρών υλικών για τη μοντελοποίηση της θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας της οροφής χωρίς και με ψυχρό υλικό φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα ως εξής:



Διάγραμμα 2.1 Διαφορά θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας της οροφής με και χωρίς ψυχρό υλικό για χειμώνα

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2.1, το οποίο αντιπροσωπεύει μια ψυχρή ημέρα από το αρχείο καιρού για την τοποθεσία των Χανίων, η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της οροφής φτάνει μέχρι και σχεδόν 19°C κατά τις μεσημεριανές ώρες χωρίς το ψυχρό υλικό

(Plain), ενώ με την εφαρμογή του ψυχρού υλικού Sikalastic-560 η θερμοκρασία δείχνει να είναι χαμηλότερη με μέγιστη τιμή της ημέρας αυτής να φτάνει σχεδόν τους 12°C (Sikalastic). Η διαφορά της πτώσης αυτής ανέρχεται μέχρι και 7°C και ποσοστιαία ισούται:

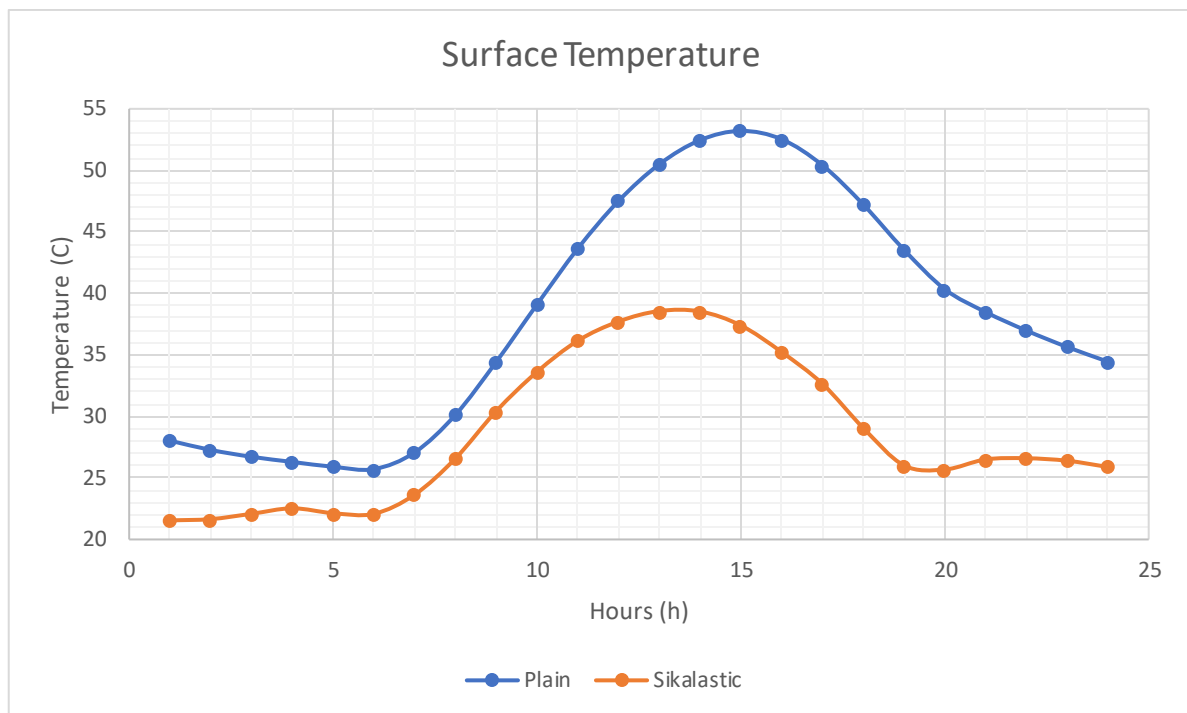
$$\frac{18.5^{\circ}\text{C} - 11.7^{\circ}\text{C}}{18.5^{\circ}\text{C}} \cdot 100\% = 36.8\%$$

Αναλυτικότερα, στον Πίνακα 2.1 παρακάτω φαίνονται οι τιμές της εξωτερικής επιφάνειας της οροφής για την χειμερινή ημέρα:

	Plain roof	Sikalastic roof
Hours (h)	Temperature (C)	Temperature (C)
02/15 01:00:00	6.02	2.86
02/15 02:00:00	5.66	2.81
02/15 03:00:00	5.38	2.72
02/15 04:00:00	5.16	2.67
02/15 05:00:00	5.07	2.55
02/15 06:00:00	5.05	2.43
02/15 07:00:00	4.96	2.38
02/15 08:00:00	5.18	2.83
02/15 09:00:00	7.04	4.40
02/15 10:00:00	9.68	6.34
02/15 11:00:00	12.40	8.18
02/15 12:00:00	15.00	9.91
02/15 13:00:00	17.31	11.25
02/15 14:00:00	18.54	11.73
02/15 15:00:00	18.50	11.55
02/15 16:00:00	17.25	10.98
02/15 17:00:00	15.44	9.91
02/15 18:00:00	13.27	8.34
02/15 19:00:00	11.54	7.15
02/15 20:00:00	10.54	6.75
02/15 21:00:00	9.87	6.54
02/15 22:00:00	9.35	6.21
02/15 23:00:00	8.91	5.81
02/15 24:00:00	8.57	5.70

Πίνακας 5.1 Τιμές για την εξωτερική επιφάνεια της οροφής για χειμώνα

Αντίστοιχα για μια ζεστή μέρα του ίδιου έτους από το αρχείο καιρού στην τοποθεσία των Χανίων, οι διαφορές θερμοκρασίας για την εξωτερική επιφάνεια της οροφής φαίνονται στο Διάγραμμα 2.2:



Διάγραμμα 2.2 Διαφορά θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας της οροφής με και χωρίς ψυχρό υλικό για καλοκαίρι

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα μια καλοκαιρινή μέρα η εξωτερική επιφάνεια της οροφής μπορεί να φτάσει μέχρι και σχεδόν 55°C (Plain) κατά τις μεσημεριανές ώρες όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι αρκετά μεγάλη, ενώ με την εφαρμογή του ψυχρού υλικού η θερμοκρασία φτάνει μέχρι σχεδόν τους 40°C (Sikalastic). Η πώση θερμοκρασίας είναι περίπου 15°C και ποσοστιαία ισούται με:

$$\frac{53.2^{\circ}\text{C} - 37.4^{\circ}\text{C}}{53.2^{\circ}\text{C}} \cdot 100\% = 29.7\%$$

Αναλυτικότερα, στον Πίνακα 2.2 παρακάτω φαίνονται οι τιμές της εξωτερικής επιφάνειας της οροφής για την καλοκαιρινή ημέρα:

Hours (h)	Plain roof	Sikalastic roof
	Temperature (C)	Temperature (C)
07/21 01:00:00	28.03	21.55
07/21 02:00:00	27.27	21.65
07/21 03:00:00	26.72	22.08
07/21 04:00:00	26.30	22.53
07/21 05:00:00	25.91	22.13
07/21 06:00:00	25.72	22.08
07/21 07:00:00	27.07	23.64
07/21 08:00:00	30.13	26.59
07/21 09:00:00	34.43	30.43
07/21 10:00:00	39.10	33.62
07/21 11:00:00	43.64	36.15
07/21 12:00:00	47.51	37.71

07/21 13:00:00	50.50	38.57
07/21 14:00:00	52.46	38.53
07/21 15:00:00	53.21	37.39
07/21 16:00:00	52.53	35.23
07/21 17:00:00	50.41	32.65
07/21 18:00:00	47.23	29.06
07/21 19:00:00	43.54	26.01
07/21 20:00:00	40.34	25.68
07/21 21:00:00	38.48	26.50
07/21 22:00:00	36.98	26.60
07/21 23:00:00	35.64	26.40
07/21 24:00:00	34.45	25.89

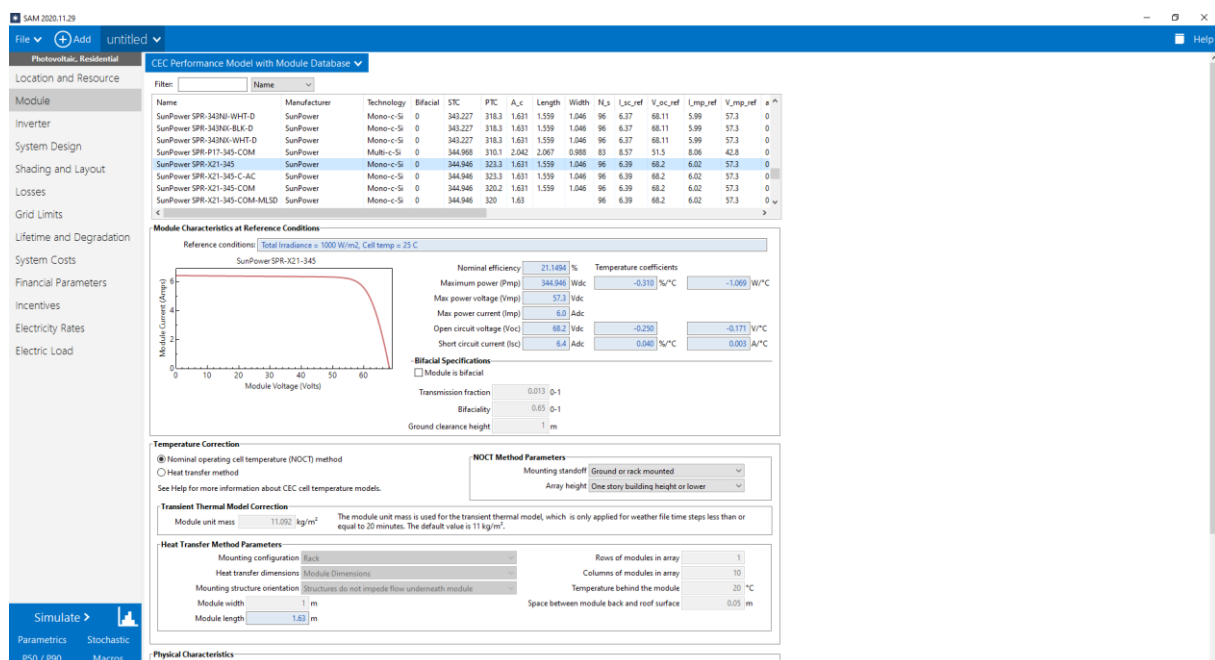
Πίνακας 5.2 Τιμές θερμοκρασίας της εξωτερικής επιφάνειας της οροφής για καλοκαίρι

Συνολικά λοιπόν από τα παραπάνω φαίνεται πως ένα ψυχρό υλικό είναι ικανό να συμβάλει περίπου 30% στην πτώση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της οροφής με αποτέλεσμα να την κάνει πιο ενεργειακά αποδοτική. [ΠΗΓΗ: Engineering Reference, 2015]

2.3. System Advisor Model (SAM) και PVsyst

Για την επαλήθευση καθώς και για βοηθητικά αποτελέσματα στις μοντελοποιήσεις της μελέτης σε αυτή τη διπλωματική, έγινε η χρήση των λογισμικών SAM και PVsyst.

- System Advisor Model (SAM)



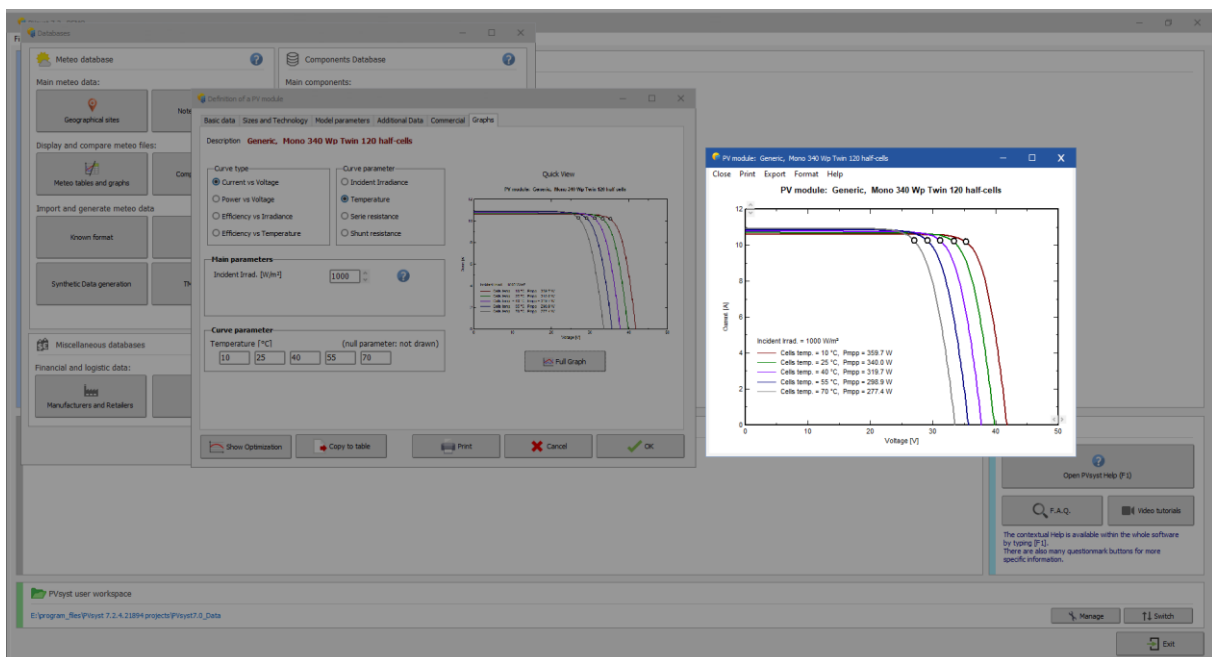
Εικόνα 2.4 Γραφικό περιβάλλον SAM

Το λογισμικό SAM μια εφαρμογή από το εργαστήριο National Renewable Energy Laboratory (NREL). Είναι εύκολο στη χρήση και περιλαμβάνει αρκετές επιλογές για προσομοιώσεις, καθώς περιέχει επίσης αρκετά μεγάλη βάση δεδομένων για φωτοβολταϊκά στοιχεία και λοιπές μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, inverters, σκιάσεις, απώλειες, αλλά ακόμα και για κοστολόγηση έργων.

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 2020.11.29 και η άδεια χρήσης του είναι δωρεάν. [ΠΗΓΗ: NREL System Advisor Model (SAM), 2021]

- PVsyst

Το λογισμικό PVsyst είναι επίσης ένα πρόγραμμα προσομοίωσης φωτοβολταϊκών πάνελ. Η συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ιδανική για εκμάθηση, καθώς είναι ικανή να διαστασιολογεί και να αναλύει ολόκληρα συστήματα φωτοβολταϊκών. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει συστήματα συνδεδεμένα στο ευρύ ηλεκτρικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, όμως μπορεί να προσομοιώσει και αυτόνομα συστήματα, καθώς περιέχει αρκετά μεγάλη βάση δεδομένων από φωτοβολταϊκά στοιχεία.



Εικόνα 2.5 Περιβάλλον χρήσης PVsyst

Το παρόν λογισμικό είναι επί πληρωμή, όμως διαθέτει δοκιμαστική λειτουργία για έναν μήνα και η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία ήταν η 2.7. [ΠΗΓΗ: PVsyst photovoltaic software, 2021]

2.4. TRNSYS (Transient System Simulation)

Το λογισμικό TRNSYS αποτελεί ένα πολύ δυνατό και ευέλικτο εργαλείο που έχει στόχο την μοντελοποίηση παροδικών συστημάτων. Καθώς η πλειοψηφία των προσομοιώσεων που γίνονται περιλαμβάνουν θερμικά και ηλεκτρικά συστήματα ενέργειας, το TRNSYS μπορεί επίσης να προσομοιώσει και δυναμικά συστήματα εξίσου καλά.

Το λογισμικό TRNSYS αποτελείται από δύο μέρη, τον πυρήνα και τις βιβλιοθήκες. Ξεκινώντας από τον πυρήνα, αυτός είναι υπεύθυνος για την ανάγνωση και την επεξεργασία των εισερχόμενων δεδομένων, για την επίλυση των μοντέλων και συστημάτων και τέλος είναι ικανός να εξάγει γραφήματα μεταβλητών. Όσον αφορά το δεύτερο μέρος από το οποίο αποτελείται το TRNSYS, τις βιβλιοθήκες, αυτές αποτελούνται από περίπου 150 στοιχεία και μοντέλα τα οποία είναι έτοιμα για πληθώρα χρήσεων σε μοντέλα πολλαπλών θερμικών ζωνών. Περιλαμβάνονται επίσης μοντέλα για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μεταξύ τους περιλαμβάνονται μοντέλα φωτοβολταϊκών, ανεμογεννητριών, ηλιακών συλλεκτών, επίσης συμπεριλαμβάνονται συστήματα εξαερισμού (HVAC), κατασκευαστικά μοντέλα και πολλά ακόμα. Τα μοντέλα που μπορούν να δημιουργηθούν, είναι ικανά να διασπαστούν σε κομμάτια, ώστε οι χρήστες να μπορούν να τροποποιούν τα δεδομένα, με αποτέλεσμα να επεκτείνονται οι ικανότητες του λογισμικού.

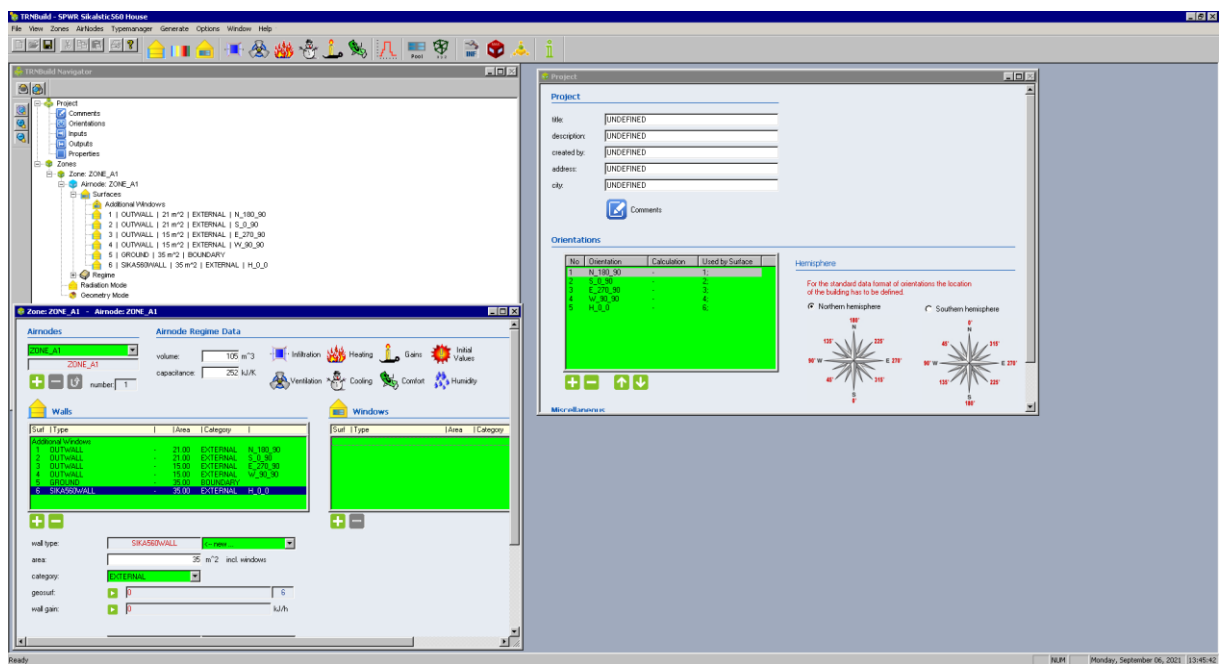
Το λογισμικό TRNSYS είναι επί πληρωμή, όμως διαθέτει δοκιμαστική έκδοση με περιορισμένες λειτουργίες. Σε συνεργασία με το Πολυτεχνείο Κρήτης υπήρξε άδεια χρήσης ολόκληρου το προγράμματος και η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε ήταν η 17.01.0028. [ΠΗΓΗ: Transsolar Software Engineering, 2021]

2.4.1. Simulation Studio και TRNBuild



Εικόνα 2.6 Γραφικό περιβάλλον του Simulation Studio

Το Simulation Studio αποτελεί το κύριο μέρος του λογισμικού TRNSYS, καθώς μέσα σε αυτό ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να συναρμολογήσει κάθε είδος συστήματος που επιθυμεί. Επίσης μπορεί να επικεντρωθεί σε κάθε τμήμα του συστήματος ξεχωριστά από το οποίο προσομοιώνει αλλά και στις συνδέσεις των τμημάτων αυτών. Τις περισσότερες φορές, οι πληροφορίες και τα δεδομένα εξόδου ενός στοιχείου του συστήματος μπορεί να αποτελούν τα δεδομένα εισόδου ενός άλλου στοιχείου. Προκειμένου να γίνει η σωστή γραφική αναπαράσταση ενός συστήματος που μοντελοποιείται από τον χρήστη, τότε αυτός πρέπει να επιλέξει με προσοχή τα στοιχεία και τα τμήματα που χρειάζεται από την εμπλουτισμένη υπάρχουσα βιβλιοθήκη που βρίσκεται στο δεξί τμήμα του Simulation Studio, καθώς επίσης πρέπει να επεξεργαστεί τα χαρακτηριστικά του κάθε στοιχείου μεμονωμένα, να εισάγει τις παραμέτρους τα δεδομένα που χρειάζονται για να διαβαστούν από το πρόγραμμα αρχικά, να ολοκληρώσει τις συνδέσεις μεταξύ των τμημάτων αυτών και τέλος να επιχειρήσει την προσομοίωση. Κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης, το λογισμικό TRNSYS εκτελεί όλες τις αναγκαίες μαθηματικές εξισώσεις από τις οποίες αποτελείται το σύστημα, ενώ τα ζητούμενα αποτελέσματα εμφανίζονται σε ξεχωριστό υποπρόγραμμα σε μορφή γραφήματος και επίσης αποθηκεύονται σε αρχείο κειμένου αναλυτικά, όπως θα επιλέξει ο χρήστης. Η μεγάλη διαφορά του TRNSYS από τα προαναφερόμενα λογισμικά, το OpenStudio και το EnergyPlus, είναι πως αυτό δεν χρειάζεται πάντα να υπάρχει κτίριο για να γίνει η προσομοίωση του συστήματος, δηλαδή μπορεί να γίνει προσομοίωση μεμονωμένων συστημάτων χωρίς την αναγκαία ύπαρξη κάποιου κτιρίου, σε αντίθεση με το OpenStudio και EnergyPlus που απαραίτητη προϋπόθεση είναι να υπάρχει κτίριο και πάνω σε αυτό να γίνει η μοντελοποίηση άλλων συστημάτων.



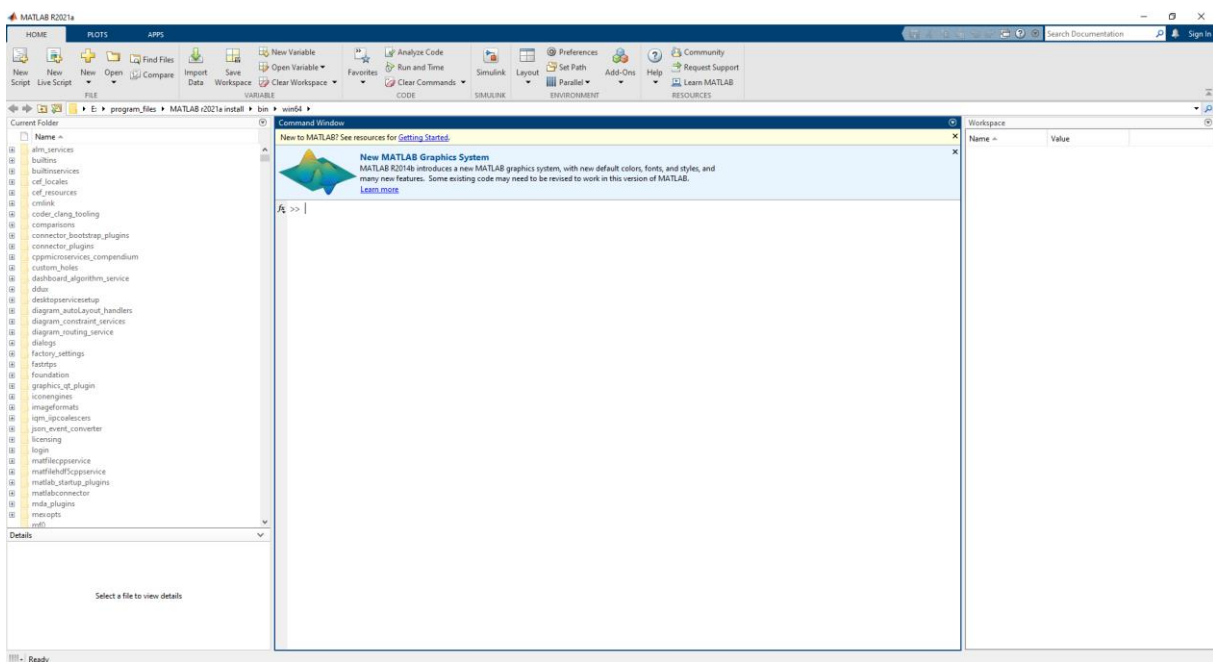
Εικόνα 2.7 Περιβάλλον εργασίας TRNBuild

Εάν στο σύστημα που εξετάζεται υπάρχει και δόμηση, τότε αυτή γίνεται μέσω του υποπρογράμματος TRNBuild που περιλαμβάνεται στο λογισμικό TRNSYS, και είναι υπεύθυνο για την κατασκευή του κτιρίου που θα συμπεριληφθεί στην προσομοίωση καθώς και για τα δεδομένα εξόδου του. Το συμπληρωματικό αυτό μέρος του λογισμικού TRNSYS διαχωρίζει το κτίριο σε μικρότερες θερμικές ζώνες για την πιο αναλυτική θερμική περιγραφή του. Για να χρησιμοποιηθεί το TRNBuild απαιτείται πρώτα το άνοιγμα του κυρίου κορμού, το Simulation Studio. Το TRNBuild δημιουργεί το αρχείο του κτιρίου όπως προαναφέρθηκε, και όπως αναφέρεται στον οδηγό του, είναι της μορφής TYPE 56. Το κομμάτι αυτό του λογισμικού

περιλαμβάνει επίσης σωστή γωνία στρέψης του κτιρίου προς το Βορρά ή προς τον Νοτιά ή προς άλλες κατευθύνσεις, καθώς επίσης τεχνικά και σχεδιαστικά χαρακτηριστικά που μπορούν να προστεθούν πάνω στο κτίριο και σε κάθε θερμική ζώνη αυτού. [ΠΗΓΗ: Transsolar Software Engineering]

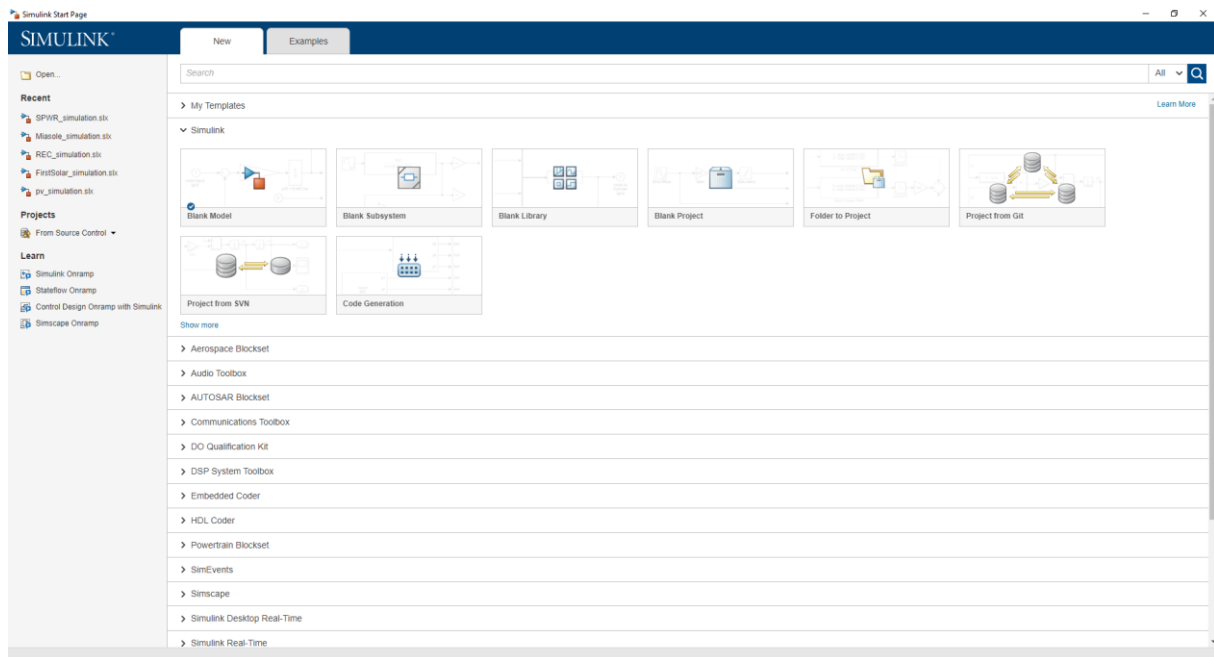
2.5. MATLAB και Simulink

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, η προσομοίωση των φωτοβολταϊκών στοιχείων για κάθε διαφορετική τιμή της θερμοκρασίας τους και της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας πάνω τους, έγινε με τη χρήση του συμπεριλαμβανόμενου προγράμματος του λογισμικού MATLAB και είναι το Simulink. Το λογισμικό MATLAB είναι ένα προϊόν από την MathWorks, είναι μια πλατφόρμα προγραμματισμού η οποία είναι σχεδιασμένη ειδικά για μηχανικούς και φυσικούς με σκοπό την ανάλυση και την σχεδίαση συστημάτων και προϊόντων. Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιεί η πλατφόρμα ονομάζεται MATLAB και αυτή. Με το εργαλείο αυτό μπορεί κανείς να κάνει ανάλυση δεδομένων, να σχηματίσει γραφήματα τόσο σε δισδιάστατο χώρο όσο και σε τρισδιάστατο χώρο, να αναπτύξει αλγορίθμους και να κατασκευάσει κι άλλες εφαρμογές. [ΠΗΓΗ: MathWorks MATLAB, 2021]



Εικόνα 2.8 Περιβάλλον MATLAB

Το επιπρόσθετο πρόγραμμα Simulink στο λογισμικό MATLAB δίνει τη δυνατότητα της προσομοίωσης συστημάτων πριν γίνει η χρήση υλικών. Η μοντελοποίηση του συστήματος γίνεται με τη χρήση κόμβων, είναι εύκολο στη χρήση του καθώς δεν είναι απαραίτητη η γνώση προγραμματισμού, αφού το Simulink παράγει μόνο του τον κώδικα μέσω του συστήματος που έχει οριστεί από τον χρήστη.

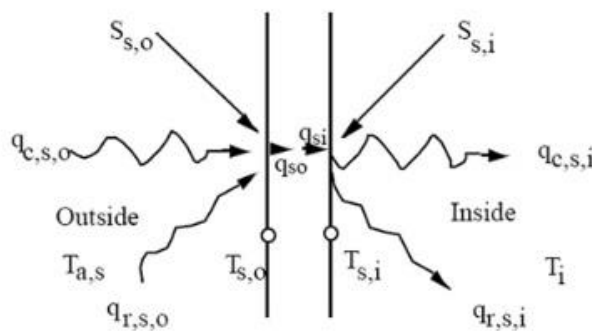


Εικόνα 2.9 Περιβάλλον χρήση Simulink

Το Simulink συνεργάζεται με τον κύριο κορμό του λογισμικού MATLAB και έχει πρόσβαση σε χιλιάδες από τους αλγόριθμους που περιλαμβάνει καθώς επίσης τα ζητούμενα δεδομένα εξόδου μπορεί να τα εξάγει σε πίνακες στο περιβάλλον εργασίας της MATLAB και από εκεί να γίνει η επεξεργασία τους. Επίσης ένα ακόμα πλεονέκτημα που προσφέρει το Simulink είναι οι αμέτρητες εφαρμογές που μπορεί να έχει για κάθε έργο αφού, περιλαμβάνει προσομοιώσεις ηλεκτρικών συστημάτων, συστήματα διαχείρισης, προσομοιώσεις σημάτων, ρομποτική αλλά μπορεί να έχει και εφαρμογές ακόμα και σε τεχνητή νοημοσύνη. [ΠΗΓΗ: MathWorks Simulink, 2021]

3. Σενάρια και αποτελέσματα

Στα παρακάτω σενάρια που παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις των θερμοκρασιών της εξωτερικής επιφάνειας της οροφής έγιναν με τη χρήση του λογισμικού TRNSYS, καθώς επίσης και για τις θερμοκρασίες του κάθε φωτοβολταϊκού στοιχείου, ενώ για την παραγωγή της ηλεκτρικής ισχύος των φωτοβολταϊκών χρησιμοποιήθηκε το επιπρόσθετο πρόγραμμα Simulink του λογισμικού MATLAB.



Εικόνα 3.1 Ροές θερμότητας και θερμοκρασιών μιας επιφάνειας [ΠΗΓΗ: TRNSYS 17 – Mathematical Reference, 2011]

Στην Εικόνα 3.1 φαίνεται η ροή μεταφοράς της θερμότητας η οποία χαρακτηρίζει την θερμική συμπεριφορά ενός τοίχου ή παραθύρου. Οι τοίχοι μοντελοποιούνται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση, καθώς οι όροι της διαφέρουν από επιφάνεια σε επιφάνεια, λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών της καθεμίας. Επομένως, για κάθε τοίχο η αγωγή θερμότητας των επιφανειών δίνεται από τις σχέσεις:

$$\dot{q}_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{c_s}} c_s^k T_{s,i}^k \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \dot{q}_{s,i}^k \quad (3.1)$$

$$\dot{q}_{s,o} = \sum_{k=0}^{n_{a_s}} a_s^k T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k T_{s,i}^k \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \dot{q}_{s,o}^k \quad (3.2)$$

Όπου:

- $S_{s,i}$: η ροή θερμικής ακτινοβολίας που απορροφάται από την εσωτερική επιφάνεια
- $S_{s,o}$: η ροή θερμικής ακτινοβολίας που απορροφάται από την εξωτερική επιφάνεια
- $\dot{q}_{r,s,i}$: καθαρή μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία από όλες τις άλλες επιφάνειες της θερμικής ζώνης
- $\dot{q}_{r,s,o}$: καθαρή μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία από όλες τις άλλες εξωτερικές επιφάνειες
- $\dot{q}_{w,g,i}$: ροή θερμότητας του τοίχου που ορίζεται από τον χρήστη
- $\dot{q}_{s,i}$: αγωγή ροής της θερμότητας από τον τοίχο στην εσωτερική επιφάνεια
- $\dot{q}_{s,o}$: αγωγή ροής της θερμότητας από το εσωτερικό του τοίχου στην εξωτερική επιφάνεια
- $\dot{q}_{c,s,i}$: εναλλαγή ροής θερμότητας από την εσωτερική επιφάνεια στον αέρα της θερμικής ζώνης
- $\dot{q}_{r,s,o}$: εναλλαγή ροής θερμότητας στην εξωτερική επιφάνεια από τις οριακές συνθήκες
- $T_{s,i}$: θερμοκρασία εσωτερικής επιφάνειας
- $T_{s,o}$: θερμοκρασία εξωτερικής επιφάνειας

Τα ισοζύγια στις επιφάνειες δίνονται από τις σχέσεις:

$$\dot{q}_{s,i} = \dot{q}_{comb,s,i} + S_{s,i} + Wallgain \quad (3.3)$$

$$\dot{q}_{s,o} = \dot{q}_{comb,s,o} + S_{s,o} \quad (3.4)$$

Όπου:

- $\dot{q}_{comb,s,i}$: συνδυασμός ροής θερμότητας και μεταφοράς της ακτινοβολίας στην επιφάνεια
- $\dot{q}_{comb,s,o}$: συνδυασμός ροής θερμότητας και μεταφοράς της ακτινοβολίας από την εσωτερική επιφάνεια του τοίχου

Μέσω του συνδυασμού της εξίσωσης (3.2) και της (3.4) μπορεί να εκφραστεί η θερμοκρασία ενός εξωτερικού τοίχου, οπότε προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$\dot{q}_{s,i} = B_s T_{a,s} - C_s T_{a,s} + D_s \quad (3.5)$$

Όπου:

$$B_s = \frac{e_s h_{s,o}}{(1 - f_s)} \quad (3.6)$$

$$C_s = \frac{f_s}{(f_s - 1)} \left(\frac{1}{R_{equiv,i} \cdot A_{s,i}} \right) \quad (3.7)$$

$$D_s = \frac{f_s \cdot S_{s,i} + e_s \cdot (S_{s,o} - k_{s,o}) + K_{s,i}}{(1 - f_s)} \quad (3.8)$$

$$e_s = \frac{b_s^o}{a_s^o + h_{s,o}} \quad (3.9)$$

$$f_s = (b_s^o \cdot e_s - c_s^o) \cdot R_{equiv,i} \cdot A_{s,i} \quad (3.10)$$

Και οι τιμές των $K_{s,i}$ και $K_{s,o}$ καθορίζονται από τις παρακάτω μαθηματικές σχέσεις:

$$K_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k \cdot T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{c_s}} c_s^k \cdot T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \cdot q_{s,i}^k \quad (3.11)$$

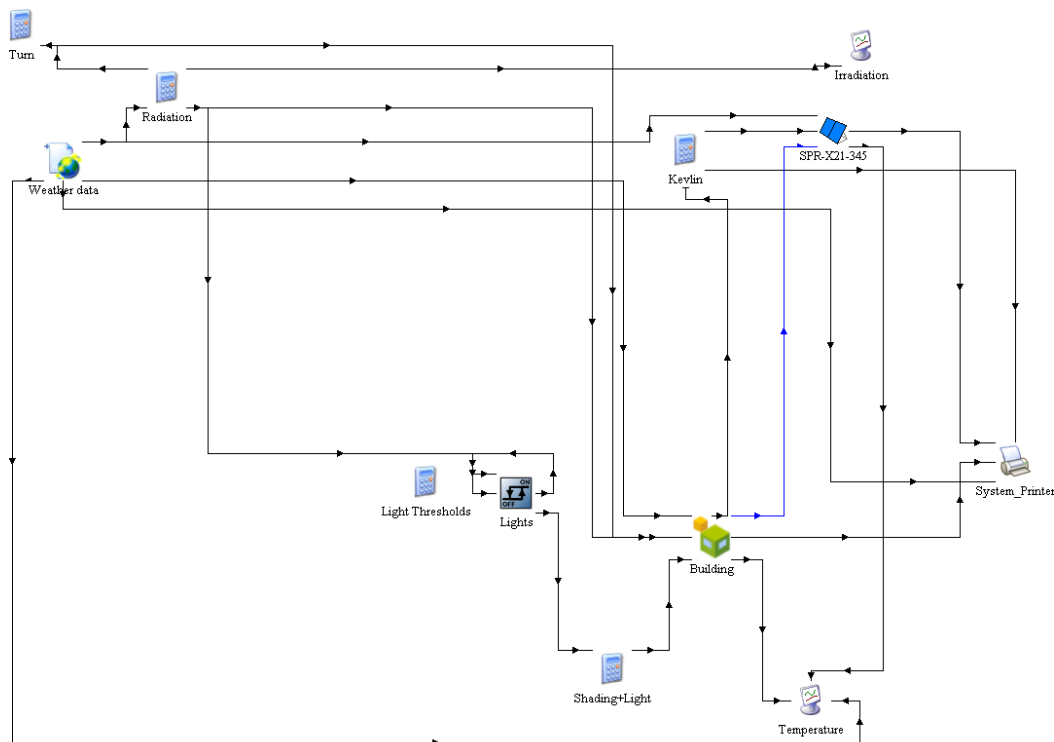
$$K_{s,o} = \sum_{k=0}^{n_{a_s}} a_s^k \cdot T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k \cdot T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \cdot q_{s,o}^k \quad (3.12)$$

Οι παραπάνω σχέσεις, και επομένως η εξωτερική θερμοκρασία της επιφάνειας ενός τοίχου εξαρτάται κυρίως από την θερμική αγωγιμότητα των υλικών από τα οποία αποτελείται καθώς επίσης και από την ανακλαστικότητα του εξωτερικού του υλικού. Στην παρούσα διπλωματική έχουν γίνει τρία βασικά σενάρια, στα οποία αλλάζει το υλικό της εξωτερικής επιφάνειας της οροφής, όπου ως «Απλό σενάριο» θεωρείται αυτό στο οποίο η οροφή αποτελείται από απλό οπλισμένο σκυρόδεμα αγωγιμότητας $7.56 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Το δεύτερο βασικό σενάριο είναι εκείνο στο οποίο έχει προστεθεί στην εξωτερική επιφάνεια της οροφής το ψυχρό υλικό Sikalastic-560 ενώ το τρίτο σενάριο η εξωτερική επιφάνεια της οροφής του κτιρίου είναι επικαλυμμένη με το ψυχρό υλικό Elastokryl. Σε κάθε ένα από τα τρία σενάρια εξετάζονται τέσσερα διαφορετικά φωτοβολταϊκά για να διαπιστωθεί πως το μεγαλύτερο εύρος των τεχνολογιών που υπάρχουν στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία επηρεάζεται από την θερμοκρασία και πώς αυτή επηρεάζει την παραγωγή της ηλεκτρικής τους ενέργειας αν μειώνεται.

