Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Χημικών Μηχανικών και
Μηχανικών Περιβάλλοντος

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ, ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

ΝΙΚΟΛΑΟΥ Γ. ΣΑΒΒΑΚΗ

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Θεοχάρης Τσούτσος, Καθηγητής (Επιβλέπων)
Κωνσταντίνος Καλαϊτζάκης, Καθηγητής
Φώτιος Μαυροματάκης, Καθηγητής

ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

1. **Τσούτσος Θεοχάρης**, Καθηγητής (Επιβλέπων), Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης
2. **Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος**, Καθηγητής, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πολυτεχνείο Κρήτης
3. **Μαυρομματάκης Φώτιος**, Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΛΜΕΠΑ
4. **Λαζαρίδης Μιχαήλ,** Καθηγητής, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης
5. **Κολοκοτσά Διονυσία**, Καθηγήτρια, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης
6. **Παπαδόπουλος Άγις**, Καθηγητής, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Α.Π.Θ
7. **Παπαδάκης Γεώργιος**, Καθηγητής, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Γ.Π.Α.

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Γ. ΣΑΒΒΑΚΗΣ
Διπλωματούχος Μηχανικός Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείου Κρήτης.
Μ.Δ.Ε. Περιβαλλοντική και Υγειονομική Μηχανική, Πολυτεχνείου Κρήτης
© 2021 – All rights reserved

Πρόλογος και Ευχαριστίες

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο των μεταπτυχιακών σπουδών μου, για την απόκτηση Διδακτορικού Διπλώματος στην Περιβαλλοντική Μηχανική.

Κατ' αρχάς, θα ήθελα να απευθύνω τις ευχαριστίες μου, στον επιβλέποντα Καθηγητή, Θεοχάρη Τσούτσο, για την ουσιαστική υποστήριξη, τη συμβολή και την καθοδήγηση του σε επιστημονικό και φιλικό επίπεδο καθ' όλη τη διάρκεια των τελευταίων ετών.

Επιπλέον, οφείλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στα μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής επιτροπής, Καθηγητή Μαυροματάκη Φώτιο, και Καθηγητή Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνο, οι οποίοι κατείχαν ενεργό ρόλο στη διαδικασία επίβλεψης της παρούσας διατριβής και συνέβαλλαν σημαντικά για την εξέλιξη της.

Θα αποτελούσε σοβαρή παράλειψη να μην αναφερθώ στη σημαντική συνεισφορά του αείμνηστου Καπελλάκη Μιχαήλ, εργαστηριακού συνεργάτη του Εργαστηρίου Ενεργειακών και Φωτοβολταϊκών Συστημάτων του ΕΛΜΕΠΑ, για το σχεδιασμό και την κατασκευή της διάταξης ιχνηλάτησης καμπύλης I-V. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στους Μεταδιδακτορικούς Ερευνητές κ. Φωτείνη Σπυρίδωνα και κ. Τριχάκη Ιωάννη για τις πολύτιμες συμβουλές, οι οποίες συνέβαλαν σημαντικά για την περάτωση της παρούσας διατριβής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τα μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής για τη συνεργασία και την πρόθυμη συμμετοχή τους στη διαδικασία αξιολόγησης της διδακτορικής μου διατριβής.

Ακολούθως, θα ήθελα να ευχαριστήσω ειλικρινά όλους τους "δασκάλους" εντός και εκτός Πολυτεχνείου Κρήτης, οι οποίοι με δίδαξαν τις έννοιες της προσπάθειας, του "καλού" αγώνα και της υπομονής, καθώς επίσης και τους ανθρώπους που ήταν δίπλα μου σε αυτήν την ανηφορική διαδρομή.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, και ιδιαίτερα τους γονείς μου, για την υπομονή, την ηθική υποστήριξη και την αμέριστη συμπαράσταση τους, προς την ευόδωση των προσπαθειών μου, σε μια περίοδο που υπήρξαν αρκετές δύσκολες στιγμές.

Νικόλαος Γ. Σαββάκης

Ιούλιος, 2021

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ **11**

ABSTRACT **13**

ΠΤΥΧΕΣ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ **15**

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ **18**

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ **19**

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ **22**

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ **25**

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ **27**

Κεφάλαιο 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ***29***

1.1 Γενικά 29
1.2 Η παγκόσμια αγορά φωτοβολταϊκών συστημάτων 31
1.2.1 Η φωτοβολταϊκή ενέργεια σε διεθνές επίπεδο 31
1.2.2 Η φωτοβολταϊκή ενέργεια στην Ελλάδα 33
1.3 Απόδοση φωτοβολταϊκών πλαισίων και παράγοντες επιρροής της 34
1.4 Αντικείμενο-Στόχοι της Διατριβής 35

Κεφάλαιο 2 : ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ ***39***

2.1 Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία 39
2.1.1 Αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων 39
2.1.2 Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων 40
2.2 Η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων 40
2.3 Η έννοια της θερμοκρασίας στα φωτοβολταϊκά συστήματα 41
2.3.1 Η επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων 41
2.3.3 Μοντελοποίηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων 43
2.4 Τεχνικές διαχείρισης της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων 47
2.4.1 Γενικά 47
2.4.2 Η αξιοποίηση Υλικών Αλλαγής Φάσης (PCM) ως μέθοδος ψύξης των φωτοβολταϊκών συστημάτων 48
2.4.2.1 Αριθμητική μοντελοποίηση και προσομοίωση της απόδοσης των συστημάτων PV+PCM 48
2.4.2.2 Πειραματική αξιολόγηση της απόδοσης των συστημάτων PV+PCM 53
2.4.2.3 Ανάπτυξη υβριδικών φωτοβολταϊκών συστημάτων με χρήση PCM 59

Κεφάλαιο 3 : ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΕΡΕΥΝΑΣ ***65***

3.1 Συνοπτική περιγραφή μεθοδολογικής προσέγγισης 65
3.1.1 Εισαγωγικά στοιχεία 65
3.1.2 Περιοχή μελέτης 66
3.2 Συνθήκες Περιβάλλοντος 67
3.2.1 Κλιματικά στοιχεία 67
3.3 Σχεδιασμός πειραματικών διατάξεων 72
3.3.1 Κριτήρια επιλογής PCM για εφαρμογές ψύξης φωτοβολταϊκών συστημάτων 74
3.3.2 Ενεργειακό ισοζύγιο σχεδιασμού τους συστήματος PV+PCM 75
3.3.3 Προσδιορισμός της απαιτούμενης ποσότητας PCM 80
3.3.4 Διαμόρφωση συστήματος PV+PCM (1η σχεδιαστική προσέγγιση) 81
3.3.4.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια 83
3.3.4.2 Κατασκευή περιβλημάτων αποθήκευσης PCM 84
3.3.5 Διαμόρφωση συστήματος PV+PCM (2η σχεδιαστική προσέγγιση) 85

3.3.5.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια 86
3.3.5.2 Κατασκευή περιβλημάτων αποθήκευσης PCM 87
3.3.6 Χωροθέτηση των πειραματικών διατάξεων 88
3.3.6.1 Προσανατολισμός και κλίση της πειραματικών διατάξεων 88

Κεφάλαιο 4 : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ 91

4.1 Στόχοι της διαδικασίας πειραματικών μετρήσεων 91
4.2 Περιγραφή συστήματος επίβλεψης και πρωτόκολλο διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων 91

Κεφάλαιο 5 : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ 95

5.1 Εισαγωγή 95
5.2 Ηλιακή ενέργεια και φωτοβολταϊκά συστήματα 95
5.2.1 Η Ηλιακή ενέργεια εκτός Ατμόσφαιρας 95
5.2.2 Ορισμοί 96
5.2.3 Κατεύθυνση ακτινικής συνιστώσας ακτινοβολίας 97
5.2.4 Η επίδραση της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας 99
5.2.5 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στο συλλέκτη 99
5.2.5.1 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας 99
5.2.5.2 Υπολογισμός των συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο 100
5.2.6.3 Υπολογισμός της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο 101
5.2.6.4 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες με νότιο προσανατολισμό 102
5.3 Μεθοδολογία ανάλυσης της ενεργειακής απόδοσης συστημάτων PV+PCM 104
5.3.1 Εισαγωγή 104
5.3.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου 104
5.3.2 Ενεργειακή ανάλυση φωτοβολταϊκών συστημάτων 106
5.3.3 Εξάρτηση της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V από τη θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου 107
5.5 Αξιολόγηση μοντέλου ενεργειακού ισοζυγίου 108
5.5.1 Κλίμακες χαρακτηρισμού των περιβαλλοντικών συνθηκών 108
5.5.2 Μεθοδολογία αξιολόγησης της απόδοσης των μοντέλων 109
5.6 Ανάπτυξη εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των συστημάτων PV+PCM 110

Κεφάλαιο 6 : ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ Α' ΦΑΣΗΣ 113

6.1 Εισαγωγή 113
6.2 Τοπικά Κλιματικά δεδομένα 113
6.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία 113
6.2.2 Θερμοκρασία περιβάλλοντος, Ταχύτητα ανέμου 116
6.3 Συνθήκες λειτουργίας φωτοβολταϊκής πειραματικής διάταξης 116
6.3.1 Αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς της πειραματικής διάταξης 117
6.4 Αξιολόγηση της ενεργειακής απόκρισης της πειραματικής διάταξης 138
6.4.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM 140
6.4.2 Εξάρτηση της ηλεκτρικής ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM από τη θερμοκρασία 143
6.5 Έλεγχος της απόδοσης και της ακρίβειας του μοντέλου ενεργειακού ισοζυγίου 155

Κεφάλαιο 7 : ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ Β' ΦΑΣΗΣ 160

7.1 Αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς της ελεγχόμενης πειραματικής διάταξης 160
7.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της ελεγχόμενης πειραματικής διάταξης κατά τη Β' πειραματική φάση .. 168
7.3 Έλεγχος της ηλεκτρικής ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM 171
7.4 Ανάπτυξη εμπειρικών μοντέλων πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων 177

7.4.1 Εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM31 177
7.4.2 Εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM27 και του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς 179
7.5 Επικύρωση των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων 183

Κεφάλαιο 8 : ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 187
8.1 Αξιολόγηση της θερμικής και ενεργειακής συμπεριφοράς του συστήματος PV+PCM (1η Σχεδιαστική προσέγγιση) υπό τις πραγματικές συνθήκες πεδίου 187
8.2 Αξιολόγηση της θερμικής και ενεργειακής συμπεριφοράς του συστήματος PV+PCM (2η Σχεδιαστική προσέγγιση) υπό τις πραγματικές συνθήκες πεδίου 193
8.3 Προτάσεις για την αξιοποίηση της διατριβής και μελλοντική έρευνα 195

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 197

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ PV+PCM 207
Α.1 Εισαγωγή 207
Α.2 Μεθοδολογική προσέγγιση για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής απόδοσης του συστήματος PV+PCM 208
Α.2.1 Στόχος και πεδίο εφαρμογής 209
Α.2.2 Λειτουργική μονάδα (Functional Unit) 210
Α.2.3 Όρια συστήματος 210
Α.2.4 Απογραφή κύκλου ζωής 212
Α.2.5 Εκτίμηση επιπτώσεων του κύκλου ζωής 215
Α.3 Αποτελέσματα για την περιβαλλοντικής απόδοσης του συστήματος PV+PCM 216
Α.3.1 ReCiPe σε επίπεδο μέσου σημείου 217
Α.3.2 ReCiPe σε επίπεδο τελικού σημείου 223
Α.4 Συμπεράσματα 225
Α.5 Βιβλιογραφία 227
Α.6 Συμπληρωματικά στοιχεία 231

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πρόσφατα, η αυξημένη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην τελική κατανάλωση ενέργειας, ως μέτρο ανάσχεσης του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής, εντάσσεται ανάμεσα στους βασικούς άξονες παρέμβασης των προωθούμενων πολιτικών για την ομαλή ενεργειακή μετάβαση προς ένα ενεργειακό σύστημα χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Σε αυτή τη διεθνή προσπάθεια, η φωτοβολταϊκή τεχνολογία αναμένεται να αναλάβει κεντρικό ρόλο για την υποστήριξη της βιώσιμης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο σε μικρή (π.χ. αποκεντρωμένη παραγωγή, αυτόνομη λειτουργία, δίκτυα) όσο και μεγάλη κλίμακα (π.χ. λειτουργία διασύνδεσης), καθότι συνδυάζει έναν αυξημένο αριθμό θετικών χαρακτηριστικών. Ωστόσο, κύρια ζητούμενα για τη διατήρηση του ευμενώς διακείμενου περιβάλλοντος ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών εφαρμογών, αποτελούν η υψηλή αξιοπιστία και η ποιότητα κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας αυτών, καθώς επίσης και η περαιτέρω τεχνολογική εξέλιξη προς την κατεύθυνση του μετριασμού των περιοριστικών παραγόντων που ανακύπτουν, λόγω της φύσης της ηλιακής ενέργειας.

Αναμεσά στους περιοριστικούς παράγοντες, η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων χαρακτηρίζεται ως βασική παράμετρος ελέγχου της διάρκειας ζωής και της ενεργειακής απόδοσης κατά τη φάση λειτουργίας τους. Συνεπώς, η ανάπτυξη ικανών μεθόδων διαχείρισης της, προκειμένου να επιτευχθεί μείωση των πιθανών απωλειών ενέργειας και ταυτόχρονη βελτίωση του οικολογικού αποτυπώματος των φωτοβολταϊκών συστημάτων, αποτελεί μια από τις σύγχρονες προκλήσεις για το μέλλον της τεχνολογίας. Υπό αυτό το πρίσμα, ο σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής εστιάζεται στη διερεύνηση, το σχεδιασμό και την ανάπτυξη ικανών διατάξεων διαχείρισης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, μέσω των οποίων να διασφαλίζεται η διατήρηση υψηλής ενεργειακής και περιβαλλοντικής απόδοσης μέχρι την ολοκλήρωση του κύκλου ωφέλιμης διάρκειας ζωής τους, με τη μέθοδο να βασίζεται στη χρήση PCM ως εργαζόμενου ρευστού για την απαγωγή της θερμότητας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η προτεινόμενη μέθοδος είναι ευρύτερα γνωστή με την ονομασία "σύστημα PV+PCM", καθότι ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο συνδυάζεται με έναν τύπο PCM, συνιστώντας μια ενιαία δομική οντότητα. Πρωταρχικό βήμα για την εξυπηρέτηση του σκοπού της παρούσας μελέτης, αποτέλεσε η διαμόρφωση μιας γενικής μεθοδολογίας για το σχεδιασμό συστημάτων τύπου PV+PCM, η οποία βασίζεται στην κατάλληλη τροποποίηση προϋπάρχοντος θεωρητικού μοντέλου ενεργειακού ισοζυγίου και τον καθορισμό κριτηρίων εκλογής και εκτίμησης της αποτελεσματικής ποσότητας του χρησιμοποιούμενου PCM. Ακολούθως, μια εκτεταμένη και εντατική πειραματική διαδικασία σε συνθήκες πεδίου έλαβε χώρα σε δύο (2) διακριτές φάσεις, και επί διαφορετικών πειραματικών διατάξεων, για την κατανόηση των βασικών λειτουργικών πτυχών της προτεινόμενης μεθόδου (π.χ. εποχικότητα, αποτελεσματικότητα, αξιοπιστία, κ.α.).