Σε κάθε ένα από τα σενάρια, για την μοντελοποίηση των φωτοβολταϊκών σε κάθε θερμοκρασία και προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία έχει θεωρηθεί η παραδοχή πως η

επιφάνεια του φωτοβολταϊκού είναι πάντα κάθετη στην προσπίπτουσα ακτινοβολία, επομένως οι τιμές παραγωγής διαβάζονται ως οι μέγιστες δυνατές τιμές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Με τη βοήθεια του TRNSYS δημιουργήθηκε το βασικό μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί με τις αναγκαίες αλλαγές για όλα τα σενάρια. Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται είναι το αρχείο καιρού, το κτίριο το φωτοβολταϊκό στοιχείο και τέλος οι έξοδοι των δεδομένων από τους υπολογισμούς. Υπάρχουν επίσης και τα αναγκαία εργαλεία τα οποία κάνουν διάφορους άλλους υπολογισμούς για τον φωτισμό και τα καιρικά δεδομένα. Το μοντέλο που κατασκευάστηκε στο λογισμικό TRNSYS έχει την εξής μορφή:

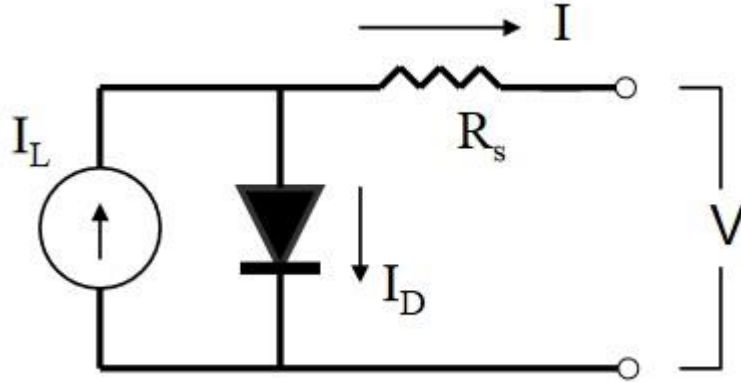


Εικόνα 3.2 Βασικό δείγμα μοντέλου TRNSYS

Μέσω αυτού του βασικού μοντέλου υπολογίζεται και η θερμοκρασία του κάθε φωτοβολταϊκού στοιχείου που χρησιμοποιείται για κάθε προσομοίωση. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ως φωτοβολταϊκό είναι το Type 94, το οποίο διαχωρίζεται στο Type 94a όπου είναι ένα ισοδύναμο μοντέλο τεσσάρων παραμέτρων και προσομοιώνει τα κρυσταλλικά πάνελ και στο Type 94b το οποίο προσομοιώνει πλαίσια thin-film. Το μοντέλο αυτό θεωρεί αρχικά πως η κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V είναι ίση με μηδέν στη συνθήκη όπου είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης:

$$\left(\frac{dI}{dV}\right)_{v=0} = 0 \quad (3.13)$$

Αυτή η παραδοχή ισχύει για όλα τα κρυσταλλικά μοντέλα. Οι τέσσερις παράμετροι που αποτελούν το μοντέλο Type94 είναι οι εξής: $I_{L,ref}$, $I_{o,ref}$, γ και R_s . Αυτές είναι εμπειρικές τιμές που δεν μπορούν να καθοριστούν από άμεσες φυσικές μετρήσεις. Το μοντέλο Type 94 τις υπολογίζει μέσω των φυλλαδίων που παρέχονται από τους κατασκευαστές.



Εικόνα 3.3 Ισοδύναμο ηλεκτρικό μοντέλο Type 94 (4-parameter) [ΠΗΓΗ: TRNSYS 17 – Mathematical Reference, 2011]

Τα χαρακτηριστικά ενός φωτοβολταϊκού, όπως προαναφέρθηκε, αλλάζουν τόσο με τη θερμοκρασία όσο και με την ηλιοφάνεια. Επομένως, το μοντέλο Type 94 χρησιμοποιεί αυτές τις περιβαλλοντικές συνθήκες και μαζί με τις τέσσερις σταθερές που το αποτελούν, σχηματίζει για κάθε χρονική στιγμή το γράφημα της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V.

Η ένταση του ρεύματος στο κύκλωμα της Εικόνας 3.3 δίνεται από την εξίσωση:

$$I = I_L - I_o \cdot \left(\exp \left(\frac{q}{\gamma \cdot k \cdot T_c} (V + I \cdot R_s) \right) - 1 \right) \quad (3.14)$$

Το φωτορεύμα I_L δίνεται από τη σχέση:

$$I_L = I_{L,ref} \frac{G_T}{G_{T,ref}} \quad (3.15)$$

Η αναφορική ηλιοφάνεια $G_{T,ref}$ ορίζεται περίπου ίση με $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, ενώ το αντίστροφο ρεύμα κορεσμού I_o δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{I_o}{I_{o,ref}} = \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 \quad (3.16)$$

Επομένως η εξίσωση (3.14) δίνει το ρεύμα ανάλογα την εισερχόμενη τάση και σύμφωνα με τους υπολογισμούς των εξισώσεων (3.15) και (3.16) με αποτέλεσμα να βρίσκεται το σημείο μέγιστης ισχύος πάνω στην χαρακτηριστική καμπύλη.

Οι παράμετροι που περιλαμβάνει το μοντέλο Type 94 είναι αρκετοί και πρέπει να εισαχθούν σύμφωνα με τις τιμές που εκδίδουν στους καταλόγους οι κατασκευαστές, οι οποίες καθορίζουν τα χαρακτηριστικά $I_{L,ref}$, $I_{o,ref}$, γ και R_s . Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι που ορίζουν το ισοδύναμο κύκλωμα που μελετάται και χρησιμοποιούνται για να βρεθεί η απόδοση του μοντέλου σε κάθε χρονική στιγμή. Για την εύρεση της απόδοσης του μοντέλου χρησιμοποιείται η παρακάτω σειρά εξισώσεων:

$$0 = I_{L,ref} - I_{o,ref} \cdot \left(\exp\left(\frac{q}{\gamma \cdot k \cdot T_{c,ref}} V_{oc,ref}\right) - 1 \right) - \frac{V_{oc,ref}}{R_{sh}} \quad (3.17)$$

$$I_{sc,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \cdot \left(\exp\left(\frac{q \cdot I_{sc,ref} \cdot R_s}{\gamma \cdot k \cdot T_{c,ref}}\right) - 1 \right) - \frac{I_{sc,ref} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (3.18)$$

$$I_{mp,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \cdot \left(\exp\left(\frac{q}{\gamma k T_{c,ref}} (V_{mp,ref} + I_{mp,ref} R_s)\right) - 1 \right) - \frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} R_s}{R_{sh}} \quad (3.19)$$

Στην περίπτωση του όρου «-1», είναι για να απλοποιήσει τις αλγεβρικές εξισώσεις. Αυτή η προσέγγιση έχει μια μικρή επίπτωση στη δεξιά πλευρά των εξισώσεων, αφού το μέγεθος της μεταβλητής I_o είναι αρκετά μικρό, πιο συγκεκριμένα της τάξης 10^{-6} Α. Κάνοντας μια μικρή αναδιάταξη δίνονται οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$I_{L,ref} \approx I_{sc,ref} \quad (3.20)$$

$$\gamma = \frac{q \cdot (V_{mp,ref} - V_{oc,ref} + I_{mp,ref} \cdot R_s)}{k \cdot T_{c,ref} \cdot \ln\left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref}}\right)} \quad (3.21)$$

$$I_{o,ref} = \frac{I_{sc,ref}}{\exp\left(\frac{q \cdot V_{oc,ref}}{\gamma \cdot k \cdot T_{c,ref}}\right)} \quad (3.22)$$

Έπειτα, σε αυτό το σημείο πρέπει να καθοριστεί η τελευταία άγνωστη παράμετρος. Η τέταρτη εξίσωση προκύπτει λαμβάνοντας το αναλυτικό παράγωγο τάσης σε σχέση με τη θερμοκρασία στην κατάσταση αναφοράς του ανοιχτού κυκλώματος. Η αναλυτική αυτή τιμή αντιστοιχεί τον συντελεστή θερμοκρασίας (temperature coefficient) ανοιχτού κυκλώματος, η οποία αποτελεί μια από τις σημαντικές προδιαγραφές του φυλλαδίου των τεχνικών χαρακτηριστικών:

$$\frac{\partial V_{oc}}{\partial T_c} = \mu_{V_{oc}} = \frac{\gamma \cdot k}{q} \left(\ln \left(\frac{I_{sc,ref}}{I_{o,ref}} \right) + \frac{T_c \cdot \mu_{I_{sc}}}{I_{sc,ref}} - \left(3 + \frac{q \cdot \varepsilon}{A \cdot k \cdot T_{c,ref}} \right) \right) \quad (3.23)$$

Όπου:

$$A = \frac{\gamma}{N_s} \quad (3.24)$$

Το μοντέλο Type 94 χρησιμοποιεί μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία αναζήτησης σε αυτές τις τέσσερις εξισώσεις για τον ορθό υπολογισμό των χαρακτηριστικών του κυκλώματος. Το πρώτο βήμα είναι να οριστεί το κατώτατο και το ανώτατο όριο της αντίστασης R_s του κυκλώματος. Έπειτα οι όροι γ και $I_{o,ref}$ υπολογίζονται από τις εξισώσεις (3.21) και (3.22), ενώ η εξίσωση (3.20) δίνει μια υποθετική λύση για τον όρο $I_{L,ref}$. Στη συνέχεια το μοντέλο χρησιμοποιεί την εξίσωση (3.23) και συγκρίνει τις αναλυτικές τιμές με αυτές των καταλόγων για τις τιμές της μεταβλητής $\mu_{V_{oc}}$. Όταν όλες οι μεταβλητές τείνουν να είναι σταθερές, τότε η αναλυτική τιμή της μεταβλητής $\mu_{V_{oc}}$ αρχίζει να αυξάνεται μονότονα με την αντίσταση του κυκλώματος. Αν η αναλυτική τιμή του συντελεστή της τάσης είναι μικρότερη από αυτή που αναφέρεται στο φυλλάδιο, τότε το ελάχιστο όριο της μεταβλητής R_s επαναπροσδιορίζεται ίσο με αυτό που θεωρήθηκε στην αρχή. Ομοίως, το ανώτατο όριο της R_s ορίζεται στην ίδια τιμή εφόσον η τιμή $\mu_{V_{oc}}$ είναι αρκετά μεγάλη. Μετά την επαναφορά το ανώτατο ή το κατώτατο όριο της τιμής R_s , τότε μια νέα θεωρητική τιμή βρίσκεται μέσω του μέσου όρου των ορίων. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου οι μεταβλητές R_s και γ συγκλίνουν. Αξίζει να αναφερθεί πως οι τιμές των μεταβλητών $I_{L,ref}$, $I_{o,ref}$, γ και R_s θεωρούνται σταθερές και υπολογίζονται την πρώτη φορά του καλείται η προσομοίωση. Εναλλακτικά, στην περίπτωση που γνωρίζει την αντίσταση του κυκλώματος R_s , εισάγει την θετική τιμή της, έτσι το μοντέλο προσπερνά τον υπολογισμό της και υπολογίζει τις υπόλοιπες μεταβλητές χρησιμοποιώντας την τιμή της μεταβλητής R_s .

Το μοντέλο Type 94 χρησιμοποιεί τα δεδομένα της θερμοκρασίας από τις μετρήσεις της ονομαστικής θερμοκρασίας λειτουργίας του κελιού (Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)) για να υπολογίσει την θερμοκρασία του πάνελ για κάθε χρονική στιγμή. Η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του κελιού (NOCT), είναι η θερμοκρασία λειτουργίας του καθώς η ταχύτητα του αέρα ισούται με 1 m/s, ταυτόχρονα δεν υπάρχει ηλεκτρικό φορτίο και υπάρχουν καθορισμένες τιμές για την ηλιοφάνεια και την θερμοκρασία αέρα. Συνήθως οι προκαθορισμένες τιμές της ηλιοφάνειας και της θερμοκρασίας ισούνται με 800 W/m² και 20 °C αντίστοιχα και διαμορφώνεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\frac{\tau \alpha}{U_L} = \frac{(T_{a,NOCT} - T_{a,NOCT})}{G_{T,NOCT}} \quad (3.25)$$

Υποθέτοντας πως ο λόγος αυτός είναι σταθερός, τότε η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού για κάθε χρονική στιγμή δίνεται από τη σχέση:

$$T_c = T_a + \frac{\left(1 - \frac{n_c}{\tau\alpha}\right)}{\left(G_T \cdot \frac{\tau\alpha}{U_L}\right)} \quad (3.26)$$

Όπου:

- β : κλίση του φωτοβολταϊκού
- γ : εμπειρική παράμετρος προσαρμογής της καμπύλης PV
- ε_g : διάκενο ζώνης ημιαγωγού
- n_g : απόδοση φωτοβολταϊκού
- $\mu_{I_{sc}}$: συντελεστής θερμοκρασίας του ρεύματος βραχυκυκλώματος
- $\mu_{V_{oc}}$: συντελεστής θερμοκρασίας της τάσης ανοιχτού κυκλώματος
- $\tau\alpha$: γινόμενο διαπερατότητας-απορροφητικότητας του φωτοβολταϊκού
- G_T : ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού
- I : ένταση ρεύματος
- I_L : φωτορεύμα
- $I_{L,ref}$: φωτορεύμα σε συνθήκες αναφοράς
- I_o : αντίστροφο ρεύμα κορεσμού της διόδου
- $I_{o,ref}$: αντίστροφο ρεύμα κορεσμού της διόδου σε αναφορικές συνθήκες
- I_{sc} : ρεύμα βραχυκύκλωσης
- $I_{sc,ref}$: ρεύμα βραχυκύκλωσης σε συνθήκες αναφοράς
- I_{mp} : ένταση ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος στην καμπύλη I-V
- $I_{mp,ref}$: ένταση ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης I-V σε συνθήκες αναφοράς
- k : σταθερά Stefan-Boltzmann
- P : ισχύς εξόδου από το φωτοβολταϊκό
- P_{max} : ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκού σύμφωνα με την χαρακτηριστική καμπύλη I-V
- R_s : αντίσταση κυκλώματος
- R_{sh} : αντίσταση παράκαμψης κυκλώματος
- T_c : θερμοκρασία φωτοβολταϊκού
- $T_{c,NOCT}$: θερμοκρασία φωτοβολταϊκού σε συνθήκη NOCT
- $T_{c,ref}$: θερμοκρασία φωτοβολταϊκού σε συνθήκες αναφοράς
- U_L : συντελεστής θερμικής απώλειας του φωτοβολταϊκού
- V : τάση
- V_{mp} : τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος σύμφωνα με την χαρακτηριστική καμπύλη I-V
- $V_{mp,ref}$: τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος σύμφωνα με την χαρακτηριστική καμπύλη I-V και σε συνθήκες αναφοράς
- V_{oc} : τάση ανοιχτού κυκλώματος
- $V_{oc,ref}$: τάση ανοιχτού κυκλώματος σε συνθήκες αναφοράς

[ΠΗΓΗ: TRNSYS 17 – Mathematical Reference, 2011]

Εφόσον από τους παραπάνω υπολογισμούς με τη χρήση του λογισμικού TRNSYS βρέθηκε η θερμοκρασία του κάθε φωτοβολταϊκού σε κάθε χρονική στιγμή, τότε υλοποιήθηκε το μαθηματικό μοντέλο στο υποπρόγραμμα Simulink του λογισμικού MATLAB, του καθενός

για την εύρεση της παρεχόμενης ισχύος σύμφωνα με τη θερμοκρασία και την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, η οποία ακτινοβολία εξάχθηκε επίσης από το πρόγραμμα TRNSYS χρησιμοποιώντας το αρχείο καιρού.

Στην διπλωματική εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα πάνελ διαφορετικής κατασκευής:

- SunPower SPR-X21-345 (monocrystalline)

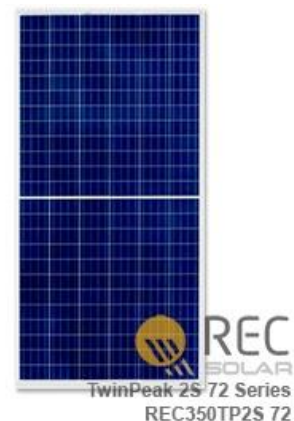


Εικόνα 3.4 SPR-X21-345 [ΠΗΓΗ: SunPower Corporation, 2016]

Το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι μονοκρυσταλλικού τύπου, κατασκευή της Αμερικανικής εταιρίας με όνομα SunPower. Το παρόν πάνελ έχει ονομαστική ισχύ ίση με 345 W, ενώ η απόδοσή του ανέρχεται στο 21.5% σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στις τεχνικές προδιαγραφές στον κατάλογο της εταιρίας SunPower. Οι διαστάσεις του είναι ίσες με 1559 mm και 1046 mm για μήκος και πλάτος αντίστοιχα, επομένως το εμβαδόν της επιφάνειάς του είναι ίσο με 1.63 m². Το παρόν πάνελ αποτελείται από 96 φωτοβολταϊκά κελιά τα οποία συνολικά δίνουν ένταση βραχυκύκλωσης $I_{sc,ref}$ ίση με 6.39 A και τάση ανοιχτού κυκλώματος $V_{oc,ref}$ ίση με 68.2 V. [ΠΗΓΗ: SunPower Corporation, 2016]

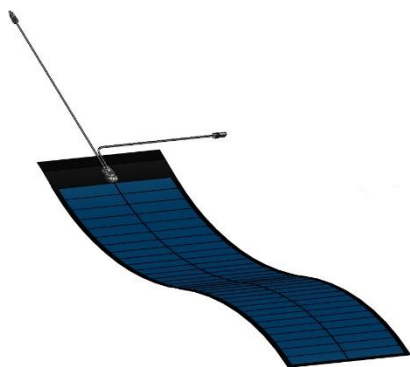
- REC Solar REC350TP2S-72 (multicrystalline)

Το συγκεκριμένο πάνελ είναι πολυκρυσταλλικού τύπου, μια κατασκευή από την Νορβηγική εταιρία με όνομα REC Solar. Το παρόν φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει ονομαστική ισχύ ίση με 350 W, ενώ η απόδοσή του είναι ίση με 17.4% σύμφωνα με τα επίσημα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στον κατάλογο της εταιρίας REC Solar με τις προδιαγραφές του. Οι διαστάσεις του είναι ίσες με 2005 mm και 1001 mm για μήκος και πλάτος αντίστοιχα, επομένως το εμβαδόν της επιφάνειάς του είναι ίσο με 1.95 m². Το πάνελ αυτό αποτελείται από 72 κελιά τα οποία δίνουν ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{sc,ref}$ ίσο με 9.72 A και τάση ανοιχτού κυκλώματος $V_{oc,ref}$ ίση με 46.7 V. [ΠΗΓΗ: REC Solar Holding AS, 2020]



Εικόνα 3.5 REC350TP2S-72 [ΠΗΓΗ: REC Solar Holding AS, 2020]

- MiaSolé FLEX-03 500W (CIGS)



Εικόνα 3.6 Miasolé FLEX-03 500W [ΠΗΓΗ: MiaSolé, 2019]

Το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι τεχνολογίας λεπτού υμένα σύνθεσης CIGS και είναι προϊόν της Αμερικανικής εταιρίας MiaSolé. Η ονομαστική ισχύ του ανέρχεται στα 500 W, ενώ η απόδοσή του είναι ίση με 16.4% σύμφωνα με τα επίσημα τεχνικά χαρακτηριστικά που αναφέρονται στον κατάλογο της MiaSolé. Οι διαστάσεις του είναι ίσες με 2580 mm και 1293 mm σε μήκος και πλάτος αντίστοιχα, επομένως το εμβαδόν της επιφάνειάς του είναι 3.34 m². Αποτελείται από 112 κελιά, τα οποία έχουν ως χαρακτηριστικά $I_{sc,ref}$ ίση με 9.4 A και $V_{oc,ref}$ ίση με 74.8 V. [ΠΗΓΗ: MiaSolé, 2019]

- First Solar FS-6450A (CdTe)

Το παρόν φωτοβολταϊκό πάνελ αποτελείται από τη σύνθεση CdTe και είναι προϊόν της Αμερικανικής εταιρίας First Solar. Η ονομαστική ισχύ του πάνελ αυτού ανέρχεται στα 450 W, ενώ η απόδοσή του είναι ίση με 18.2% όπως αναφέρεται στον επίσημο κατάλογο των τεχνικών χαρακτηριστικών από την εταιρία First Solar. Οι διαστάσεις του ισούνται με 2009 mm και 1232 mm όσον αφορά το μήκος και πλάτος αντίστοιχα, ενώ το εμβαδόν της επιφάνειάς του υπολογίζεται να είναι 2.47 m². Το παρόν στοιχείο αποτελείται από ένα σύνολο κελιών όπου φτάνουν τον αριθμό των 264, τα οποία δίνουν μια συνολική τιμή για το ρεύμα βραχυκυκλώματος $I_{sc,ref}$ ίσο με 2.57 A και μια συνολική τιμή για την τάση ανοιχτού κυκλώματος $V_{oc,ref}$ ίση με 221.2 V. [ΠΗΓΗ: First Solar, Inc., 2021]



Εικόνα 3.7 First Solar FS-6450A [ΠΗΓΗ: First Solar, Inc., 2021]

Μέσω του Simulink του λογισμικού της MATLAB έγινε η εύρεση παροχής ισχύος για κάθε τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και για κάθε αντίστοιχη τιμή της θερμοκρασία του κάθε πάνελ. Το βασικό μαθηματικό μοντέλο που κατασκευάστηκε αποτελείται από τις παρακάτω μαθηματικές εξισώσεις:

$$I_{ph} = (I_{sc} + k_i \cdot (T - 298)) \cdot \frac{G}{1000} \quad (3.27)$$

$$I_o = I_{rs} \cdot \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \cdot \exp\left(\frac{q \cdot E_{g0} \cdot \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)}{n \cdot K}\right) \quad (3.28)$$

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{n \cdot N_s \cdot K \cdot T}\right) - 1} \quad (3.29)$$

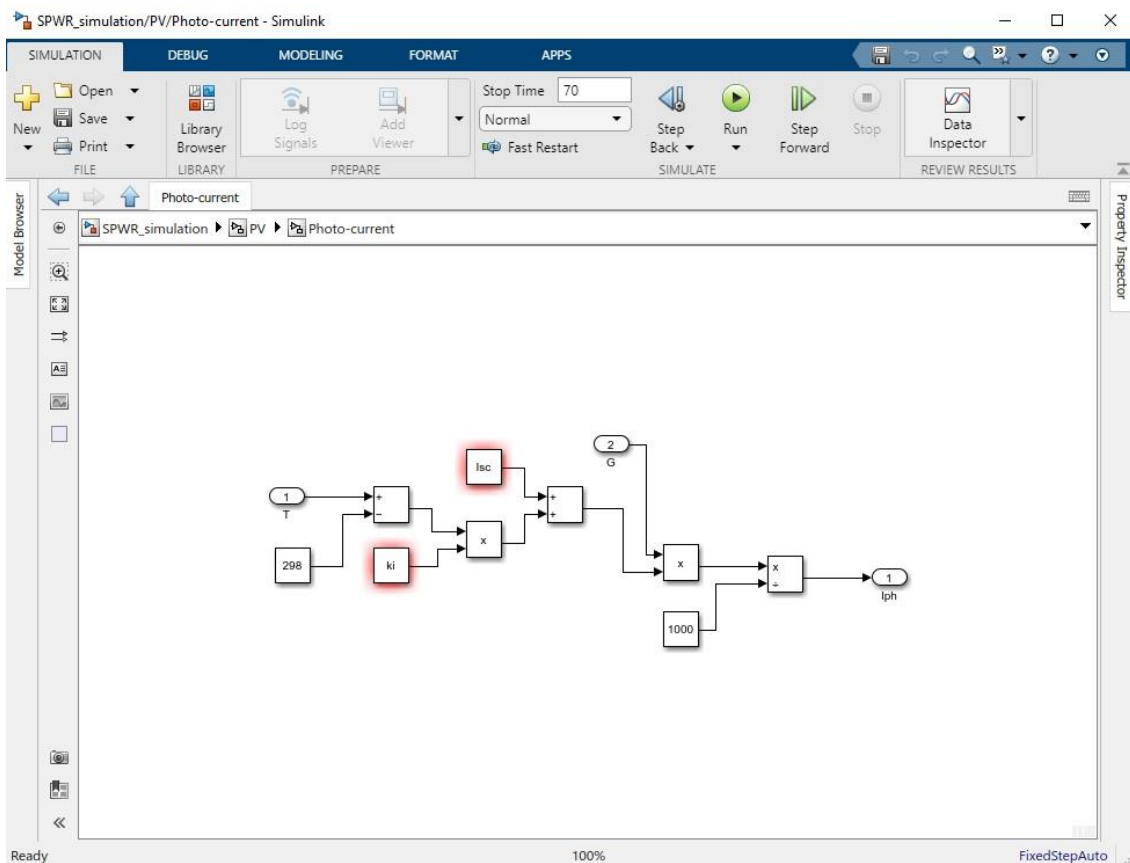
$$I_{sh} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (3.30)$$

$$I = I_{ph} - I_o \cdot \left(\exp\left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T}\right) - 1\right) - I_{sh} \quad (3.31)$$

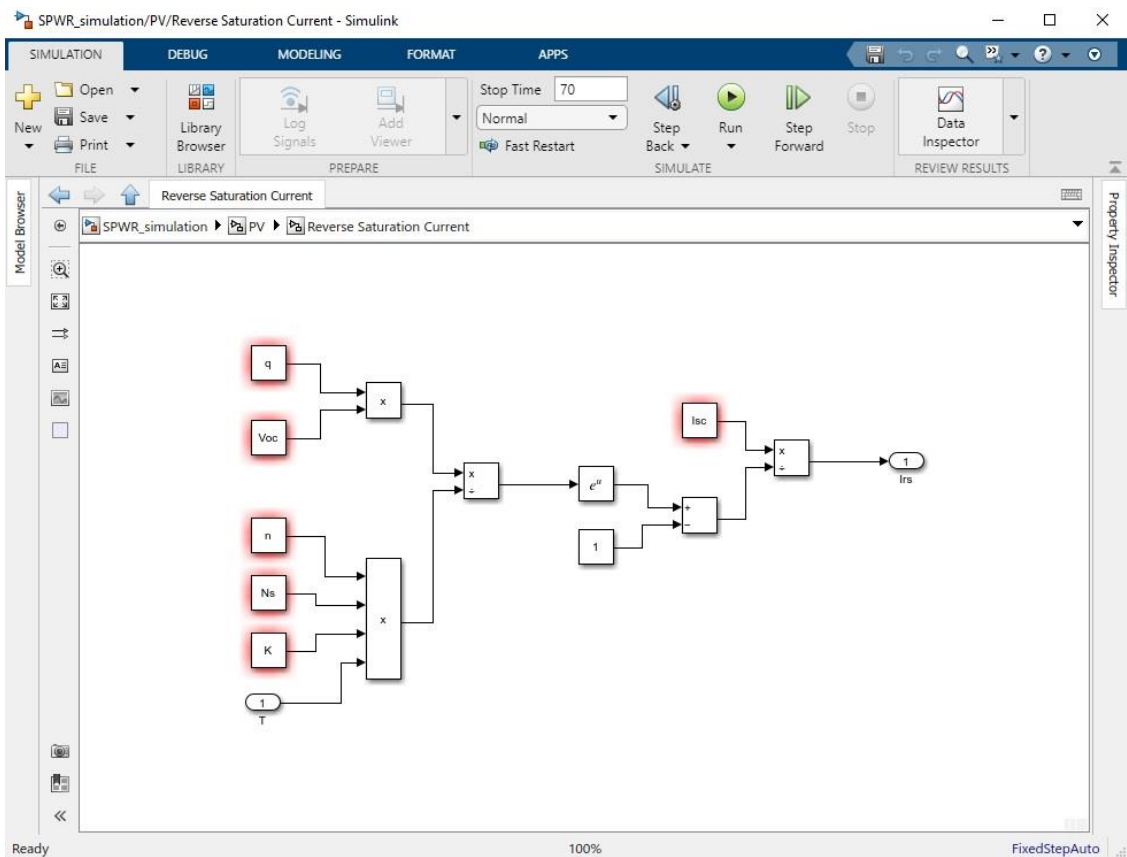
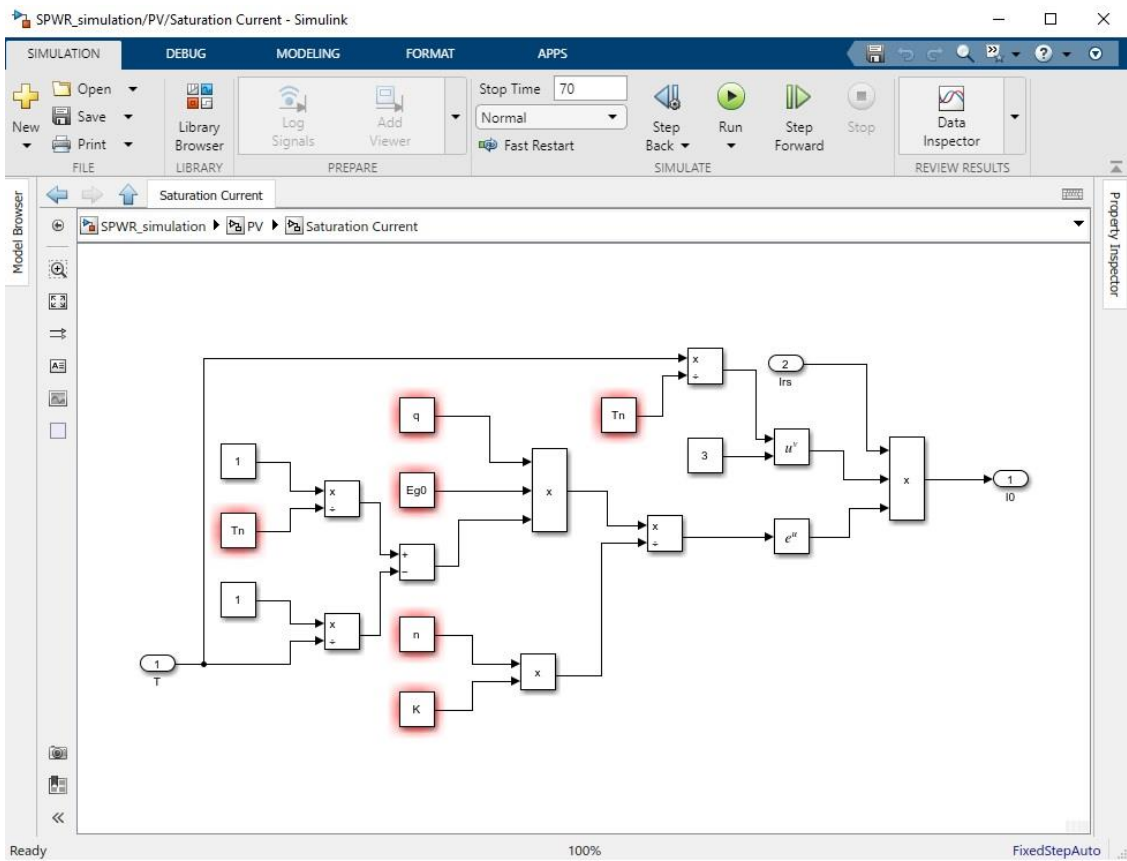
Όπου:

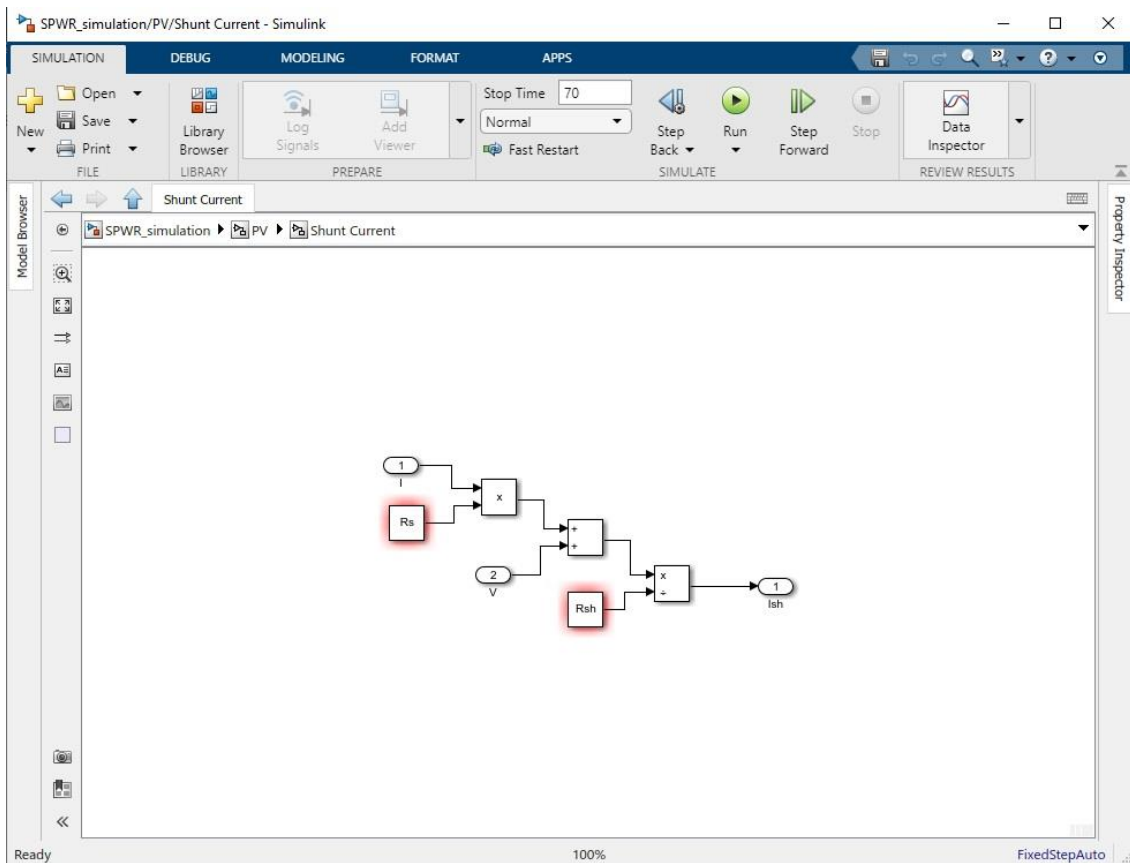
- I_{ph} : φωτορεύμα
- I_{sc} : ρεύμα βραχυκύκλωσης
- I_o : ρεύμα κορεσμού
- I_{rs} : αντίστροφο ρεύμα κορεσμού
- k_i : ρεύμα βραχυκύκλωσης κελιού σε θερμοκρασία 25°C και προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ίση με 1000 W/m²
- T : θερμοκρασία λειτουργίας που εισάγεται από τον χρήστη
- T_n : ονομαστική θερμοκρασία
- G : προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία που εισάγεται από τον χρήστη
- q : φορτίο ηλεκτρονίου ίσο με $1.6 \cdot 10^{-23}$ C
- V_{oc} : τάση ανοιχτού κυκλώματος
- n : συντελεστής ιδανικότητας της διόδου
- K : σταθερά Stefan-Boltzmann ίσος με $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K
- E_{g0} : ενέργεια ζώνης διάκενου
- N_s : αριθμός συνδεδεμένων κελιών
- R_s : αντίσταση κυκλώματος
- R_{sh} : αντίσταση παράκαμψης

Γραφικά με τη χρήση του Simulink οι εξισώσεις (3.27), (3.28), (3.29), (3.30) και (3.31) κατασκευάστηκαν με τη σειρά:

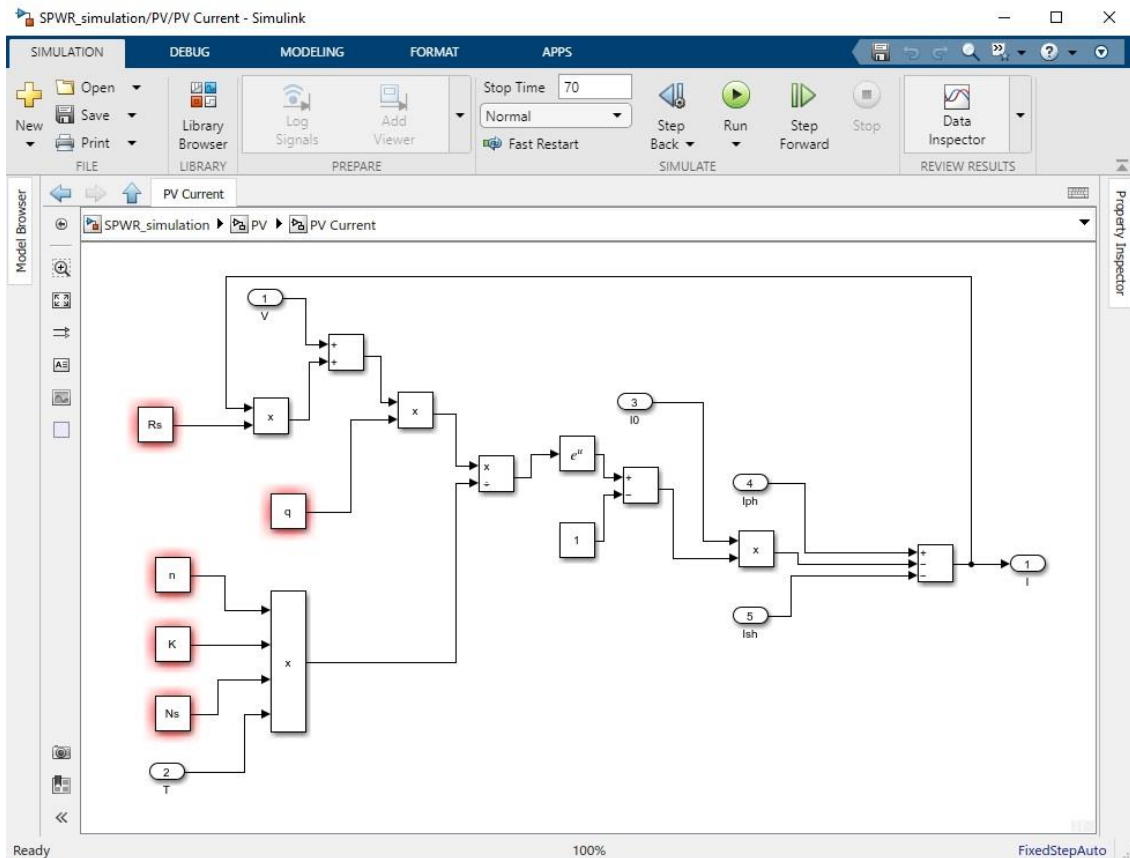


Εικόνα 3.8 Γραφική αναπαράσταση μέσω Simulink της εξίσωσης (3.27)



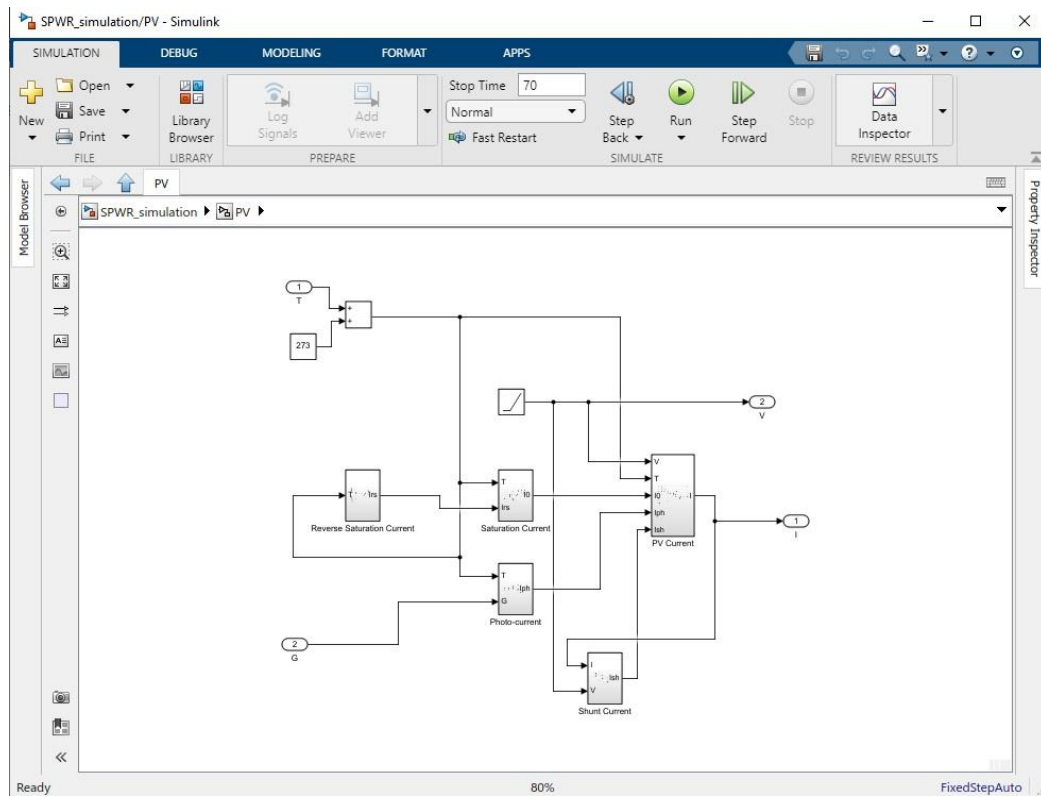


Εικόνα 3.11 Γραφική αναπαράσταση μέσω Simulink της εξίσωσης (3.30)

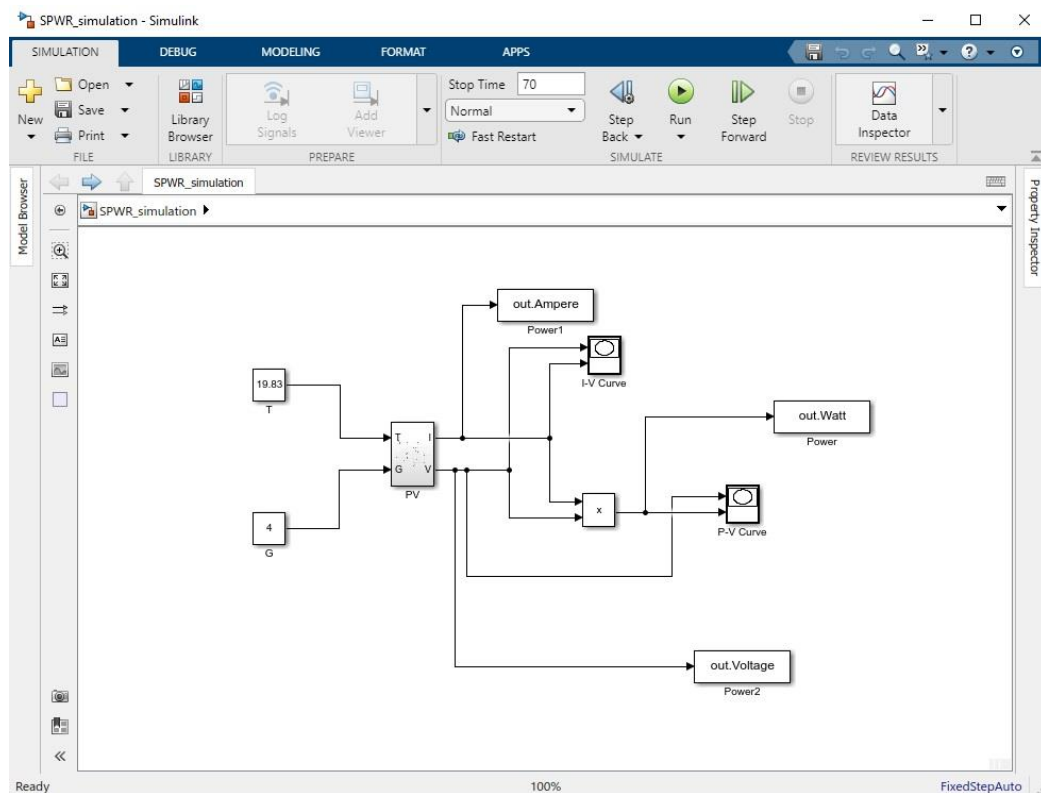


Εικόνα 3.12 Γραφική αναπαράσταση μέσω Simulink της εξίσωσης (3.31)

Οι παραπάνω εξισώσεις αποτελούνται από στοιχεία εισόδου, πράξεων μεταξύ σταθερών τιμών και από ορίσματα εξόδου. Κάποια από τα ορίσματα εξόδου αποτελούν όρισμα εισόδου για κάποια άλλη εξίσωση. Όλα μαζί αποτελούν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο και ομαδοποιημένες φαίνονται γραφικά στο Simulink παρακάτω:



Εικόνα 3.13 Γραφική αναπαράσταση ενός PV Array



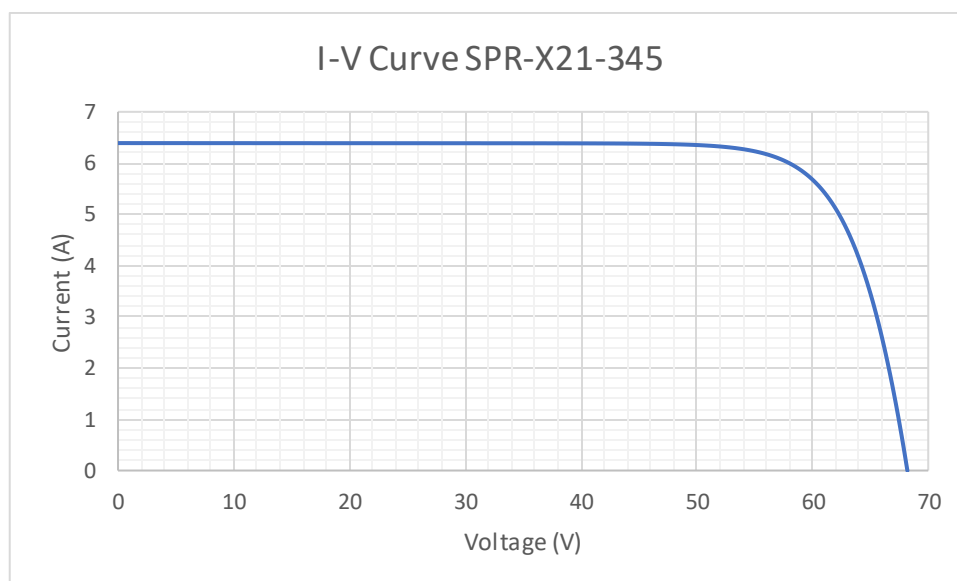
Εικόνα 3.14 Γραφική αναπαράσταση μέσω Simulink τελικού συστήματος

Τέλος, μέσω της ομαδοποίησης όλων των τμημάτων, το αποτέλεσμα είναι να δημιουργηθεί το σύστημα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου με ορίσματα εισόδου την θερμοκρασία του και την προσπίπτουσα ακτινοβολία πάνω του, καθώς αυτές οι δύο τιμές ορίζονται από τον χρήστη. Επίσης το σύστημα αυτό αποτελείται και από πέντε ορίσματα εξόδου, εκ των οποίων τα τρία είναι οι πίνακες που αποθηκεύουν τις τιμές για την ένταση, την τάση και την ισχύ του συστήματος, και τα δύο επόμενα ορίσματα εξόδου είναι υπεύθυνα για την δημιουργία των χαρακτηριστικών καμπύλων I-V και P-V.

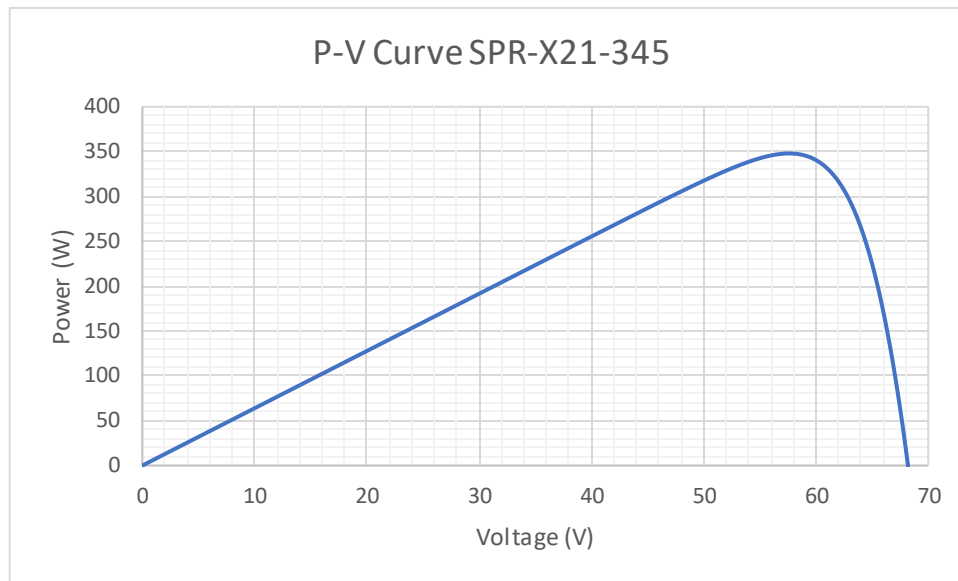
Στο μοντέλο αυτό, ο χρήστης θέτει τις σταθερές τιμές που απαιτούνται στις ιδιότητες του «PV», επίσης θέτει το βήμα με το οποίο θα εκτελείται, καθώς επίσης θέτει και το πέρας του μοντέλου. Έπειτα, πρέπει το μοντέλο να λάβει τις τιμές για τη θερμοκρασία του πάνελ και την ηλιακή ακτινοβολία πάνω του και το μοντέλο είναι έτοιμο για εκτέλεση. Μόλις η εκτέλεση γίνει επιτυχώς το μοντέλο έχει κατασκευάσει τα διανύσματα για την ένταση, την τάση και την ισχύ, τα οποία μπορούν να βρεθούν και να επεξεργαστούν στο κεντρικό περιβάλλον του λογισμικού MATLAB, ενώ παρατηρείται και η κατασκευή δύο διαγραμμάτων δύο διαστάσεων τα οποία αποτελούν τις καμπύλες I-V και P-V.

Αναλυτικά παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες των φωτοβολταϊκών που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη:

- SPR-X21-345

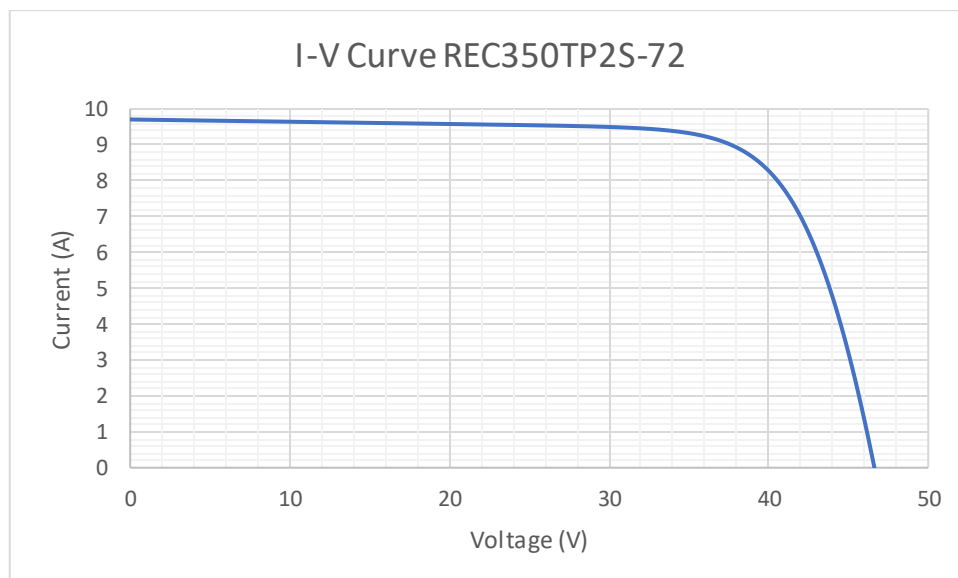


Διάγραμμα 3.1 SPR-X21-345 I-V curve at reference conditions

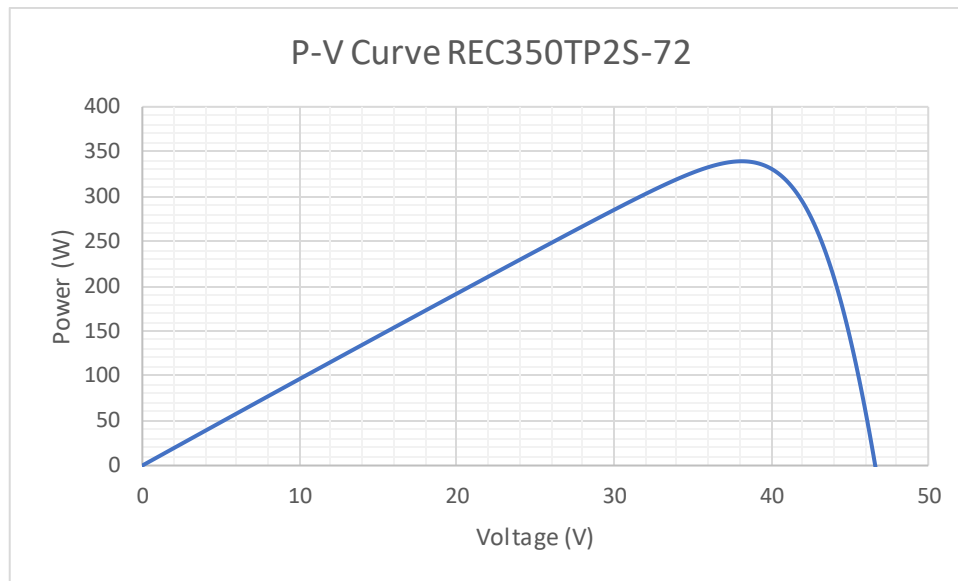


Διάγραμμα 3.2 SPR-X21-345 P-V curve at reference conditions

- REC350TP2S-72

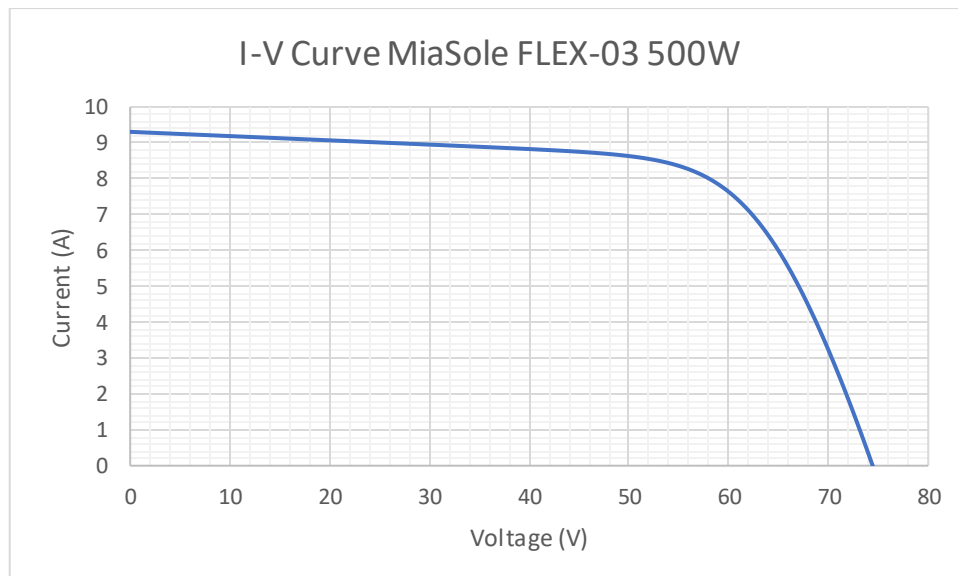


Διάγραμμα 3.3 REC350TP2S-72 I-V curve at reference conditions

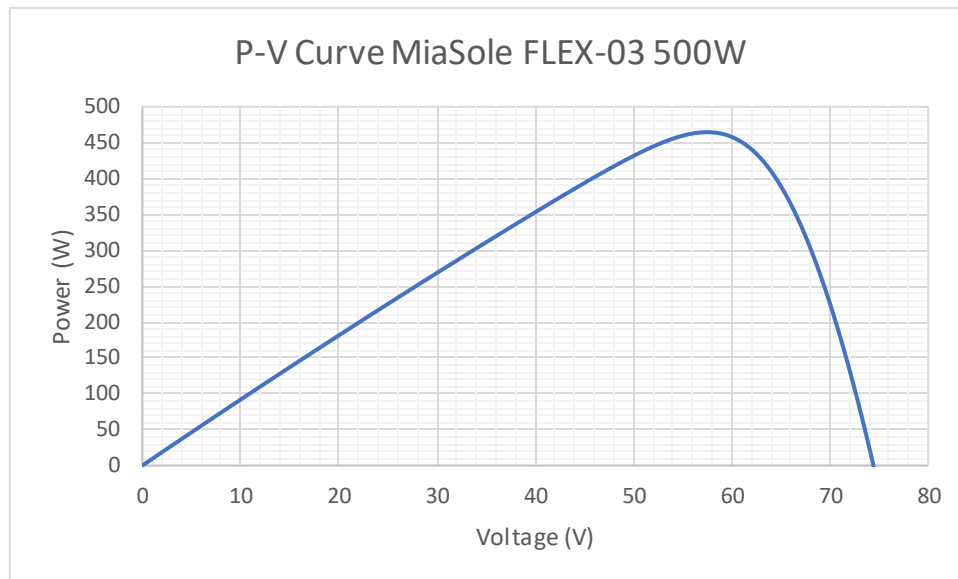


Διάγραμμα 3.4 REC350TP2S-72 P-V curve at reference conditions

- MiaSolé FLEX-03 500W

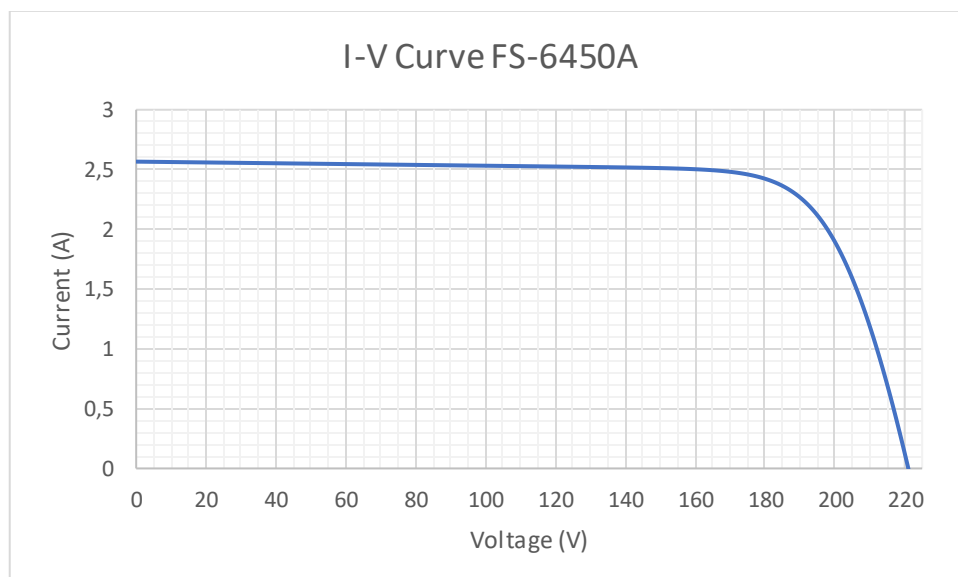


Διάγραμμα 3.5 MiaSole FLEX-03 500W I-V curve at reference conditions

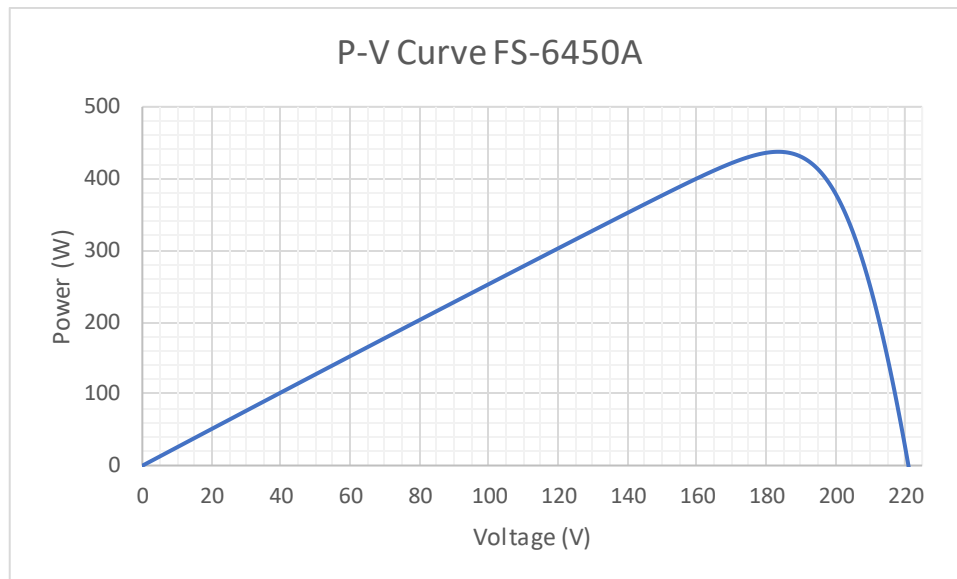


Διάγραμμα 3.6 MiaSole FLEX-03 500W P-V at reference conditions

- FS-6450A



Διάγραμμα 3.7 FS-6450A I-V curve at reference conditions



Διάγραμμα 3.8 FS-6450A P-V curve at reference conditions

Στα σενάρια τα οποία έχει χρησιμοποιηθεί ψυχρό υλικό, τα υλικά είναι τα εξής:

- Elastokryl

Το ένα υλικό που χρησιμοποιήθηκε, είναι προϊόν της Ελληνικής εταιρίας Χρωτέξ, το οποίο είναι ένα θερμοανακλαστικό υλικό. Συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας των κτιρίων, χάρη της κύριας ιδιότητάς του η οποία είναι η υψηλή ανακλαστικότητα, καθώς δεν πρέπει να παραληφθεί και η χαμηλή θερμική αγωγιμότητά του. Το υλικό προστατεύει την οροφή του κτιρίου από την υγρασία καθώς δημιουργεί μια αδιαπέραστη μεμβράνη και καλύπτει τις τριχοειδείς ρωγμές. Το υλικό αυτό έχει ελαστική επιφάνεια η οποία διατηρεί την ιδιότητά της και σε χαμηλές θερμοκρασίες, ακόμα και χαμηλότερες από τους 0°C, παρέχει άριστη αντοχή στην ηλιακή ακτινοβολία και αποτρέπει την ανάπτυξη μούχλας, καθώς η όψη του είναι λευκή.

Στα τεχνικά χαρακτηριστικά του όπως αναφέρονται στο επίσημο φυλλάδιο της Χρωτέξ, το υλικό έχει συντελεστή ανακλαστικότητας ίσο με 0.88 και συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (λ) ίσο με $0.268 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, επομένως η αντίσταση του υλικού υπολογίζεται ως η αντίστροφη τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και ισούται με $3.731 \text{ m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ [ΠΗΓΗ: Chrotex, 2012]

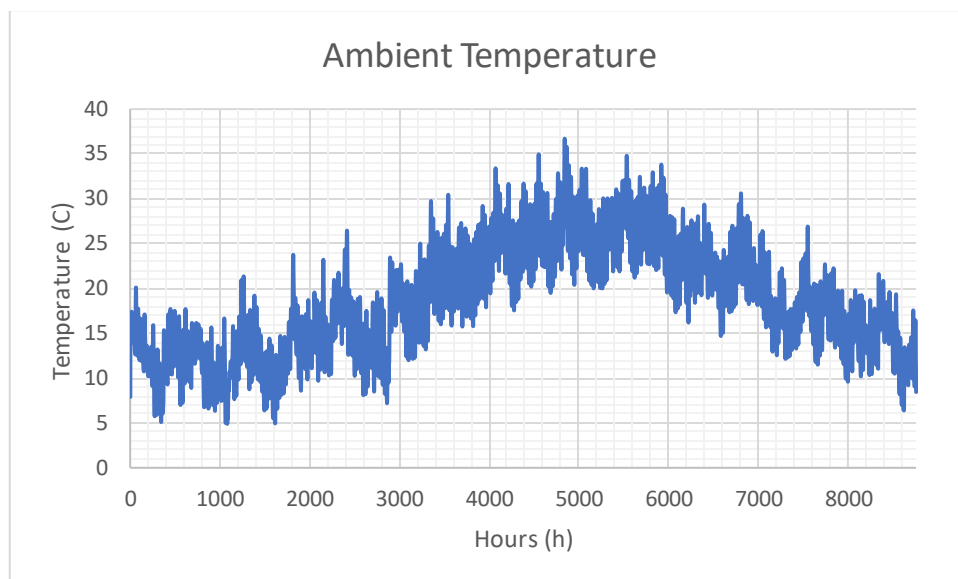
- Sikalastic-560

Το δεύτερο υλικό που χρησιμοποιήθηκε, είναι ένα από τα προϊόντα της Ελβετικής εταιρίας Sika, το οποίο είναι ένα επίσης θερμοανακλαστικό υλικό αρκετά ελαστικό και έχει υψηλή αντίσταση την υπεριώδη ακτινοβολία καθώς είναι εύκολο στην εφαρμογή του. Είναι ιδανικό για την αδιαβροχοποίηση της οροφής, τόσο σε νέα κτίρια όσο και σε παλιότερα τα οποία μελετώνται προς ανακαίνιση. Επίσης είναι ιδανικό για οροφές με πολύπλοκη γεωμετρία, καθώς επεκτείνει τον κύκλο ζωής της οροφής και τέλος λόγω της υψηλής ανακλαστικότητάς του μετατρέπει την οροφή σε μια πιο ενεργειακή μειώνοντας το κόστος ψύξης της θερμικής ζώνης που καλύπτεται από αυτό.

Στα τεχνικά χαρακτηριστικά του όπως αναφέρονται στο επίσημο φυλλάδιο της Sika, το υλικό αυτό έχει συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (λ) ίσο με $0.272 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, επομένως η

αντίστασή του υπολογίζεται ίση με $3.676 \text{ m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$, και τέλος έχει συντελεστή ανακλαστικότητας ίσο με 0.82. [ΠΗΓΗ: Sika Corporation, 2021]

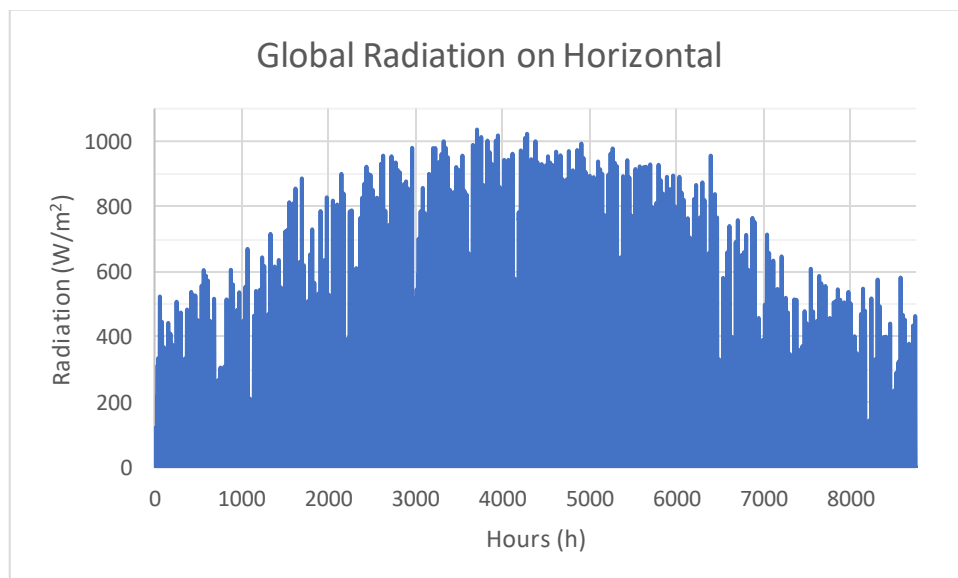
Σε όλα τα σενάρια το διάγραμμα της θερμοκρασίας αέρα λαμβάνεται από τα δεδομένα που υπάρχουν στο αρχείο καιρού και κατασκευάζεται ως εξής:



Διάγραμμα 3.9 Διάγραμμα θερμοκρασίας για ολόκληρο το έτος

Η κατώτατη θερμοκρασία που υπάρχει στο αρχείο καιρού για το ένα έτος αυτό ήταν ίση με 4.9°C ενώ η ανώτατη θερμοκρασία που μετρήθηκε για αυτό το έτος ήταν ίση με 36.7°C .

Αντίστοιχα παρουσιάζεται και το διάγραμμα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας για ολόκληρο το έτος που γίνεται η προσομοίωση και φαίνεται παρακάτω:



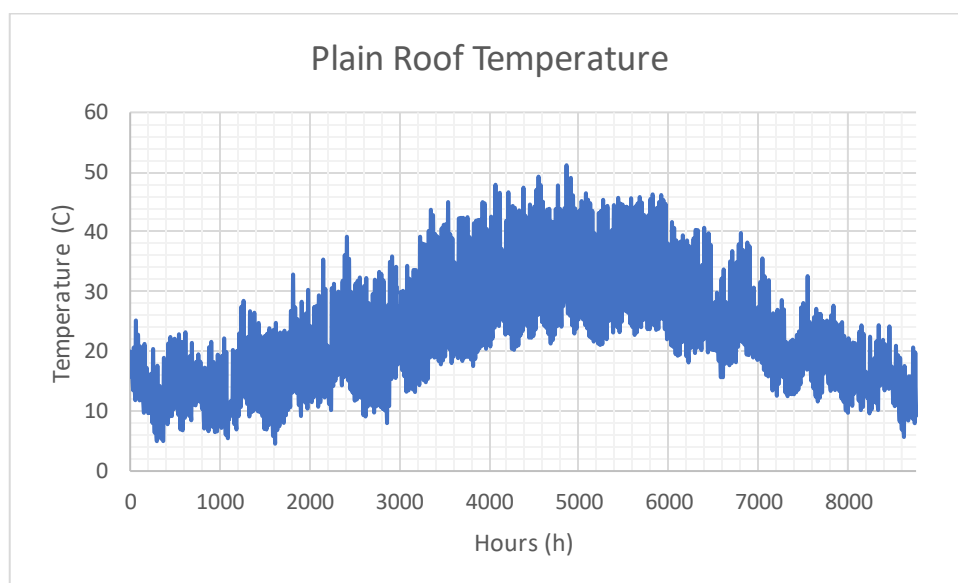
Διάγραμμα 3.10 Διάγραμμα προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας για ολόκληρο το έτος

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έγιναν από το λογισμικό TRNSYS η μέγιστη ηλιοφάνεια που υπήρξε το έτος αυτό ήταν ίση με 1036 W/m^2 .

3.1. Απλό σενάριο

Το σενάριο αυτό αποτελείται από το κτίριο χωρίς κάποια επίστρωση στην οροφή του από ψυχρό υλικό, είναι δηλαδή κατασκευασμένη από απλό οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 0.2 m και συντελεστή θερμικής διαπερατότητας ίσο με $1.836 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, η απορροφητικότητα της εξωτερικής επιφάνειας ισούται με 0.6 και επομένως η συνολική τιμή u-value της οροφής ισούται με $1.779 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

Η θερμοκρασία της οροφής, σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έγιναν από το λογισμικό TRNSYS παρουσιάζεται παρακάτω Διάγραμμα 3.11:

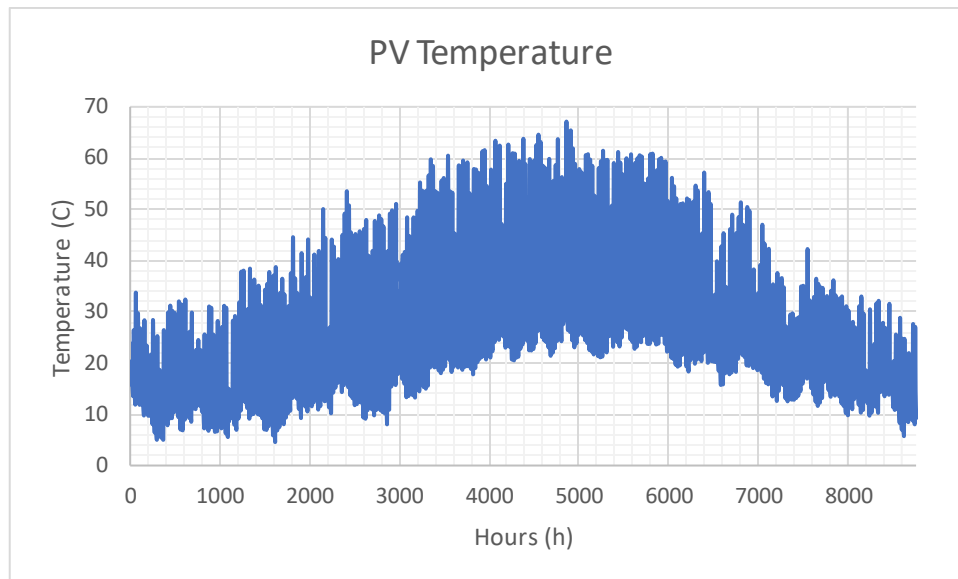


Διάγραμμα 3.11 Διάγραμμα εξωτερικής θερμοκρασίας απλής οροφής

Σύμφωνα με τις μετρήσεις που εξάχθηκαν από την προσομοίωση η μέγιστη τιμή της απλής οροφής οπλισμένου σκυροδέματος είναι ίση με 51.16°C και η ελάχιστη θερμοκρασία που μετρήθηκε είναι ίση με 4.57°C .

3.1.1. Απλό σενάριο σε συνδυασμό με το Φ/Β SPR-X21-345

Στο σενάριο αυτό, η οροφή παραμένει ίδια προστίθεται το φωτοβολταϊκό SPR-X21-345 και στο Διάγραμμα 3.12 παρουσιάζεται η θερμοκρασία του για όλη τη διάρκεια του χρόνου:

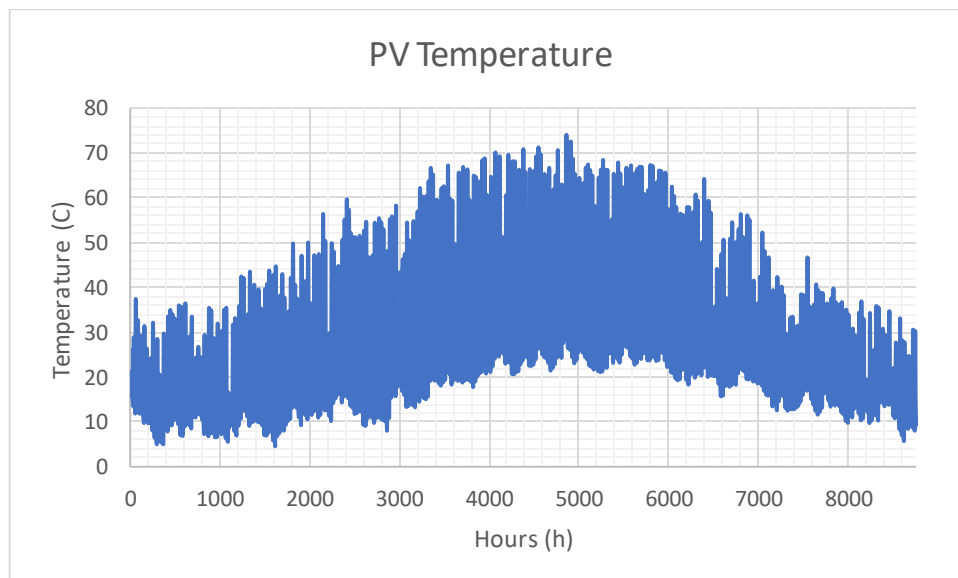


Διάγραμμα 3.12 Θερμοκρασία SPR-X21-345 σε απλή οροφή

Η μέγιστη θερμοκρασία του πάνελ σύμφωνα με την προσομοίωση ανέρχεται στους 67.13°C σε μια από τις καλοκαιρινές μέρες ενώ η ελάχιστη θερμοκρασία είναι ίση με 4.57°C.