Κατά την Α' φάση διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων (περίοδος Ιουλίου 2016 – Ιουνίου 2017), ένα σύστημα PV+PCM τυπικού σχήματος, το οποίο συνδυάζει ένα (1) συμβατικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο και έναν (1) επιλεγμένο τύπο PCM, αξιολογήθηκε προκειμένου να εκτιμηθεί η ενεργειακή και η θερμική απόκριση του υπό τις επικρατούσες συνθήκες του περιβάλλοντος στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου (Νότια Ελλάδα, Κρήτη). Σύμφωνα με

τα ληφθέντα αποτελέσματα, η ένταξη της προτεινόμενης διάταξης παθητικής ψύξης (με χρήση PCM) σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο είχε σημαντική συμβολή για τη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας του, όπως υποδεικνύεται από τη μέγιστη καταγραφείσα τιμή των 26,1 ^{o}C, και οδήγησε σε αύξηση της ετήσιας παραγωγής ενέργειας κατά 5,7%.

Στο πλαίσιο διερεύνησης των δυνατοτήτων εξέλιξης των συστημάτων PV+PCM, η παρούσα μελέτη επικεντρώθηκε στη διαμόρφωση μιας εναλλακτικής προσέγγισης σχεδιασμού της διάταξης που φέρει το εργαζόμενο ρευστό (PCM). Η ιδιαιτερότητα της προσέγγισης αυτής έγκειται στην προσπάθεια συνδυασμού των πλεονεκτημάτων μιας τυπικής διάταξης ψύξης με πτερύγια (δηλ. ενισχυμένη μεταφορά θερμότητας με φυσική συναγωγή) και ενός θερμικού συλλέκτη (δηλ. απορρόφηση θερμότητας). Προκειμένου να αξιολογηθούν και να αποτιμηθούν τα οφέλη από τη λειτουργία των εναλλακτικά διαμορφωμένων συστημάτων PV+PCM σε συνθήκες πεδίου, μια σειρά πειραματικών μετρήσεων διεξήχθησαν κατά τη διάρκεια της Β' φάσης πειραματικού ελέγχου (περίοδος Φεβρουαρίου - Ιουλίου 2019). Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι η θερμοκρασία λειτουργίας του ελεγχόμενου φωτοβολταϊκού τύπου μειώθηκε κατά 6,4 ^{o}C και 7,5 ^{o}C, μέσω της εφαρμογής μικρής ποσότητας (περίπου 260 g) από τα επιλεγμένα PCM27 και PCM31, αντίστοιχα. Συνεπακόλουθα, ο δείκτης αποτελεσματικής ποσότητας PCM προσδιορίστηκε ίσος με 0,34 kg/m$^{2}\cdot{}^{o}$C, ενώ τα συστήματα PV+PCM27 και PV+PCM31 παρουσίασαν αυξημένη παραγωγή ενέργειας κατά 4,19% και 4,24%, αντίστοιχα. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι ένα σύστημα PV+PCM, το οποίο έχει σχεδιαστεί βάσει της προτεινόμενης εναλλακτικής προσέγγισης, απολαμβάνει της συνεργιστικής δράσης του ανέμου και του επιλεγμένου PCM, ακόμη και μετά πλήρη τήξη του, όπως αποδεικνύεται από τις ημερήσιες καμπύλες διακύμανσης της θερμοκρασίας λειτουργίας των ανεπτυγμένων συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31.

Τα πιθανά περιβαλλοντικά κέρδη από τη χρήση PCM, ως εργαζόμενου ρευστού για τη διαχείριση της θερμότητας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, την ενίσχυση της σταθερότητας, όσον αφορά την αποδιδόμενη ισχύ και την ενεργειακή παραγωγή ενός τυπικού φωτοβολταϊκού πλαισίου, διερευνήθηκαν μέσω της εφαρμογής της μεθοδολογία αξιολόγησης κύκλου ζωής (LCA). Προς αυτή την κατεύθυνση, τα πραγματικά δεδομένα από τη φάση κατασκευής και πιλοτικής λειτουργίας ενός συστήματος PV+PCM (τυπικού σχήματος), τα οποία συλλέχθηκαν μέσω συστηματικής πειραματικής παρατήρησης κατά τη διάρκεια ενός (1) έτους, αξιοποιήθηκαν κατάλληλα. Σύμφωνα τα στοιχεία της προκαταρκτικής αξιολόγησης, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συστήματος PV+PCM αναμένεται υψηλότερο κατά 11,7% σε σχέση με την επιβάρυνση που μπορεί να προκληθεί από ένα συμβατικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Ωστόσο, η ενισχυμένη ενεργειακή παραγωγή του συστήματος PV+PCM, η οποία θα αξιοποιηθεί για την υποκατάσταση της παραγόμενης ενέργειας από το ενεργειακό σύστημα της Ελλάδας (με υψηλή εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα), δύναται να καλύψει το πρόσθετο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σύντομο χρονικό διάστημα. Εν κατακλείδι, τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής παραπέμπουν σε ουσιαστικά ευρήματα για τα οφέλη της προεκτεινόμενης μεθόδου παθητικής ψύξης (με χρήση PCM) φωτοβολταϊκών πλαισίων, και συμπληρώνουν την υπάρχουσα βιβλιογραφία, όσον αφορά τη θερμική και ενεργειακή απόκριση των συστημάτων PV+PCM σε συνθήκες πεδίου.

ABSTRACT

Recently, the penetration of Renewable Energy Sources (RES) in the final energy consumption is considered as a key measure to curb climate change impacts and support the transition from a fossil-fuelled energy system to clean energy. To this end, the exploitation of solar energy became one of the most promising options to meet the ever-growing energy needs globally. Among several solar applications, photovoltaic (PV) technology has been extensively used and is intended to have a principal role in realising the vision of sustainability. To enhance its growth, the control of specific parameters is essential so that it is feasible to improve the PV systems' efficiency.

These aspects comprise solar irradiance, PV cell technology, as well as the PV cell operating temperature, which is partly transformed into thermal energy. This thermal energy provokes PV module temperature rise and reasonable energy losses. The high operating temperature of PVs do not only limit energy conversion efficiency but also affects their lifetime. Consequently, heat removal from the PV module's surfaces is deemed pivotal to raise PV efficiency. Therefore, potentially applicable cooling techniques, have been introduced and studied by several researchers. Among these techniques, the use of Phase Change Materials (PCMs) has earned extraordinary attention since they can absorb a high amount of thermal energy at a consistent temperature range of phase alteration and, by extension, assist in heat removal and temperature handling. To contribute to this research section, this dissertation is focused on the theoretical analysis, design, and experimental assessment of the performance of PV+PCM systems during their operation by deepening insights into this passive approach under actual Mediterranean conditions. The prior step before the analysis was the development of a comprehensive methodology approved for the PV+PCM system design and evaluation. This methodological approach is built on a reasonable modification of the energy balance model for typical PV modules. Following, an extensive and intensive experimental process under real field conditions took place in two distinct phases, and on different experimental set-ups, to clearly understand the operational aspects of the proposed method (e.g., seasonality, efficiency, reliability, etc.).

During the 1st stage of this study, a customized solar system (PV+PCM system) combining a conventional PV module with a chosen type of PCM was tested in the Mediterranean climate during a year-long period. This analysis supported recognising the main operational aspects (e.g., seasonality in performance, stability) of the system and served a better understanding of the possible defects and underestimations. As stated in the results of this research, the operating temperature difference could arise up to 26,1 ºC, so the annual power generation of the new system increases by 5,7%. To explore the main aspects of the PV+PCM systems' evolution, the present study focuses on the development of an alternative design approach regarding the PCM container. The peculiarity of this approach relies on the combination of the main advantages of a heat sink (i.e., enhanced heat transfer with natural convection) and a heat absorber (i.e., heat absorption). In this study, the integration of PCMs via an alternative type of enclosure in tubular shape was proposed and investigated, as an option of lessening the PV operating temperature to improve their efficiency. For this purpose, two PV+PCM systems and a commercial PV module (reference case) were examined to evaluate their

energy performance under real-field conditions. Paraffins RT27 and RT31 were selected as the PCMs' employed. The results suggested that a peak temperature decrease of 6,4 ^{o}C and 7,5 ^{o}C could be observed by using 260g of PCM27 and PCM31, respectively. Therefore, PV+PCM27 and PV+PCM31 systems showed improved energy production by 4,19% and 4,24%, respectively. The suggested configuration of PCM enclosures benefited from the synergistic effect of wind, as proved by the logged daily thermal profiles of the PV+PCM27 and PV+PCM31 systems, even after the moment of the complete PCMs' melting.

In addition, the actual data collected from a PV+PCM system, constructed and operated under the Mediterranean climate conditions (Greece), were further exploited to estimate its environmental performance using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. The integration of PCM cooling increases PV's total footprint by ~11,7%, but at the same time also increases PV module's lifespan and electricity output. In that sense, the environmental gains through displacing fossil-fuel-dependent electricity from Greece's energy mix may appear. To conclude, the results of the present dissertation refer to the benefits arising from the proposed passive cooling method (using PCM) for PV modules and complement the existing literature on the thermal and energy behaviour of PV+PCM systems under real-field conditions.

ΠΤΥΧΕΣ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Οι πτυχές καινοτομίας-συμβολής της παρούσας διατριβής εστιάζεται σε (6) επίπεδα, όπως παρουσιάζονται συνοπτικά:

- **1ο Επίπεδο συμβολής:** *Πειραματική αξιολόγηση της απόδοσης των συστημάτων τύπου PV+PCM υπό τις πραγματικές συνθήκες πεδίου στην περιοχή της Μεσογείου (Χανιά, Κρήτη)*

  Στη διεθνή βιβλιογραφία, απαντάται σήμερα, ένα σημαντικός αριθμός αριθμητικών μελετών και υπολογιστικών προσομοιώσεων έχει διεξαχθεί ώστε να αποτιμηθούν οι συνέπειες της ενσωμάτωσης PCM για τη διαχείριση της θερμοκρασίας λειτουργίας και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Μολονότι, η σχετική έρευνα μπορεί να χαρακτηριστεί πολυδιάστατη, ο αριθμός των μελετών πειραματικής αξιολόγησης συστημάτων PV+PCM σε πραγματικές συνθήκες πεδίου, τα οποία θα μπορούσαν να προσαρμοστούν κατάλληλα για πρακτική εφαρμογή, είναι πολύ περιορισμένος. Εξ ’αυτού του λόγου, η παρούσα διδακτορική διατριβή εστιάζεται στην εφαρμογή μιας εκτενούς και εντατικής πειραματικής διαδικασίας για τη συλλογή σημαντικού αριθμού δεδομένων σε σχέση με τη βραχυπρόθεσμη και τη μακροπρόθεσμη θερμική και ενεργειακή απόκριση των τυπικών φωτοβολταϊκών πλαισίων, με και χωρίς την ενσωμάτωση PCM, υπό τις πραγματικές κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου. Παράλληλα, τα καταγεγραμμένα στοιχεία τεκμηριώνουν επαρκώς την ικανότητα των προτεινόμενων διατάξεων παθητικής ψύξης (με χρήση PCM) για τη διαχείριση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ενώ καθίσταται εφικτή η παροχή πληροφοριών για τους παράγοντες που μπορεί να επηρεάζουν την ποιότητα και την απόδοση τους. Επίσης, είναι απαραίτητο να επισημανθεί η προστιθέμενη αξία της απόκτησης των πειραματικών δεδομένων σχετικών με την εφαρμογή PV+PCM, δεδομένου ότι η παρούσα μελέτη αποτελεί μια εκ των λίγων πειραματικών ερευνών ετήσιας διάρκειας που δύναται να απαντηθούν στη διεθνή βιβλιογραφία.

- **2ο Επίπεδο συμβολής:** *Ολοκληρωμένη Μεθοδολογική Προσέγγιση για το σχεδιασμό συστημάτων τύπου PV+PCM*

  Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία αναπτύχθηκε για το σχεδιασμό συστημάτων PV+PCM (τυπικής διαμόρφωσης), η οποία δύναται να αξιοποιηθεί από ερευνητές και μηχανικούς ως ένα έγκυρο, εύχρηστο και οικονομικά αποδοτικό (cost-efficient) εργαλείο άμεσης εκτίμησης της αποτελεσματικότητας, και κατ’ επέκταση της σκοπιμότητας, της προτεινόμενης εφαρμογής σε υφιστάμενα ή/και μελλοντικά φωτοβολταϊκά συστήματα. Η μεθοδολογική αυτή προσέγγιση υλοποιείται σε τρείς διακριτές φάσεις: i. επιλογή του κατάλληλου PCM, βάσει πρακτικών κριτηρίων προσδιορισμού του θερμοκρασιακού εύρους της μετάβασης φάσης αυτού, ii. εκτίμηση της απαιτούμενης ποσότητας PCM για την επιλεγμένη εφαρμογή, iii. διαστασιολόγηση της διάταξης παθητικής ψύξης για τη βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος PV+PCM. Επίσης, τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα αξιοποιήθηκαν περαιτέρω για την επαλήθευση της προτεινόμενης μεθοδολογίας και τον έλεγχο ακρίβειας των αποτελεσμάτων της. Η καινοτομία της προτεινόμενης μεθοδολογίας εντοπίζεται στην ικανότητα της να

συσχετίζει την ποσότητα του επιλεγμένου PCM και τη θερμική συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Ακόμη, θα πρέπει να τονιστούν οι δυνατότητες αξιοποίησης της προτεινόμενης μεθοδολογίας, μέσω κατάλληλης προσαρμογής, στο πλαίσιο του σχεδιασμού άλλων τύπων εφαρμογών με επίκεντρο τη χρήση PCM.