3.1.2.Απλό σενάριο σε συνδυασμό με το Φ/Β REC350TP2S-72

Στο σενάριο αυτό πάνω στην υπάρχουσα οροφή προστίθεται το φωτοβολταϊκό REC350TP2S-72 και παρακάτω στο Διάγραμμα 3.13 παρουσιάζεται η θερμοκρασία του καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, όπως αυτή υπολογίστηκε από την προσομοίωση του TRNSYS:

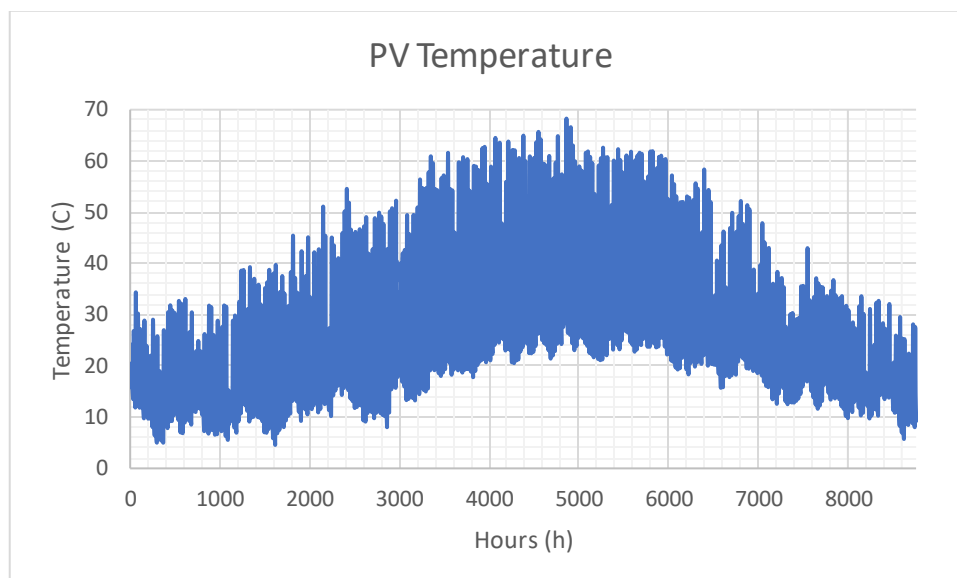


Διάγραμμα 3.13 Θερμοκρασία REC350TP2S-72 σε απλή οροφή

Η μέγιστη θερμοκρασία του πάνελ σύμφωνα με την προσομοίωση ανέρχεται στους 74.04°C σε μια από τις καλοκαιρινές μέρες ενώ η ελάχιστη θερμοκρασία είναι ίση με 4.57°C.

3.1.3.Απλό σενάριο σε συνδυασμό με το Φ/Β MiaSolé FLEX-03 500W

Σε αυτό το σενάριο στην απλή οροφή οπλισμένου σκυροδέματος εγκαταστάθηκε το φωτοβολταϊκό MiaSolé FLEX-03 500W και παρακάτω φαίνεται το γράφημα της θερμοκρασίας του:

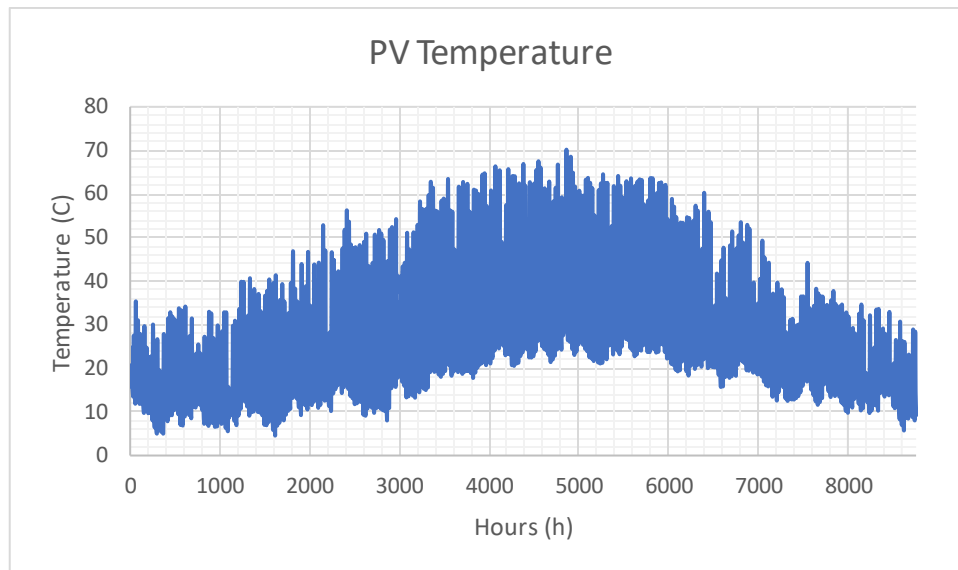


Διάγραμμα 3.14 Θερμοκρασία MiaSole FLEX-03 500W σε απλή οροφή

Από τη μοντελοποίηση, η μέγιστη θερμοκρασία που είχε το πάνελ καθ' όλη τη διάρκεια του έτους ήταν ίση με 68.27°C ενώ η κατώτατη ήταν ίση με 4.57°C.

3.1.4.Απλό σενάριο σε συνδυασμό με το Φ/Β FS-6450A

Στο σενάριο αυτό, πάνω στην οροφή οπλισμένου σκυροδέματος εγκαταστάθηκε το φωτοβολταϊκό FS-6450A και μέσω της προσομοίωσης η ανώτατη θερμοκρασία του είναι ίση με 70.18°C ενώ η κατώτατη θερμοκρασία του ήταν ίση με 4.57°C. Αναλυτικότερα:

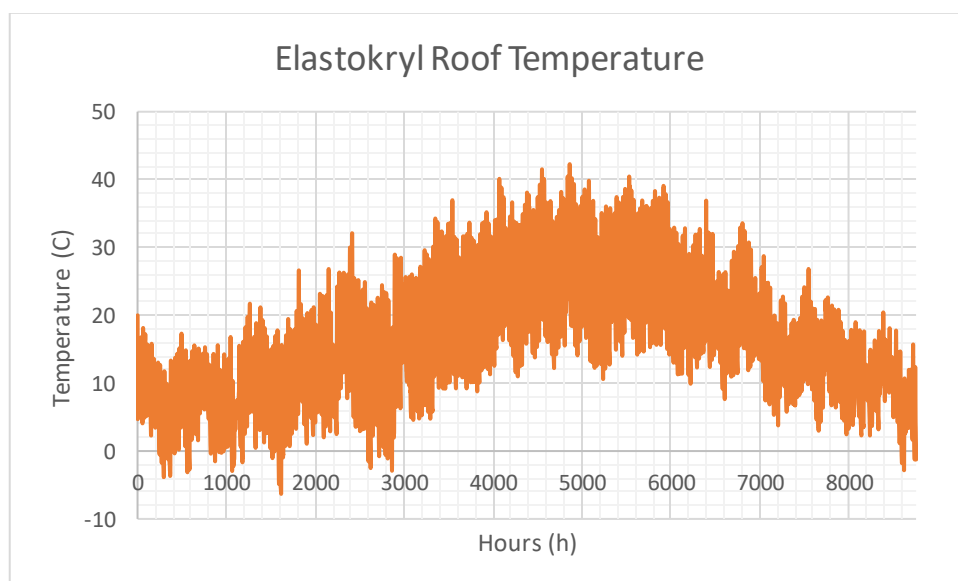


Διάγραμμα 3.15 Θερμοκρασία FS-6450A σε απλή οροφή

3.2. Σενάριο με το ψυχρό υλικό Elastokryl

Το σενάριο αυτό αποτελείται από το κτίριο με την επίστρωση του ψυχρού υλικού Elastokryl στην οροφή του, είναι δηλαδή κατασκευασμένη από απλό οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 0.2 m και συντελεστή θερμικής διαπερατότητας ίσο με $1.836 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, η απορροφητικότητα της εξωτερικής επιφάνειας ισούται με 0.15 και στην εξωτερική του επιφάνεια έχει προστεθεί το Elastokryl με τιμή αντίστασης στη θερμική διαπερατότητα ίση με $3.731 \text{ h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{kJ}^{-1}$. Επομένως η συνολική τιμή u-value της οροφής ισούται με $0.071 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

Η θερμοκρασία της οροφής, σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έγιναν από το λογισμικό TRNSYS παρουσιάζεται παρακάτω Διάγραμμα 3.16:

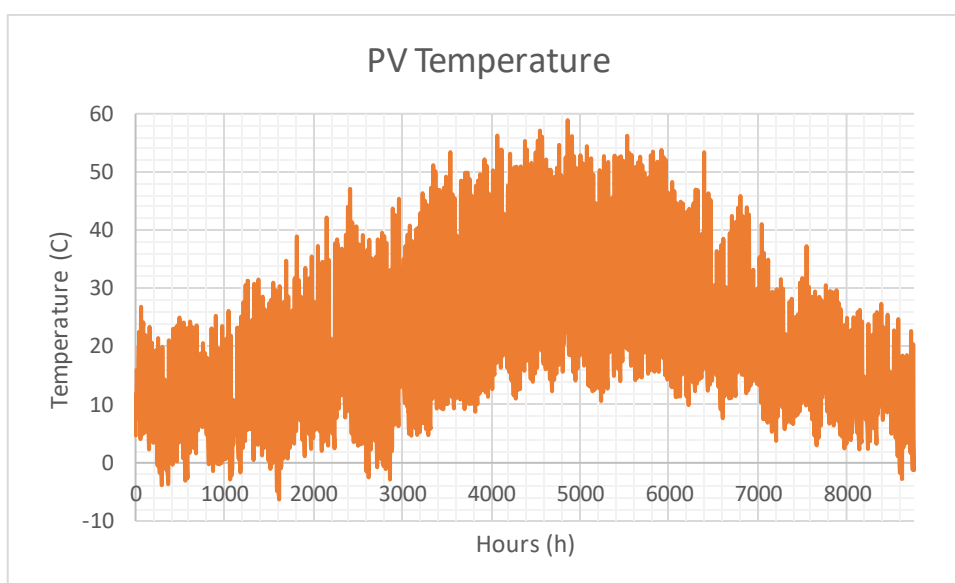


Διάγραμμα 3.16 Εξωτερική θερμοκρασία οροφής με Elastokryl

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του TRNSYS η μέγιστη θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας της οροφής φαίνεται να είναι ίση με 42.28°C ενώ η ελάχιστη είναι ίση με -6.31°C . Με μια απλή σύγκριση μεταξύ του σεναρίου αυτού και του απλού σεναρίου, φαίνεται πως η θερμοκρασία της οροφής είναι χαμηλότερη όσον αφορά τη μέγιστη θερμοκρασία καθώς επίσης και όσον αφορά την ελάχιστη θερμοκρασία.

3.2.1.Elastokryl σε συνδυασμό με το Φ/Β SPR-X21-345

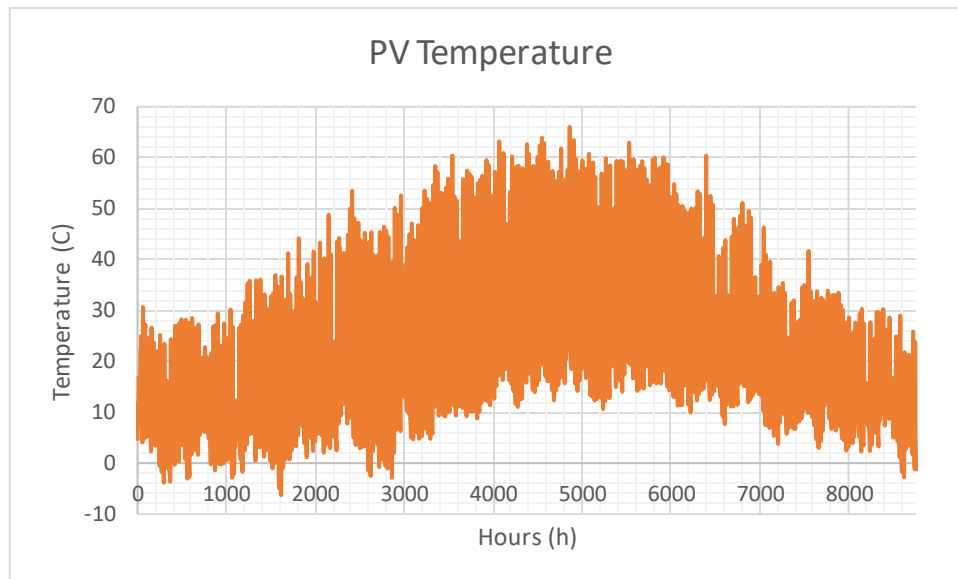
Στο σενάριο αυτό, εγκαταστάθηκε το φωτοβολταϊκό SPR-X21-345 στην οροφή πάνω από το υλικό Elastokryl. Η μέγιστη θερμοκρασία του είναι ίση με 58.91°C ενώ η χαμηλότερη βρέθηκε από το μοντέλο να είναι ίση με -6.31°C . Αναλυτικά για όλο το έτος:



Διάγραμμα 3.17 Θερμοκρασία SPR-X21-345 με Elastokryl

3.2.2.Elastokryl σε συνδυασμό με το Φ/Β REC350TP2S-72

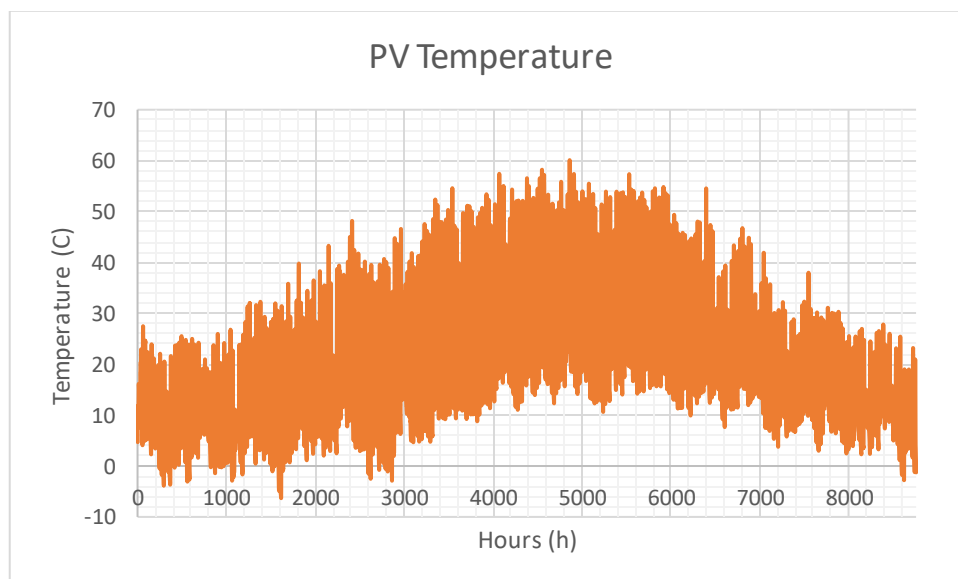
Στο σενάριο αυτό εγκαταστάθηκε το φωτοβολταϊκό REC350TP2S-72 πάνω στην οροφή η οποία είναι επικαλυμμένη με το υλικό Elastokryl. Η ανώτατη και κατώτατη θερμοκρασία του που προέκυψε από την προσομοίωση είναι ίση με 66.06°C και -6.31°C αντίστοιχα.



Διάγραμμα 3.18 Θερμοκρασία REC350TP2S-72 με Elastokryl

3.2.3.Elastokryl σε συνδυασμό με το Φ/Β MiaSolé FLEX-03 500W

Στο σενάριο αυτό, πάνω από το υλικό Elastokryl στην οροφή εγκαταστάθηκε το φωτοβολταϊκό MiaSolé FLEX-03 500W, όπου έπειτα από την μοντελοποίηση του η ανώτατη και κατώτατη θερμοκρασία του προέκυψε ίση με 60.09°C και -6.31°C αντίστοιχα.

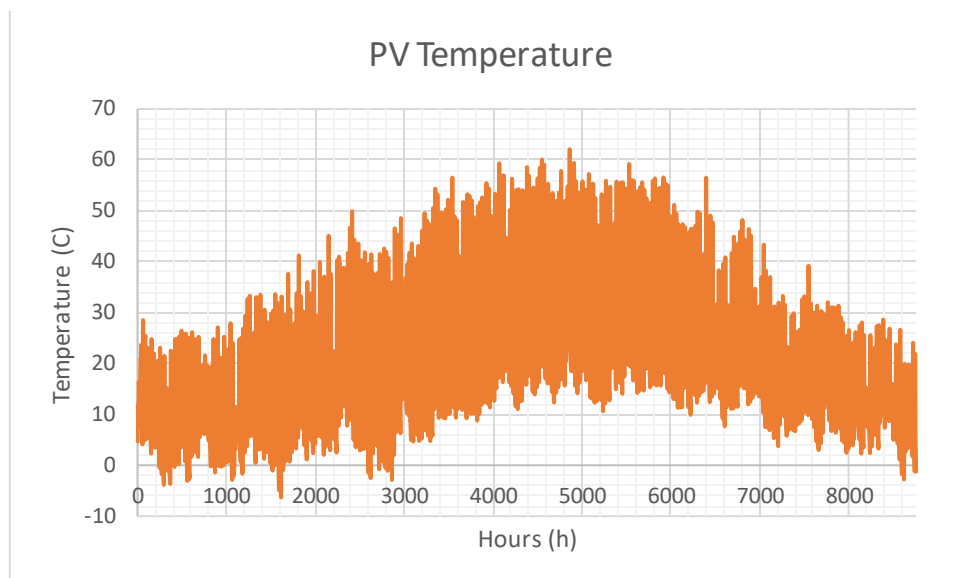


Διάγραμμα 3.19 Θερμοκρασία MiaSole FLEX-03 500W με Elastokryl

3.2.4.Elastokryl σε συνδυασμό με το Φ/Β FS-6450A

Στο σενάριο αυτό εγκαταστάθηκε το φωτοβολταϊκό FS-6450A πάνω από το υλικό Elastokryl που έχει επικαλύψει την επιφάνεια της οροφής και σύμφωνα με τα αποτελέσματα

της προσομοίωσης η ανώτατη θερμοκρασία του είναι ίση με 62.07°C και η κατώτατη φαίνεται να είναι ίση με -6.31°C .

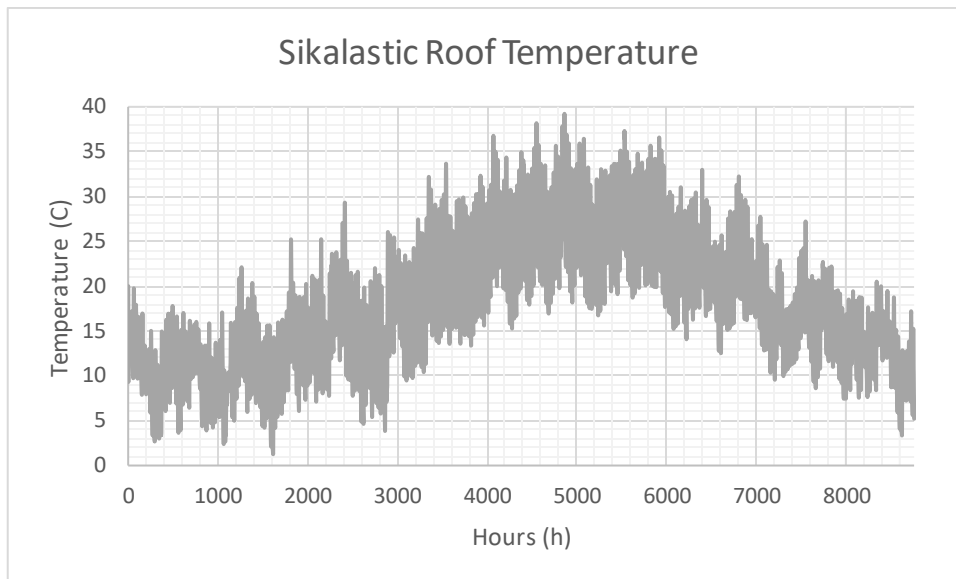


Διάγραμμα 3.20 Θερμοκρασία FS-6450A με Elastokryl

3.3. Σενάριο με το ψυχρό υλικό Sikalastic-560

Το σενάριο αυτό αποτελείται από το κτίριο με την επίστρωση του ψυχρού υλικού Sikalastic-560 στην οροφή του, είναι δηλαδή κατασκευασμένη από απλό οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 0.2 m και συντελεστή θερμικής διαπερατότητας ίσο με $1.836 \text{ kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, η απορροφητικότητα της εξωτερικής επιφάνειας ισούται με 0.18 και στην εξωτερική του επιφάνεια έχει προστεθεί το Sikalastic-560 με τιμή αντίστασης στη θερμική διαπερατότητα ίση με $3.676 \text{ h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{kJ}^{-1}$. Επομένως η συνολική τιμή u-value της οροφής ισούται με $0.072 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

Η θερμοκρασία της οροφής, σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έγιναν από το λογισμικό TRNSYS παρουσιάζεται παρακάτω Διάγραμμα 3.21:

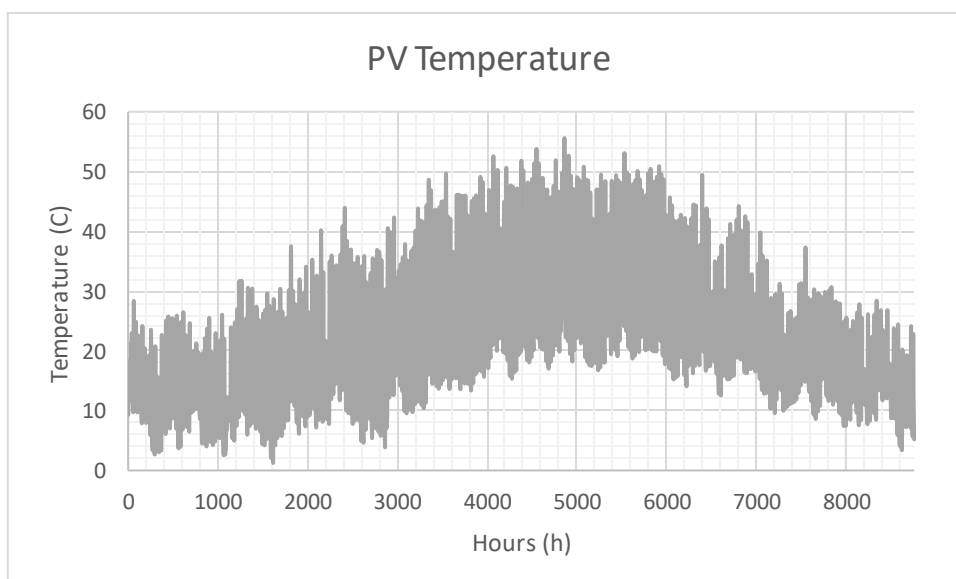


Διάγραμμα 3.21 Εξωτερική θερμοκρασία οροφή με Sikalastic-560

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του προέκυψαν από το λογισμικό TRNSYS η μείωση της εξωτερικής θερμοκρασίας στην επιφάνεια της οροφής, σε σχέση με το σενάριο που δεν περιλαμβάνει κάποιο ψυχρό υλικό, είναι φανερή. Πιο συγκεκριμένα, ως ανώτατη θερμοκρασία που μετρήθηκε είναι ίση με 39.22°C και η κατώτατη είναι ίση με 1.26°C .

3.3.1.Sikalastic-560 σε συνδυασμό με το Φ/Β SPR-X21-345

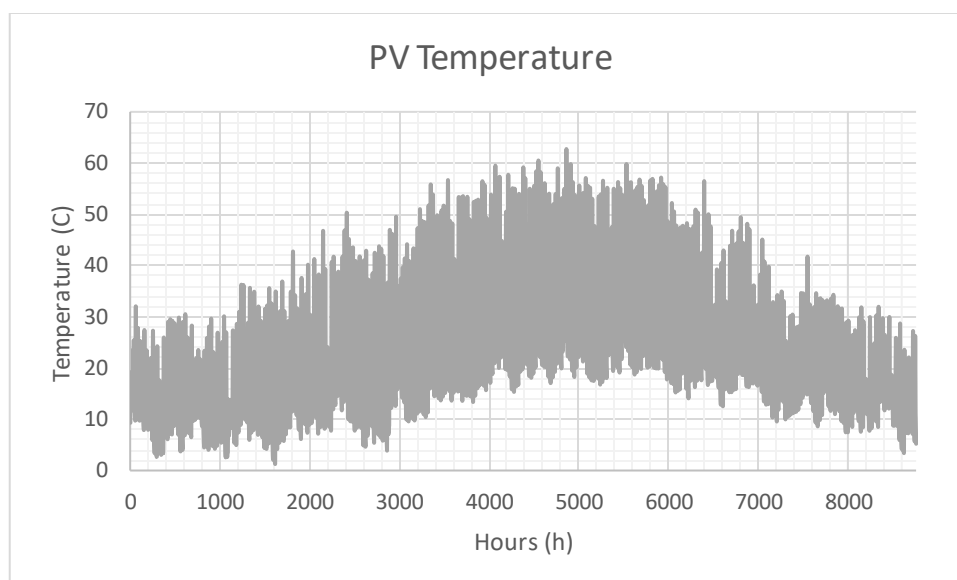
Στο σενάριο αυτό γίνεται ο έλεγχος της μείωσης στη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πάνελ SPR-X21-345 σε συνδυασμό με το ψυχρό υλικό Sikalastic-560. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν πως η ανώτατη θερμοκρασία που ανέπτυξε το πάνελ είναι ίση με 55.59°C και η κατώτατη είναι ίση με 1.26°C .



Διάγραμμα 3.22 Θερμοκρασία SPR-X21-345 με Sikalastic-560

3.3.2.Sikalastic-560 σε συνδυασμό με το Φ/Β REC350TP2S-72

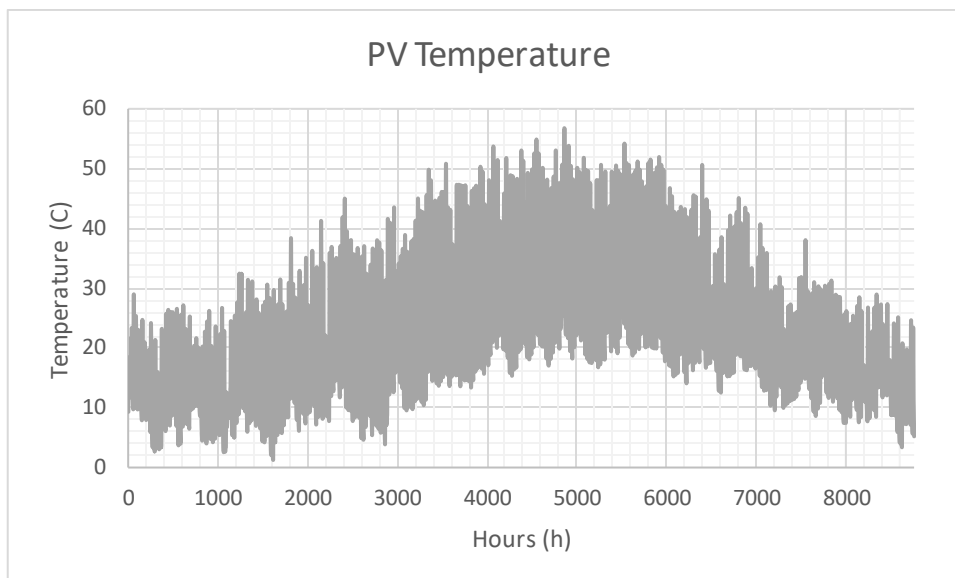
Στο σενάριο αυτό, εγκαθίσταται το φωτοβολταϊκό REC350TP2S-72 πάνω στην οροφή, στην οποία υπάρχει το υλικό Sikalastic-560. Από την προσομοίωση προκύπτουν τα αποτελέσματα για τις θερμοκρασίες του όπου ανέρχονται σε 62.74°C και 1.26°C για μέγιστη και ελάχιστη αντίστοιχα:



Διάγραμμα 3.23 Θερμοκρασία REC350TP2S-72 με Sikalastic-560

3.3.3.Sikalastic-560 σε συνδυασμό με το Φ/Β MiaSolé FLEX-03 500W

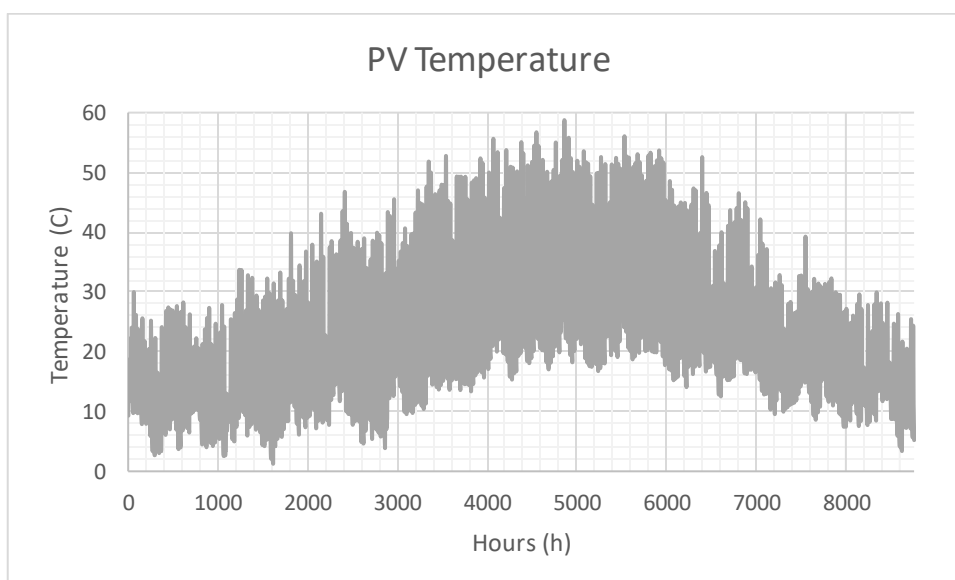
Στο σενάριο αυτό, πάνω από το υλικό Sikalastic-560 που υπάρχει στην οροφή, εγκαθίσταται το φωτοβολταϊκό MiaSolé FLEX-03 500W, όπου για τις θερμοκρασίες του μέσω της μοντελοποίησης του TRNSYS προκύπτει η ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία που αναπτύχθηκε στο πάνελ να είναι ίση με 56.77°C και 1.26°C.



Διάγραμμα 3.24 Θερμοκρασία MiaSole FLEX-03 500W με Sikalastic-560

3.3.4.Sikalastic-560 σε συνδυασμό με το Φ/B FS-6450A

Στο σενάριο αυτό ενσωματώνεται το φωτοβολταϊκό FS-6450A πάνω από το ψυχρό υλικό Sikalastic-560 και σύμφωνα με την προσομοίωση προκύπτουν οι θερμοκρασίες του για όλο το έτος, εν των οποίων η μέγιστη ισούται με 58.75°C και η ελάχιστη ισούται με 1.26°C.

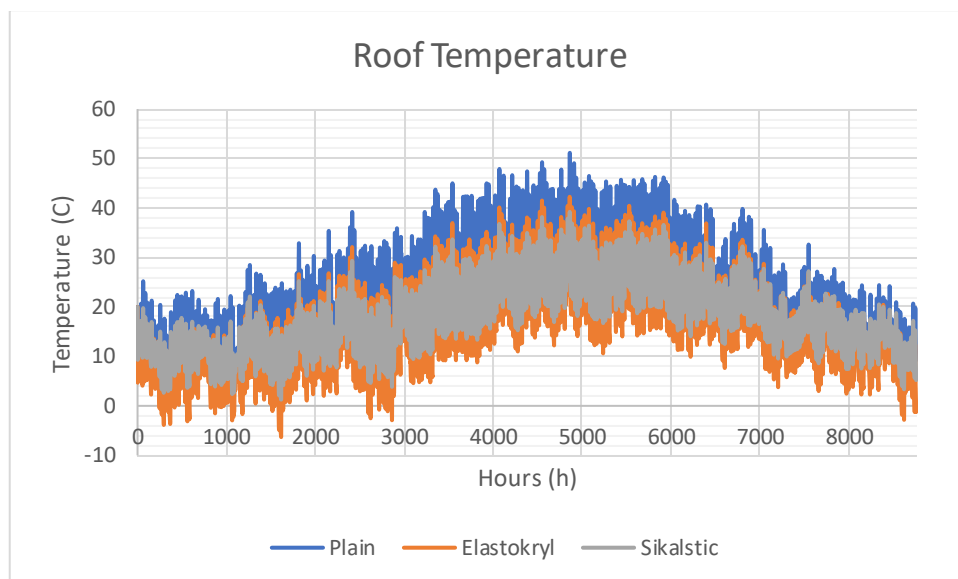


Διάγραμμα 3.25 Θερμοκρασία FS-6450A με Sikalastic-560

4. Σύγκριση αποτελεσμάτων

Με την αξιοποίηση των παραπάνω αποτελεσμάτων για την εξωτερική θερμοκρασία στην επιφάνεια της οροφής, για τη θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών καθώς και από την προσομοίωση της παραγωγής ισχύος αυτών, μπορεί να γίνει η σύγκριση και η πιο αναλυτική περιγραφή τους.

Όσον αφορά τη θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια της οροφής, σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα εξόδου από την μοντελοποίηση του TRNSYS κατασκευάζεται παρακάτω το Διάγραμμα 4.1, το οποίο αναπαριστά τις θερμοκρασίες για κάθε χρονική στιγμή του έτους:



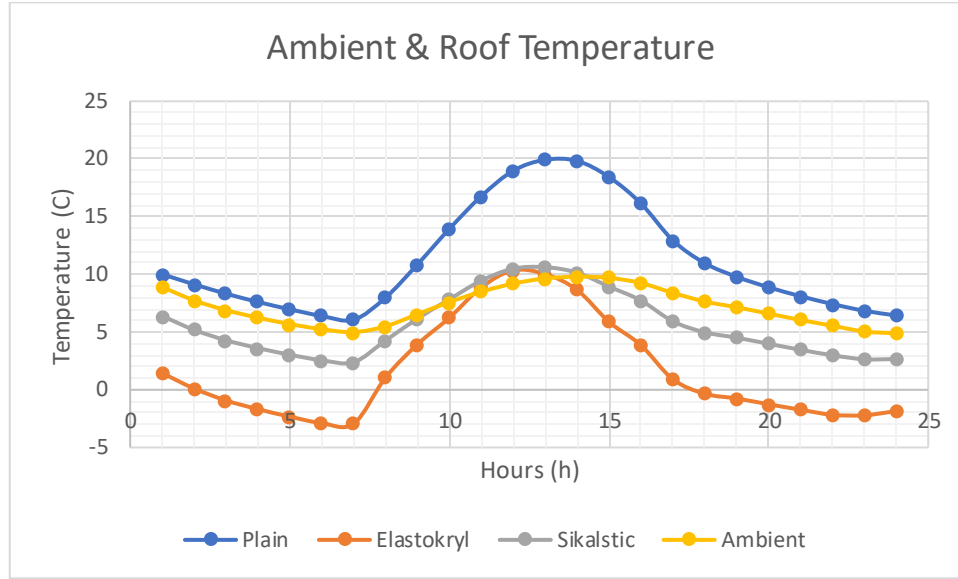
Διάγραμμα 4.1 Σύγκριση θερμοκρασίας στην εξωτερική επιφάνεια της οροφής για κάθε σενάριο

Πιο αναλυτικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την απλή οροφή, κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα (Plain), επίσης για την οροφή που αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα και το ψυχρό υλικό Elastokryl (Elastokryl) και τέλος για την οροφή που αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα και το ψυχρό υλικό Sikalastic-560 (Sikalastic).

Και τα δύο ψυχρά υλικά μειώνουν την θερμοκρασία της οροφής σε σημαντικό βαθμό, κυρίως τις καλοκαιρινές ημέρες, οι οποίες είναι και το κύριο επίκεντρο προσοχής, όμως δεν παραλείπεται και η μελέτη για τις χειμερινές ημέρες όπου η θερμοκρασία του αέρα είναι αρκετά χαμηλότερη. Παρακάτω παρουσιάζονται οι συγκρίσεις για την κρύα ημέρα του χειμώνα όπου υπήρξε η χαμηλότερη θερμοκρασία από το αρχείο καιρού, για μια ζεστή μέρα του καλοκαιριού όπου μετρήθηκε η υψηλότερη θερμοκρασία και τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την ημέρα όπου μετρήθηκε η μέγιστη ηλιοφάνεια που προσπίπτει πάνω στο οριζόντιο επίπεδο.

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 4.1 διακρίνεται πως ο υλικό Sikalastic-560 διατηρεί μικρότερο εύρος θερμοκρασιών σε σχέση με το υλικό Elastokryl. Αυτό συμβαίνει διότι οι ιδιότητες των υλικών διαφέρουν, επομένως διαφέρουν και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την μοντελοποίησή τους.

- Ψυχρή χειμερινή ημέρα



Διάγραμμα 4.2 Θερμοκρασίες οροφής για χειμερινή ημέρα

Όπως διακρίνεται παραπάνω στο Διάγραμμα 4.2, η μέγιστη θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια της οροφής ισούται με 19.93°C στο σενάριο της απλής οροφής (Plain). Για την ίδια χρονική στιγμή οι θερμοκρασίες που αναπτύσσεται μετά την εφαρμογή του Elastokryl και του Sikalastic-560 είναι ίσες με 10.02°C και 10.62°C αντίστοιχα. Οι ελάχιστες που προέκυψαν από την προσομοίωση για την απλή οροφή, για το Elastokryl και το Sikalastic-560 είναι ίσες με 6.44°C, -1.85°C και 2.66°C αντίστοιχα.

Ποσοστιαία, η πτώση της θερμοκρασίας για κάθε υλικό υπολογίζεται ως εξής:

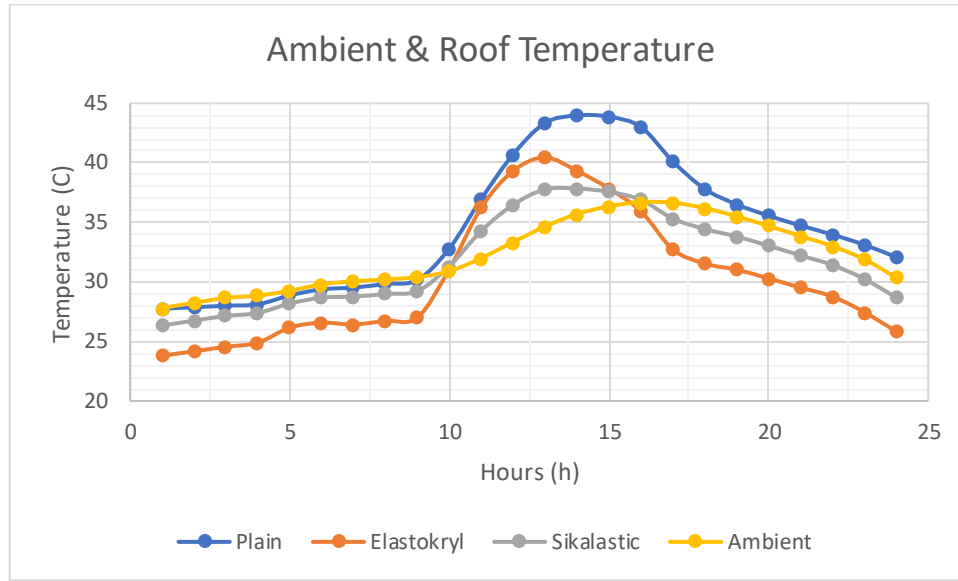
$$\frac{T_{Plain,max}^{Cold} - T_{Elastokryl,max}^{Cold}}{T_{Plain,max}^{Cold}} \cdot 100\% = \frac{19.93 - 10.02}{19.93} \cdot 100\% = 49.72\% \quad (4.1)$$

$$\frac{T_{Plain,min}^{Cold} - T_{Elastokryl,min}^{Cold}}{T_{Plain,min}^{Cold}} \cdot 100\% = \frac{6.44 - (-1.85)}{6.44} \cdot 100\% = 128\% \quad (4.2)$$

$$\frac{T_{Plain,max}^{Cold} - T_{Sikalstic,max}^{Cold}}{T_{Plain,max}^{Cold}} \cdot 100\% = \frac{19.93 - 10.62}{19.93} \cdot 100\% = 46.71\% \quad (4.3)$$

$$\frac{T_{Plain,min}^{Cold} - T_{Sikalstic,min}^{Cold}}{T_{Plain,min}^{Cold}} \cdot 100\% = \frac{6.44 - 2.66}{6.44} \cdot 100\% = 58.70\% \quad (4.4)$$

- Ζεστή εαρινή ημέρα



Διάγραμμα 4.3 Θερμοκρασίες οροφής για εαρινή ημέρα

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 4.3, οι μέγιστες θερμοκρασίες της εξωτερικής επιφάνειας της οροφής για την απλή οροφή (Plain), για την οροφή με Elastokryl (Elastokryl) και για την οροφή με Sikalastic-560 (Sikalastic) ισούνται με 43.98°C, 40.45°C και 37.84°C αντίστοιχα. Οι ελάχιστες θερμοκρασίες είναι ίσες με 27.75°C, 23.80°C και 26.33°C αντίστοιχα.

Ποσοστιαία η πτώση της θερμοκρασία για κάθε υλικό υπολογίζεται ως εξής:

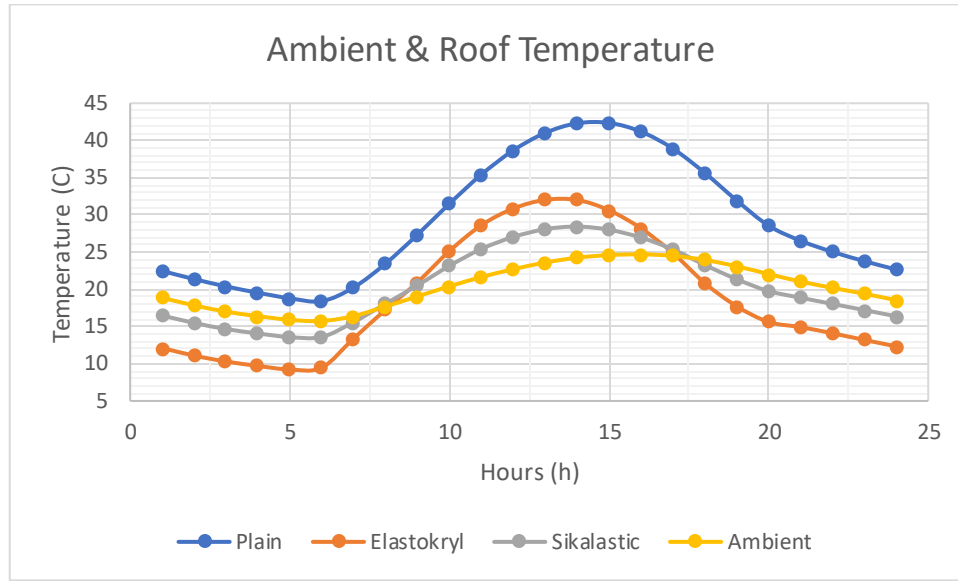
$$\frac{T_{Plain,max}^{Hot} - T_{Elastokryl,max}^{Hot}}{T_{Plain,max}^{Hot}} \cdot 100\% = \frac{43.98 - 40.45}{43.98} \cdot 100\% = 8.03\% \quad (4.5)$$

$$\frac{T_{Plain,min}^{Hot} - T_{Elastokryl,min}^{Hot}}{T_{Plain,min}^{Hot}} \cdot 100\% = \frac{27.75 - 23.80}{27.75} \cdot 100\% = 14.23\% \quad (4.6)$$

$$\frac{T_{Plain,max}^{Hot} - T_{Sikalastic,max}^{Hot}}{T_{Plain,max}^{Hot}} \cdot 100\% = \frac{43.98 - 37.84}{43.98} \cdot 100\% = 13.96\% \quad (4.7)$$

$$\frac{T_{Plain,min}^{Hot} - T_{Sikalastic,min}^{Hot}}{T_{Plain,min}^{Hot}} \cdot 100\% = \frac{27.75 - 26.33}{27.75} \cdot 100\% = 5.12\% \quad (4.8)$$

- Ημέρα του έτους με τη μέγιστη ηλιοφάνεια



Διάγραμμα 4.4 Θερμοκρασίες οροφής για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια

Από το Διάγραμμα 4.4 που προκύπτει από τις προσομοιώσεις του λογισμικού TRNSYS, οι μέγιστες θερμοκρασίες της εξωτερικής επιφάνειας για την απλή οροφή, την οροφή με Elastokryl και την οροφή με Sikalastic-560 ισούνται με 42.36°C, 32.02°C και 28.43°C αντίστοιχα. Οι ελάχιστες τιμές της ανέρχονται σε 18.41°C, 9.22°C και 13.58°C αντίστοιχα.

Ποσοστιαία, η πτώση της θερμοκρασία υπολογίζεται ως εξής:

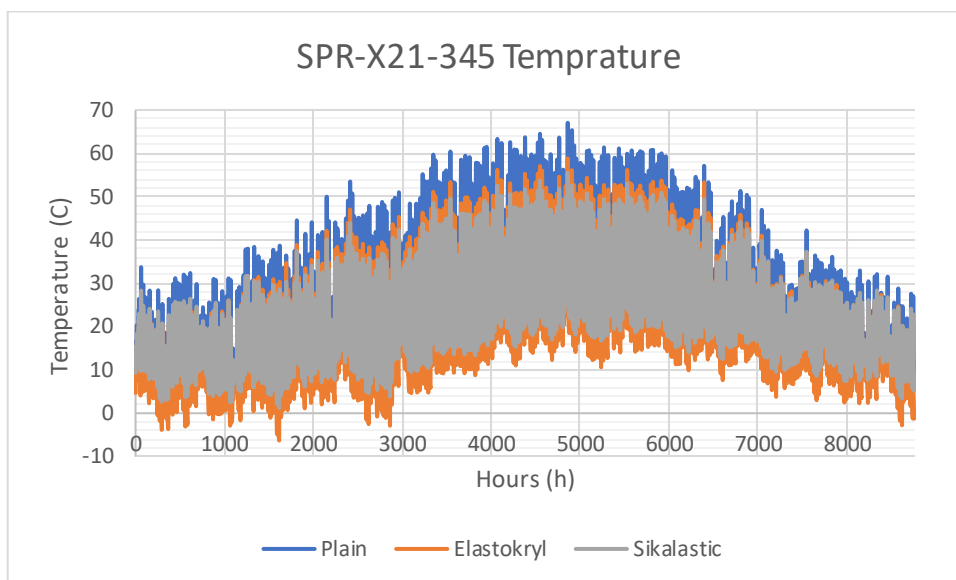
$$\frac{T_{Plain,max}^{Full\ Irradiance} - T_{Elastokryl,max}^{Full\ Irradiance}}{T_{Plain,max}^{Full\ Irradiance}} \cdot 100\% = \frac{42.36 - 32.02}{42.36} \cdot 100\% = 24.41\% \quad (4.9)$$

$$\frac{T_{Plain,min}^{Full\ Irradiance} - T_{Elastokryl,min}^{Full\ Irradiance}}{T_{Plain,min}^{Full\ Irradiance}} \cdot 100\% = \frac{18.41 - 9.22}{18.41} \cdot 100\% = 49.92\% \quad (4.10)$$

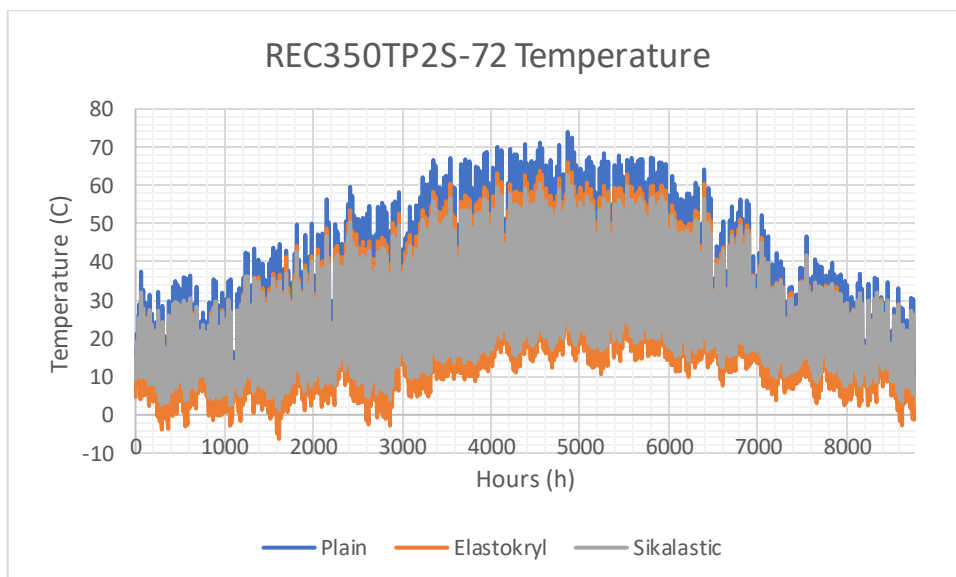
$$\frac{T_{Plain,max}^{Full\ Irradiance} - T_{Sikalastic,max}^{Full\ Irradiance}}{T_{Plain,max}^{Full\ Irradiance}} \cdot 100\% = \frac{42.36 - 28.43}{42.36} \cdot 100\% = 32.88\% \quad (4.11)$$

$$\frac{T_{Plain,min}^{Full\ Irradiance} - T_{Sikalastic,min}^{Full\ Irradiance}}{T_{Plain,min}^{Full\ Irradiance}} \cdot 100\% = \frac{18.41 - 13.58}{18.41} \cdot 100\% = 26.24\% \quad (4.12)$$

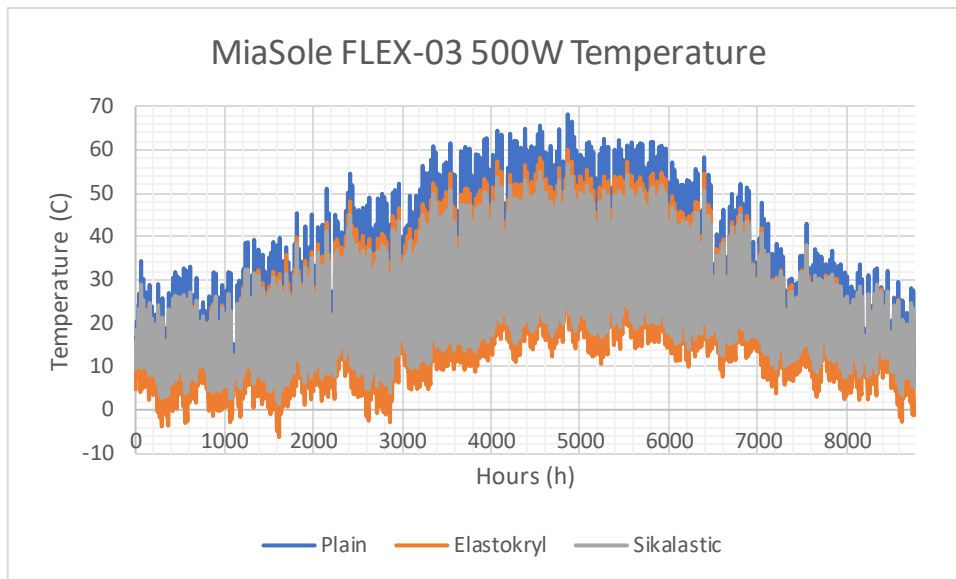
Στο σημείο αυτό, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στον κεφάλαιο 3, γίνεται σύγκριση των θερμοκρασιών των φωτοβολταϊκών που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη αυτή. Στα Διαγράμματα 4.5, 4.6, 4.7 και 4.8 φαίνονται συγκριτικά οι θερμοκρασίες των στοιχείων καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, για κάθε αντίδρασή τους με τα ψυχρά υλικά. Παρουσιάζονται με την σειρά SPR-X21-345, REC350TP2S-72, MiaSolé FLEX-03 500W και FS-6450A, αντίστοιχα:



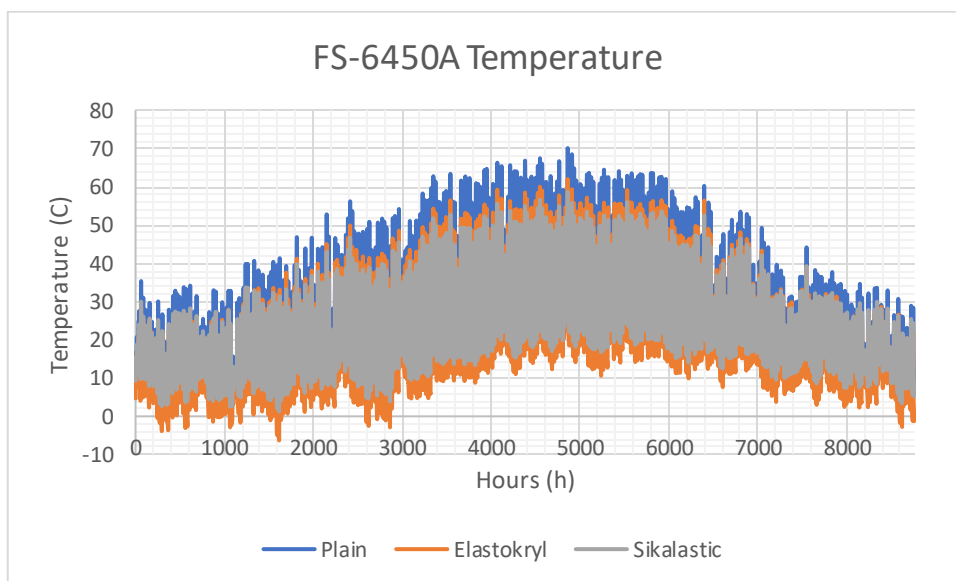
Διάγραμμα 4.5 Θερμοκρασίες του SPR-X21-345 με και χωρίς συνδυασμό ψυχρού υλικού για ένα έτος



Διάγραμμα 4.6 Θερμοκρασίες του REC350TP2S-72 με και χωρίς συνδυασμό ψυχρού υλικού για ένα έτος



Διάγραμμα 4.7 Θερμοκρασίες MiaSole FLEX-03 500W με και χωρίς συνδυασμό ψυχρού υλικού για ένα έτος

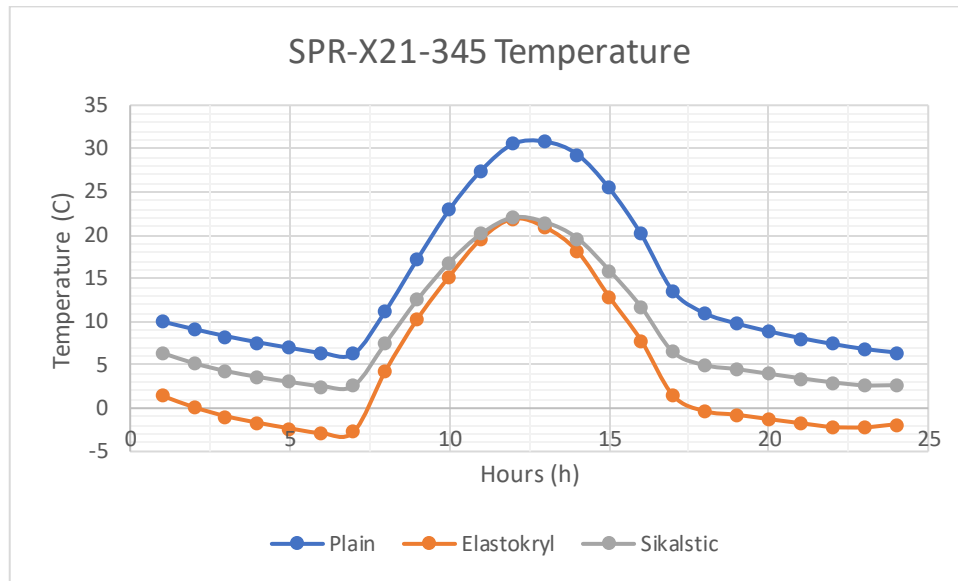


Διάγραμμα 4.8 Θερμοκρασίες FS-6450A με και χωρίς συνδυασμό με ψυχρό υλικό για ένα έτος

Όπως διακρίνεται από τα Διαγράμματα 4.5, 4.6, 4.7 και 4.8 τα φωτοβολταϊκά αντιδρούν με την ψύξη που προσφέρουν τα ψυχρά υλικά στον γύρω περιβάλλοντα χώρο, επομένως μειώνεται και η δική τους θερμοκρασία μαζί με την πτώση της θερμοκρασίας στην εξωτερική επιφάνεια της οροφής.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα, στα οποία φαίνονται οι συγκρίσεις για μια ψυχρή μέρα του χειμώνα, μια ζεστή εαρινή ημέρα καθώς επίσης και για την ημέρα του έτους κατά την οποία παρατηρήθηκε η μέγιστη προσπίπτουσα ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο για όλα τα φωτοβολταϊκά που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

- Αποτελέσματα ψυχρής ημέρας για το Φ/Β SPR-X21-345



Διάγραμμα 4.9 Θερμοκρασίες SPR-X21-345 σε συνδυασμό με και χωρίς ψυχρό υλικό για χειμερινή ημέρα

Όπως παρατηρείται στο Διάγραμμα 4.9 το στοιχείο SPR-X21-345 της SunPower αντιδρά στην πτώση της θερμοκρασίας των ψυχρών υλικών, επομένως υπάρχει πτώση και στην ίδια του τη θερμοκρασία. Για την χειμωνιάτικη αυτή η μέρα η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας του ανέρχεται στους 30.81°C στο μοντέλο της απλής οροφής (Plain), ενώ στα μοντέλα με τα ψυχρά υλικά Elastokryl (Elastokryl) και Sikalastic-560 (Sikalastic) η μέγιστη θερμοκρασία ανέρχεται τους 21.89°C και 22.04°C αντίστοιχα.

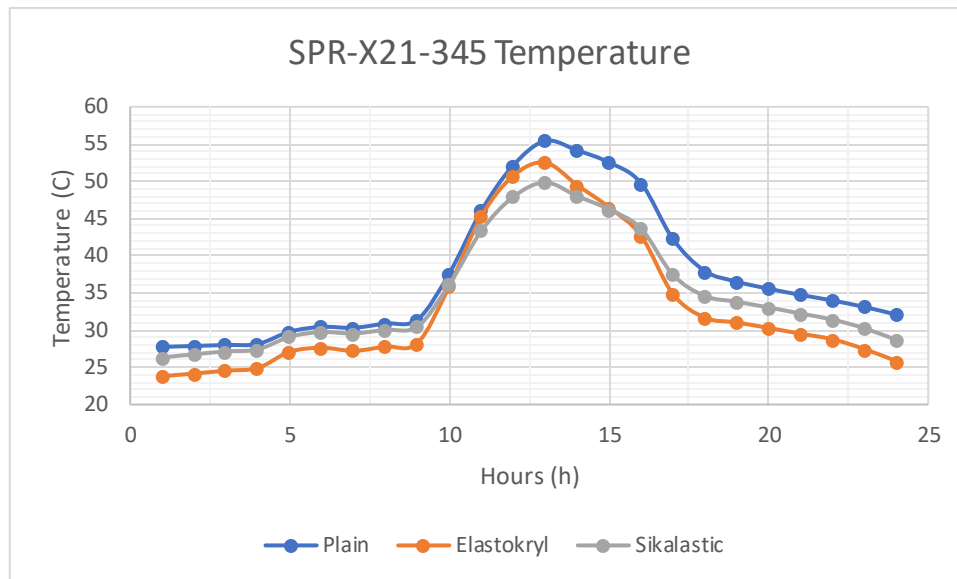
Ποσοστιαία η μεταβολή αυτή της θερμοκρασίας του υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{T_{Plain}^{SPR} - T_{Elastokryl}^{SPR}}{T_{Plain}^{SPR}} \cdot 100\% = \frac{30.81 - 21.89}{30.81} \cdot 100\% = 28.95\% \quad (4.13)$$

$$\frac{T_{Plain}^{SPR} - T_{Sikalastic}^{SPR}}{T_{Plain}^{SPR}} \cdot 100\% = \frac{30.81 - 22.04}{30.81} \cdot 100\% = 28.46\% \quad (4.14)$$

- Αποτελέσματα εαρινής ημέρας για το Φ/Β SPR-X21-345

Όπως παρατηρείται στο Διάγραμμα 4.10 παρακάτω, υπάρχει πτώση της θερμοκρασίας του πάνελ και κατά τις καλοκαιρινές ημέρες, καθώς οι μέγιστες τιμές για τη θερμοκρασία του μέσω του λογισμικού TRNSYS ανέρχονται στους 55.41°C, 40.45°C και 37.84°C για τα μοντέλα της απλής οροφής (Plain), της οροφής με Elastokryl (Elastokryl) και της οροφής με Sikalastic-560 (Sikalastic) αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.10 Θερμοκρασίες SPR-X21-345 σε συνδυασμό με και χωρίς ψυχρό υλικό για καλοκαιρινή ημέρα

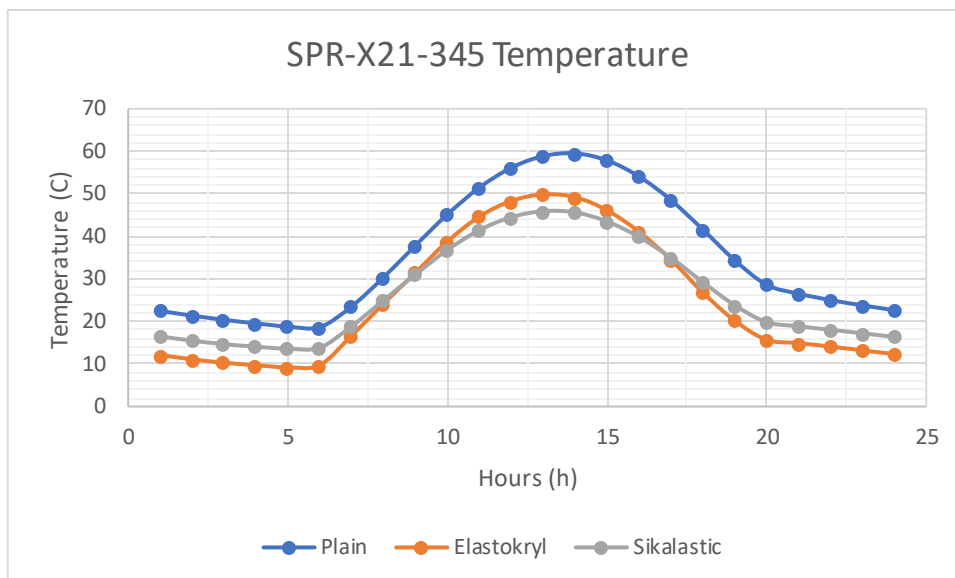
Ποσοστιαία, επομένως, οι πτώσεις της θερμοκρασίας υπολογίζονται ως εξής:

$$\frac{T_{Plain}^{SPR} - T_{Elastokryl}^{SPR}}{T_{Plain}^{SPR}} \cdot 100\% = \frac{55.41 - 40.45}{55.41} \cdot 100\% = 27.00\% \quad (4.15)$$

$$\frac{T_{Plain}^{SPR} - T_{Sikalastic}^{SPR}}{T_{Plain}^{SPR}} \cdot 100\% = \frac{55.41 - 37.84}{55.41} \cdot 100\% = 31.71\% \quad (4.16)$$

- Αποτελέσματα ημέρας με μέγιστη ηλιοφάνεια για το Φ/Β SPR-X21-345

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4.11, τα ψυχρά υλικά μειώνουν και σε αυτή την περίπτωση την θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού, όπου η μέγιστη τιμή που προέκυψε από τις προσομοιώσεις του λογισμικού TRNSYS είναι ίση με 59.53°C, 49.87°C και 45.93°C, για τα μοντέλα με απλή οροφή (Plain), με την προσθήκη του Elastokryl (Elastokryl) και με την προσθήκη του Sikalastic-560 (Sikalastic) αντίστοιχα.



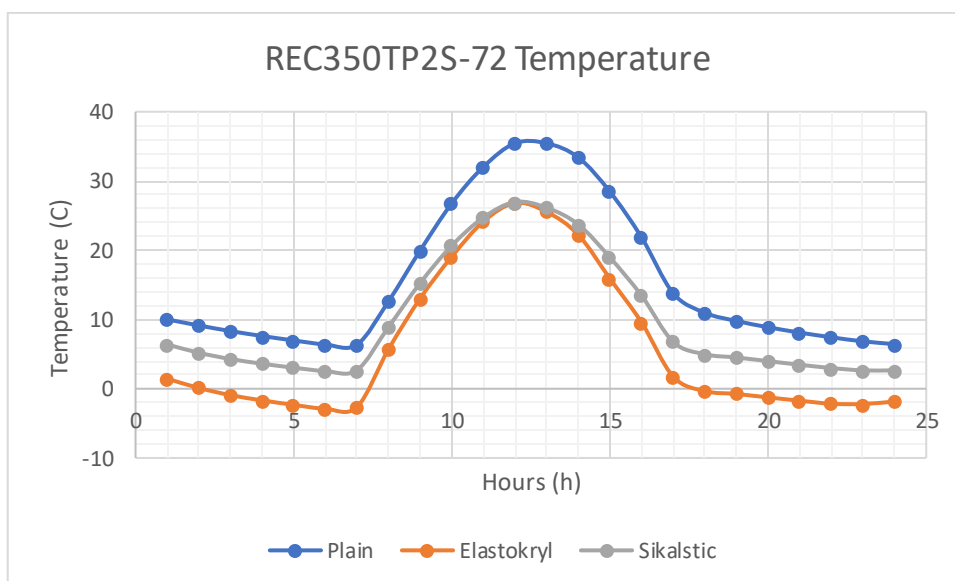
Διάγραμμα 4.11 Θερμοκρασίες SPR-X21-345 σε συνδυασμό με και χωρίς ψυχρό υλικό για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια

Επομένως, οι ποσοστιαίες πτώσεις του κάθε μοντέλου υπολογίζονται ως εξής:

$$\frac{T_{Plain}^{SPR} - T_{Elastokryl}^{SPR}}{T_{Plain}^{SPR}} \cdot 100\% = \frac{59.53 - 49.87}{59.53} \cdot 100\% = 16.23\% \quad (4.17)$$

$$\frac{T_{Plain}^{SPR} - T_{Sikalastic}^{SPR}}{T_{Plain}^{SPR}} \cdot 100\% = \frac{59.53 - 45.93}{59.53} \cdot 100\% = 22.85\% \quad (4.18)$$

- Αποτελέσματα ψυχρής ημέρας για το Φ/Β REC350TP2S-72



Διάγραμμα 4.12 Θερμοκρασίες REC350TP2S-72 για χειμερινή ημέρα με και χωρίς ψυχρό υλικό

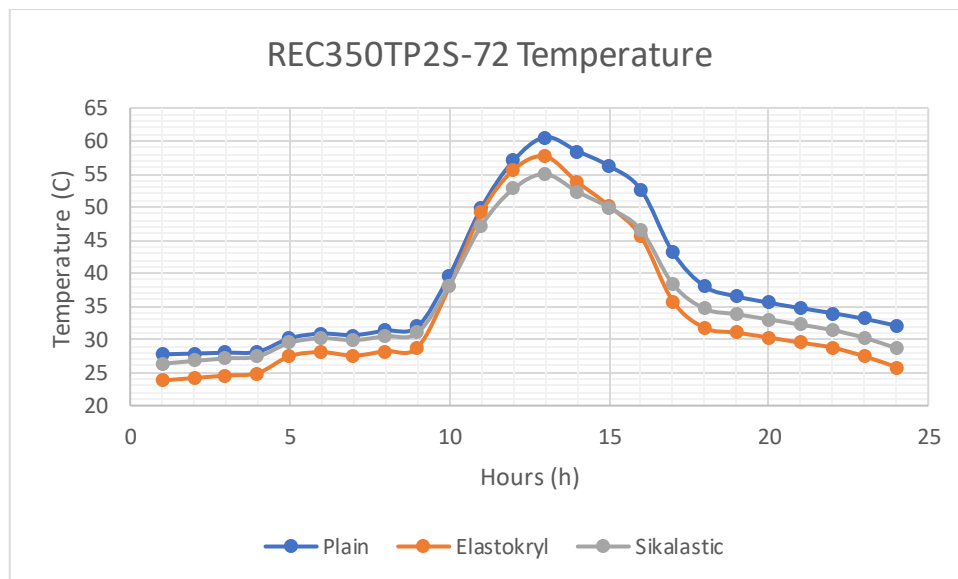
Σύμφωνα με το Διάγραμμα 4.12 που προέκυψε από τις προσομοιώσεις του TRNSYS το φωτοβολταϊκό REC350TP2S-72 η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας του για τα σενάρια με απλή οροφή (Plain), με το υλικό Elastokryl (Elastokryl) και το ψυχρό υλικό Sikalastic-560 (Sikalastic) ανέρχεται στους 35.46°C, 26.82°C και 26.97°C αντίστοιχα.

Ποσοστιαία η πτώσεις αυτές υπολογίζονται ως εξής:

$$\frac{T_{Plain}^{REC} - T_{Elastokryl}^{REC}}{T_{Plain}^{REC}} \cdot 100\% = \frac{35.46 - 26.82}{35.46} \cdot 100\% = 24.37\% \quad (4.19)$$

$$\frac{T_{Plain}^{REC} - T_{Sikalastic}^{REC}}{T_{Plain}^{REC}} \cdot 100\% = \frac{35.46 - 26.97}{35.46} \cdot 100\% = 23.94\% \quad (4.20)$$

- Αποτελέσματα εαρινής ημέρας για το Φ/Β REC350TP2S-72



Διάγραμμα 4.13 Θερμοκρασίες REC350TP2S-72 για καλοκαιρινή ημέρα με και χωρίς ψυχρό υλικό

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 4.13, οι μέγιστες θερμοκρασίες του REC350TP2S-72 για τις προσομοιώσεις που έγιναν με τη χρήση του λογισμικού TRNSYS ανέρχονται στους 60.56°C, 57.66°C και 54.99°C για τα μοντέλα με την απλή οροφή (Plain), για την οροφή με Elastokryl (Elastokryl) και την οροφή με Sikalastic-560 (Sikalastic) αντίστοιχα.

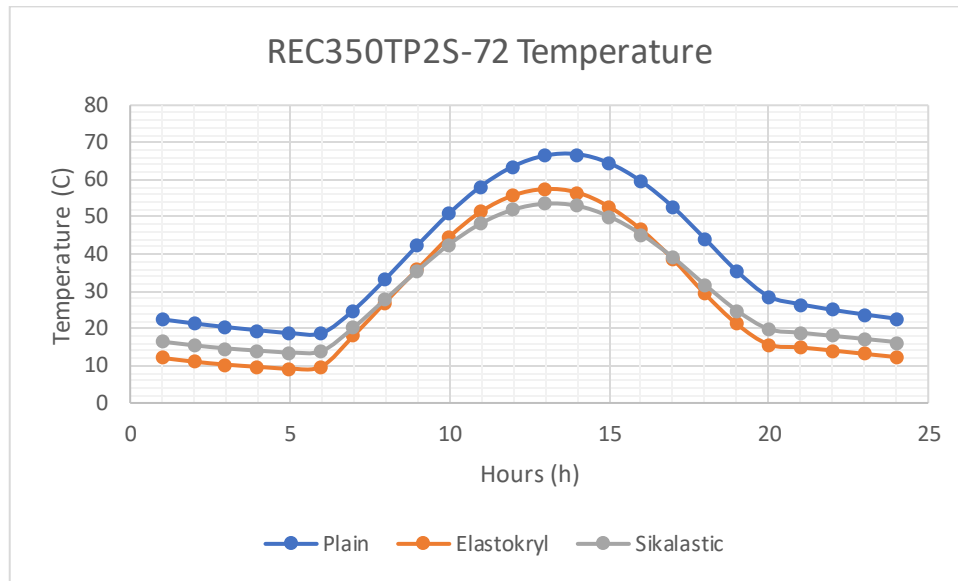
Ποσοστιαία οι μεταβολές της θερμοκρασίας υπολογίζονται ως εξής:

$$\frac{T_{Plain}^{REC} - T_{Elastokryl}^{REC}}{T_{Plain}^{REC}} \cdot 100\% = \frac{60.56 - 57.66}{60.56} \cdot 100\% = 4.79\% \quad (4.21)$$

$$\frac{T_{Plain}^{REC} - T_{Sikalastic}^{REC}}{T_{Plain}^{REC}} \cdot 100\% = \frac{60.56 - 54.99}{60.56} \cdot 100\% = 9.20\% \quad (4.22)$$

[72]

- Αποτελέσματα για το Φ/Β REC350TP2S-72 για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια



Διάγραμμα 4.14 Θερμοκρασίες REC350TP2S-72 για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια με και χωρίς ψυχρό υλικό

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 4.14 το οποίο επίσης προέκυψε μέσω των προσομοιώσεων του λογισμικού TRNSYS, οι ανώτατες θερμοκρασίες του REC350TP2S-72, για την απλή οροφή (Plain), για τον συνδυασμό του με το Elastokryl (Elastokryl) και τον συνδυασμό του με Sikalastic-560 (Sikalastic), ανέρχονται στους 66.87°C, 57.49°C και 53.55°C αντίστοιχα.

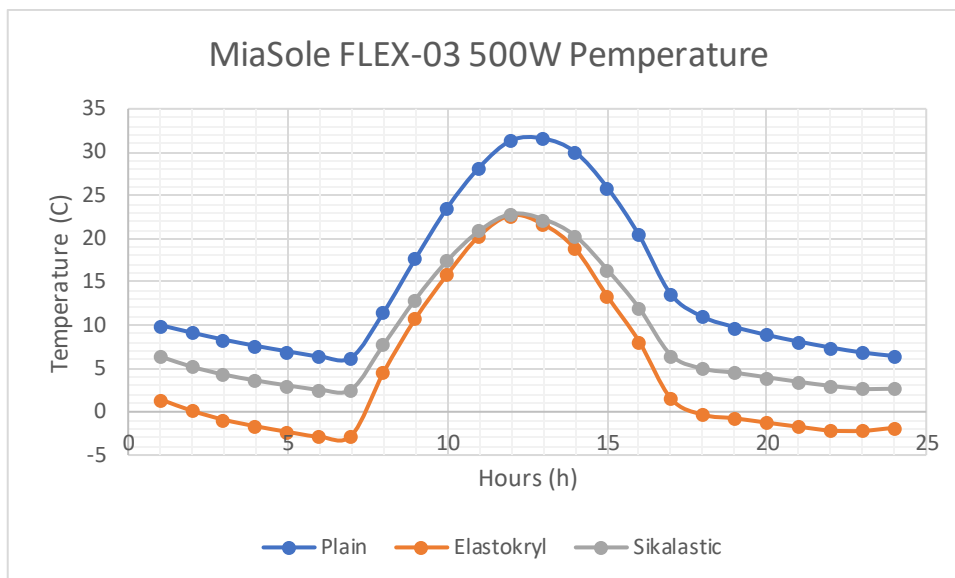
Οι πτώσεις αυτές, ποσοστιαία υπολογίζονται ως εξής:

$$\frac{T_{Plain}^{REC} - T_{Elastokryl}^{REC}}{T_{Plain}^{REC}} \cdot 100\% = \frac{66.87 - 57.49}{66.87} \cdot 100\% = 14.03\% \quad (4.23)$$

$$\frac{T_{Plain}^{REC} - T_{Sikalastic}^{REC}}{T_{Plain}^{REC}} \cdot 100\% = \frac{66.87 - 53.55}{66.87} \cdot 100\% = 19.92\% \quad (4.24)$$

- Αποτελέσματα MiaSolé FLEX-03 500W για χειμερινή ημέρα

Στο Διάγραμμα 4.15 παρακάτω παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες που ανέπτυξε το φωτοβολταϊκό MiaSolé FLEX-03 500W κατά τις ώρες μιας χειμερινής ημέρας. Οι μέγιστες θερμοκρασίες για κάθε περίπτωση, με απλή οροφή (Plain), σε συνδυασμό με το ψυχρό υλικό Elastokryl (Elastokryl) και σε συνδυασμό με το ψυχρό υλικό Sikalastic-560 (Sikalastic) ανέρχονται στους 31.57°C, 22.71°C και 22.86°C αντίστοιχα.