- **<u>3ο Επίπεδο Συμβολής</u>:** *Κατασκευή πρωτότυπων συστημάτων τύπου PV+PCM και συσκευή ιχνηλάτησης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών τους*

  Για την εκπλήρωση των επιδιώξεων της διδακτορικής διατριβής, δύο (2) πρωτότυπα συστήματα PV+PCM αναπτύχθηκαν προκειμένου να εκτεθούν στις επικρατούσες συνθήκες της περιοχής των Χανίων (Ελλάδα, Κρήτη). Βασικό ζητούμενο της διαδικασίας αποτέλεσε η κατασκευή των ειδικών διατάξεων για την αποθήκευση του PCM, με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγονται τεχνικά προβλήματα κατά τις περιόδους διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, ένα σύνολο κριτηρίων, όπως η αντοχή σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και μηχανικής καταπόνησης, η στεγανότητα, η συμβατότητα με τον επιλεγμένο τύπο PCM, η τιμή θερμικής αγωγιμότητας, το κόστος, η κατασκευαστική εμπειρία, κ.α., τέθηκαν προς εξέταση, προκειμένου να διασφαλιστεί η αξιόπιστη και ασφαλής λειτουργία των συστημάτων PV+PCM. Από την άλλη, ο σχεδιασμός ενός συστήματος PV+PCM, πέραν της αναγνώρισης των πραγματικών αναγκών και των πιθανών περιορισμών της εφαρμογής, θα πρέπει να επικεντρώνεται στην επίτευξη της υψηλότερης δυνατής απόδοσης με την ενσωμάτωση της ελάχιστης απαιτούμενης ποσότητας PCM. Ως εκ τούτου, η διαμόρφωση μιας εναλλακτικής πρότασης σχεδιασμού για τη διάταξη αποθήκευσης του PCM, σε ένα σύστημα PV+PCM, αποτέλεσε στοιχείο καινοτομίας στο πλαίσιο των επιδιώξεων της παρούσας διατριβής. Ο κύριος λόγος για την υιοθέτηση της προαναφερθείσας προσέγγισης ήταν η "ενεργοποίηση" του μηχανισμού μεταφοράς θερμότητας με ελεύθερη συναγωγή από την οπίσθια πλευρά κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου προς το περιβάλλον, ο οποίος συχνά τίθεται ανενεργός στα συστήματα PV+PCM που φέρουν συμβατικού τύπου δοχείο αποθήκευσης PCM και χαρακτηρίζεται ως ρυθμιστικός παράγοντας για την εξέλιξη της διαδικασίας τήξης/πήξης των PCM. Γίνεται επομένως εύκολα αντιληπτή η συμβολή της παρούσας διατριβής, για την ανάπτυξη μιας πρωτότυπης τεχνικής διαχείρισης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, η οποία να επιτυγχάνει τη συνεργατική δράση δύο εργαζόμενων ρευστών μέσων (αέρα και PCM) και να αξιοποιεί δυνητικά τα χαρακτηριστικά του μικροκλίματος στην περιοχή εγκατάστασης. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ως σημείο πρωτοτυπίας, ο σχεδιασμός και η κατασκευή αυτοματοποιημένου συστήματος καταγραφής μετρήσεων (I-V tracer - ιδιοκατασκευή), το οποίο είχε ελεγχθεί κατάλληλα σε ότι αφορά την ακρίβεια του.

- **<u>4ο Επίπεδο Συμβολής</u>:** *Μεθοδολογία διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων και ανάλυσης δεδομένων*

  Σε γενικές γραμμές, οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν κατάλληλους αισθητήρες για τη μέτρηση και καταγραφή των παραμέτρων που συνδέονται με τη λειτουργία τους σε πραγματικό χρόνο, έτσι ώστε να καθίσταται εφικτή η ανάλυση της

λειτουργικής απόδοσης τους. Εναλλακτικά, η χρησιμοποίηση κατάλληλου εξοπλισμού που αποτελείται από φορητά όργανα μετρήσεων προκρίνεται ως ρεαλιστική και αξιόπιστη επιλογή. Εν προκειμένω, τα σημεία που χρήζουν ιδιαίτερη αναφοράς θεωρούνται η διαμόρφωση των ελεγχόμενων πειραματικών διατάξεων, καθώς και η σύνταξη κατάλληλου πρωτοκόλλου διεξαγωγής μετρήσεων ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή εξέλιξη της σχετικής διαδικασίας και η ποιότητα των πειραματικών δεδομένων.

- **<u>5ο Επίπεδο Συμβολής</u>:** *Ανάπτυξη εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των συστημάτων PV+PCM*

  Η περαιτέρω ανάλυση των πειραματικών δεδομένων, μέσω της εφαρμογής της κατάλληλης στατιστικής τεχνικής, οδήγησε στην ανάπτυξη έξι (6) εμπειρικών προσεγγίσεων για την εκτίμηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των εναλλακτικά διαμορφωμένων συστημάτων PV+PCM

- **<u>6ο Επίπεδο Συμβολής</u>:** *Προκαταρκτική Εκτίμηση της Περιβαλλοντικής Απόδοσης των συστημάτων των συστημάτων PV+PCM*

  Παρότι τα τελευταία χρόνια ένας μεγάλος αριθμός ερευνητών έχει εστιάσει στις τεχνικές πτυχές των συστημάτων PV+PCM, η περιβαλλοντική διάσταση τους δεν έχει αναλυθεί επαρκώς προκειμένου να τεθούν οι βάσεις για την περαιτέρω εξέλιξη σε μια ώριμη τεχνολογία αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό, ένα πρόσθετο πεδίο συμβολής της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτέλεσε η προκαταρκτική αξιολόγηση της περιβαλλοντικής απόδοσης ενός συστήματος PV+PCM που κατασκευάστηκε και λειτούργησε για ένα (1) έτος υπό τις πραγματικές κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου στη νότια Ελλάδα (Κρήτη). Συγκεκριμένα, η ρεαλιστική ανάλυση του κύκλου ζωής (LCA) του εξεταζόμενου συστήματος PV+PCM υλοποιήθηκε αξιοποιώντας τα πραγματικά δεδομένα όσον αφορά τις απαιτούμενες διεργασίες και ροές υλικών για την κατασκευή και την εγκατάσταση του. Ακόμη, τα πειραματικά αποτελέσματα από την αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών κερδών λόγω της υποκατάστασης μέρους της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία προέρχεται από το βασισμένο σε ορυκτά καύσιμα ενεργειακό σύστημα της Ελλάδας.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Επιστημονικές δημοσιεύσεις στο πλαίσιο της εκπονηθείσας Διδακτορικής Διατριβής

1. **N. Savvakis,** T. Tsoutsos, **"Theoretical design and experimental evaluation of PV-PCM system in the mediterranean climate"**, Energy, 2021, vol. 220,119690.
2. **N. Savvakis,** E. Dialyna**,** T. Tsoutsos, "**Investigation of the operational performance and efficiency of an alternative PV+PCM concept**, Solar Energy, 2020, vol. 211, pp. 1283-1300.
3. **N. Savvakis**, T. Tsoutsos, "**Phase Change Materials in Photovoltaics: Assessment of system performance under actual Mediterranean climate conditions"**, In F. Mavromatakis & K. Siderakis (Eds), Energy Markets and Renewable Energy Sources in South-Eastern Europe, Trivent Publishing, 2016, pp. 218-234.
4. **N. Savvakis**, T. Tsoutsos, "**Performance Assessment of a thin film PV system under actual Mediterranean climate conditions in the island of Crete**", Energy, 2015, vol.19, part 2, pp. 1435-1455.
5. **N. Savvakis,** S. Foteinis, T. Tsoutsos, , "**Integration of a PCM-based cooling system to PV modules as means to improve their environmental performance**", Renewable Energy, (under peer review).

Επιστημονικές δημοσιεύσεις έμμεσα σχετιζόμενες με το θέμα της εκπονηθείσας Διδακτορικής Διατριβής

1. D. Hasapis, **N. Savvakis**, S. Psychis, T. Tsoutsos, N.P. Nikolaidis, "**Design of large scale prosuming in Universities: The solar energy vision of the TUC campus**", Energy and Buildings, 2017, vol. 141, pp. 39-55.

Εργασίες σε συνέδρια με κριτές (στο πλαίσιο της εκπονούμενης Διδακτορικής Διατριβής)

1. **N. Savvakis**, T. Tsoutsos: "**Phase Change Materials in Photovoltaics: Assessment of system performance under actual Mediterranean climate conditions**", DEMSEE'16 - 11th International Conference on Deregulated Electricity Market Issues in South Eastern Europe, 22-23 September 2016, Heraklion, Greece.
2. **N. Savvakis**, P. Kokkalis, T. Tsoutsos: "**Preliminary performance assessment of a PV-PCM system under actual Mediterranean climate conditions**", Workshop on "Technical and Economic Aspects of Renewable Energies 2016", July 4-7, 2016, Berlin, Germany.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

AC	Εναλλασσόμενο ρεύμα
AM	Αέριος μάζα
AST	Ηλιακός χρόνος - h
C_m	Θερμική χωρητικότητα φωτοβολταϊκού πλαισίου - J/K
C_p	Ειδική θερμότητα του στρώματος - J/kg·K
d	Πάχος του στρώματος - m
DC	Συνεχές ρεύμα
E	Παραγωγή ενέργειας - kWh
E_{DC}	Ημερήσια συνολική παραγωγή ενέργειας συνεχούς ρεύματος του φωτοβολταϊκού πλαισίου - kWh
E_c	θερμότητα που μεταφέρεται στο PCM κατά τη διάρκεια μια επιλεγμένης περιόδου - kWh
FF	Παράγων Πλήρωσης - %
G_{sc}	Ηλιακή σταθερά - W/m^2
G_{on}	Ηλιακή ακτινοβολία εκτός γήινης ατμόσφαιρας σε επίπεδο κάθετο προς τις ακτίνες του ηλίου - W/m^2
G_t	Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο - W/m^2
G_{STC}	Ηλιακή ακτινοβολία στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC) - W/m^2
H_o	Ημερήσια ηλιακή ενέργεια εκτός γήινης ατμόσφαιρας στο οριζόντιο επίπεδο - kWh/m^2/d
$\bar{H}_o$	Μηνιαία μέση ημερήσια ηλιακή ενέργεια εκτός γήινης ατμόσφαιρας στο οριζόντιο επίπεδο - kWh/m^2/d
H_b	Μέση ημερήσια άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο - kWh/m^2/d
$\bar{H}_b$	Μηνιαία μέση ημερήσια άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο - kWh/m^2/d
$H_{b,T}$	Μέση ημερήσια άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο - kWh/m^2/d
$\bar{H}_{b,T}$	Μηνιαία μέση ημερήσια άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο - kWh/m^2/d
$H_{r,T}$	Μέση ημερήσια ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο - kWh/m^2/d
$\bar{H}_{r,T}$	Μηνιαία μέση ημερήσια ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο - kWh/m^2/d
H_h	Ημερήσια ενεργειακή απολαβή από τον Ήλιο στο οριζόντιο επίπεδο - kWh/m^2
$\bar{H}_h$	Μηνιαία μέση ημερήσια ενεργειακή απολαβή από τον Ήλιο στο οριζόντιο επίπεδο - kWh/m^2/d
H_t	Ημερήσια ενεργειακή απολαβή από τον Ήλιο στο κεκλιμένο επίπεδο - kWh/m^2
$\bar{H}_t$	Μηνιαία μέση ημερήσια ενεργειακή απολαβή από τον Ήλιο στο κεκλιμένο επίπεδο - kWh/m^2/d
h	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητα με συναγωγής - W/K·m^2
I	Ρεύμα - A
I_{SC}	Ρεύμα βραχυκύκλωσης - A
K_t	Συντελεστής αιθριότητας

$\overline{K}_t$	Μηνιαία Μέση ημερήσια τιμή του συντελεστή αιθριότητας
k	Θερμική αγωγιμότητα - W/m·K
k_r	Συντελεστής Ross - $^oC \cdot m^2/W$
LST	Τοπικός χρόνος - h
LL	Γεωγραφικό μήκος της θέσης μελέτης
M	Μέγιστο
MAE	Μέσο απόλυτο σφάλμα - %
MBE	Μέσο σφάλμα μεροληψίας - %
n_{ELEC}	Απόδοση φωτοβολταϊκού πλαισίου - %
n_T	Συντελεστής διόρθωσης της ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκού πλαισίου - % (ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες ενέργειας λόγω αύξησης της θερμοκρασίας λειτουργίας)
P_{STC}	Ονομαστική ισχύς του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC) – W_p
P_{sol}	Ηλιακή ισχύς, η οποία απορροφάται ως θερμότητα από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο – W or J/s
P_{rad}	Ανταλλαγή θερμότητας με ακτινοβολία - W ή J/s
P_{conv}	Ανταλλαγή θερμότητας με συναγωγή - W ή J/s
P_M	Αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς - W ή J/s
P_c	Θερμότητα προς μεταφορά από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο στο PCM - W ή J/s
PCM	Υλικό Αλλαγής Φάσης
PCM27	Υλικό Αλλαγής Φάσης με σημείο τήξης ίσο 27 ^oC
PCM31	Υλικό Αλλαγής Φάσης με σημείο τήξης ίσο 31 ^oC
PR	Λόγος επίδοσης - %
PV	Φωτοβολταϊκό
RMSE	Μέσο τετραγωνικό σφάλμα - %
R	Συντελεστής συσχέτισης
R^2	Συντελεστής προσδιορισμού
R^2_{adj}	Προσαρμοσμένος συντελεστής προσδιορισμού
R_b	Γεωμετρικός παράγοντας
$\bar{R}_b$	Μέσος μηνιαίας γεωμετρικός παράγοντας
S	Επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου - m^2
SL	Ζώνη ώρας της θέσης μελέτης- ^{o}
t	Χρονικό διάστημα μεταξύ δυο διαδοχικών μετρήσεων
T	Θερμοκρασία – ^oC ή K
Τα	Θερμοκρασία περιβάλλοντος – ^oC ή K
$Τα_{day}$	Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τις ώρες ηλιοφανειας– ^oC ή K