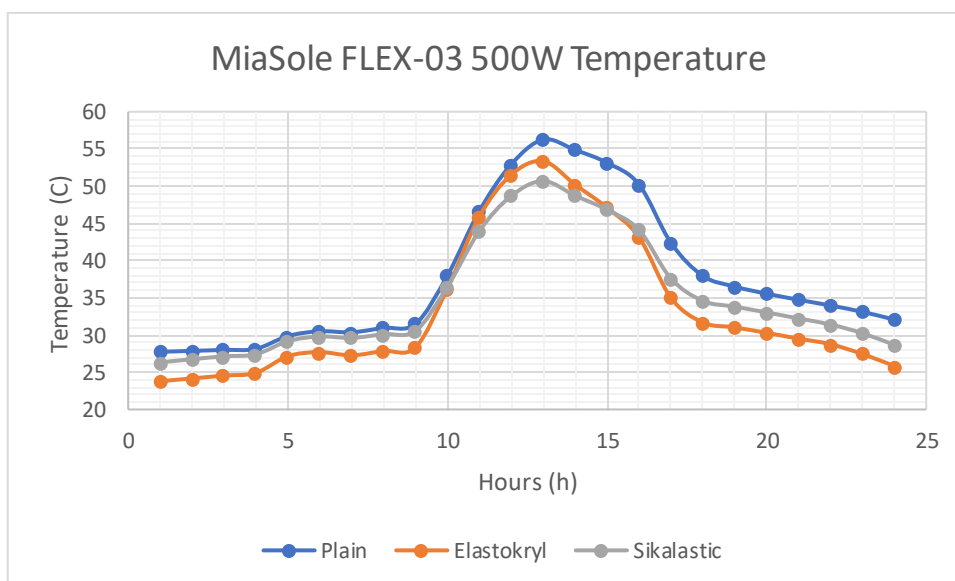
Διάγραμμα 4.15 Θερμοκρασίες MiaSole FLEX-03 500W για χειμερινή ημέρα σε συνδυασμό με και χωρίς ψυχρό υλικό

Οι παραπάνω διαφορές στη θερμοκρασία για κάθε περίπτωση υπολογίζονται ως εξής:

$$\frac{T_{Plain}^{MS} - T_{Elastokryl}^{MS}}{T_{Plain}^{MS}} \cdot 100\% = \frac{31.57 - 22.71}{31.57} \cdot 100\% = 28.06\% \quad (4.25)$$

$$\frac{T_{Plain}^{MS} - T_{Sikalastic}^{MS}}{T_{Plain}^{MS}} \cdot 100\% = \frac{31.57 - 22.86}{31.57} \cdot 100\% = 27.59\% \quad (4.26)$$

- Αποτελέσματα για το Φ/Β MiaSolé FLEX-03 500W μια καλοκαιρινή ημέρα



Διάγραμμα 4.16 Θερμοκρασίες MiaSole FLEX-03 500W για εαρινή ημέρα με και χωρίς ψυχρό υλικό

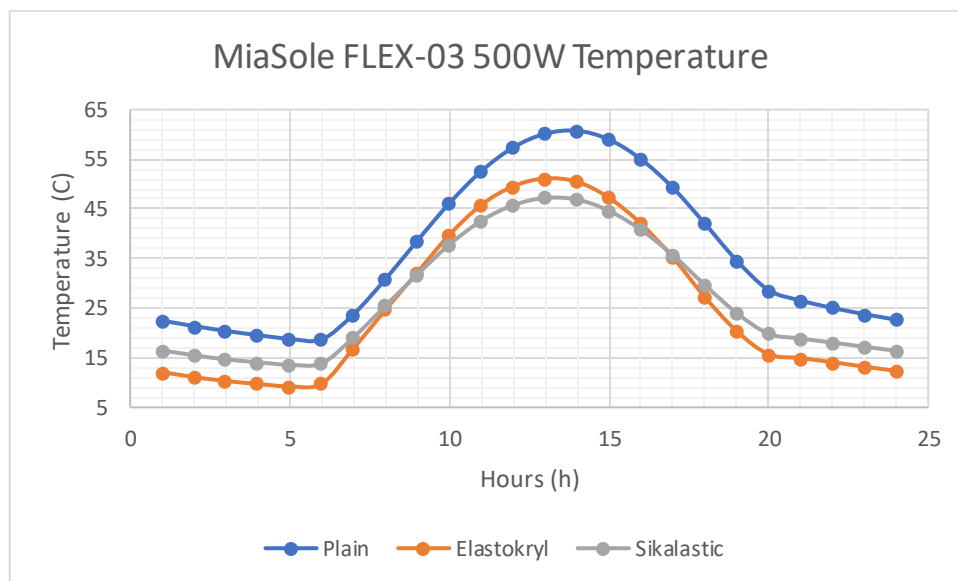
Οι μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν στο φωτοβολταϊκό MiaSolé FLEX-03 500W σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ανέρχονται στους 56.26°C, 53.36°C και 50.69°C για τις περιπτώσεις όπου η οροφή είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα (Plain), για την οροφή με Elastokryl (Elastokryl) και για την οροφή με Sikalastic-560 (Sikalastic) αντίστοιχα.

Οι διαφορές μεταξύ της απλής οροφής και αυτές των ψυχρών υλικών υπολογίζονται ως εξής:

$$\frac{T_{Plain}^{MS} - T_{Elastokryl}^{MS}}{T_{Plain}^{MS}} \cdot 100\% = \frac{56.26 - 53.36}{56.26} \cdot 100\% = 5.15\% \quad (4.27)$$

$$\frac{T_{Plain}^{MS} - T_{Sikalastic}^{MS}}{T_{Plain}^{MS}} \cdot 100\% = \frac{56.26 - 50.69}{56.26} \cdot 100\% = 9.90\% \quad (4.28)$$

- Αποτελέσματα για MiaSolé FLEX-03 500W για την ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια



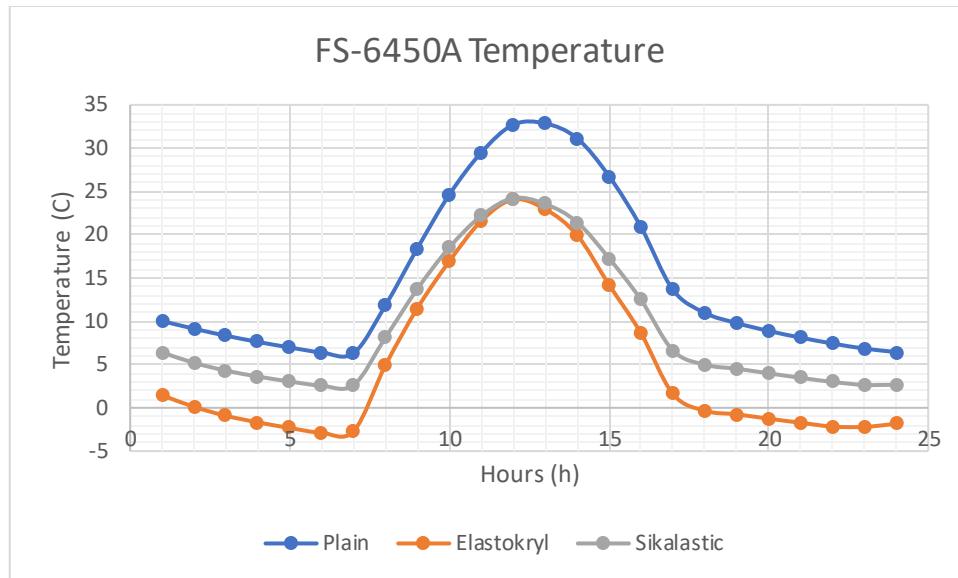
Διάγραμμα 4.17 Θερμοκρασίες MiaSole FLEX-03 500W με και χωρίς ψυχρό υλικό για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια

Όπως προέκυψε, οι μέγιστες θερμοκρασίες, για την περίπτωση της απλής οροφής (Plain), την περίπτωση με Elastokryl (Elastokryl) και την περίπτωση Sikalastic-560 (Sikalastic), ανέρχονται στους 60.74°C, 51.13°C και 47.19°C αντίστοιχα. Επομένως οι διαφορές αυτές ποσοστιαία υπολογίζονται ως εξής:

$$\frac{T_{Plain}^{MS} - T_{Elastokryl}^{MS}}{T_{Plain}^{MS}} \cdot 100\% = \frac{60.74 - 51.13}{60.74} \cdot 100\% = 15.82\% \quad (4.29)$$

$$\frac{T_{Plain}^{MS} - T_{Sikalastic}^{MS}}{T_{Plain}^{MS}} \cdot 100\% = \frac{60.74 - 47.19}{60.74} \cdot 100\% = 22.31\% \quad (4.30)$$

- Αποτελέσματα για το Φ/Β FS-6450A για χειμερινή ημέρα



Διάγραμμα 4.18 Θερμοκρασίες FS-6450A με και χωρίς ψυχρό υλικό για χειμερινή ημέρα

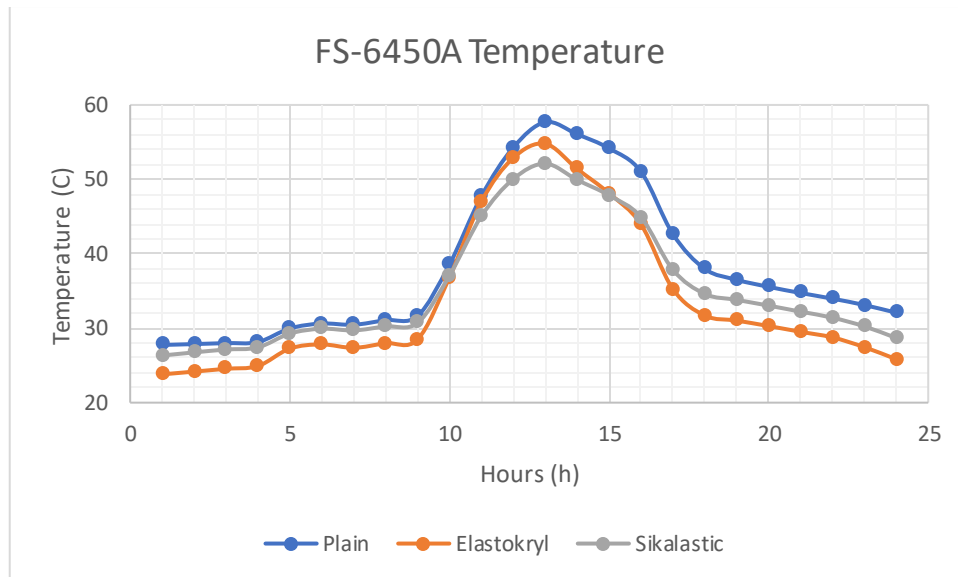
Όπως προέκυψε από τις προσομοιώσεις του λογισμικού TRNSYS για το φωτοβολταϊκό FS-6450A, οι θερμοκρασίες που ανέπτυξε για τις τρεις περιπτώσεις, με απλή οροφή (Plain), οροφή με Elastokryl (Elastokryl) και για την οροφή με Sikalastic-560 (Sikalastic), ανέρχονται στους 32.86°C, 24.07°C και 24.22°C αντίστοιχα. Οι διαφορές αυτές υπολογίζονται ως εξής:

$$\frac{T_{Plain}^{FS} - T_{Elastokryl}^{FS}}{T_{Plain}^{FS}} \cdot 100\% = \frac{32.86 - 24.07}{32.86} \cdot 100\% = 26.75\% \quad (4.31)$$

$$\frac{T_{Plain}^{FS} - T_{Sikalastic}^{FS}}{T_{Plain}^{FS}} \cdot 100\% = \frac{32.86 - 24.22}{32.86} \cdot 100\% = 26.29\% \quad (4.32)$$

- Αποτελέσματα για το Φ/Β FS-6450A για καλοκαιρινή ημέρα

Όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4.19 παρακάτω οι μέγιστες θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο FS-6450A ανέρχονται στους 57.69°C, 54.89°C και 52.12°C για τις περιπτώσεις με απλή οροφή (Plain), για την οροφή με Elastokryl (Elastokryl) και για την οροφή με Sikalastic-560 (Sikalastic) αντίστοιχα.



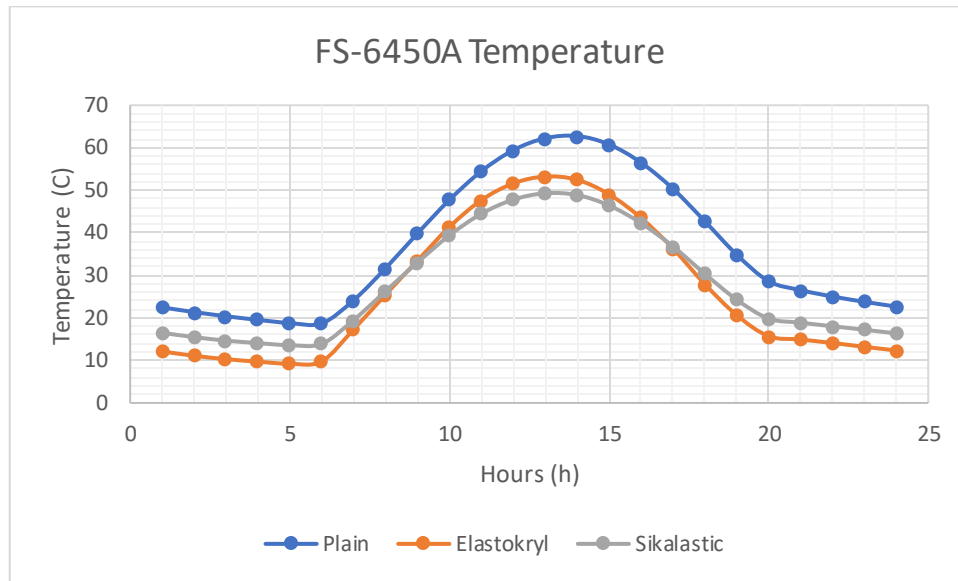
Διάγραμμα 4.19 Θερμοκρασίες FS-6450A με και χωρίς ψυχρό υλικό για ζεστή ημέρα

Οι ποσοστιαίες διαφορές της θερμοκρασίας συγκριτικά υπολογίζονται ως εξής:

$$\frac{T_{Plain}^{FS} - T_{Elastokryl}^{FS}}{T_{Plain}^{FS}} \cdot 100\% = \frac{57.69 - 54.89}{57.69} \cdot 100\% = 4.85\% \quad (4.33)$$

$$\frac{T_{Plain}^{FS} - T_{Sikalastic}^{FS}}{T_{Plain}^{FS}} \cdot 100\% = \frac{57.69 - 52.12}{57.69} \cdot 100\% = 9.66\% \quad (4.34)$$

- Αποτελέσματα για το Φ/Β FS-6450A για την ημέρα με τη μέγιστη ηλιοφάνεια



Διάγραμμα 4.20 Θερμοκρασίες FS-6450A με και χωρίς ψυχρό υλικό για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια

Όπως προέκυψε από τις μοντελοποιήσεις για το FS-6450A, οι μέγιστες θερμοκρασίες που ανέπτυξε είναι 62.77°C στην περίπτωση που είναι τοποθετημένο σε απλή οροφή οπλισμένου σκυροδέματος (Plain), 53.24°C για την περίπτωση που τοποθετηθεί πάνω από το ψυχρό υλικό Elastokryl (Elastokryl) και 49.30°C στην περίπτωση που πίσω του στην οροφή υπάρχει το υλικό Sikalastic-560 (Sikalastic). Επομένως, το ποσοστό διαφοράς των θερμοκρασιών υπολογίζεται ως εξής:

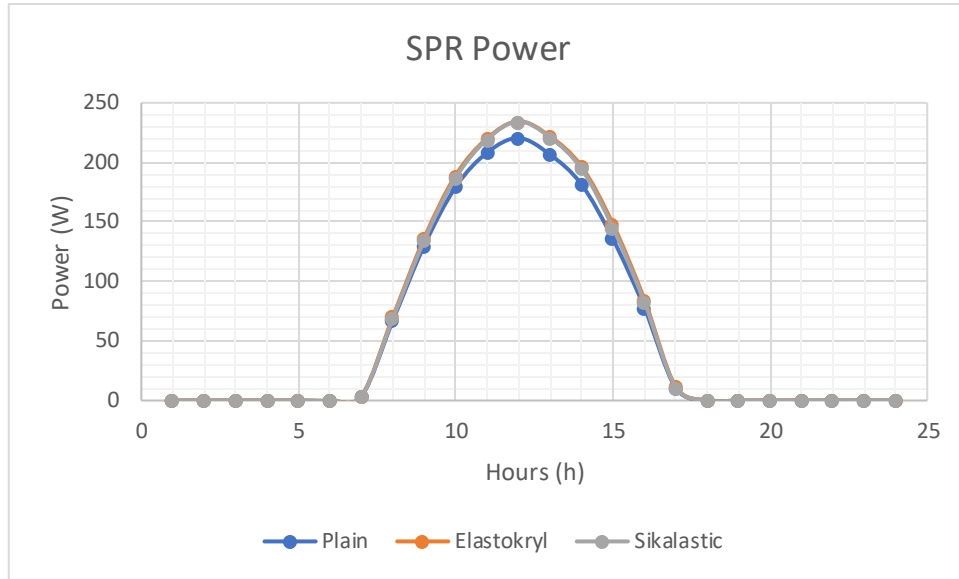
$$\frac{T_{Plain}^{FS} - T_{Elastokryl}^{FS}}{T_{Plain}^{FS}} \cdot 100\% = \frac{62.77 - 53.24}{62.77} \cdot 100\% = 15.18\% \quad (4.35)$$

$$\frac{T_{Plain}^{FS} - T_{Sikalastic}^{FS}}{T_{Plain}^{FS}} \cdot 100\% = \frac{62.77 - 49.30}{62.77} \cdot 100\% = 21.46\% \quad (4.36)$$

Τέλος, γίνονται οι συγκρίσεις για την παραγωγή ισχύος για κάθε φωτοβολταϊκό σύμφωνα με την κατασκευή της οροφής. Αναλυτικότερα, ακολουθούν οι συγκρίσεις παραγωγή ισχύος-κατασκευή οροφής, παραγωγή ισχύος-θερμοκρασία πάνελ, παραγωγή ισχύος-ηλιοφάνεια για χειμερινή, καλοκαιρινή και ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια, σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο που κατασκευάστηκε μέσω Simulink. Όπως προαναφέρθηκε, στις προσομοιώσεις αυτές έγινε η παραδοχή πως η ακτινοβολία προσπίπτει πάντα κάθετα στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού.

- SPR-X21-345 για χειμερινή ημέρα

Η παραγωγή ισχύος για μια κρύα ημέρα του έτους του φωτοβολταϊκού SPR-X21-345 φαίνεται το Διάγραμμα 4.21 παρακάτω όπου στην απλή οροφή (Plain) έχει μέγιστη παραγωγή 220.58 W, στην οροφή με Elastokryl (Elastokryl) η παραγωγή ανέρχεται στα 234.56 W ενώ στην οροφή με το υλικό Sikalastic-560 (Sikalastic) η παραγωγή ανέρχεται στα 234.32 W. Το ποσοστό διαφοράς στην παραγωγή ισχύος υπολογίζεται ως εξής:

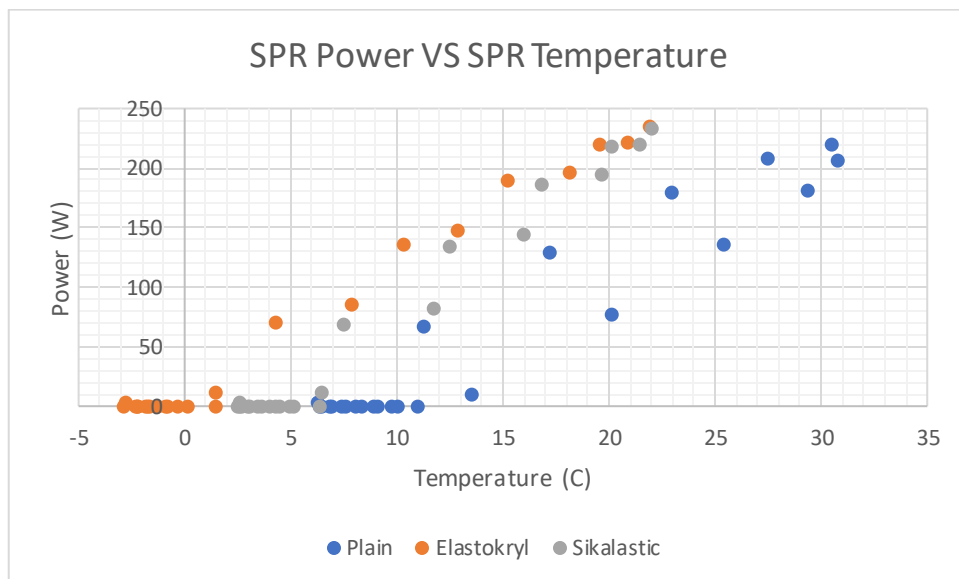


Διάγραμμα 4.21 Ισχύς SPR-X21-345 για χειμερινή ημέρα

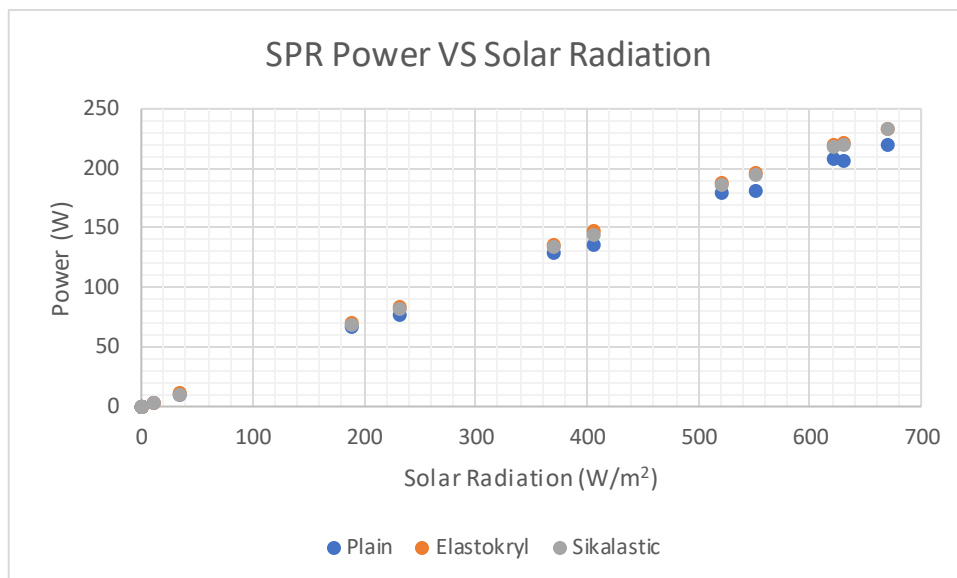
$$\left| \frac{P_{Plain}^{SPR} - P_{Elastokryl}^{SPR}}{P_{Plain}^{SPR}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{220.58 - 234.56}{220.58} \right| \cdot 100\% = 6.34\% \quad (4.27)$$

$$\left| \frac{P_{Plain}^{SPR} - P_{Sikalastic}^{SPR}}{P_{Plain}^{SPR}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{220.58 - 234.32}{220.58} \right| \cdot 100\% = 6.23\% \quad (4.28)$$

Αντίστοιχα για το παρόν φωτοβολταϊκό, παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ παραγωγής ισχύος και θερμοκρασίας του, καθώς επίσης και η σύγκριση μεταξύ παραγωγής ισχύος και προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας:

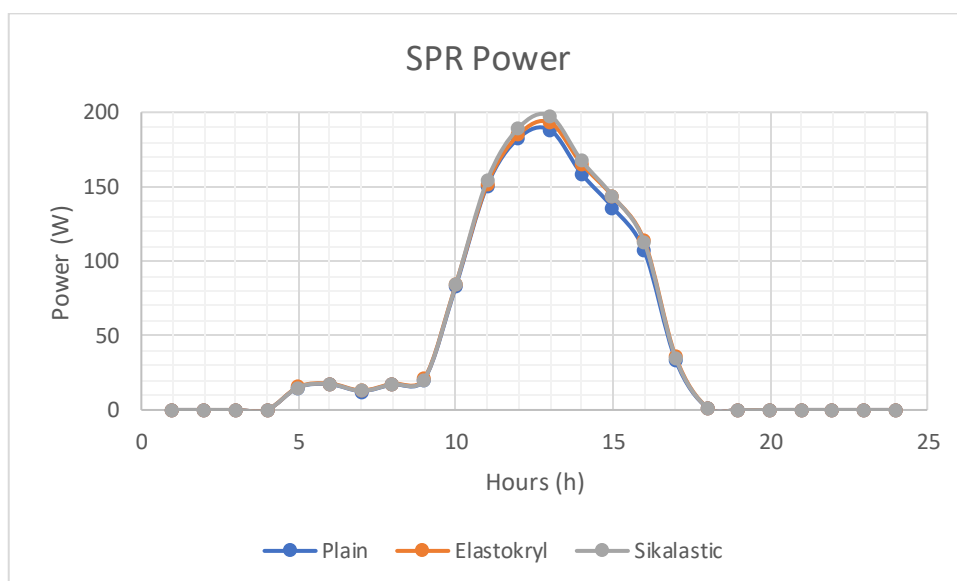


Διάγραμμα 4.22 Διάγραμμα P-T SPR-X21-345 για χειμώνα



Διάγραμμα 4.23 Διάγραμμα P-Solar Irradiance για χειμώνα

- SPR-X21-345 για εαρινή ημέρα



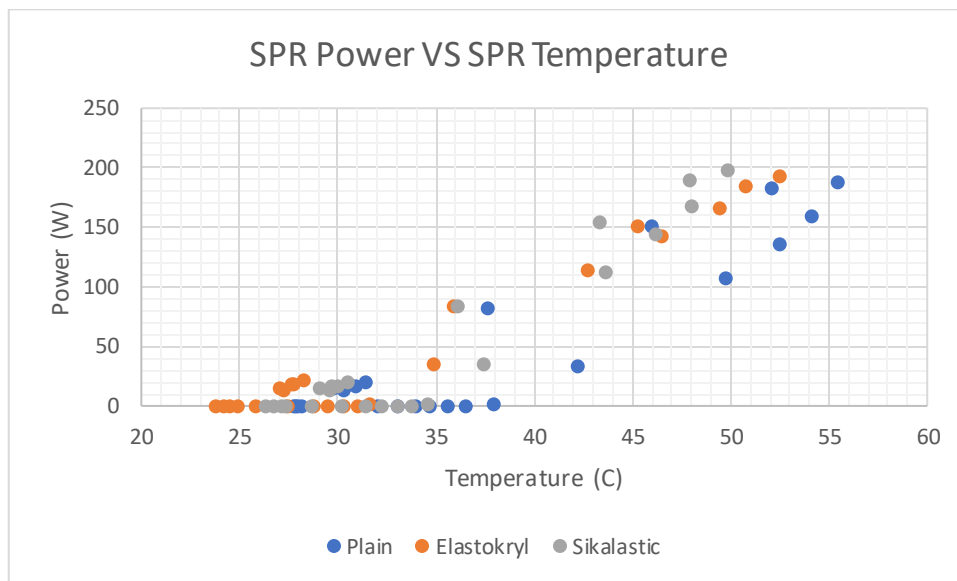
Διάγραμμα 4.24 Ισχύς SPR-X21-345 για καλοκαιρινή ημέρα

Από το Διάγραμμα 4.24 φαίνεται η διαφορά στην παραγωγή του πάνελ αυτού ανάλογα με το ψυχρό υλικό που υπάρχει ή όχι στην οροφή. Για την περίπτωση που η οροφή είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα (Plain) η παραγωγή είναι 188.17 W, για την περίπτωση που υπάρχει στην επιφάνεια της οροφής το ψυχρό υλικό Elastokryl (Elastokryl) η παραγωγή ανέρχεται στα 193.14 W ενώ στην παραγωγή όπου υπάρχει το ψυχρό υλικό Sikalastic-560 (Sikalastic) η παραγωγή ανέρχεται στα 197.71 W. Οι διαφορές, ποσοστιαία φαίνονται ως εξής:

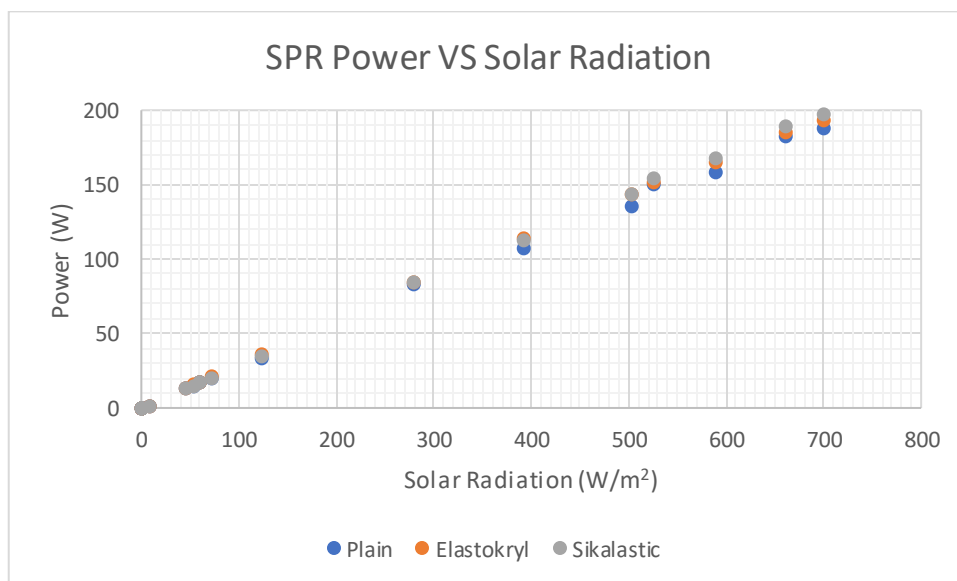
$$\left| \frac{P_{Plain}^{SPR} - P_{Elastokryl}^{SPR}}{P_{Plain}^{SPR}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{188.17 - 193.14}{188.17} \right| \cdot 100\% = 2.64\% \quad (4.29)$$

$$\left| \frac{P_{Plain}^{SPR} - P_{Sikalastic}^{SPR}}{P_{Plain}^{SPR}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{188.17 - 197.71}{188.17} \right| \cdot 100\% = 5.07\% \quad (4.30)$$

Αντίστοιχα, τα Διαγράμματα 4.25 και 4.26 δείχνουν τις συγκρίσεις μεταξύ παραγωγής ισχύος και θερμοκρασίας του πάνελ, και την παραγωγή ισχύος με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

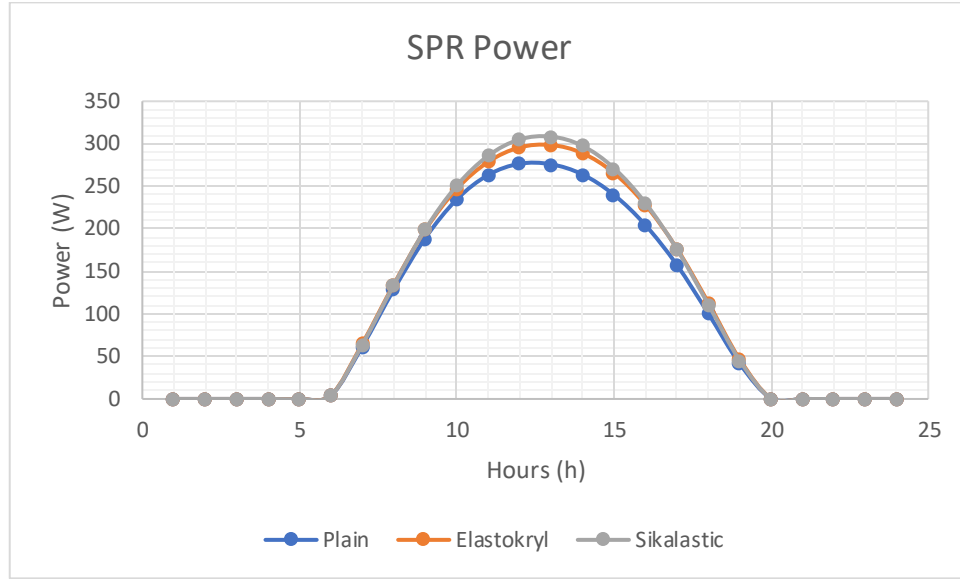


Διάγραμμα 4.25 Διάγραμμα P-T SPR-X21-345 για καλοκαίρι



Διάγραμμα 4.26 Διάγραμμα P-Solar Irradiance SPR-X21-345 για καλοκαίρι

- SPR-X21-345 για την ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια



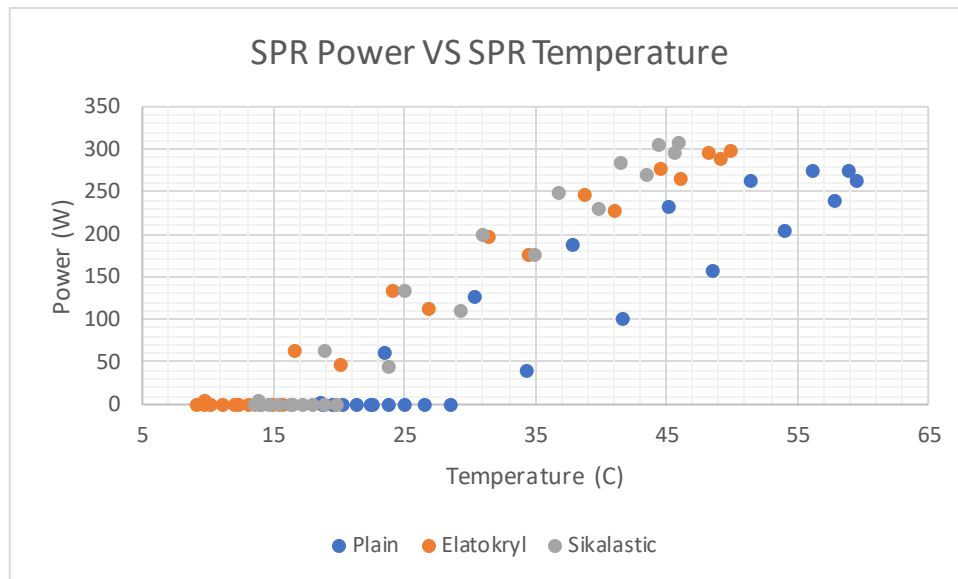
Διάγραμμα 4.27 Ισχύς SPR-X21-345 για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από τις μοντελοποιήσεις η μέγιστη παραγωγή για την ημέρα αυτή του φωτοβολταϊκού είναι 275.98 W, 298.60 W και 308.49 W για τις περιπτώσεις όπου η οροφή είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα (Plain), όπου υπάρχει το υλικό Elastokryl (Elastokryl) και όπου υπάρχει το υλικό Sikalastic-560 (Sikalastic).

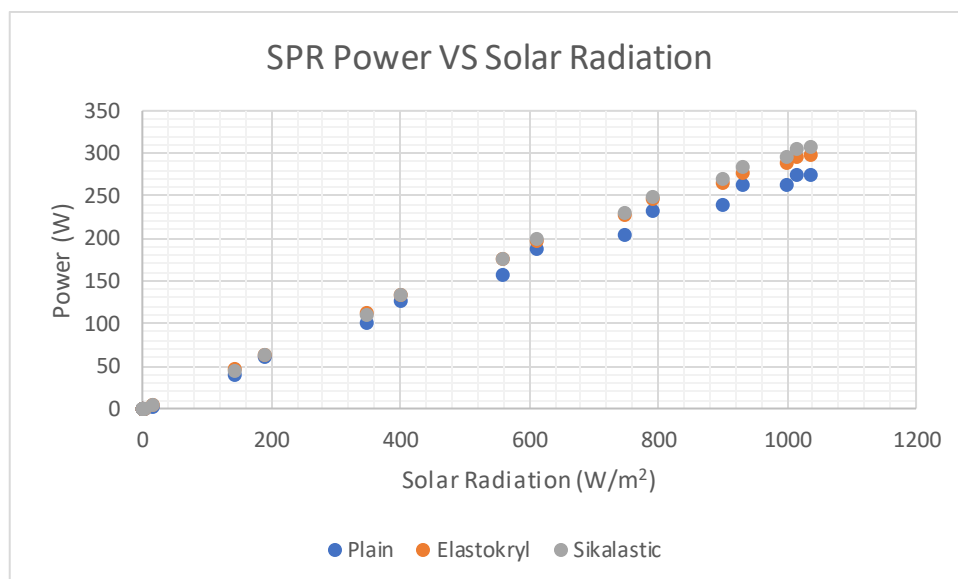
$$\left| \frac{P_{Plain}^{SPR} - P_{Elastokryl}^{SPR}}{P_{Plain}^{SPR}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{275.98 - 298.60}{275.98} \right| \cdot 100\% = 8.20\% \quad (4.31)$$

$$\left| \frac{P_{Plain}^{SPR} - P_{Sikalastic}^{SPR}}{P_{Plain}^{SPR}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{275.98 - 308.49}{275.98} \right| \cdot 100\% = 11.78\% \quad (4.32)$$

Στη συνέχεια παρατίθενται τα γραφήματα από τη σύγκριση της παραγωγής ισχύος με την θερμοκρασία του πάνελ, και τη σύγκριση της παραγωγής ισχύος με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.



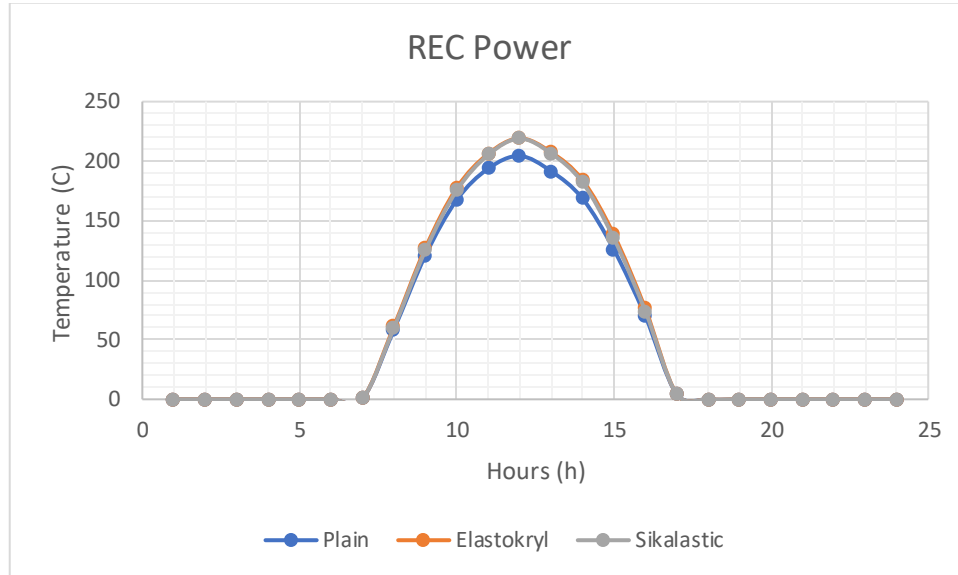
Διάγραμμα 4.28 Διάγραμμα P-T SPR-X21-345 για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια



Διάγραμμα 4.29 Διάγραμμα P-Solar Irradiance για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια

- REC350TP2S-72 για χειμερινή ημέρα

Η μέγιστη παραγωγή του φωτοβολταϊκού αυτού βρέθηκε ίση με 204.35 W, 219.13 W και 218.89 W για τα σενάρια όπου η οροφή είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα (Plain), όπου η οροφή στην εξωτερική της επιφάνεια είναι επικαλυμμένη με Elastokryl (Elastokryl) και στο σενάριο όπου η οροφή είναι επικαλυμμένη με Sikalastic-560 (Sikalastic) αντίστοιχα.