Ta_{night}	Θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τις νυχτερινές ώρες – ^oC ή K
T_m	Θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου – ^oC ή K
T_{mf}	Θερμοκρασία λειτουργίας της οψης του φωτοβολταϊκού πλαισίου – ^oC ή K
T_{mb}	Θερμοκρασία λειτουργίας της οπίσθια επιφάνειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου – ^oC ή K
$T_{PCM,melt}$	Θερμοκρασία τήξης του PCM – ^oC ή K
$T_{PCM, melt1}$	Κάτω όριο της θερμοκρασιακής περιοχής μετάβασης φάσης – ^oC ή K
$T_{PCM, melt2}$	Άνω όριο της θερμοκρασιακής περιοχής μετάβασης φάσης – ^oC ή K
$T_{m\ (PV+PCM)}$	Θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM – ^oC ή K
$T_{m\ (PV\ reference)}$	Θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου που λαμβάνεται υπόψη ως περίπτωση αναφοράς – ^oC ή K
T_S	Θερμοκρασία του ουρανού – ^oC ή K
T_g	Θερμοκρασία του εδάφους – ^oC ή K
V	Τάση - V
V_{OC}	Τάση ανοιχτού κυκλώματος - V
v_w	Ταχύτητα ανέμου - m/s
α	Συντελεστής απορρόφησης
α_s	Γωνία ανύψωσης του ηλίου – ^{o}
β	Γωνία κλίσης – ^{o}
γ	Αζιμούθια γωνία επιφάνειας – ^{o}
γ_{PM}	Θερμικός συντελεστής ισχύος - %/^{o}C
γ_s	Αζιμούθια γωνία του ηλίου – ^{o}
δ	Ηλιακή απόκλιση – ^{o}
ε	Ικανότητα εκπομπής εκπομπής
θ	Γωνία πρόσπτωσης – ^{o}
θz	Ζενιθιακή γωνία – ^{o}
λ	Ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας του PCM – kJ/kg
ρ	Δείκτης ανάκλασης
ρ_X	Πυκνότητα στρώματος X- kg/m^3
σ	Σταθερά΄Stefan-Boltzmann - W/K^4· m^2
φ	Γεωγραφικό πλάτος – ^{o}
ω	Ωριαία γωνία – ^{o}
ω_{sr}	Ωριαία γωνία ανατολής ηλίου – ^{o}
ω_{ss} ή ω_s	Ωριαία γωνία δύσης ηλίου – ^{o}

Οι καταλήξεις d, m και y χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις για τον καθορισμό της ημερήσιας, μηνιαίας και της ετήσιας μέσης τιμής των προαναφερθέντων όρων (εκτός από τις περιπτώσεις των μέσων μηνιαίων τιμών του δείκτη ενεργειακής απολαβής από τον Ήλιο και του συντελεστή αιθριότητας)

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1-1: Η αναμενόμενη εξέλιξη της κατανάλωσης ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο (περίοδος 2010-2050) 29

Διάγραμμα 1-2: Διαχρονική εξέλιξη της απόδοσης για διαφορετικές τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων. 30

Διάγραμμα 1-3: Διαχρονική εξέλιξη της συνολικής εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος (GWp) κατά την περίοδο 2000 - 2019. 31

Διάγραμμα 2-1: Κατηγοριοποίηση τεχνικών ψύξης για εφαρμογή σε φωτοβολταικά πλαίσια. 47

Διάγραμμα 2-2: Σχηματική απεικόνιση και αρχικά ερευνητικά αποτελέσματα από την 1η συστηματική μελέτη φωτοβολταϊκών διατάξεων με χρήση PCM 49

Διάγραμμα 2-3: I) Ημερήσια διακύμανση της θερμικής συμπεριφοράς ενός συστήματος PV+PCM κατα η διάρκεια μιας εβομάδας του Αυγούστου 2013 υπό τις κλιματικές συνθήκες της Σαραγόσα, Ισπανία, II) Συγκριτική ανάλυση του κύκλου ζωής διατάξεων PV+PCM έναντι της περίπτωσης αναφοράς 52

Διάγραμμα 2-4: Σχηματική απεικόνιση και ενδεικτικά αποτελέσματα από τη λειτουργία περιραματικής διάταξης με σύστημα PV+PCM και φωτοβολταικό πλαίσιο αναφοράς: I) στην περιοχή του Παντεμπορν, Γερμανία [*Japs et al*., 2016] και II) στην περιοχή του Αλ-ιν, Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα [*Hasan et al.*,2017] 55

Διάγραμμα 3-1: Συνοπτική περιγραφή των κλιματικών συνθηκών στην περιοχή των Χανίων. 68

Διάγραμμα 3-2: Αποτύπωση της γενική μεθοδολογίας (διάγραμμα ροής) που υιοθετηθηκε για το σχεδιασμό και την πειραματική αξιολόγηση του συστήματος PV+PCM 73

Διάγραμμα 6-1: Συχνότητα εμφάνισης συνθηκών αιθριότητας κατά την περίοδο παρακολούθησης Ιουλίου 2016 – Ιουνίου 2017. 115

Διάγραμμα 6-2: Μεταβολή της μηνιαίας μέσης ημερήσιας ενεργειακής απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο ($\boldsymbol{Ht}$) και το οριζόντιο ($\boldsymbol{Hh}$) επίπεδο, θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T\alpha_{,m}$) και της ταχύτητας ανέμου ($v_{w,m}$) κατά τις ώρες διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων την περίοδο Ιουλίου 2016 - Ιουνίου 2017. 116

Διάγραμμα 6-3: Διακύμανση της μέσης μηνιαίας, της μέγιστης και της ελάχιστης στιγμιαίας θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (T_m) κατά τις ώρες διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας για την 1η περίοδο αξιολόγησης (Ιούλιος 2016 – Ιούνιος 2017). 119

Διάγραμμα 6-4: Μέση και μέγιστη απόκλιση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των εξεταζόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_peak}$, $\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_avg}$). 119

Διάγραμμα 6-5: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας (21/7/2016). 120

Διάγραμμα 6-6: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας (2/8/2016). 122

Διάγραμμα 6-7: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας φθινοπωρινής ημέρας (11/9/2016). 124

Διάγραμμα 6-8: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας φθινοπωρινής ημέρας (12/10/2016). 126

Διάγραμμα 6-9: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας φθινοπωρινής ημέρας (17/11/2016) 128

Διάγραμμα 6-10: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής ημέρας (19/12/2016)..... 128

Διάγραμμα 6-11: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής ημέρας (17/1/2017)..... 129

Διάγραμμα 6-12: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής ημέρας (21/2/2017)..... 129

Διάγραμμα 6-13: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (23/3/2017)..... 132

Διάγραμμα 6-14: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (27/4/2017)..... 134

Διάγραμμα 6-15: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (11/5/2017)..... 136

Διάγραμμα 6-16: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής ημέρας (9/6/2017)..... 136

Διάγραμμα 6-17: Ολική μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ($E_{DC,m}$) και μηνιαία διακύμανση του λόγου επίδοσης ($PR_{DC,m}$) φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά την περίοδο Ιουλίου 2016 – Ιουνίου 2017..... 140

Διάγραμμα 6-18: Γραφική απεικόνιση των ηλεκτρικών παραμέτρων του φωτοβολταϊκού πλαισίου με PCM (σύστημα PV+PCM) και χωρίς PCM (φωτοβολταϊκό αναφοράς), βάσει των χαρακτηριστικών καμπυλών μεταβολής P-V και I-V στις 11:40 (11/5/2017)..... 141

Διάγραμμα 6-19: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ανοιξιάτικης ημέρας (11/5/2017)..... 142

Διάγραμμα 6-20: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας περιόδου πέντε (5) ημερών του καλοκαιρού (28/7/2016-1/8/2016)..... 142

Διάγραμμα 6-21: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας (21/7/2016)..... 145

Διάγραμμα 6-22: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας (2/8/2016)..... 145

Διάγραμμα 6-23: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας φθινοπωρινής ημέρας (11/9/2016)..... 146

Διάγραμμα 6-24: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας φθινοπωρινής ημέρας (12/10/2016)..... 146

Διάγραμμα 6-25: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας φθινοπωρινής ημέρας (17/11/2016)..... 148

Διάγραμμα 6-26: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής ημέρας (19/12/2016). 148

Διάγραμμα 6-27: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής ημέρας (17/1/2017). 149

Διάγραμμα 6-28: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής ημέρας (21/2/2017). 149

Διάγραμμα 6-29: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (23/3/2017). 151

Διάγραμμα 6-30: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (27/4/2017). 151

Διάγραμμα 6-31: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (11/5/2017). 153

Διάγραμμα 6-32: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας (9/6/2017). 153

Διάγραμμα 6-33: Διακύμανση των αποτελεσμάτων της θεωρητικής ανάλυσης και πειραματικών δεδομένων για το φωτοβολταϊκό αναφοράς και το σύστημα PV+PCM κατά τις επιλεγμένες ημέρες. 159

Διάγραμμα 7-1: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής ημέρας (22//2/2019). 162

Διάγραμμα 7-2: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (14/3/2017). 163

Διάγραμμα 7-3: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (10/4/2017). 163

Διάγραμμα 7-4: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (3/5/2019) 164

Διάγραμμα 7-5: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (13/5/2019). 164

Διάγραμμα 7-6: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας (20/6/2017). 166

Διάγραμμα 7-7: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας (25/6/2019). 166

Διάγραμμα 7-8: Διακύμανση του ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{SC}) και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{OC}) της περίπτωσης αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31 κατά τη διάρκεια των επιλεγμένων αντιπροσωπευτικών ημερών: a) 22/2/2019, b) 14/3/2019, c) 10/4/2019, d) 3/5/2019, e) 13/5/2019, f) 20/6/2019, g) 25/6/2019. 169

Διάγραμμα 7-9: Διακύμανση της απόκλισης των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31 κατά τη διάρκεια επιλεγμένων ημερών της άνοιξης και του καλοκαιριού: a) 14/3/2019, b) 10/4/2019, c) 20/6/2019, d) 25/6/2019. 174

Διάγραμμα 7-10: Συνολική παραγωγή ενέργειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31 κατά τη διάρκεια των επιλεγμένων αντιπροσωπευτικών ημερών: a) 22/2/2019, b) 14/3/2019, c) 10/4/2019, d) 3/5/2019, e) 13/5/2019, f) 20/6/2019, g) 25/6/2019. 176

Διάγραμμα 7-11: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των συστημάτων PV+PCM ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$, $T_{mb\ (PV+PCM31)}$) και του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$) κατά τη διάρκεια δύο τυπικών θερινών ημερών (: a) 5/7/2019, b)12/7/2019) με χαμηλές τιμές ταχύτητας ανέμου (v_w<5 m/s). 184

Διάγραμμα 7-12: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των συστημάτων PV+PCM ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$, $T_{mb\ (PV+PCM31)}$) και του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$) κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας (: a) 25/6/2019) με αυξημένες τιμές ταχύτητας ανέμου (v_w≥5 m/s). 185

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου των εξεταζόμενων μοντέλων πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργία του φωτοβολταϊκού κελιού. 44

Πίνακας 2-2: Σύνοψη των κύριων παραμέτρων ελέγχου των φωτοβολταϊκών πλαισίων με και χωρίς PCM (σύστημα PV-PCM1, σύστημα PV-PCM1), όπως σημειώθηκαν στις 12/9/2009 και 30/10/2009 υπό τις συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος του Δουβλίνου (Ιρλανδία) και του Βεχάρι (Πακιστάν), αντιστοιχα. 54

Πίνακας 2-3: Σύνοπτική παρουσίαση συναφών εργασιών που απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία 58

Πίνακας 3-1: Κλιματικά στοιχεία θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Τα) για την περιοχή των Χανίων (χρονική περίοδος μετρήσεων: 1958 - 2010). 69

Πίνακας 3-2: Κλιματικά στοιχεία ταχύτητας (v_w) και διεύθυνσης ανέμων για την περιοχή των Χανίων. 69

Πίνακας 3-3: Κλιματικά στοιχεία υγρασίας για την περιοχή των Χανίων (χρονική περίοδος μετρήσεων: 1958 - 2010). 69

Πίνακας 3-4: Κλιματικά στοιχεία βροχόπτωσης για την περιοχή των Χανίων (χρονική περίοδος μετρήσεων 1958 - 2010). 70

Πίνακας 3-5: Συνοπτικός πίνακας τιμών για τις παραμέτρων που χρησιμοποιούνται κατά τον υπολογισμό της θερμικής χωρητικότητας του ελεγχόμενου φωτοβολταϊκού πλαισίου και του ανεπτυγμένου δοχείου PCM. 79

Πίνακας 3-6: Τιμές των φυσικών παραμέτρων που αποτελούν μεταβλητες εισόδου στο μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου 80

Πίνακας 3-7: Χαρακτηριστικές παράμετροι για τα τεχνικά στοιχεία που συνθέτουν το ανεπτυγμένο σύστημα PV+PCM. 82

Πίνακας 3-8: Χαρακτηριστικές παράμετροι για τα τεχνικά στοιχεία που συνθέτουν το ανεπτυγμένο σύστημα PV+PCM. 88

Πίνακας 4-1: Βασικές παράμετροι και όργανα πειραματικών μετρήσεων 93

Πίνακας 5-1: Κατηγοριοποίηση του δείκτη ανάκλασης (ρ). 99

Πίνακας 5-2: Διαχωρισμός του έτους σε εποχές 108

Πίνακας 5-3: Χαρακτηρισμός ημέρας βάσει του δείκτη αιθριότητας. 108

Πίνακας 5-4: Διαχωρισμός της έντασης του ανέμου βάσει της κλίμακας Beaufort. 108

Πίνακας 6-1: Συγκριτικός πίνακας μέσων μηνιαίων τιμών των παραμέτρων: ημερήσια ενεργειακή απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο ($\boldsymbol{Ht}$) και το οριζόντιο ($\boldsymbol{Hh}$) επίπεδο, συντελεστή αιθριότητας ($\boldsymbol{Kt}$) για τις περιόδους αναφοράς Ιουλίου 2016 - Ιουνίου 2017 και 1958 - 2001. 114

Πίνακας 6-2: Σύνοψη των βασικών μετεωρολογικών παραμέτρων (G_t, $T\alpha$, v_w) και των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας των εξεταζόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων ($T_{m\ (PV\ reference)}$, $T_{m\ (PV+PCM)}$) κατά τις ώρες διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας για την 1η περίοδο αξιολόγησης (Ιούλιος 2016 – Ιούνιος 2017). 118

Πίνακας 6-3: Συγκεντρωτικός πίνακας των παραμέτρων προσδιορισμού της ενεργειακής απόκρισης του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά την περίοδο Ιουλίου 2016 – Ιουνίου 2017. 139

Πίνακας 6-4: Συγκριτικός πίνακας των ηλεκτρικών παραμέτρων του φωτοβολταϊκού πλαισίου με PCM (σύστημα PV+PCM) και χωρίς PCM (φωτοβολταϊκό αναφοράς), όπως σημειώθηκαν στις 11:40 (11/5/2017). 141

Πίνακας 6-5: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου της ακρίβειας των εκτιμήσεων του θεωρητικού μοντέλου για τις ελεγχόμενες ημέρες. 157

Πίνακας 7-1: Έλεγχος προσαρμογής του εμπειρικού μοντέλου εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$) για τις συνθήκες K_T≥0,5 και v_w<5 m/s. 180

Πίνακας 7-2: Έλεγχος προσαρμογής του εμπειρικού μοντέλου εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$) για τις συνθήκες K_T≥0,5 και v_w≥5 m/s. 180

Πίνακας 7-3: Έλεγχος προσαρμογής του εμπειρικού μοντέλου εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM27 ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$) για τις συνθήκες K_T≥0,5 και v_w<5 m/s. 181

Πίνακας 7-4: Έλεγχος προσαρμογής του εμπειρικού μοντέλου εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$) για τις συνθήκες K_T≥0,5 και v_w≥5 m/s. 181

Πίνακας 7-5: Έλεγχος προσαρμογής του εμπειρικού μοντέλου εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$) για τις συνθήκες K_T≥0,5 και v_w<5 m/s. 182

Πίνακας 7-6: Έλεγχος προσαρμογής του εμπειρικού μοντέλου εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$) για τις συνθήκες K_T≥0,5 και v_w≥5 m/s. 182

Πίνακας 8-1: Συνοπτικός πίνακας μέσων μηνιαίων τιμών για τις παραμέτρους ελέγχου: ημερήσια ενεργειακή απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο (Ht), συντελεστής αιθριότητας (Kt), θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T\alpha$), ταχύτητα ανέμου (v_w), θερμοκρασία λειτουργίας των εξεταζόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων ($T_{m\ (PV\ reference)}$, $T_{m\ (PV+PCM)}$), κατα τη 1η περίοδο αξιολόγησης (Ιούλιος 2016 – Ιούνιος 2017). 189

Πίνακας 8-2: Εποχική διακύμανση της θερμικής συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τις ώρες διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας, για την 1η περίοδο αξιολόγησης (Ιούλιος 2016 – Ιούνιος 2017). 189

Πίνακας 8-3: Εποχική διακύμανση της ενεργειακής συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τις ώρες διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας, για την 1η περίοδο αξιολόγησης (Ιούλιος 2016 – Ιούνιος 2017). 190

Πίνακας 8-4: Συγκριτικό πίνακας αξιολογησης των αποτελεσματαων της παρούσας μελέτης σε σχεση με τα στοιχεία μελετών που απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία. 192

Πίνακας 8-5: Συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που σχετίζονται με την αποτελεσματικότητας της χρησιμοποιούμενης ποσότητας PCM, στο πλαίσιο της εφαρμογής των συστημάτων PV+PCM, και των στοιχείων από αντίστοιχες μελέτης σε διαιρετικές περιοχές. 193

Πίνακας 8-6: Συνοπτική παρουσίαση των ανεπτυγμένων εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων. 195

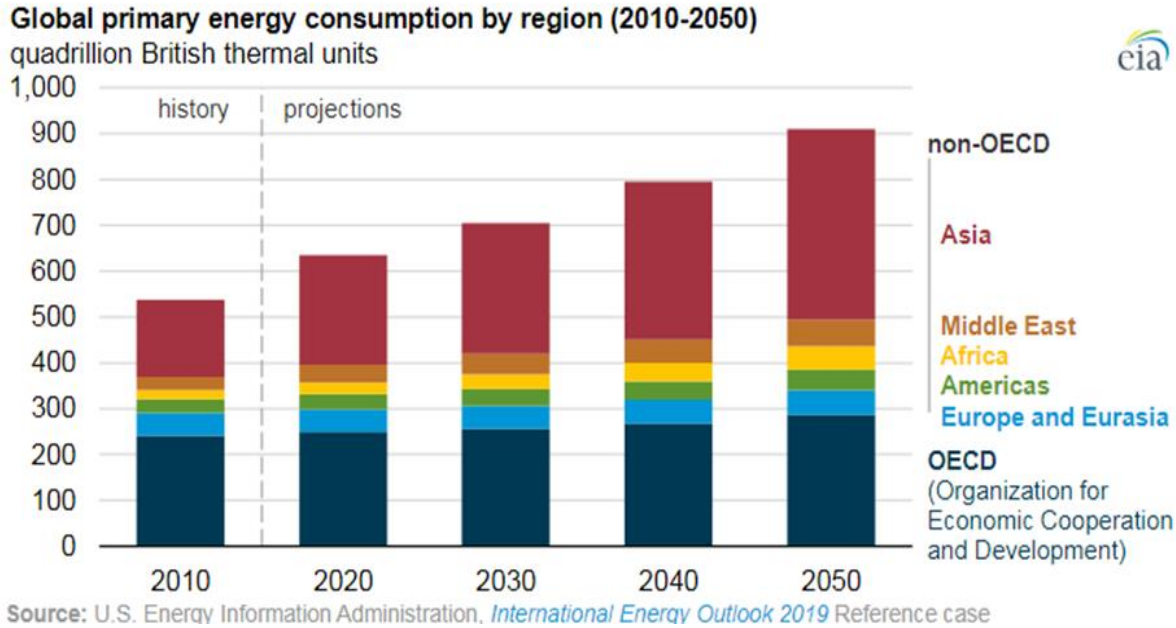
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-1: Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MWp) στην Ευρωπαϊκή Ένωση κατά το έτος 2019. 32
Εικόνα 1-2: Γραφική απεικόνιση του εθνικού σχεδίου ανάπτυξης της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας στην Ελλάδα. 33
Εικόνα 1-3: Φωτοβολταϊκό στέγαστρο (ονομαστικής ισχύος 1,58 MWp) πάνω από το κτίριο της Εθνικής Λυρικής Σκηνής στο Κέντρο Πολιτισμού Ίδρυμα Σταυρός Νιάρχος. 33
Εικόνα 2-1: Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας τυπικού φωτοβολταϊκού στοιχείου. 39
Εικόνα 2-2: Σχηματική απεικόνιση της ελεγχθείσας πειραματικής διάταξης στην περιοχή του Δουβλίνου (Ιρλανδία). 60
Εικόνα 3-1: Απεικόνιση της τοποθεσίας εγκατάστασης πειραματικών διατάξεων. 66
Εικόνα 3-2: Χώρος διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων (Εργαστήριο Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος) 67
Εικόνα 3-3: Χάρτης ηλιακού δυναμικού της Ελλάδας. 71
Εικόνα 3-4: Σχηματικό διάγραμμα ενεργειακών ροών σε ένα τυπικό σύστημα PV+PCM. 72
Εικόνα 3-5: Πρωτότυπο σύστημα PV+PCM 82
Εικόνα 3-6: Σχηματική απεικόνιση του φωτοβολταϊκού πλαισίου Sharp NA-E130(L5). 83
Εικόνα 3-7: Σχηματική απεικόνιση της τομής τυπικού φωτοβολταϊκού πλαισίου λεπτών υμενίων διπλής επίστρωσης (a-Si/μc-Si) 83
Εικόνα 3-8: 1η Σχεδιαστική προσέγγιση για τη δημιουργία του περιβλήματός PCM. 84
Εικόνα 3-9: Σχηματική απεικόνιση του περιβλήματός PCM (αριστερά) και της τελικής διαμόρφωσης του συστήματος PV+PCM (δεξιά). 85
Εικόνα 3-10:Σχηματική απεικόνιση της 2ης προσέγγισης σχεδιασμού για το σύστημα PV+PCM 86
Εικόνα 3-11: Σχηματική απεικόνιση του φωτοβολταϊκού πλαισίου Luxor LX-10M 86
Εικόνα 4-1: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης και των χρησιμοποιούμενων μέσων για τη διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων. 93
Εικόνα 5-1: Γωνίες ορισμού θέσης μιας επίπεδης επιφάνειας και του Ήλιου. 97
Εικόνα 5-2: Συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας. 101
Εικόνα 5-3: Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου. 105
Εικόνα 5-4: Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική καμπύλη ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. 107
Εικόνα 6-1 Κοντινή άποψη της εξεταζόμενης πειραματικής διάταξης κατά τη Α' φάση μετρήσεων. 113
Εικόνα 6-2: Θερμική εικόνα της πειραματικής διάταξης (εμπρόσθια όψη) ληφθείσα στις 12:30 μ.μ., 21/7/2016. 120
Εικόνα 6-3: Θερμική εικόνα της πειραματικής διάταξης (εμπρόσθια όψη) ληφθείσα στις 11:00 π.μ., 2/8/2016. 122
Εικόνα 6-4: Θερμική εικόνα της πειραματικής διάταξης (εμπρόσθια όψη) ληφθείσα στις 10:30 π.μ., 11/9/2016. 124
Εικόνα 6-5: Θερμική εικόνα της πειραματικής διάταξης (εμπρόσθια όψη) ληφθείσα στις 17:00, 12/10/2016. 126
Εικόνα 6-6: Θερμική εικόνα της πειραματικής διάταξης (εμπρόσθια όψη) ληφθείσα στις 9:00, 23/3/2017 132
Εικόνα 6-7: Θερμικής εικόνα της πειραματικής διάταξης (εμπρόσθια όψη) ληφθείσα στις 17:00, 27/4/2017 134

Κεφάλαιο 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

1.1 Γενικά

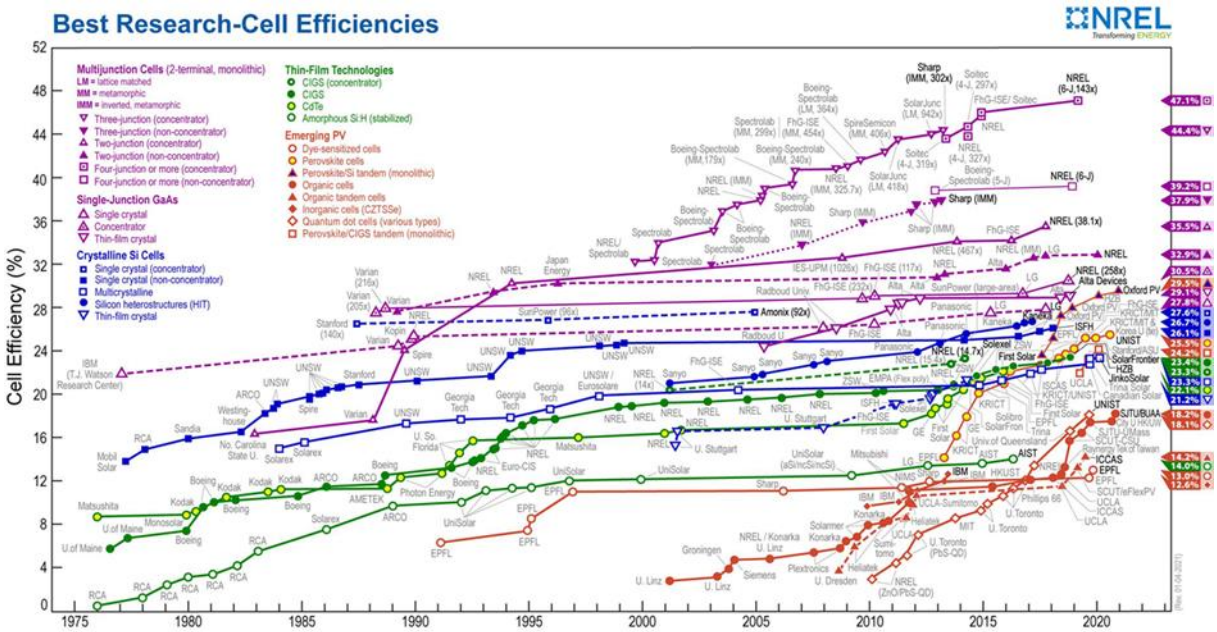
Σε διεθνές επίπεδο, οι δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εντατική χρήση των πεπερασμένων φυσικών πόρων (γαιάνθρακες, αργό πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.λπ.) για την κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης, στο πλαίσιο της ευημερίας των σύγχρονων κοινωνιών, αποτελούν πεδίο έντονου προβληματισμού και έρευνας κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών. Παράλληλα, οι εκτιμήσεις του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών για αξιοσημείωτη μεγέθυνση του παγκόσμιου πληθυσμού ως το 2050 (~9,7 δις) [*UN*, 2019] σε συνδυασμό με τις προβλέψεις για τη διατήρηση υψηλού ρυθμού ανάπτυξης της οικονομίας, ιδιαίτερα στις ταχύτερα αναπτυσσόμενες χώρες της Ασίας (Κίνα, Ινδία) [*World Bank*, 2021], υποδεικνύουν μια συνέχεια της αυξητικής τάσης όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα (Διάγραμμα 1-1), και εγείρουν ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού. Ως εκ τούτου, η ανάγκη υιοθέτησης ενός ενεργειακού μοντέλου που θα βασίζεται στις αρχές της αειφόρου ανάπτυξης, προβάλλει ως επιτακτική για την ομαλή και δίκαιη μετάβαση προς ένα ενεργειακό σύστημα με χαμηλότερη ένταση άνθρακα. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται περαιτέρω από τις δεσμεύσεις 197 κρατών που απορρέουν από τη συμφωνία του Παρισίου για την κλιματική αλλαγή. Για την επίτευξη του στόχου της ενεργειακής μετάβασης, η αυξημένη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην τελική κατανάλωση ενέργειας, η ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης, η ορθολογική διαχείριση της ενεργειακής ζήτησης, η ανάπτυξη ευφυών δικτύων διανομής και αποθήκευσης ενέργειας καθίστανται στρατηγικοί άξονες παρέμβασης, στο πλαίσιο μιας ολοκληρωμένης ενεργειακής πολιτικής με έμφαση στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα, την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού και την ανταγωνιστικότητα. [*Wiseman*, 2018; *UNECE*, 2020; *Kemfert et al.*, 2020]