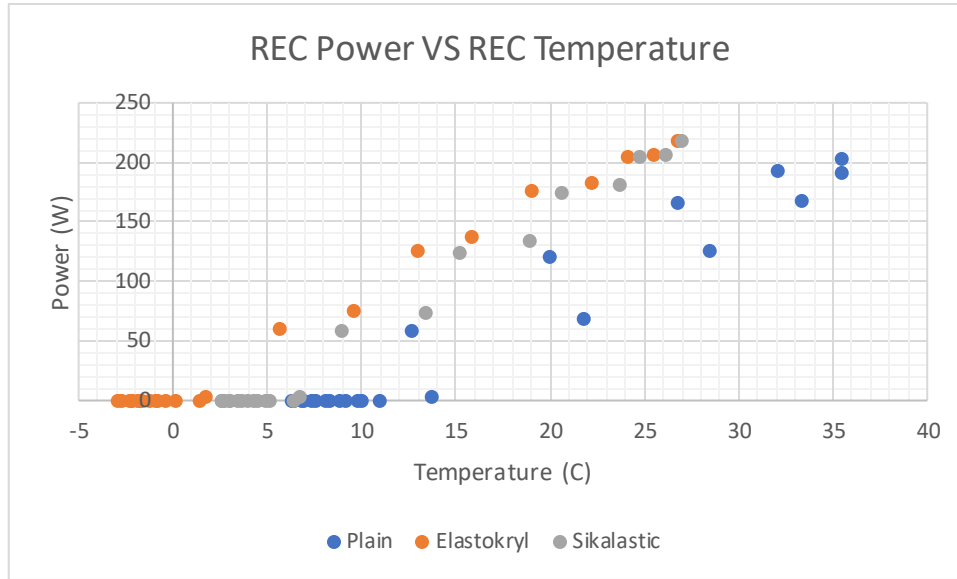
Διάγραμμα 4.30 Ισχύς REC350TP2S-72 για χειμώνα

Οι διαφορές σε ποσοστό υπολογίζονται ως εξής:

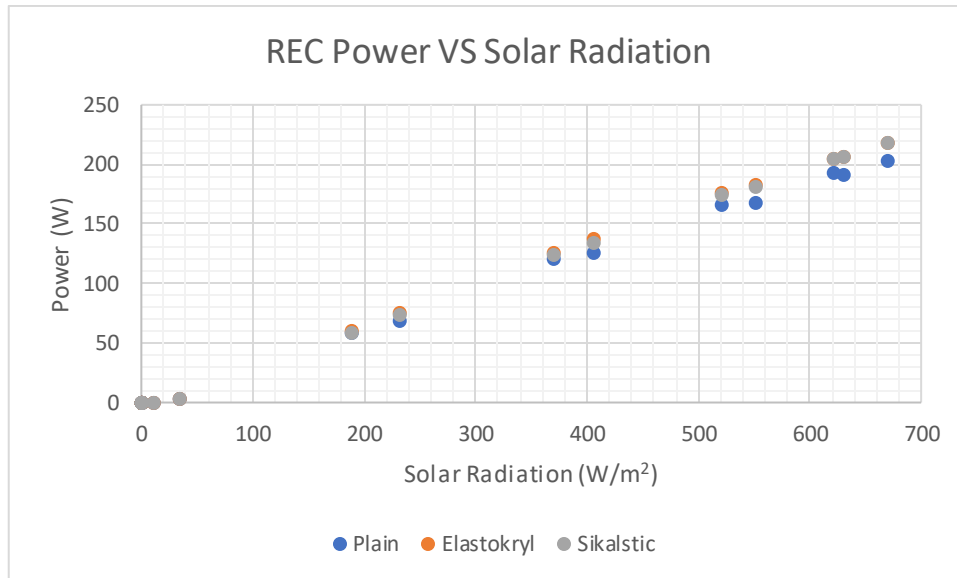
$$\left| \frac{P_{Plain}^{REC} - P_{Elastokryl}^{REC}}{P_{Plain}^{REC}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{204.35 - 219.13}{204.35} \right| \cdot 100\% = 7.23\% \quad (4.33)$$

$$\left| \frac{P_{Plain}^{REC} - P_{Sikalastic}^{REC}}{P_{Plain}^{REC}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{204.35 - 218.89}{204.35} \right| \cdot 100\% = 7.12\% \quad (4.34)$$

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα στα οποία φαίνονται οι συγκρίσεις ισχύς προς θερμοκρασία πάνελ, και ισχύς προς ηλιακή ακτινοβολία.



Διάγραμμα 4.31 Διάγραμμα P-T REC350TP2S-72 για χειμώνα



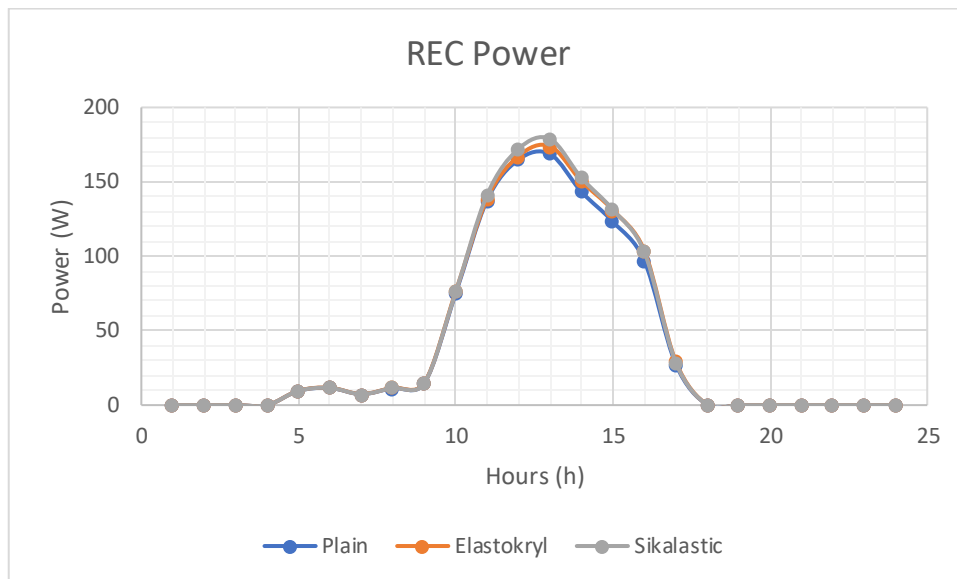
Διάγραμμα 4.32 Διάγραμμα P-Solar Irradiance REC350TP2S-72 για χειμώνα

- REC350TP2S-72 για καλοκαιρινή ημέρα

Η μέγιστη παραγωγή του στοιχείου αυτού για μια καλοκαιρινή ημέρα είναι ίση με 168.72 W, 174.00 W και 178.85 W όπου η οροφή είναι απλή (Plain), υπάρχει το υλικό Elastokryl (Elastokryl) και στην περίπτωση όπου υπάρχει το υλικό Sikalastic-560 (Sikalastic). Οι διαφορές θερμοκρασίας υπολογίζονται ποσοστιαία ως εξής:

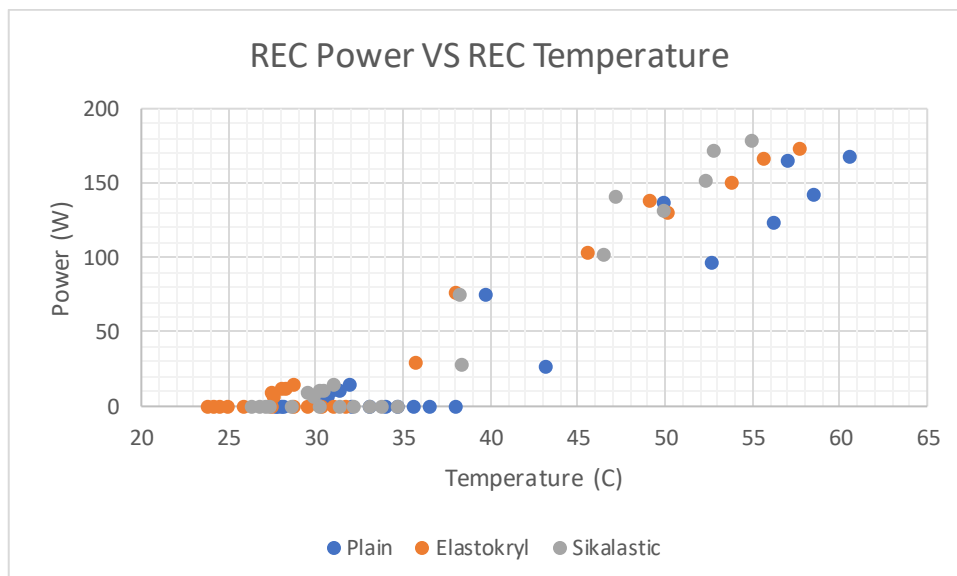
$$\left| \frac{P_{Plain}^{REC} - P_{Elastokryl}^{REC}}{P_{Plain}^{REC}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{168.72 - 174.00}{168.72} \right| \cdot 100\% = 3.13\% \quad (4.35)$$

$$\left| \frac{P_{Plain}^{REC} - P_{Sikalastic}^{REC}}{P_{Plain}^{REC}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{168.72 - 178.85}{168.72} \right| \cdot 100\% = 6.00\% \quad (4.36)$$

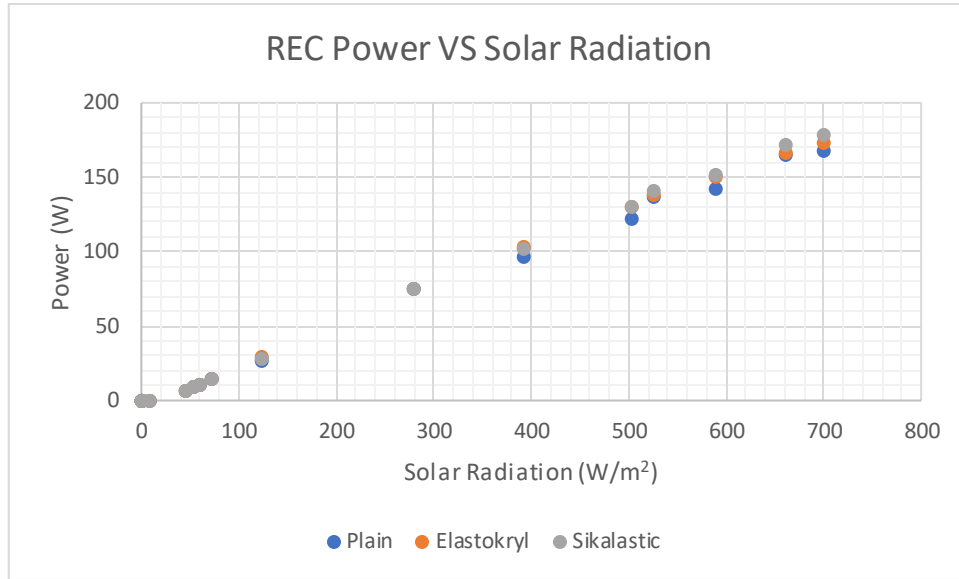


Διάγραμμα 4.33 Ισχύς REC350TP2S-72 για καλοκαίρι

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα Διαγράμματα 4.32 και 4.33 όπου γίνεται η σύγκριση της παραγόμενης ισχύος με τη θερμοκρασία του πάνελ και την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία αντίστοιχα.



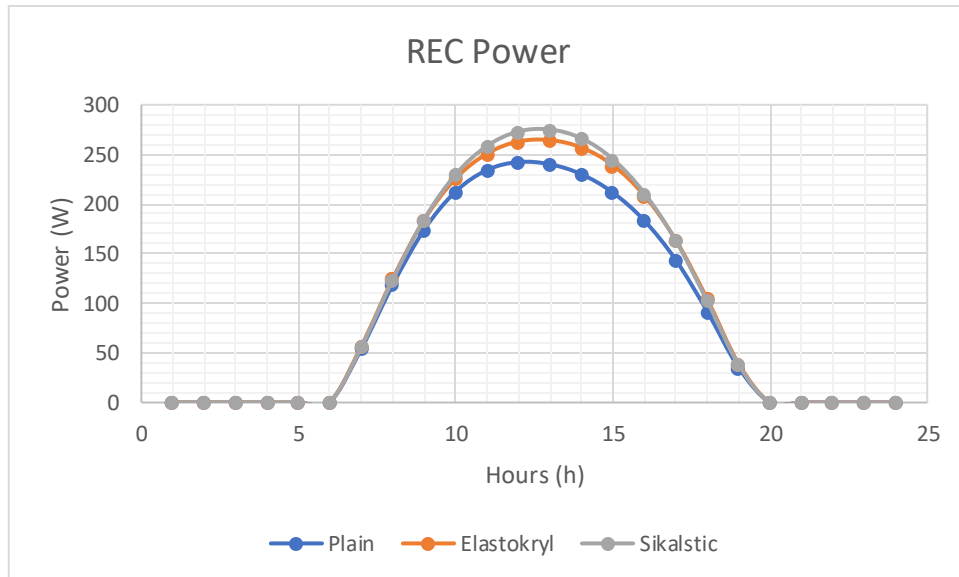
Διάγραμμα 4.34 Διάγραμμα P-T REC350TP2S-72 για καλοκαίρι



Διάγραμμα 4.35 Διάγραμμα P-Solar Irradiance REC350TP2S-72 για καλοκαίρι

- REC350TP2S-72 για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια

Η μέγιστη ισχύ που καταγράφηκε από το μοντέλο σε καθένα από τις τρεις περιπτώσεις, απλή οροφή (Plain), οροφή με Elastokryl (Elastokryl) και οροφή με Sikalastic-560 (Sikalastic), για την ημέρα αυτή ανέρχεται στα 240.07 W, 264.45 W και 275.12 W αντίστοιχα.

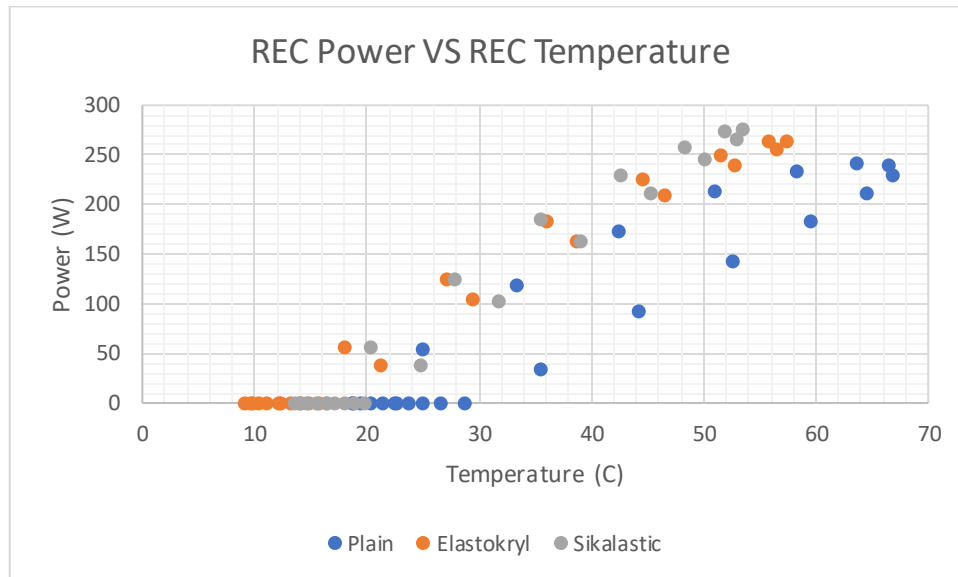


Διάγραμμα 4.36 Ισχύς REC350TP2S-72 για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια

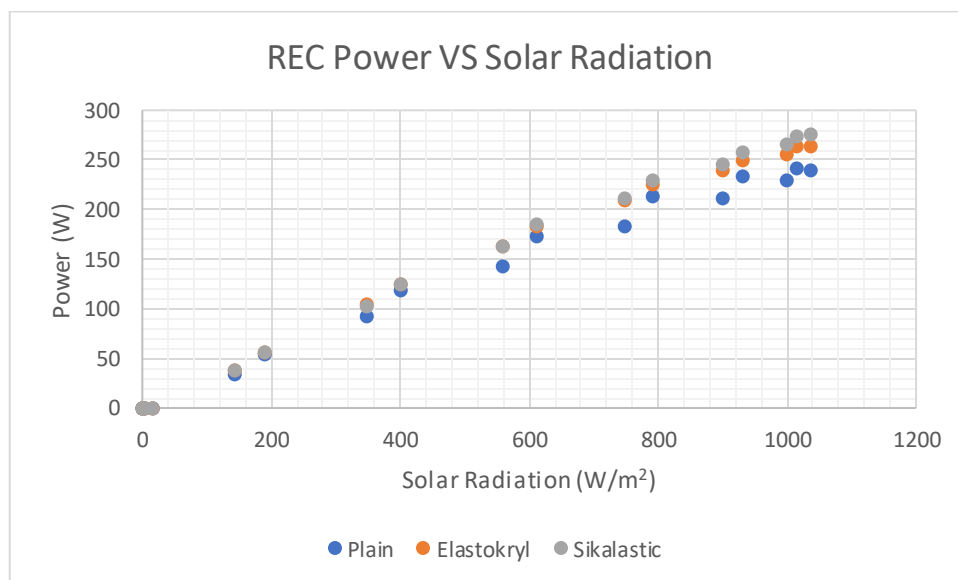
$$\left| \frac{P_{Plain}^{REC} - P_{Elastokryl}^{REC}}{P_{Plain}^{REC}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{240.07 - 264.45}{240.07} \right| \cdot 100\% = 10.16\% \quad (4.37)$$

$$\left| \frac{P_{Plain}^{REC} - P_{Sikalastic}^{REC}}{P_{Plain}^{REC}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{240.07 - 275.12}{240.07} \right| \cdot 100\% = 14.60\% \quad (4.38)$$

Αντίστοιχα παρουσιάζονται και τα διαγράμματα παρακάτω με τις συγκρίσεις της ισχύος με την θερμοκρασία του πάνελ και της ισχύος με την προσπίπτουσα ακτινοβολία.



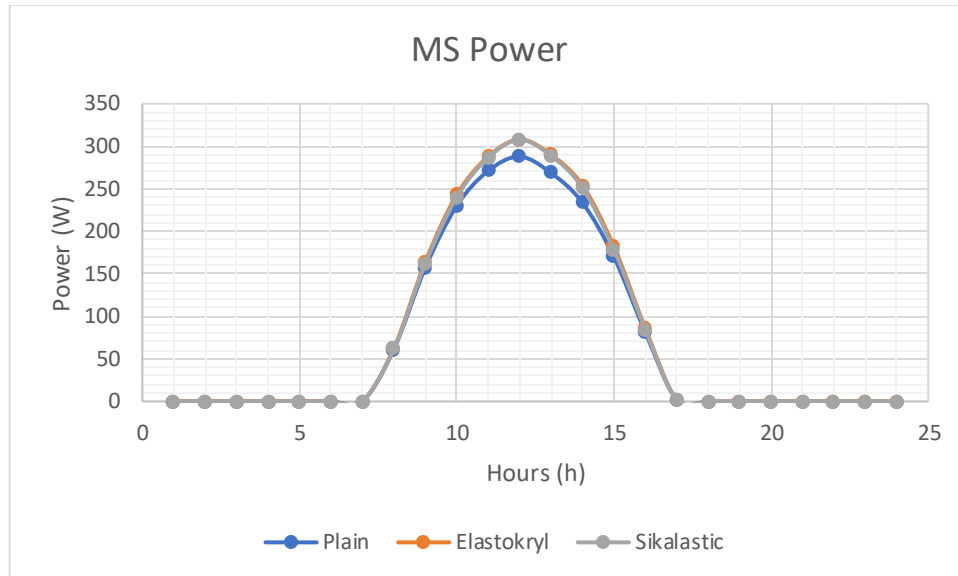
Διάγραμμα 4.37 Διάγραμμα P-T REC350TP2S-72 για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια



Διάγραμμα 4.38 Διάγραμμα P-Solar Irradiance REC350TP2S-72 για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια

- MiaSolé FLEX-03 500W για χειμώνα

Η μέγιστη παραγωγής ισχύος του φωτοβολταϊκού MiaSolé FLEX-03 500W για μια χειμερινή ημέρα είναι ίση με 287.77 W, 307.98 W και 307.63 W όπου οι τιμές αντιστοιχούν στις περιπτώσεις σύμφωνα με την κατασκευή της οροφής, με την πρώτη τιμή να αντιστοιχεί την απλή οροφή οπλισμένου σκυροδέματος (Plain), η δεύτερη τιμή να αντιστοιχεί στην οροφή με το Elastokryl (Elastokryl) και τέλος η επόμενη τιμή να αντιστοιχεί στην οροφή με το Sikalastic-560 (Sikalastic).



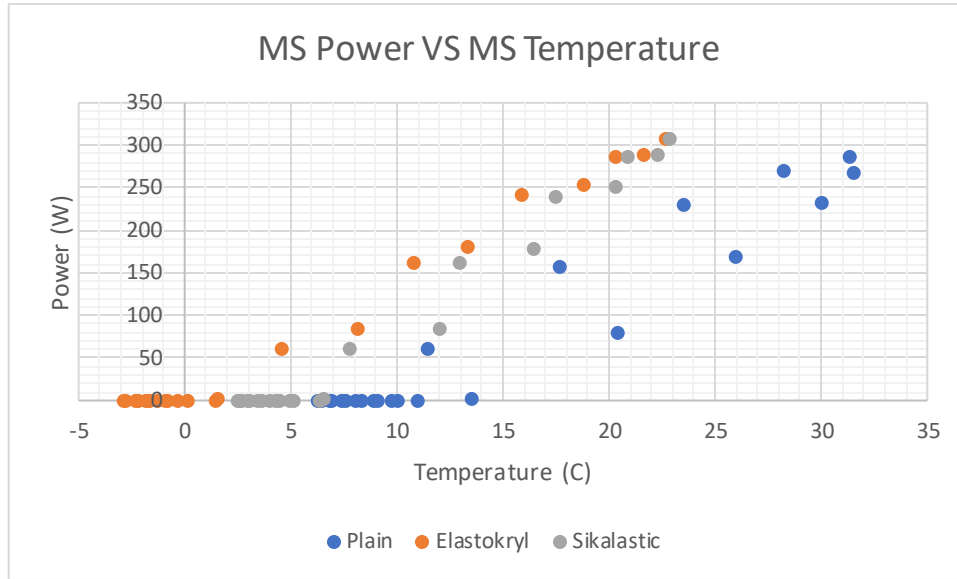
Διάγραμμα 4.39 Ισχύς MiaSole FLEX-03 500W για χειμώνα

Οι ποσοστιαίες διαφορές υπολογίζονται ως εξής:

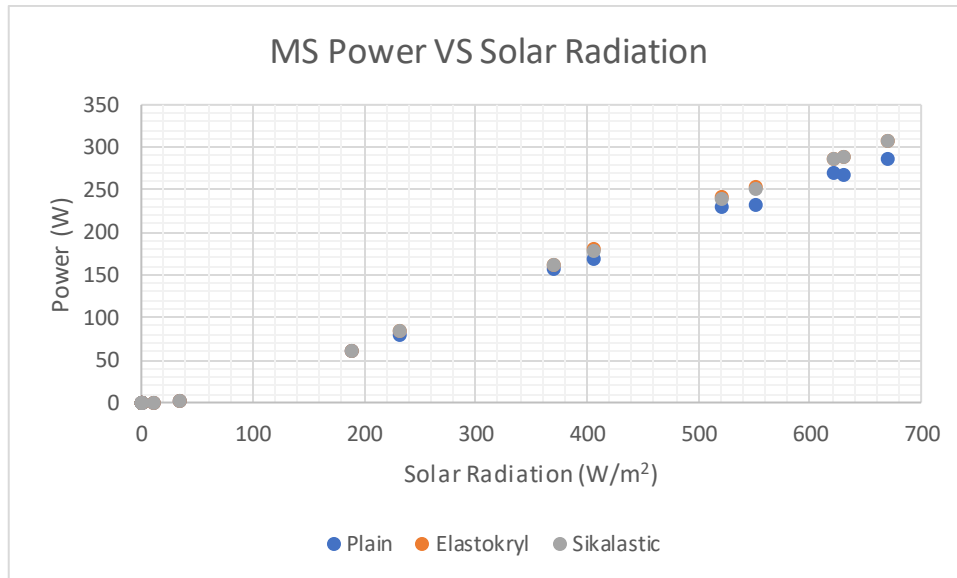
$$\left| \frac{P_{Plain}^{MS} - P_{Elastokryl}^{MS}}{P_{Plain}^{MS}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{287.77 - 307.98}{287.77} \right| \cdot 100\% = 7.02\% \quad (4.39)$$

$$\left| \frac{P_{Plain}^{MS} - P_{Sikalastic}^{MS}}{P_{Plain}^{MS}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{287.77 - 307.63}{287.77} \right| \cdot 100\% = 6.90\% \quad (4.40)$$

Παρακάτω παρατίθεται τα Διαγράμματα 4.39 και 4.40 όπου δείχνουν τη σύγκριση μεταξύ ισχύος και θερμοκρασία του στοιχείου, καθώς επίσης και της ισχύος με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.



Διάγραμμα 4.40 Διάγραμμα P-T MiaSole FLEX-03 500W για χειμώνα



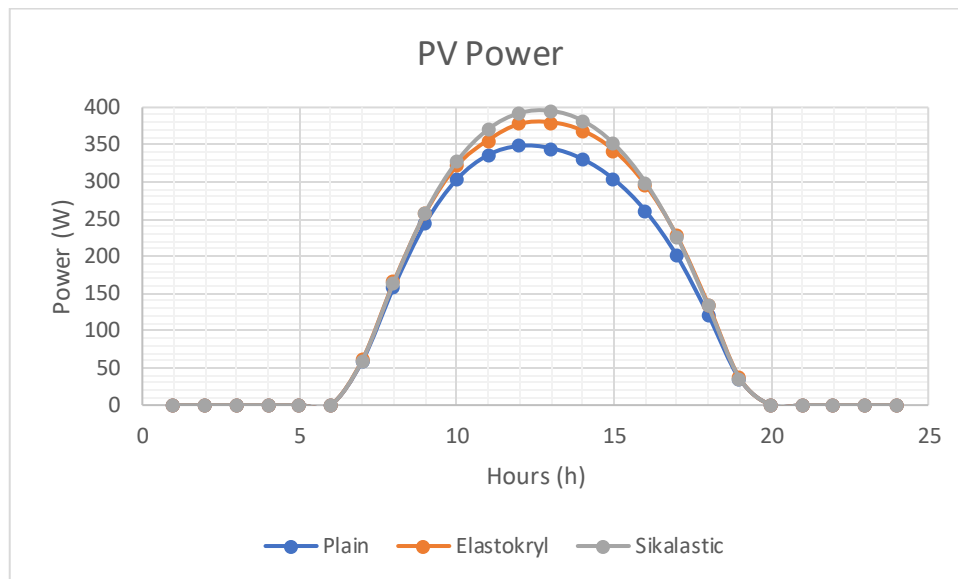
Διάγραμμα 4.41 Διάγραμμα P-Solar Irradiance MiaSole FLEX-03 500W για χειμώνα

- MiaSolé FLEX-03 500W για καλοκαίρι

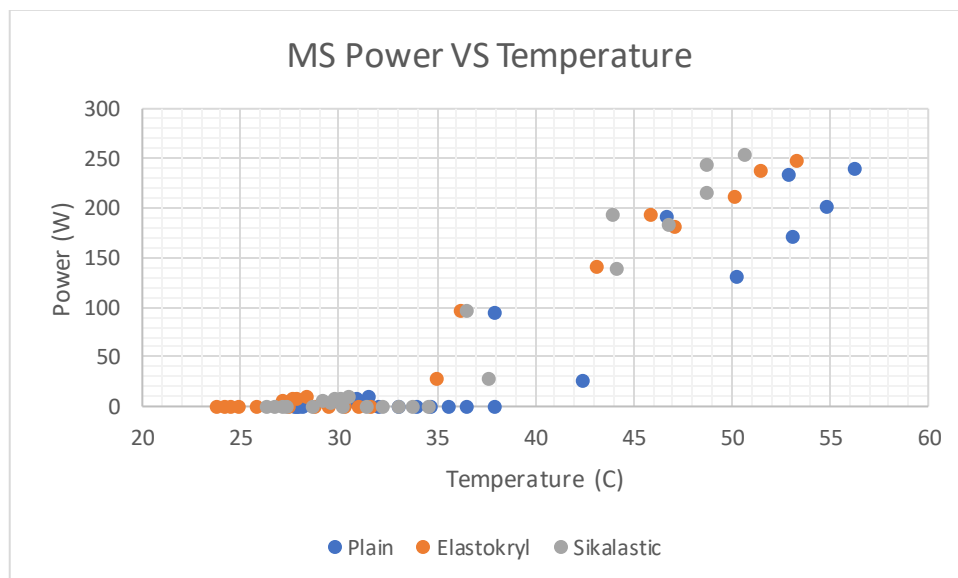
Οι μέγιστες παραγωγές ισχύος του στοιχείου αυτού, για κάθε ένα από τα σενάρια με και χωρίς ψυχρό υλικό, ανέρχονται στα 239.79 W, 247.07 W και 253.77 W όπου οι τιμές αντιπροσωπεύουν την οροφή κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα (Plain), την οροφή με Elastokryl (Elastokryl) και την οροφή με Sikalastic-560 (Sikalastic) αντίστοιχα. Οι μεταβολές στην παραγωγή υπολογίζονται ως εξής:

$$\left| \frac{P_{Plain}^{MS} - P_{Elastokryl}^{MS}}{P_{Plain}^{MS}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{239.79 - 247.07}{239.79} \right| \cdot 100\% = 3.04\% \quad (4.41)$$

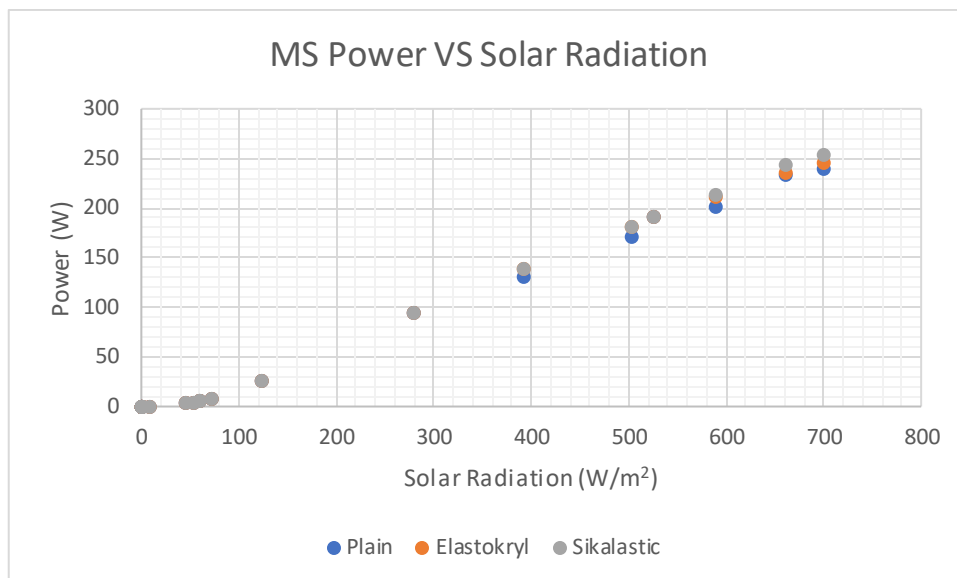
$$\left| \frac{P_{Plain}^{MS} - P_{Sikalastic}^{MS}}{P_{Plain}^{MS}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{239.79 - 253.77}{239.79} \right| \cdot 100\% = 5.83\% \quad (4.42)$$



Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα των συγκρίσεων μεταξύ ισχύος με θερμοκρασία στοιχείου και μεταξύ ισχύος με ηλιακή ακτινοβολία.



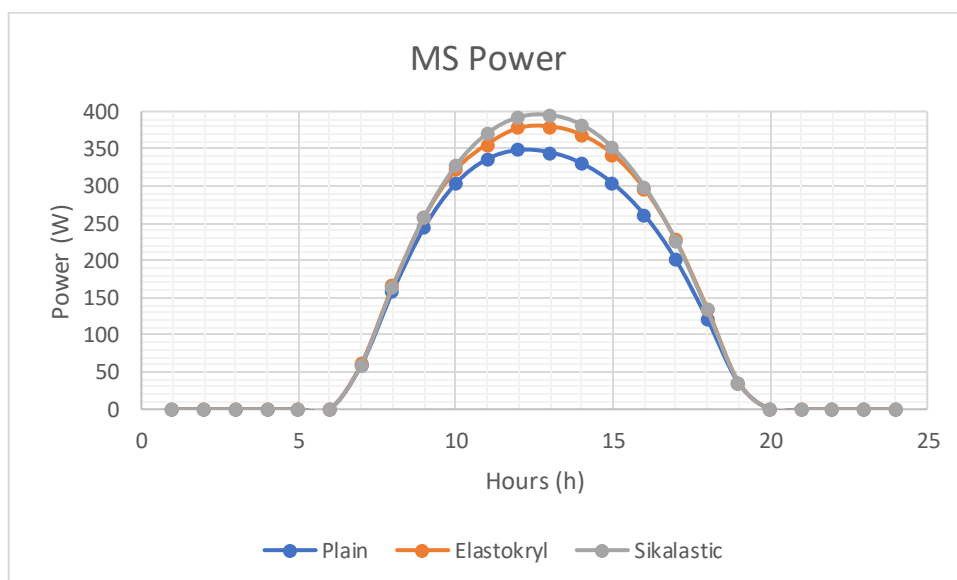
Διάγραμμα 4.42 Διάγραμμα P-T MiaSole FLEX-03 500W για καλοκαίρι



Διάγραμμα 4.43 Διάγραμμα P-Solar Irradiance MiaSole FLEX-03 500W για καλοκαίρι

- MiaSolé FLEX-03 500W για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια

Οι μέγιστες τιμές για την παραγωγή του φωτοβολταϊκού ανέρχονται στα 348.38 W, 380.13 W και 395.43 W για την απλή οροφή (Plain), για την οροφή με Elastokryl (Elastokryl) και για την οροφή με Sikalastic-560 (Sikalastic).



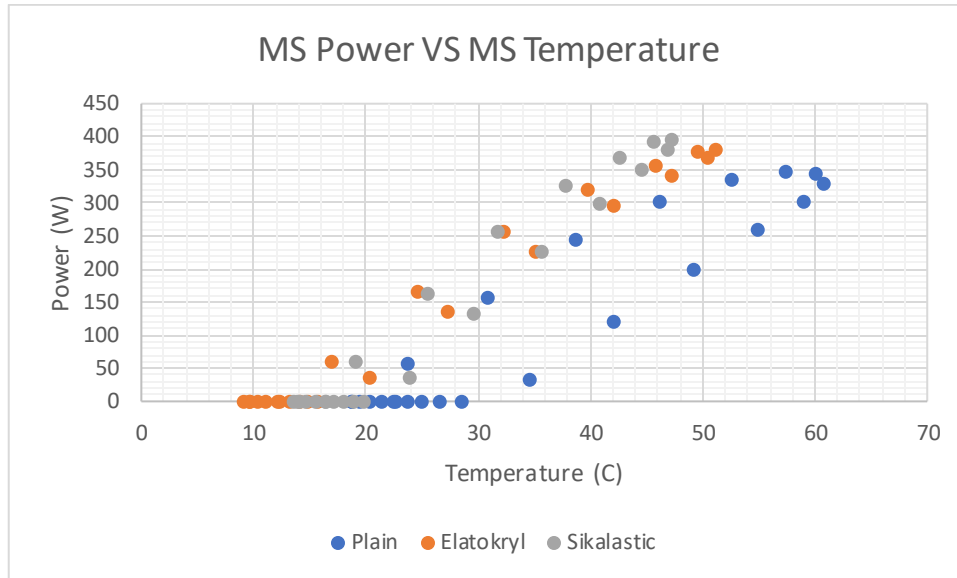
Διάγραμμα 4.44 Ισχύς MiaSole FLEX-03 500W για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια

Οι διαφορές στην παραγωγή ποσοστιαία είναι:

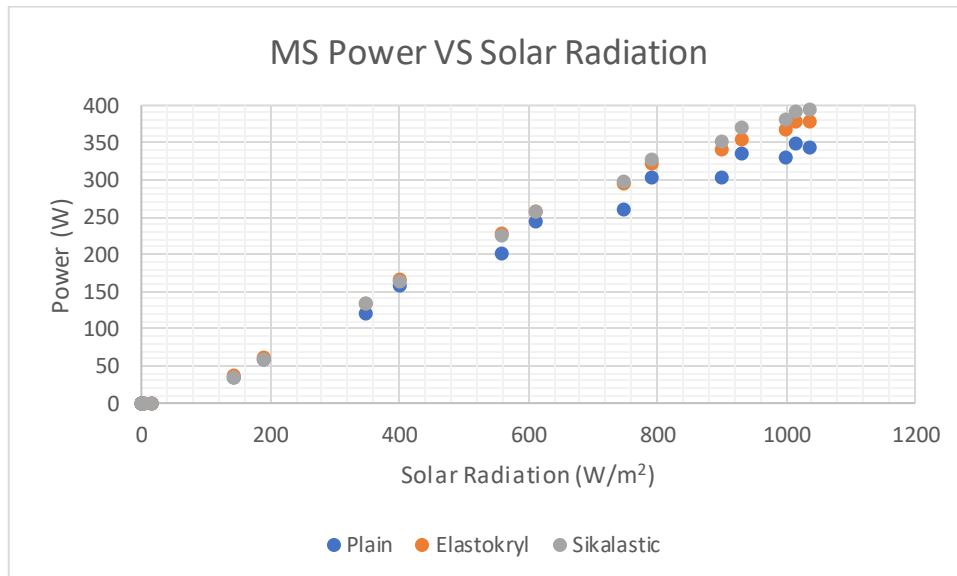
$$\left| \frac{P_{Plain}^{MS} - P_{Elastokryl}^{MS}}{P_{Plain}^{MS}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{348.38 - 380.13}{348.38} \right| \cdot 100\% = 9.11\% \quad (4.43)$$

$$\left| \frac{P_{Plain}^{MS} - P_{Sikalastic}^{MS}}{P_{Plain}^{MS}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{348.38 - 395.43}{348.38} \right| \cdot 100\% = 13.51\% \quad (4.44)$$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα για τις συγκρίσεις μεταξύ της ισχύος και της θερμοκρασίας που αναπτύσσει το πάνελ, καθώς και μεταξύ της ισχύος και της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε αυτό.