Διάγραμμα 1-1: Η αναμενόμενη εξέλιξη της κατανάλωσης ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο (περίοδος 2010-2050)

[*EIA*, 2019]

Ειδικότερα, η παραγωγή και χρήση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές αναμένεται να αναλάβει πρωταγωνιστικό ρόλο στην οικουμενική προσπάθεια για ένα ενεργειακό σύστημα, το οποίο θα διασφαλίζει την επίτευξη του στόχου διατήρησης της αύξησης της θερμοκρασίας αρκετά χαμηλότερα από τους 2 ^{o}C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα, μέχρι το έτος 2100 [*IRENA*, 2021]. Πέρα από τα άμεσα περιβαλλοντικά κέρδη που ανακύπτουν, λόγω της υποκατάστασης της παραγωγής ενέργειας με χρήση συμβατικών καυσίμων, η ρθολογική αξιοποίηση των ΑΠΕ δύναται να παρέχει σημαντικά κοινωνικά και οικονομικά οφέλη (π.χ. τοπική και περιφερειακή ανάπτυξη, ενεργειακή ανεξαρτησία και ασφάλεια, ενίσχυση και αντοχή της οικονομίας, νέες επενδυτικές ευκαιρίες, νέες θέσεις εργασίας, αντιμετώπιση του φαινομένου ενεργειακής ένδειας, μείωσης του κόστους της ενέργειας, προστασία της δημόσιας υγείας, κ.α.), ενώ ταυτόχρονα προάγεται η καινοτομία και η ανάπτυξη νέων εφαρμογών στον τομέα της ενέργειας [*IRENA*, 2017; *Gielen et al.,* 2019; *Cantarero*; 2020].
Μεταξύ των διαφορετικών μορφών ΑΠΕ, η αξιοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, μέσω των ενδεδειγμένων φωτοβολταϊκών διατάξεων, θεωρείται σήμερα ως μια εκ των βέλτιστων διαθέσιμων τεχνολογικών επιλογών ηλεκτροπαραγωγής. Συνεπώς, η φωτοβολταϊκή τεχνολογία, η οποία αναπτύχθηκε ραγδαία κατά τη διάρκεια του 2^{ου} μισού του 20^{ου} αιώνα, αναμένεται να γνωρίσει σημαντική αύξηση της συμμετοχής της στο ενεργειακό μείγμα του μέλλοντος δεδομένου ότι εμφανίζει υψηλό επίπεδο ωριμότητας και πολλαπλές δυνατότητες εφαρμογής [*Τσούτσος* και *Κανάκης*, 2013]. Παρά την αναγνώριση της σημαντικής εξέλιξης και των θετικών προοπτικών ανάπτυξης της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, η διεθνής επιστημονική κοινότητα συνεχίζει απρόσκοπτα τις ερευνητικές της δραστηριότητες, εστιάζοντας στην περαιτέρω ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων με ταυτόχρονή μείωση του κόστους παραγωγής τους. Για το σκοπό αυτό, τα τελευταία χρόνια, προωθείται η παραγωγή νέων τύπων φωτοβολταϊκών στοιχείων (Διάγραμμα 1-2) μέσω σύγχρονων διεργασιών χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης.



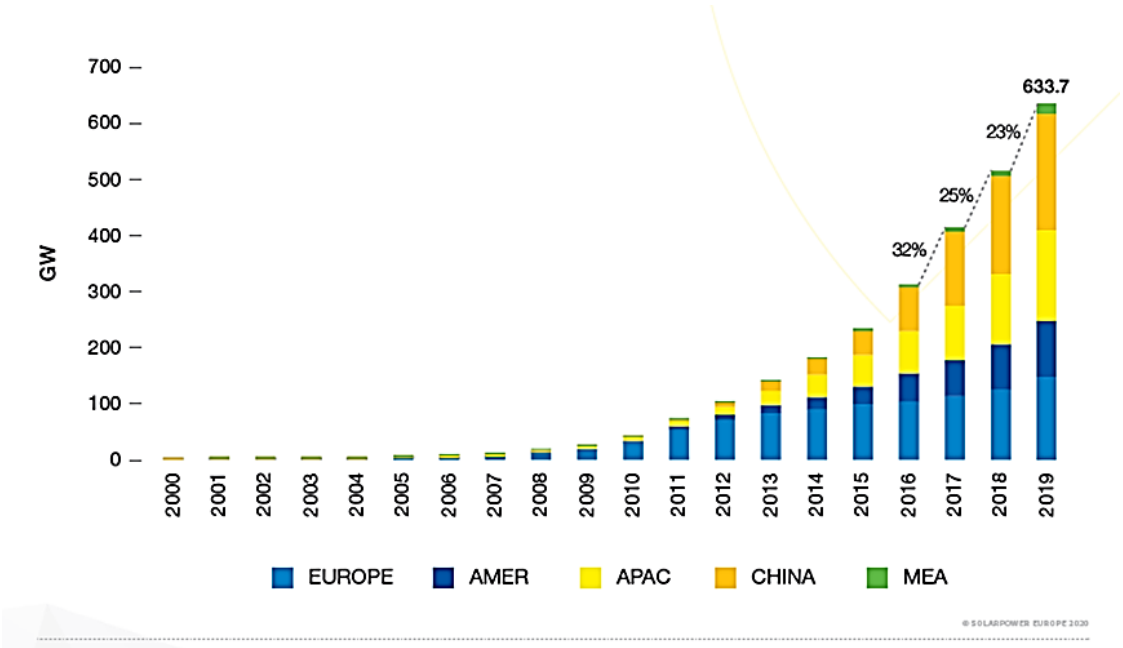
Διάγραμμα 1-2: Διαχρονική εξέλιξη της απόδοσης για διαφορετικές τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων.

[*NREL*, 2021]

1.2 Η παγκόσμια αγορά φωτοβολταϊκών συστημάτων

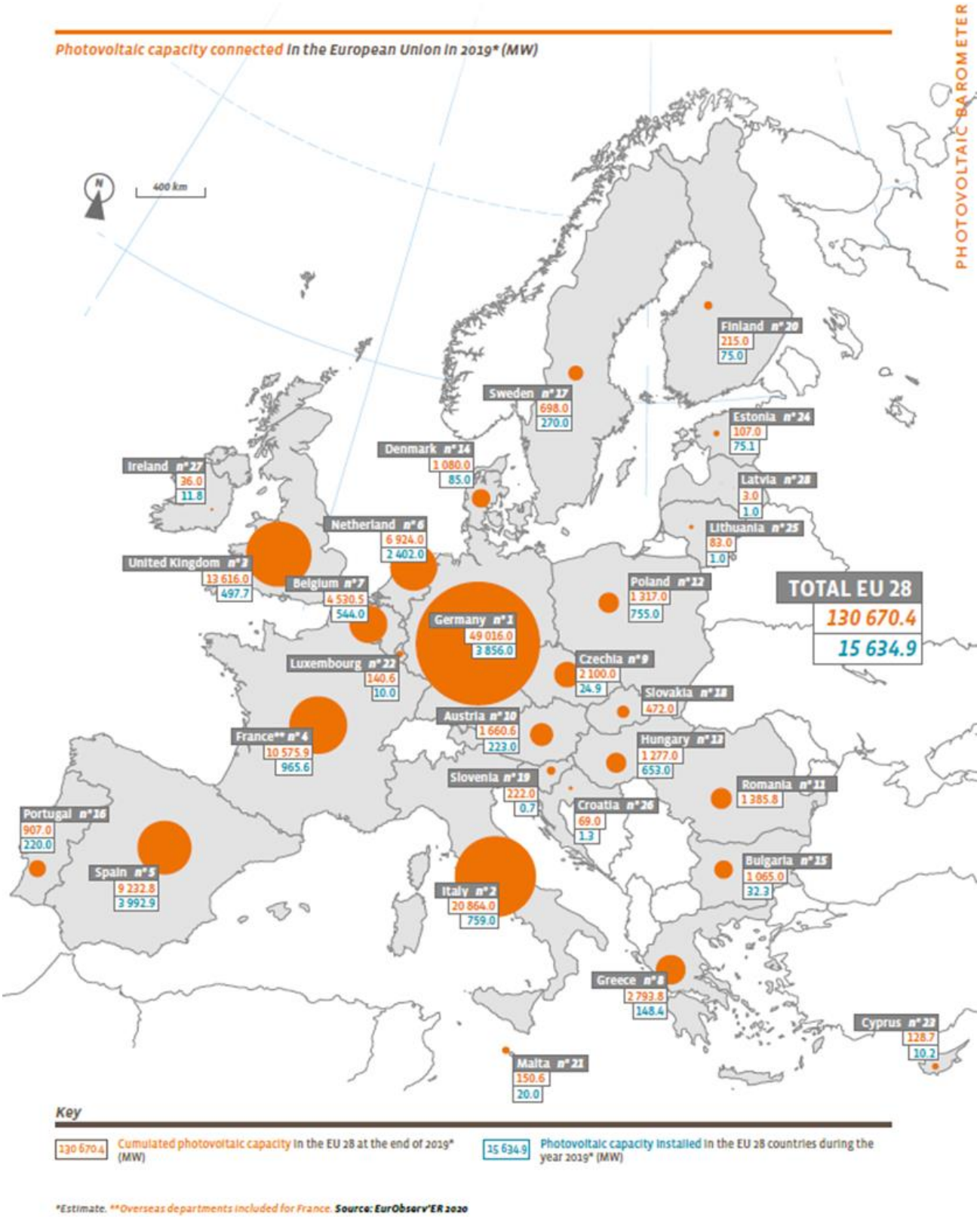
1.2.1 Η φωτοβολταϊκή ενέργεια σε διεθνές επίπεδο

Πρόσφατα, η στροφή προς την αξιοποίηση των ΑΠΕ, ως μέτρο περιορισμού των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, κατατάχθηκε αναμεσά στους κύριους άξονες παρέμβασης για την υποστήριξη της επιθυμητής ενεργειακής μετάβασης προς ένα ενεργειακό σύστημα και μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Ως εκ τούτου, η παραγωγή ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων, τα οποία χαρακτηρίζονται από ισχυρά πλεονεκτήματα, ανταγωνιστικό κόστος εγκατάστασης (έναντι των υπόλοιπων τεχνολογιών ΑΠΕ) και αυξημένες δυνατότητες αυτονομίας, προσαρμογής και εξέλιξης σε τεχνικό επίπεδο, κερδίζει έδαφος και αναμένεται συμβάλει ουσιαστικά για την ικανοποίηση των επιδιώξεων της προωθούμενης στρατηγικής για τη βιώσιμη ανάπτυξη. Επιπροσθέτως, η αξία και οι προοπτικές της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας έχουν αναγνωριστεί σε επίπεδο λήψης πολιτικών αποφάσεων, με τη διαμόρφωση σχεδίων δράσης και τη δημιουργία χρηματοδοτικών μηχανισμών στήριξης, αλλά και σε επίπεδο επενδυτικού κοινού, όπως υποδεικνύουν τα στοιχεία για την εξέλιξη της αγοράς φωτοβολταϊκών σε διεθνές επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα, κατά την τελευταία δεκαετία, η ανάπτυξης της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας καταγράφεται με αυξανόμενο ρυθμό και υψηλή συνέπεια ως προς το σημαντικό ρόλο της για την ομαλή εξέλιξη της ενεργειακής μετάβασης. Σύμφωνα με πρόσφατα στοιχεία από τον οργανισμό SolarPower Europe, η εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών σε παγκόσμια κλίμακα αυξήθηκε σημαντικά από 41,4 GWp το έτος 2010, σε 633,7 GWp στο τέλος του 2019 (Διάγραμμα 1-3), με περίπου 149,2 GWp να αφορούν σε εγκατεστημένη ισχύ στην Ευρώπη,~205,2 GWp στην Κίνα, ~76,1 GWp στις Η.Π.Α.,~63 GWp στην Ιαπωνία. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η σχετική αύξηση που σημειώθηκε το 2019, οφείλονταν στη διεύρυνση της αγοράς της Κίνας και των ΗΠΑ, ενώ σε μικρότερο βαθμό στις αγορές της Ινδίας και της Ιαπωνίας. [*SolarPower Europe*, 2020]



Διάγραμμα 1-3: Διαχρονική εξέλιξη της συνολικής εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύος (GWp) κατά την περίοδο 2000 - 2019.

[*SolarPower Europe*, 2020]

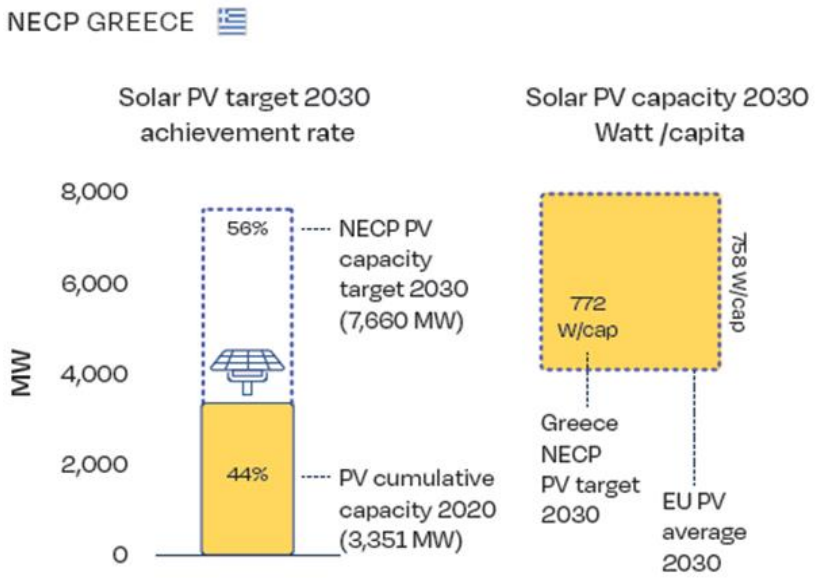


Εικόνα 1-1: Εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών (MWp) στην Ευρωπαϊκή Ένωση κατά το έτος 2019.