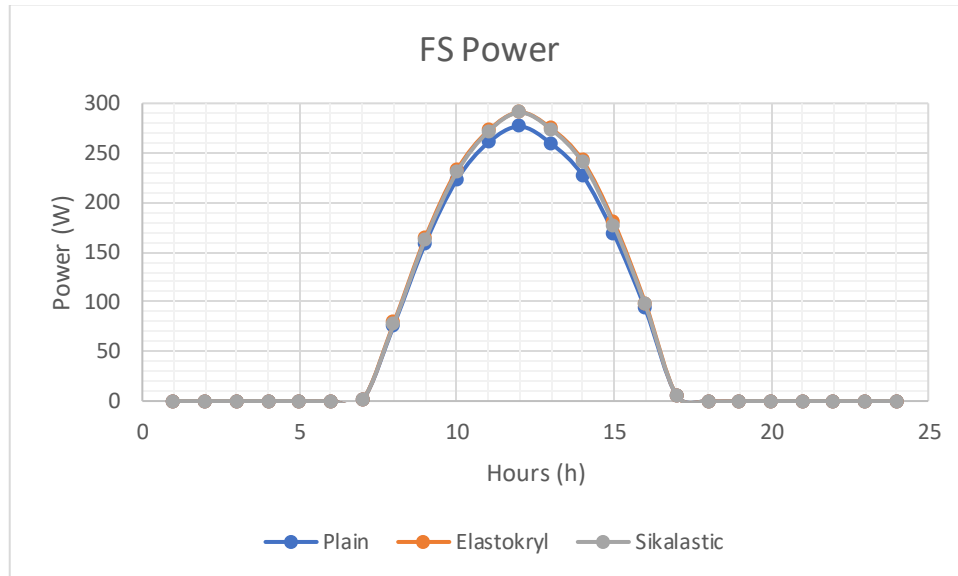
Διάγραμμα 4.45 Διάγραμμα P-T MiaSole FLEX-03 500W για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια



Διάγραμμα 4.46 Διάγραμμα P-Solar Irradiance MiaSole FLEX-03 500W για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια

- FS-6450A για χειμερινή ημέρα

Το φωτοβολταϊκό, σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο, μπόρεσε να παράγει ισχύ μέχρι και 276.66 W, 290.90 W και 290.65 W τη χειμερινή ημέρα για την οποία μοντελοποιήθηκε σύμφωνα με την θερμοκρασία του και την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Οι τιμές αντιστοιχούν, αρχικά στην περίπτωση με την απλή οροφή (Plain), στην περίπτωση με το υλικό Elastokryl (Elastokryl) και τέλος στην περίπτωση με το υλικό Sikalastic-560 (Sikalastic).



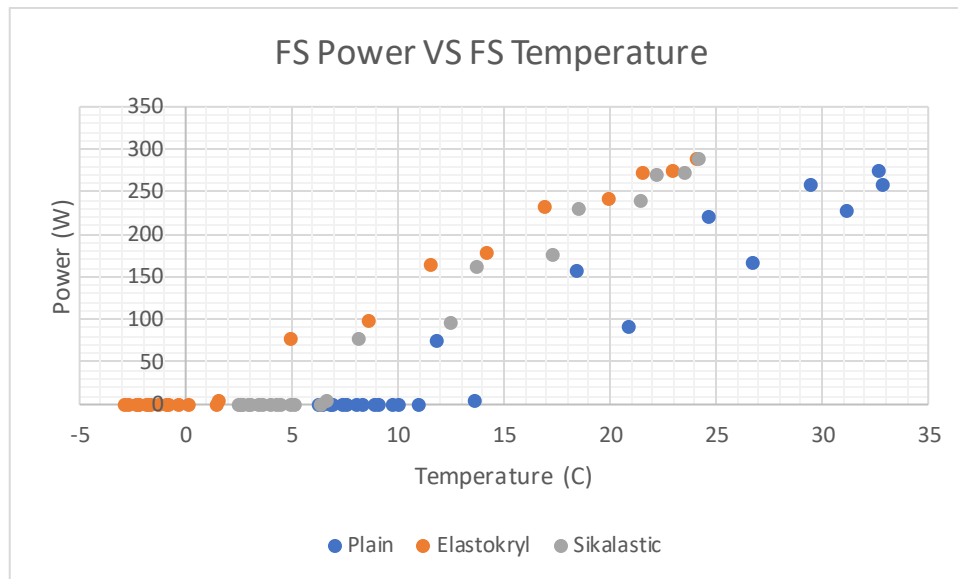
Διάγραμμα 4.47 Ισχύς FS-6450A για χειμώνα

Οι διαφορές παραγωγής σε ποσοστό υπολογίζεται ως εξής:

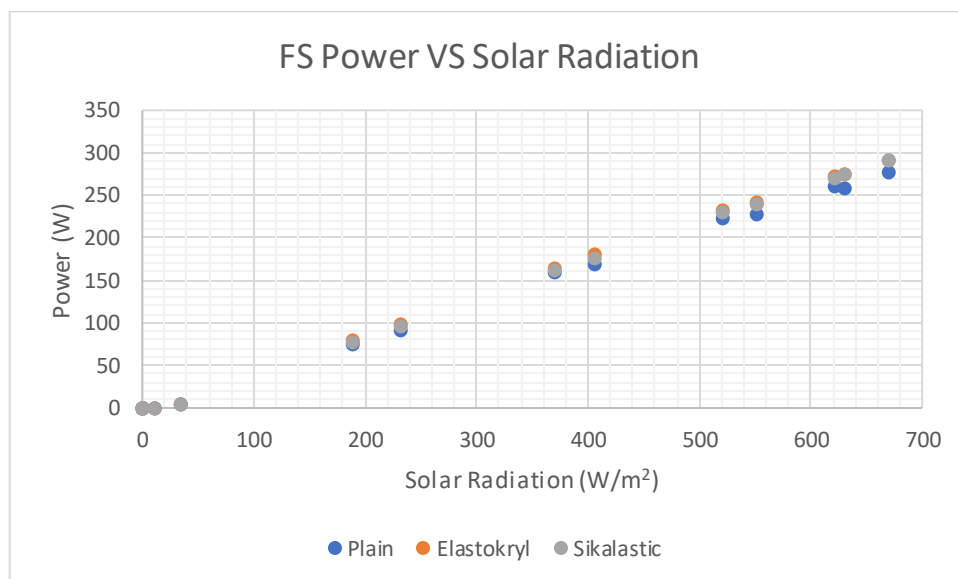
$$\left| \frac{P_{Plain}^{FS} - P_{Elastokryl}^{FS}}{P_{Plain}^{FS}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{276.66 - 290.90}{276.66} \right| \cdot 100\% = 5.15\% \quad (4.45)$$

$$\left| \frac{P_{Plain}^{FS} - P_{Sikalastic}^{FS}}{P_{Plain}^{FS}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{276.66 - 290.65}{276.66} \right| \cdot 100\% = 5.06\% \quad (4.46)$$

Αντίστοιχα παρατίθενται τα διαγράμματα με τις συγκρίσεις της ισχύος με την θερμοκρασία του πάνελ και την προσπίπτουσα ακτινοβολία πάνω του.

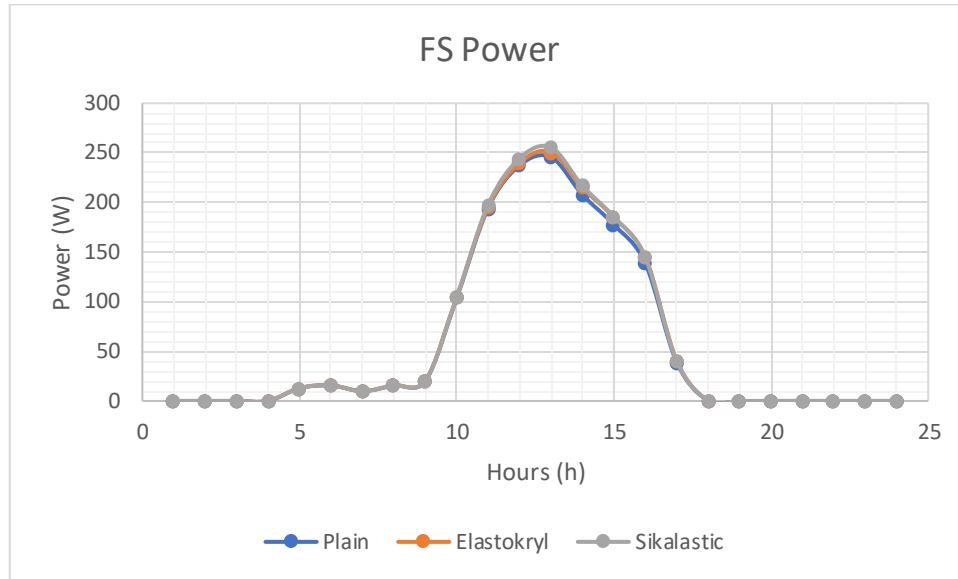


Διάγραμμα 4.48 Διάγραμμα P-T FS-6450A για χειμώνα



Διάγραμμα 4.49 Διάγραμμα P-Solar Irradiance FS-6450A για χειμώνα

- FS-6450A για εαρινή ημέρα



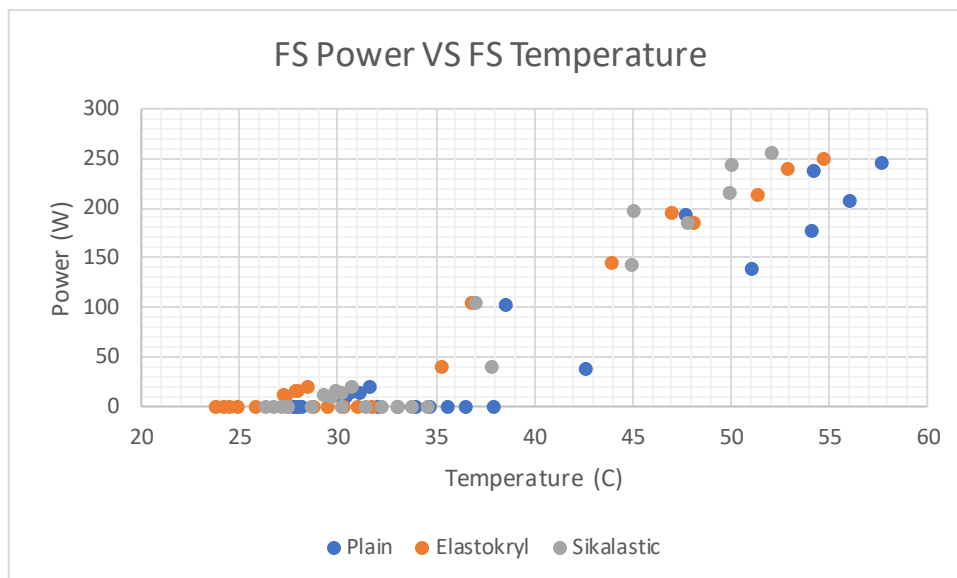
Διάγραμμα 4.50 Ισχύς FS-6450A για καλοκαίρι

Η μέγιστη παραγωγή ισχύος για κάθε περίπτωση είναι ίση με 245.72 W (Plain), 250.87 W (Elastokryl) και 255.60 W (Sikalastic). Επομένως οι μεταβολές σε ποσοστά είναι:

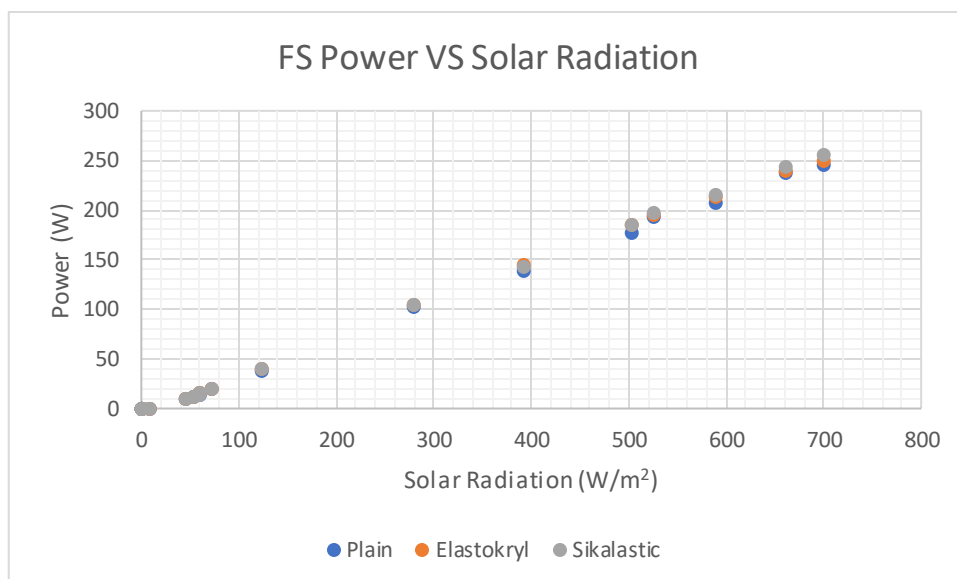
$$\left| \frac{P_{Plain}^{FS} - P_{Elastokryl}^{FS}}{P_{Plain}^{FS}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{245.72 - 250.87}{245.72} \right| \cdot 100\% = 2.10\% \quad (4.47)$$

$$\left| \frac{P_{Plain}^{FS} - P_{Sikalastic}^{FS}}{P_{Plain}^{FS}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{245.72 - 255.60}{245.72} \right| \cdot 100\% = 4.02\% \quad (4.48)$$

Αντίστοιχα παρατίθεται τα διαγράμματα με τις συγκρίσεις μεταξύ ισχύος-θερμοκρασίας πάνελ και μεταξύ ισχύος-προσπίπτουσας ακτινοβολίας



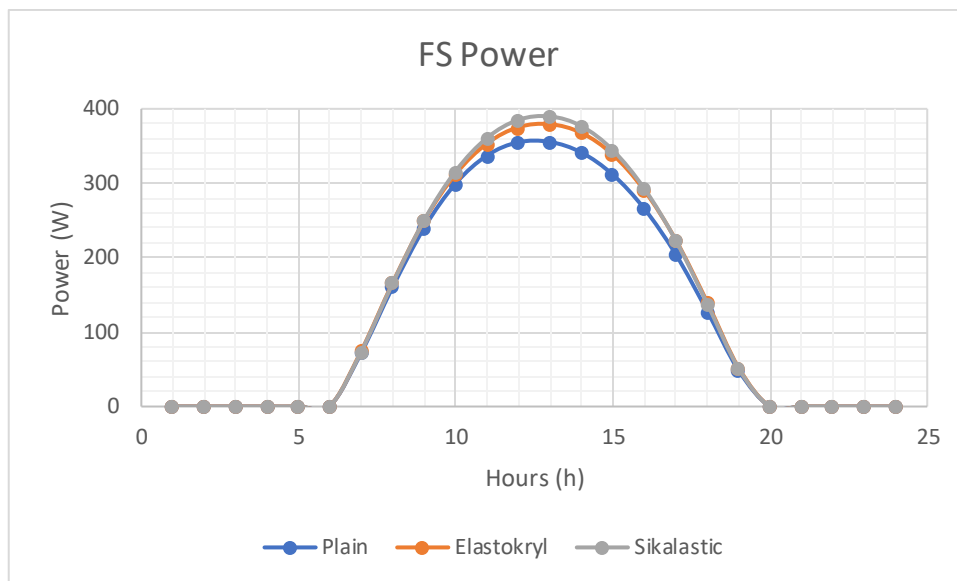
Διάγραμμα 4.51 Διάγραμμα P-T FS-6450A για καλοκαίρι



Διάγραμμα 4.52 Διάγραμμα P-Solar Irradiance FS-6450A για καλοκαίρι

- FS-6450A για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια

Οι τιμές της μέγιστης παραγωγής ισχύος για τα σενάρια με την απλή οροφή (Plain), την οροφή με το ψυχρό υλικό Elastokryl (Elastokryl) και την οροφή με το ψυχρό υλικό Sikalastic-560 (Sikalastic) ανέρχονται στα 355.53 W, 379.66 W και 389.82 W αντίστοιχα για τις οροφές.



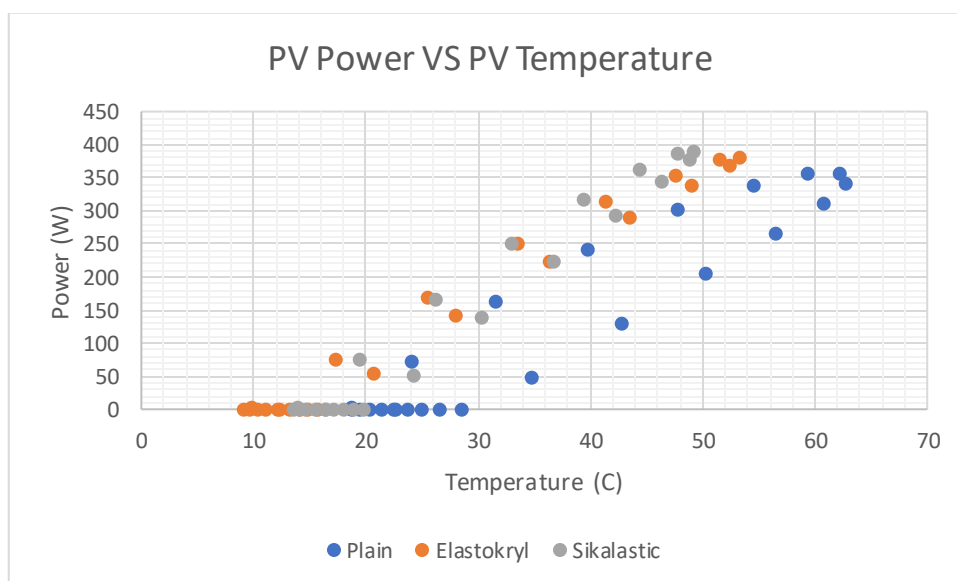
Διάγραμμα 4.53 Ισχύς FS-6450A για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια

Οι ποσοστιαίες μεταβολές υπολογίζονται ως εξής:

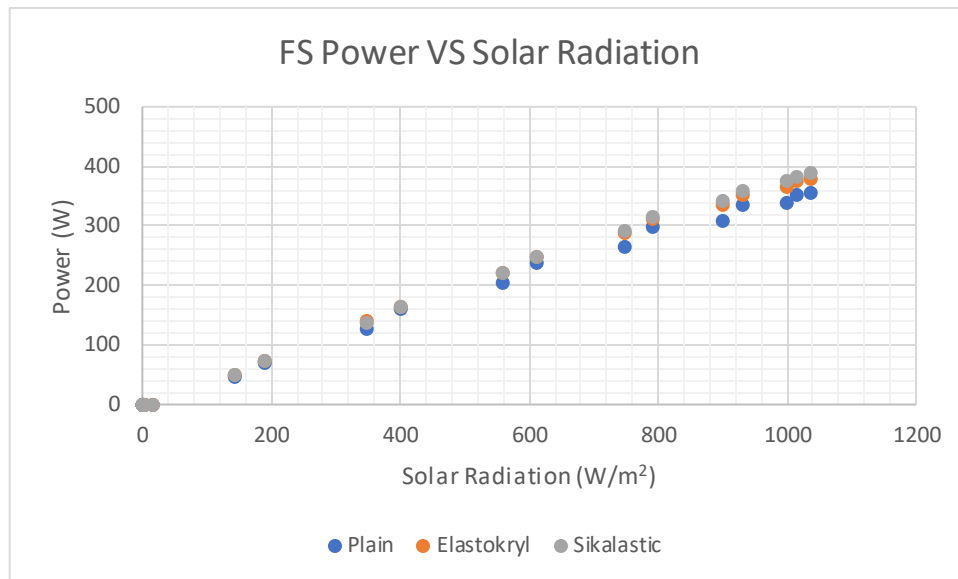
$$\left| \frac{P_{Plain}^{FS} - P_{Elastokryl}^{FS}}{P_{Plain}^{FS}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{355.53 - 379.66}{355.53} \right| \cdot 100\% = 6.79\% \quad (4.49)$$

$$\left| \frac{P_{Plain}^{FS} - P_{Sikalastic}^{FS}}{P_{Plain}^{FS}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{355.53 - 389.82}{355.53} \right| \cdot 100\% = 9.64\% \quad (4.50)$$

Αντίστοιχα παρατίθενται τα διαγράμματα με τις συγκρίσεις της ισχύος μεταξύ της θερμοκρασίας του πάνελ και μεταξύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



Διάγραμμα 4.54 Διάγραμμα P-T FS-6450A για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια



Διάγραμμα 4.55 Διάγραμμα P-Solar Irradiance FS-6450A για ημέρα με μέγιστη ηλιοφάνεια

4.1. Πλεονεκτήματα φωτοβολταϊκών σε κτίρια

Τα φωτοβολταϊκά όπως έχει προαναφερθεί, είναι ένας τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς τη χρήση καυσίμου. Είναι επομένως ένας τρόπος παραγωγής πράσινης ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά έχουν όμως επιπρόσθετα πλεονεκτήματα:

- Σχεδιαστικά πλεονεκτήματα. Σε αυτή την κατηγορία υπάγονται τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν καλύτερη αισθητική, όπως σκίαση από τον Ήλιο κατά τις ώρες με ηλιοφάνεια, θερμική μόνωση, προσθήκη αυτών ως προστατευτικό γυαλί, προστασία από την ηχορύπανση.
- Οικονομικά πλεονεκτήματα. Σε αυτή την κατηγορία υπάγονται τα πλεονεκτήματα που έχουν σκοπό τη μείωση δαπανών κυρίως στην κατανάλωση ρεύματος. Επίσης μετατρέπουν το κτίριο σε ένα πιο ενεργειακά αποδοτικό αφού εξαλείφουν την ανάγκη για μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και επίσης συμβάλλουν στην παραγωγή πράσινης ενέργειας και μετάδοση αυτή στο ευρύ δίκτυο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, εφόσον είναι συνδεδεμένα σε αυτό.
- Περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα. Σε αυτή την κατηγορία συναντώνται τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν όσον αφορά τη μείωση των εκπομπών άνθρακα, καθώς επίσης και του κοινωνικού κόστους του άνθρακα (SCC). [ΠΗΓΗ: DE. Attoye, KA Tabel Aoul, A Hassan, 2017]

4.2. Αποθήκευση ενέργειας

Η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτίρια, δεν στοχεύει την αυτονομία αυτών, όμως στοχεύει στη δημιουργία ενός συστήματος εξοικονόμησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Εφόσον ένα κτίριο χρησιμοποιεί πράσινη ενέργεια έχει ως αποτέλεσμα να καταναλώνει λιγότερη ενέργεια, η οποία προέρχεται από το ευρύ δίκτυο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, τότε κυρίως εξοικονομεί δαπάνες. Όμως στην περίπτωση που δεν είναι συνδεδεμένο στο ευρύ δίκτυο, πρέπει να γίνει η πλήρης αξιοποίηση του συστήματος αυτού. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να υπάρχει ένα σύστημα αποθήκευσης τις ώρες κατά τις οποίες η ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια είναι λιγότερη από αυτή στις ώρες αιχμής. Η συχνότερη λύση αυτού του προβλήματος είναι η χρήση συσσωρευτών, οι οποίοι αποθηκεύουν την ενέργεια όσο αυτή είναι σε περίσσεια ποσότητα από αυτή που καταναλώνεται, όμως διανέμουν όταν απαιτείται. Το σύστημα αυτό χρειάζεται έναν ελεγκτή φόρτισης, ο οποίος ορίζει την φόρτιση και την διακοπή αυτής έτσι ώστε να αποτραπεί η υπερφόρτιση, η οποία προκαλεί φθορές στους συσσωρευτές, ενώ ο ελεγκτής αυξάνει το χρόνο ζωής των συσσωρευτών.

5. Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα και τις συγκρίσεις των κεφαλαίων 3 και 4, ο συνδυασμός των ψυχρών υλικών με φωτοβολταϊκά είναι ένας τρόπος αύξηση της παροχής ισχύος από τα φωτοβολταϊκά καθώς επίσης και ένας τρόπος μείωσης του κόστους ψύξης για τις θερμικές ζώνες οι οποίες βρίσκονται υπό των στεγών με ψυχρά υλικά. Αρχικά τα ψυχρά υλικά είναι ικανά να ψύξουν την εξωτερική επιφάνεια της οροφής, όχι γιατί παρέχουν ψύξη αντλώντας τη θερμότητα από το εξωτερικό μέρος της κατασκευής της οροφής, αλλά γιατί έχουν την ιδιότητα να απωθούν την θερμική ενέργεια που προσπίπτει πάνω τους, επομένως η συσσώρευση θερμότητας σε αυτά είναι μικρότερη από άλλα συμβατικά υλικά κατασκευής ή ακόμα καλύτερα από χρώματα βαφής που προσπαθούν να προσομοιάσουν τα ψυχρά υλικά. Πιο αναλυτικά το υλικό Elastokryl σε μια χειμερινή ημέρα είναι ικανό να μειώσει την μέγιστη θερμοκρασία της οροφής μέχρι 49.72%, ενώ σε μια ζεστή καλοκαιρινή ημέρα παρατηρείται μείωση μέχρι και 8.03%, καθώς σε μια ηλιόλουστη ζεστή επίσης μέρα η πτώση της θερμοκρασίας από το υλικό αυτό ανέρχεται μέχρι και 24.41%. Το δεύτερο υλικό που μελετήθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία είναι το Sikalastic-560, το οποίο κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής ημέρας στα Χανιά, είναι ικανό να μειώσει την θερμοκρασία της οροφής μέχρι και 46.71%, ενώ μια ζεστή ημέρα η μείωση που προσφέρει φτάνει μέχρι και το 13.96%, καθώς μια ηλιόλουστη ζεστή ημέρα η πτώση της θερμοκρασίας μπορεί να φτάσει μέχρι και το 32.88% σύμφωνα με τις προσομοιώσεις του λογισμικού TRNSYS.

Υλικό		Elastokryl	
Ημέρα	Χειμώνας	Καλοκαίρι	Μέγιστη Ακτινοβολία
Πτώση Θερμοκρασίας(%)	49.72	8.03	24.41
Υλικό		Sikalastic-560	
Ημέρα	Χειμώνας	Καλοκαίρι	Μέγιστη Ακτινοβολία
Πτώση Θερμοκρασίας (%)	46.71	13.96	32.88

Πίνακας 5.1 Ποσοστιαίες μεταβολές θερμοκρασίας οροφής από τα υλικά

Η πτώση αυτή της θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος έχει ως θετικό αντίκτυπο στη μείωση της θερμοκρασίας και των φωτοβολταϊκών που είναι τοποθετημένα στην οροφή του κτιρίου που μελετάται. Πιο αναλυτικά το πρώτο μοντέλο που μελετήθηκε είναι το SPR-X21-345 της εταιρίας SunPower. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο αυτό, αντέδρασε θετικά στο συνδυασμό και των δύο ψυχρών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Αρχικά με το Elastokryl για μια κρύα χειμερινή ημέρα η ψύξη που είχε από το γύρω περιβάλλον του έφτασε μέχρι και το 28.95% ενώ η παραγωγή που προσέφερε αυξήθηκε κατά 6.34%. Όσον αφορά το Sikalastic-560 η μείωση της θερμοκρασίας του έφτασε μέχρι και το 28.46% καθώς η παραγωγή του αυξήθηκε κατά 6.23%. Το ίδιο στοιχείο για μια ζεστή ημέρα του καλοκαιριού σε συνδυασμό με το Elastokryl είχε πτώση θερμοκρασίας μέχρι και 27.00% καθώς η παραγωγή του αυξήθηκε κατά 2.64%, ενώ ο συνδυασμός του με το Sikalastic-560 είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας του μέχρι και 31.71% ενώ η παραγωγή του αυξήθηκε κατά 5.07%. Τα αποτελέσματα για το SPR-X21-345 έδειξαν πως, για μια ημέρα με πλήρη ηλιοφάνεια, η θερμοκρασία του είχε πτώση 16.23% και η παραγωγή του αυξήθηκε κατά 8.20%, ενώ αντίστοιχα με το Sikalastic-560 η πτώση της θερμοκρασίας του είναι στο 22.85% και η αύξηση της παραγωγής του ανέρχεται στο 11.78%.

SunPower SPR-X21-345			
Ημέρα	Υλικό	Πτώση Θερμοκρασίας (%)	Αύξηση Παραγωγής (%)
Χειμώνας	Elastokryl	28.95%	6.34%
	Sikalastic-560	28.46%	6.23%
Καλοκαίρι	Elastokryl	27.00%	2.64%
	Sikalastic-560	31.71%	5.07%
Μέγιστη Ηλιοφάνεια	Elastokryl	16.23%	8.20%
	Sikalastic-560	22.85%	11.78%

Πίνακας 5.2 Ποσοστά μεταβολής θερμοκρασίας και παραγωγής SPR-X21-345

Όσον αφορά το φωτοβολταϊκό REC350TP2S-72 της εταιρίας REC Solar μια κρύα ημέρα στα Χανιά, σε συνδυασμό με το υλικό Elastokryl έχει πτώση στη θερμοκρασία του μέχρι και 24.37% και αύξηση στην παραγωγή του έως και 7.23%, ενώ σε συνδυασμό με το υλικό Sikalastic-560 η πτώση της θερμοκρασίας του φτάνει μέχρι και 23.94% καθώς αυτή η πτώση έχει ως αποτέλεσμα στην αύξηση της παραγωγής του μέχρι και 7.12%. Σε μια ζεστή ημέρα του καλοκαιριού η παρατηρείται πτώση στη θερμοκρασία του μέχρι και 4.79% καθώς η παραγωγή του αυξάνεται κατά 3.13% όταν αυτό συνδυάζεται με το Elastokryl, ενώ όταν συνδυάζεται με το Sikalastic-560 η πτώση της θερμοκρασίας του είναι 9.20% ενώ ταυτόχρονα η αύξηση της παραγωγής του είναι 6.00%. Στην περίπτωση όπου υπάρχει μέγιστη προσπίπτουσα ακτινοβολία πάνω του, με το Elastokryl η πτώση της θερμοκρασίας του ανέρχεται στο 14.03% ενώ η παραγωγή του αυξάνεται κατά 10.16%, και σε συνδυασμό με το Sikalastic-560 η πτώση στη θερμοκρασία του παρατηρείται να είναι ίση με 19.92% καθώς η αύξηση στην παραγωγή του ανέρχεται στο 14.60%.

REC Solar REC350TP2S-72			
Ημέρα	Υλικό	Πτώση Θερμοκρασίας (%)	Αύξηση Παραγωγής (%)
Χειμώνας	Elastokryl	24.37%	7.23%
	Sikalastic-560	23.94%	7.12%
Καλοκαίρι	Elastokryl	4.79%	3.13%
	Sikalastic-560	9.20%	6.00%
Μέγιστη Ηλιοφάνεια	Elastokryl	14.03%	10.16%
	Sikalastic-560	19.92%	14.60%

Πίνακας 5.3 Ποσοστά μεταβολής θερμοκρασίας και παραγωγής REC350TP2S-72

Τα αποτελέσματα για το φωτοβολταϊκό στοιχείο MiaSolé FLEX-03 500W της εταιρίας MiaSolé, σύμφωνα με τις προσομοιώσεις που έγιναν με τη χρήση του λογισμικού TRNSYS, για μια χειμερινή ημέρα στα Χανιά σε συνδυασμό με το Elastokryl έχει πτώση στη θερμοκρασία του η οποία φτάνει το 28.06% καθώς παρατηρείται ταυτόχρονα αύξηση στην παραγωγή του ίση με 7.02%, ενώ σε συνδυασμό με το Sikalastic-560 παρατηρείται πτώση μέχρι και 27.59% καθώς η αύξηση της παραγωγής του είναι ίση με 6.90%. Μια ζεστή ημέρα του καλοκαιριού η μείωση της θερμοκρασίας του είναι κατά 5.15% όταν αυτό συνδυάζεται με το Elastokryl καθώς η παραγωγή του ανέρχεται στο 3.04%, ενώ σε συνδυασμό με το Sikalastic-560 η μείωση στη θερμοκρασία του είναι κατά 9.90% καθώς η παραγωγή του αυξάνεται κατά 5.83%. Σε μια ηλιόλουστη ημέρα όπου η ηλιοφάνεια είναι μέγιστη το Elastokryl επηρεάζει την θερμοκρασία του και τη μειώνει κατά 15.82% καθώς επηρεάζει την παραγωγή του και την αυξάνει κατά 9.11%, ενώ το Sikalastic-560 μειώνει τη θερμοκρασία του κατά 22.31% και αυξάνει την παραγωγή του κατά 13.51%

MiaSolé FLEX-03 500W			
Ημέρα	Υλικό	Πτώση Θερμοκρασίας (%)	Αύξηση Παραγωγής (%)
Χειμώνας	Elastokryl	28.06%	7.02%
	Sikalastic-560	27.59%	6.90%
Καλοκαίρι	Elastokryl	5.15%	3.04%
	Sikalastic-560	9.90%	5.83%
Μέγιστη Ηλιοφάνεια	Elastokryl	15.82%	9.11%
	Sikalastic-560	22.31%	13.51%

Πίνακας 5.4 Ποσοστά μεταβολής θερμοκρασίας και παραγωγής MiaSole FLEX-03 500W

Τέλος τα αποτελέσματα για το φωτοβολταϊκό FS-6450A της εταιρίας First Solar δείχνουν πως σε μια χειμερινή ημέρα το Elastokryl μειώνει την θερμοκρασία του κατά 26.75% και αυξάνει την θερμοκρασία του κατά 5.15%, ενώ το Sikalastic-560 μείωσε τη θερμοκρασία του κατά 26.29% καθώς συνέβαλλε στην αύξηση της παραγωγής του η οποία ανέρχεται στο 5.06%. Μια ζεστή ημέρα το Elastokryl συνέβαλλε στη μείωση της θερμοκρασίας του πάνελ κατά 4.85% καθώς παρατηρήθηκε αύξηση στην παραγωγή του κατά 2.10%. Την ηλιόλουστη ημέρα το FS-6450A είχε μείωση στη θερμοκρασία του κατά 15.18% και αύξηση στην παραγωγή του κατά 6.97% όταν συνδυάστηκε με το Elastokryl, ενώ η μείωση στη θερμοκρασία του ήταν κατά 21.46% και η αύξηση στην παραγωγή του κατά 9.64% όταν αυτό συνδυάστηκε με το ψυχρό υλικό Sikalastic-560.

First Solar FS-6450A			
Ημέρα	Υλικό	Πτώση Θερμοκρασίας (%)	Αύξηση Παραγωγής (%)
Χειμώνας	Elastokryl	26.75%	5.15%
	Sikalastic-560	26.29%	5.06%
Καλοκαίρι	Elastokryl	4.85%	2.10%
	Sikalastic-560	9.66%	4.02%
Μέγιστη Ηλιοφάνεια	Elastokryl	15.18%	6.79%
	Sikalastic-560	21.46%	9.64%

Πίνακας 5.5 Ποσοστά μεταβολή θερμοκρασίας και παραγωγής FS-6450A

6. Βιβλιογραφία

- Anna Laura Pisello (2017), *State of the art on development of cool coating for buildings and cities*
- A.L. Pisello, V.L. Castlido, G. Pignatta, F. Cotana, M. Santamouris (2015), *Experimental in-lab ad in-field analysis of waterproof membranes for cool roof application and urban heat island mitigation*
- Bryan Urban, Kurt Roth (2010), *Guidelines for Selecting Cool Roofs*
- A. Synnefa, M. Santamouris, H. Akbari (2007), *Estimating the effect of using cool coatings on energy loads the thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions*
- Rosa Francesca De Masi, Silvia Ruggiero, Giuseppe Peter Vanoli (2018), *Acrylic white paint of industrial sector for cool roofing application: Experimental investigation of summer behavior and aging problem under Mediterranean climate*
- Yee-Shin Chang, Yen-Hwei Chang, In-Gann Chen, Guo-Ju Chen, Yin-Lai Chai, Te-Hua Fang, Sean Wu (2004), *Synthesis, formation and characterization of ZnTiO₃ ceramics*
- Jinpeng LV, Mingzhang Tang, Ronghui Quan, Ziyi Chai (2019), *Synthesis of solar heat-reflective ZnTiO₃ pigments with novel roof cooling effect*
- Hong Fang, Dongliand Zhao, Jinchao Yuan, Ablimit Aili, Xiaobo Yin, Ronggui Yang, Gang Tan (2019), *Performance evaluation of a metamaterial-based new cool roof using improved Roof Thermal Transfer Value model*
- Swapnil Dubey, Jatin Narotam Sarvaiya, Bharath Seshadri (2013), *Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect of PV Production in the World – A Review*
- Dionysia – Denia Kolokotsa, Gerassimos Giannariakis, Kostas Gobakis, Giannis Giannarakis, Afroditi Synnefa, Mat Santamouris (2017), *Cool roofs and cool pavements application in Acharnes, Greece*
- Amir Baniassadi, David J. Sailor, George A. Ban-Weiss (2019), *Potential energy and climate benefits of super-cool materials as a rooftop strategy*
- Hamed H. Saber, Wahid Maref, Ali E. Hajjah (2019), *Hygrothermal Performance of Cool Roofs Subjected to Saudi Climates*
- Hamed H. Saber, Wahid Maref, Ali E. Hajjah (2019), *Energy Performance of Cool Roofs Followed by Development of Practical Design Tool*

- Sika Corporation, SIKA SERVICES AG/ROOFING (2021), *Roofing Sika Cool Roof Solutions Solutions for energy-efficient flat roof buildings*
- University of Colorado (2009), *Photovoltaic Efficiency: The Temperature Effect*
- M. L. C. Attyagalle, Sanka Chandrasiri (2017), *Temperature Effect on Solar Photovoltaic Power Generation*
- Z. Syagiqah, N. A. M. Amin, Y. M. Irwan, M. S. A. Majid, N. A. Aziz (2017), *Simulation study of air and water cooled photovoltaic panel using ANSYS*
- Navdeep Singh, Arvind Goswami, (2018), *Study of P-V and I-V Characteristics of Solar Cell in MATLAB/ Simulink*
- Mark Fedkin, John A. Dutton, *Photovoltaic effect*
- SunPower Corporation MAXEON, SIGNATURE, InvisiMount, Document #504828 Rev F/LTR_US (2016), *SunPower X-Series Residential Solar Panels | X21-345-BLK | X21-345*
- REC Solar Holdings AS, Ref: NE-05-07-13 Rev-B 03.17 (2020), *REC TWINPEAK2S 72 SERIES*
- MiaSolé, 302-191947-00_A (2019), *MiaSolé FLEX SERIES-03W 2.6METER*
- First Solar, Inc., PD-5-401-06 (2021), *First Solar Series 6 ADVANCED THIN FILM TECHNOLOGY*
- Chrotex (2012), *Elastokryl technical data sheet*
- Sika Corporation, Sikalastic-560-en-LK-(05-2019)-3-1 (2019), *Product data sheet Sikalastic-560*
- Juoti Mishra, S. N. Joshi (2014), *Modeling of Photovoltaic Array using MATLAB*
- Xuan Hieu Nguyen, Mihn Phuong Nguyen (2015), *Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in Matlab/Simulink*
- E. L. Maxwell, T. L. Stoffel, R. E. Bird (1986), *Measuring and Modeling Solar Irradiance on Vertical Surfaces*
- Department of Energy (2021), *Cool Roofs*
- NREL (2021), *Solar Photovoltaic Technology Basics*
- Nikolaos, F. Voudoukis (2018), *Photovoltaic Technology and Innovative Solar Cells*
- Bhubaneswari Parida, S. Iniyan, Ranko Goic (2011), *A review of solar photovoltaic technologies*

- Jose Antonio Ramos, J. J. Campayo, Ekaitz Zulueta, I. Zamora (2013), *Obtaining the characteristic curves of a photocell by different methods*
- University of California, US Department of Energy (2015), *Engineering Reference – EnergyPlus 8.0*
- TRNSYS 17, Volume 4 (2011), *Mathematical Reference*
- Daniel Efurosibina Attoye, Kheira Anissa Tabet Aoul, Ahmed Hassan (2017), *A Review on Building Integrated Photovoltaic Façade Customization Potentials*
- ΥΠΕΚΑ (2010)
- Θεοχάρης Τσούτσος, Ιωάννης Κανάκης (2016), *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας Τεχνολογίες & Περιβάλλον*