[*Eurobserver*, 2020]

1.2.2 Η φωτοβολταϊκή ενέργεια στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, η εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων, βάσει των πρόσφατων στοιχείων, ξεπέρασε το όριο των 3,4 GWp, με την ετήσια εγκατεστημένη ισχύ διασυνδεμένων φωτοβολταϊκών κατά τη διάρκεια της περιόδου Ιανουαρίου - Σεπτεμβρίου 2020, να αγγίζει τα 500 MWp. Η εξέλιξη αυτή κρίνεται ως σημαντική, αν ληφθούν υπόψη οι ιδιαιτερότητες του έτους 2020 που σχετίζονται με τον τρόπο τιμολόγησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. ηλεκτρονικές δημοπρασίες) και φορολόγησης των εσόδων που προκύπτουν, καθώς και τις ρυθμίσεις για την προώθηση της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων για αυτοπαραγωγή με ενεργειακό συμψηφισμό. [*SolarPower Europe*, 2020]



Εικόνα 1-2: Γραφική απεικόνιση του εθνικού σχεδίου ανάπτυξης της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας στην Ελλάδα.

[*SolarPower Europe*, 2020]

Εικόνα 1-3: Φωτοβολταϊκό στέγαστρο (ονομαστικής ισχύος 1,58 MWp) πάνω από το κτίριο της Εθνικής Λυρικής Σκηνής στο Κέντρο Πολιτισμού Ίδρυμα Σταυρός Νιάρχος.

[*ΚΠΙΣΝ,* 2017]

1.3 Απόδοση φωτοβολταϊκών πλαισίων και παράγοντες επιρροής της

Σε γενικές γραμμές, η ενεργειακή απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου εξαρτάται πρωτίστως από την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην ενεργή επιφάνεια του, και δευτερευόντως από τη θερμοκρασία λειτουργίας του [*Lobera και Valkealahti*, 2013]. Αναλυτικά, η αύξηση της έντασης ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας επιφέρει σχεδόν ανάλογη μεταβολή στην τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης και του ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος του φωτοβολταϊκού πλαισίου, ενώ η τάση ανοιχτού κυκλώματος και η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος παρουσιάζουν σχεδόν αμελητέα μεταβολή. Γίνεται, επομένως, εύκολα αντιληπτή η αναλογική σχέση μεταξύ της αποδιδόμενης ισχύος του φωτοβολταϊκού πλαισίου και της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας υπό σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας. Εν αντιθέσει, η επίδραση της θερμοκρασίας στην ενεργειακή συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου παρατηρείται σημαντική, δεδομένου ότι η σχετική αύξηση της συνδέεται με τον περιορισμό της τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος, και κατ' επέκταση της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος του φωτοβολταϊκού πλαισίου [*Kalogirou*, 2009]. Συμπληρωματικά, άλλοι παράγοντες που επιδρούν στην ενεργειακή απόκριση των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι:

- *Ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου*: Σαφώς, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου συνδέονται με τη λειτουργική απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, καθώς άνεμοι που πνέουν από βόρειες διευθύνσεις και με υψηλές τιμές ταχύτητας συνεπάγονται χαμηλότερες τιμές για τη θερμοκρασία λειτουργία του.
- *Καθαρότητα των όψεων των φωτοβολταϊκών πλαισίων*: Αναμφίβολα, οι διάφορες μορφές επικαθίσεων (π.χ. σωματιδίων σκόνης, άλατα, κλπ.) μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές απώλειες στην απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- *Σκίαση*: Γενικά, οι συνθήκες σκίασης για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα δύναται να προκύψουν είτε από την παρουσία εμποδίων, είτε λόγω παροδικών φαινομένων (π.χ. σύννεφα) ή από περιορισμούς που σχετίζονται με τη χωροθέτηση της εγκατάστασης. Πέραν των βραχυχρόνιων επιπτώσεων της σκίασης στην ενεργειακή απόδοση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, ο παρατεταμένος σκιασμός ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου του, σε συνδυασμό με έντονο φωτισμό των υπόλοιπων στοιχείων του, μπορεί να επιφέρει την πλήρη καταστροφή του φωτοβολταϊκού πλαισίου αυτού.
- *Γήρανση*: Η μείωση της ενεργειακής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου με το πέρασμα του χρόνου, λόγω της σχετικής αλλοίωσης των επιμέρους στοιχείων του, αναγνωρίζεται ως μια αναμενόμενη συνθήκη. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα σχετικών μελετών, ο ρυθμός ελάττωσης της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου κρυσταλλικού πυριτίου αναφέρεται ίσος με 1%/έτος, υπό πρότυπες συνθήκες.
- *Ηλεκτρικές απώλειες*: Σε επίπεδο φωτοβολταϊκού συστήματος, μια σειρά ηλεκτρικών απωλειών δύναται να προκληθούν μέσω των ηλεκτρικών συνδέσεων των μερών του.
- *Οπτικές Απώλειες*: Οι οπτικές απώλειες σχετίζονται κυρίως με τη διαφοροποίηση της ανακλαστικότητας των επιμέρους στρωμάτων του φωτοβολταϊκού πλαισίου και του φάσματος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που σημειώθηκαν σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC).

[*Φραγκιαδάκης*, 2008; *Hasapis et al.*, 2017]

1.4 Αντικείμενο-Στόχοι της Διατριβής

Η μετάβαση από την υφιστάμενη κατάσταση στον τομέα της ενέργειας προς ένα μοντέλο ενεργειακού συστήματος με αυξημένη συμμετοχή του ποσοστού των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας αποτελεί, πλέον, μια αναγκαία συνθήκη, αναγνωρισμένη διεθνώς, για την ανάσχεση του εν εξελίξει φαινομένου της κλιματικής αλλαγής. Σε αυτή τη διεθνή προσπάθεια, ο ρόλος της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας για την υποστήριξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο σε μικρή (π.χ. αποκεντρωμένη παραγωγή, αυτόνομη λειτουργία, δίκτυα) όσο και μεγάλη κλίμακα (π.χ. λειτουργία διασύνδεσης), προσδιορίζεται ως εξόχως σημαντικός, καθότι συνδυάζει έναν αυξημένο αριθμό θετικών χαρακτηριστικών. Με δεδομένα τα παραπάνω, καθίσταται σαφής η διατήρηση υψηλού ρυθμού ανάπτυξης της παγκόσμιας αγοράς φωτοβολταϊκών τα επόμενα χρόνια. Ωστόσο, κύριες προϋποθέσεις για τη θωράκιση του ευμενώς διακείμενου περιβάλλοντος ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών εφαρμογών, είναι η διασφάλιση της αξιοπιστίας και της ποιότητας κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας αυτών, καθώς επίσης και η περαιτέρω τεχνολογική εξέλιξη προς την κατεύθυνση του μετριασμού των περιοριστικών παραγόντων που ανακύπτουν λόγω της φύσης της ηλιακής ενέργειας.

Αναμεσά στους παράγοντες με σημαντική επίδραση στην ενεργειακή απόδοση και την ωφέλιμη διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών συστημάτων, η θερμοκρασία λειτουργίας των πλαισίων τυγχάνει ιδιαίτερης προσοχής, τόσο σε επίπεδο σχεδιασμού όσο και σε επίπεδο εφαρμογής, για την πλήρη κατανόηση των αποκλίσεων (βραχυπροθέσμα ή/και μακροπρόθεσμα) μεταξύ της πραγματικής και της αναμενόμενης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Άλλωστε, η άποψη αυτή τεκμηριώνεται μέσω της αιτιώδους σχέσης ανάμεσα στην αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ και τη θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, όταν αυξάνεται πάνω από τους 25 °C, η οποία περιγράφεται από τον θερμικό συντελεστή μέγιστης ισχύος λαμβάνοντας τιμές από -0,2%/^{o}C έως -0,5%/^{o}C. Ως εκ τούτου, η ανάλυση του μηχανισμού που προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων και η ανάπτυξη κατάλληλων τεχνικών μετριασμού των συνεπαγόμενων επιπτώσεων χαρακτηρίζονται ως σύγχρονες προκλήσεις για το μέλλον της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής συνιστά ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ικανών διατάξεων διαχείρισης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, μέσω των οποίων να επιτυγχάνεται η διατήρηση της υψηλής ενεργειακής και περιβαλλοντικής απόδοσης μέχρι την ολοκλήρωση του κύκλου ωφέλιμης ζωής τους, με την προτεινόμενη μέθοδο να βασίζεται στη χρήση PCM ως ρευστού μέσου για την απαγωγή της θερμότητας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η προτεινόμενη μέθοδος είναι ευρύτερα γνωστή με την ονομασία "σύστημα PV+PCM", καθότι ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο συνδυάζεται με έναν τύπο PCM, συνιστώντας μια ενιαία δομική οντότητα. Πέραν της κατασκευής των προτεινόμενων διατάξεων, η πειραματική αξιολόγηση της θερμικής και της ενεργειακής συμπεριφοράς τυπικών φωτοβολταϊκών πλαισίων, χωρίς και με την ενσωμάτωση PCM (σύστημα PV+PCM), υπό τις πραγματικές κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου στην περιοχή της Κρήτης, προκειμένου να διερευνηθούν τα οφέλη της προτεινόμενης μεθόδου, να αναγνωριστούν τα σημεία που χρήζουν περαιτέρω βελτίωσης και να πραγματοποιηθεί η συσχέτιση μεταξύ των μετρούμενων παραμέτρων, συνιστά τον κύριο πυρήνα της παρούσας διατριβής. Παράλληλα, τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα αξιοποιήθηκαν περαιτέρω για τη διαμόρφωση

εμπειρικών μοντέλων εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας των συστημάτων PV+PCM, τα οποία δύναται να χρησιμοποιηθούν σε περιοχές με όμοια κλιματικά χαρακτηριστικά. Ακόμη, η διαμόρφωση μιας γενικής μεθοδολογίας σχεδιασμού για συστήματα τύπου PV+PCM, η οποία βασίστηκε στην κατάλληλη τροποποίηση υφιστάμενου θεωρητικού μοντέλου ενεργειακού ισοζυγίου για φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναγνωρίζεται ως κύριο σημείο της έρευνας. Επιπρόσθετο στοιχείο θεωρείται η προκαταρκτική αξιολόγηση της περιβαλλοντικής απόδοσης των συστημάτων PV+PCM, βάσει των πραγματικών δεδομένων όσον αφορά την κατασκευή και τη λειτουργία τους, και για το σύνολο του κύκλου ζωής τους, η οποία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο υιοθέτησης μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας αξιολόγησης τους. Τέλος, αξίζει να επισημανθεί ότι το σύνολο των θεωρητικών αποτελεσμάτων επαληθεύονται αξιοποιώντας τις κατάλληλες πειραματικές μετρήσεις. Ειδικότερα, οι βασικοί στόχοι της διδακτορικής διατριβής είναι:

- Η διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου μεθοδολογικού πλαισίου αξιολόγησης των συστημάτων PV+PCM, το οποίο λαμβάνει υπόψη την ενεργειακή και την περιβαλλοντική τους διάσταση.
- Η ανάπτυξη απλοποιημένης, αναπαράξιμης και οικονομικά αποδοτικής μεθοδολογικής προσέγγισης σχεδιασμού των συστημάτων PV+PCM, με την επικύρωση της να στηρίζεται σε σημαντικό βαθμό στην ακρίβεια του υιοθετημένου θεωρητικού μοντέλου ενεργειακού ισοζυγίου.
- Ο καθορισμός κριτηρίων για την κατασκευή των προτεινόμενων διατάξεων διαχείρισης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες που απαντώνται σε συνθήκες πεδίου στις περιοχές της Μεσογείου.
- Η διεξαγωγή ικανού αριθμού πειραματικών μετρήσεων για τη συστηματική μελέτη της θερμοκρασίας λειτουργίας των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών τύπων με και χωρίς τη χρήση PCM υπό τις επικρατούσες συνθήκες της Μεσογείου. Ταυτόχρονα, η συγκριτική αξιολόγηση των καταγεγραμμένων μετρήσεων για την αναγνώριση του βαθμού και την κατανόηση του μηχανισμού επίδρασης των προτεινόμενων διατάξεων παθητικής ψύξης στη θερμική συμπεριφορά των συζευγμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων (σε ημερήσια, μηνιαία και ετήσια βάση). Ακόμη, ειδικό στόχο συνιστά η στοχευμένη ανάλυση της εποχικότητας στη θερμική απόκριση των συστημάτων PV+PCM.
- Η εφαρμογή διεξοδικού πειραματικού ελέγχου για το χαρακτηρισμό της ενεργειακής απόκρισης (αποδιδόμενη ισχύς, παραγωγή ενέργειας, βαθμός απόδοσης) των φωτοβολταϊκών πλαισίων των ελεγχόμενων πειραματικών διατάξεων (φωτοβολταϊκά πλαίσια αναφοράς, συστήματα PV+PCM) σε ημερήσια, μηνιαία και ετήσια βάση. Παράλληλα, ειδικός στόχος της μελέτης είναι η σύγκριση των ληφθέντων αποτελεσμάτων με συναφή στοιχεία άλλων σχετικών μελετών που απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία
- Η εξαγωγή συμπερασμάτων και η διαμόρφωση σημείων αναφοράς για τα οφέλη εφαρμογής.

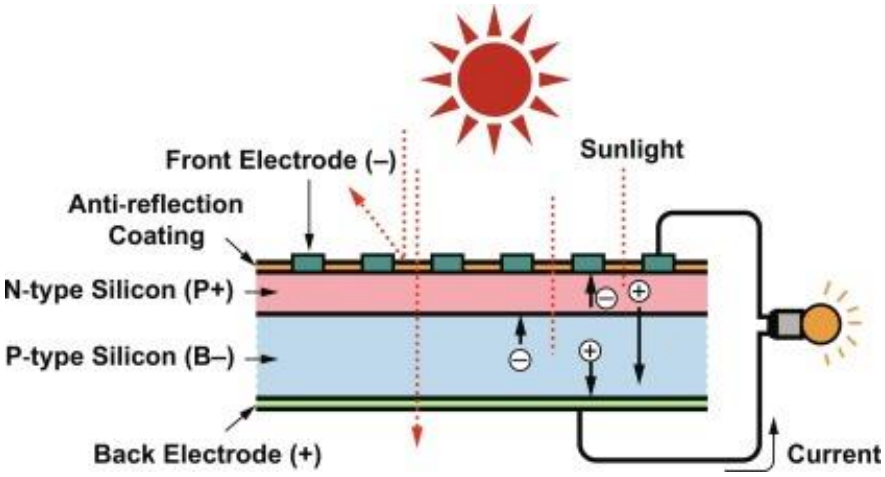
Τα αποτελέσματα δύνανται να παρέχουν σημαντικά στοιχεία για τις βελτιώσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την ένταξη διατάξεων ψύξης σε υφιστάμενες ή μελλοντικές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, με σκοπό την αυξημένη ενεργειακή απόδοση και την ταυτόχρονη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων τους.

Κεφάλαιο 2 : ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

2.1 Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία

2.1.1 Αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Σε γενικές γραμμές, ως φωτοβολταϊκό φαινόμενο περιγράφεται η διαδικασία μέσω της οποίας ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μετατρέπει την απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Συνήθως, η λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων εδράζεται στον μηχανισμό της επαφής τύπου p-n, η οποία δημιουργείται μέσω της κατάλληλης διάταξης ημιαγωγών πρόσμειξης (Εικόνα 2-1) και επιτρέπει την κίνηση των ηλεκτρονίων παρουσία φωτεινής πηγής (π.χ. ηλιακή ακτινοβολία). Αναλυτικά, η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία συνίσταται από φωτόνια με διαφορετικό ενεργειακό περιεχόμενο ανάλογα με το μήκος κύματος του ηλιακού φάσματος, στην επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου επιφέρει τη διέγερση στην περιοχή της ημιαγωγικής επαφής του. Η σχετική διέγερση λαμβάνει χώρα λόγω της απορρόφησης φωτονίων, με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού, η οποία επιτρέπει τη μεταπήδηση ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, απελευθερώνοντας στη ζώνη σθένους αντίστοιχες οπές. [*Τσούτσος* και *Κανάκης*, 2013]



Εικόνα 2-1: Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας τυπικού φωτοβολταϊκού στοιχείου.

[*Gorjian και Shukla*, 2020]

Κατά συνέπεια, ένα πλεόνασμα από ζεύγη φορέων ηλεκτρονίων-οπών δημιουργείται κατά την ακτινοβόληση. Οι φορείς αυτοί, καθώς διαχέονται στο στερεό και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντιθέτου πρόσημου, δύνανται να εντοπιστούν στην περιοχή της επαφής p-n υπό την επιρροή του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού της πεδίου. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια αποκλίνουν προς την περιοχή του ημιαγωγού τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς την περιοχή του ημιαγωγού τύπου p, με επακόλουθο τη δημιουργία μιας διαφοράς δυναμικού στα άκρα του ηλεκτρικού πεδίου. [*Φραγκιαδάκης*, 2008; *Τσούτσος* και *Κανάκης*, 2013]

Με άλλα λόγια, η διάταξη ημιαγωγών πρόσμειξης λογίζεται ως πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, διατηρώντας την ιδιότητα αυτή, κατά το χρονικό διάστημα πρόσπτωσης του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Η παρατήρηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο (2) όψεων του φωτοβολταϊκού στοιχείου που αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, καλείται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων για την παραγωγή ενέργειας εδράζεται στην αξιοποίηση του σχετικού φαινομένου. [*Τσούτσος* και *Κανάκης*, 2013]

2.1.2 Είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων

Το πυρίτιο (Si) αποτελεί έναν εκ των πλέον κοινών ημιαγωγών, με υψηλή διαθεσιμότητα στη φύση (περίπου 28% του στερεού φλοιού της Γης), ο οποίος έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στη βιομηχανία παραγωγής φωτοβολταϊκών στοιχείων. Πέραν του πυριτίου (Si), για το σχηματισμό φωτοβολταϊκών στοιχείων έχουν αξιοποιηθεί ο δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CIS), το τελουριούχο κάδμιο (CdTe), κ.α. Ενδεικτικά, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία δύνανται να ταξινομηθούν σε διαφορετικές κατηγορίες βάσει του κύριου ημιαγώγιμου υλικού (π.χ. κρυσταλλικού πυριτίου – c-Si, άμορφου πυριτίου – a-Si, κ.α.), του τρόπου κατεργασίας τους (π.χ. λεπτών υμενίων – TF κ.α.), του τύπου των επαφών τους (π.χ. ομοειδούς – homojunction, ετεροεπαφής – heterojunction), καθώς επίσης και της δομής τους (π.χ. πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά – HIT). [*Φραγκιαδάκης*, 2008]

2.2 Η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων

Οι κύριες παράμετροι, οι οποίες ελέγχονται σε κάθε εργαστηριακά κατασκευασμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο, όπως επίσης και στο τελικό προϊόν, είναι η ισχύς στο σημείο αιχμής (P_p), ο παράγοντας πλήρωσης (*FF*), το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{SC}) και η τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{OC}) υπό δεδομένες συνθήκες φωτισμού (δηλ. πυκνότητας ισχύος και φάσμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας) και θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Η πληροφόρηση επί των ηλεκτρικών παραμέτρων καθιστά εφικτή την αναγνώριση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου (n_{ELEC}) κάτω από καθορισμένες συνθήκες, οι οποίες προσομοιώνουν τις τυπικές καταστάσεις αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Για τη συνεπή εξυπηρέτηση αυτού του σκοπού, έχουν καθοριστεί πρότυπες συνθήκες ελέγχου των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ή πλαισίου (*Standard Test Conditions, STC*), οι οποίες συνοψίζονται ως εξής:

- Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία πυκνότητας ισχύος 1000 W/m^2 ή 1 kW/m^2
  - υπό κάθετη πρόσπτωση
- Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας AM 1,5 .
- Θερμοκρασία φωτοβολταϊκού στοιχείου 25 ^{o}C ± 2 ^{o}C .

[*Φραγκιαδάκης*, 2008]

Ωστόσο, οι συνθήκες λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων ή πλαισίων συχνά διαφέρουν σημαντικά από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (*STC*). Επομένως, οι τιμές για τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πλαισίων, που αναφέρονται στις σχετικές

εκθέσεις των κατασκευαστών, δεν δύναται να θεωρηθούν επαρκείς για την εκτίμηση της αναμενόμενης λειτουργικής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Συνεπώς, οι υιοθέτηση διαδικασιών επιτήρησης και ανάλυσης των κατάλληλων δεικτών αποτελούν βασική προϋπόθεση για την ικανή αξιολόγηση της ενεργειακής απόκρισης κάθε φωτοβολταϊκής διάταξης [*Makrides et al.*, 2012]. Ειδικότερα, η διαρκής επίβλεψη της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος επιτρέπει τη συλλογή σημαντικών πληροφοριών για:

- την απόδοση των συνιστωσών του,
- την συνολική ενεργειακή του απόδοση,
- την αξιοπιστία και τα αίτια πρόκλησης των προβλημάτων του,
- την εγκυρότητα των θεωρητικών μοντέλων,
- τη μακροπρόθεσμη ενεργειακή συμπεριφορά του.

[*Tripathy et al.*,1993; *Savvakis* και *Tsoutsos*, 2015]

2.3 Η έννοια της θερμοκρασίας στα φωτοβολταϊκά συστήματα

Σε μακροσκοπικό επίπεδο, η θερμοκρασία εκφράζει την κατάσταση ενός σώματος ως προς την ένταση του θερμικού αισθήματος (θερμό ή ψυχρό) που αναγνωρίζεται στο ανάλογο αισθητήριο κατά την επαφή του με την ύλη. Μικροσκοπικά, η θερμοκρασία αντανακλά την ταχύτητα των μορίων του σώματος. Πρακτικά, στη σχέση μεταξύ αιτίας και αποτελέσματος, τη θέση του αποτελέσματος καταλαμβάνει η θερμοκρασία, ενώ η θερμότητα λογίζεται ως η βασική αιτία πρόκλησης της ανόδου της θερμοκρασίας [*Cengel* και *Boles*, 2003]. Τα κύρια ζητήματα που προκύπτουν από τη σύνδεση της θερμοκρασίας και των μερών ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, είναι τόσο η κατανόηση του μηχανισμού ανάπτυξης της, όσο και η αναγνώριση του τρόπου που επηρεάζει στην ηλεκτρική του απόδοση.

2.3.1 Η επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων

Η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (T_m) αναγνωρίζεται ως μια από τις κύριες παραμέτρους κατά την αξιολόγηση της ενεργειακής και της θερμικής απόκρισης των φωτοβολταϊκών συστημάτων, ενώ εξαρτάται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, τις θερμοφυσικές ιδιότητες των επιμέρους στρωμάτων των φωτοβολταϊκών πλαισίων, τον τύπο των χρησιμοποιούμενων φωτοβολταϊκών στοιχείων, τη διαμόρφωση της εγκατάστασης και τις κλιματικές συνθήκες [*Alonso Garcia et al.*, 2004; *Chandel et al.*; 2017]

Γενικά, έχει καταγραφεί ότι η αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ($T\alpha$) επιδρά στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων οδηγώντας σε μειωμένη ενεργειακή παραγωγή. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται εντονότερο, όταν τα φωτοβολταϊκά συστήματα λειτουργούν σε περιοχές με θερμό κλίμα. Για παράδειγμα, τα αποτελέσματα από τον πειραματικό έλεγχο φωτοβολταϊκών στοιχειών κρυσταλλικού πυριτίου στις συνθήκες του θερμού κλίματος της Νοτιοανατολικής Ασίας, υπέδειξαν την υψηλή εξάρτηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχειών (n_{ELEC}) από τη θερμοκρασία λειτουργίας τους (T_c). Αναλυτικά, η ερευνητική ομάδα ανέφερε μείωση της απόδοσης κατά 69% σε σχέση με την παρατηρηθείσα τιμή υπό πρότυπες συνθήκες ελέγχου (*STC*), ενόσω η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχειών (T_c) προσέγγισε τους 64 ^{o}C. [*Malik et al.*,2003]

Σύμφωνα με το υφιστάμενο θεωρητικό πλαίσιο, η μεταβολή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου σε σχέση με την εξέλιξη της θερμοκρασίας λειτουργίας του (T_m) εκφράζεται μεσώ των θερμοκρασιακών συντελεστών. Κοντά σε αυτούς, η τυπική θερμοκρασία λειτουργίας (NOCT) παρέχεται ως ένδειξη της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο, όταν διατελεί σε συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος που προσεγγίζουν μια μέση κατάσταση πριν και μετά το μεσημέρι μιας αίθριας ημέρας της θερινής περιόδου. Στο σύνολο των περιπτώσεων, ο προσδιορισμός των ανωτέρω περιγραφόμενων δεικτών για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια εκτελείται υπό ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες, μέσω κατάλληλων τεχνικών. Ωστόσο, σε συνθήκες πεδίου, οι σχετικές τιμές διαφέρουν από τις καταγεγραμμένες σε εργαστηριακό επίπεδο. Η ανωτέρω διαπίστωση έδωσε το έναυσμα για τη διεξαγωγή πειραματικής έρευνας με στόχο την καταγραφή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και τον προσδιορισμό των θερμοκρασιακών συντελεστών των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Στην πράξη, ο πειραματικός έλεγχος για την κατανόηση του μηχανισμού της εξάρτησης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών από τη θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (T_m), στηρίζεται στη μέθοδο γραμμικής συσχέτισης των αντίστοιχων δεικτών υπό σταθερή πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας (G_t). [*Φραγκιαδάκης*, 2008; *Makrides et al.*, 2012]

Σε περιοχές με υψηλό ηλιακό δυναμικό και θερμό κλίμα, η ενεργειακή απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος (n_{syst}) επηρεάζεται σημαντικά, δεδομένου ότι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνήθως λειτουργούν με τιμές θερμοκρασίας (T_m) υψηλότερες των 50 ^oC κατά τη θερινή περίοδο [*Mavromatakis et al*., 2014]. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο θερμικός συντελεστής αποδιδόμενης ισχύος (γ_{PM}) χαρακτηρίζεται ως κρίσιμος παράγοντας. Σε σχετική μελέτη τους, οι *Makrides et al.* προχώρησαν στη διερεύνηση της επίδρασης της θερμοκρασίας λειτουργίας διαφορετικών τύπων φωτοβολταϊκών πλαισίων (T_m) στην ονομαστική τους ισχύ (P_n), τόσο σε εργαστηριακό επίπεδο όσο και σε συνθήκες πεδίου στην περιοχή της Κύπρου. Οι κύριοι περιορισμοί που θεωρήθηκαν για τις μετρήσεις πεδίου ήταν η σταθερή πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_t: σταθερή), η ασθενής ένταση ανέμων (v_w<2 m/s) και η διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων κατά τις ώρες κοντά στο ηλιακό μεσημέρι. Ως επί το πλείστον, η διαφοροποίηση μεταξύ των πειραματικών τιμών πεδίου και των αναφερόμενων σε πρότυπες συνθήκες εντοπίστηκε ιδιαίτερα σημαντική. Εν αντιθέσει, τα θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια άμορφου πυριτίου (a-Si) παρατηρήθηκαν με σχετική ταύτιση. [*Makrides et al.*, 2012]

Κατά αντίστοιχό τρόπο, οι *Kamkird et al.* διεξήγαγαν πειραματική μελέτη αναφορικά με την επιρροή της θερμοκρασίας (T_m) στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών συστημάτων διαφορετικών τύπου σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Για το σκοπό αυτό, τα δεδομένα από την επιτήρηση (περίοδος Ιανουαρίου 2008 - Δεκεμβρίου 2009) ενός φωτοβολταϊκού σταθμού εγκατεστημένου στην περιοχή Πιτσανούλοκ (Ταϊλάνδη) αξιοποιήθηκαν κατάλληλα. Ο ελεγχόμενος φωτοβολταϊκός σταθμός περιλάμβανε τρία (3) υποσυστήματα διαφορετικής τεχνολογίας φωτοβολταϊκών: το 1° υποσύστημα (3,67 kWp) αποτελούνταν από εξήντα οκτώ (68) φωτοβολταϊκά πλαίσια άμορφου πυριτίου (a-Si), το 2° υποσύστημα (3,60 kWp) είχε σαράντα πέντε (45) φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου (PC-Si), ενώ το 3° υποσύστημα συνιστούσαν δέκα έξι (16) φωτοβολταϊκά πλαίσια υβριδικής τεχνολογίας. Τα ληφθέντα στοιχεία αναλύθηκαν με εφαρμογή γραμμικής παλινδρόμησης υπό σταθερές τιμές ακτινοβολίας 660 W/m^2 για το έτος 2008 και 640 W/m^2 για το έτος 2009, ώστε να εκτιμηθεί η

σχέση εξάρτησης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών (ρεύμα - I_M, τάση - V_M, ισχύς - P_M, απόδοση - n_{syst}) των ελεγχόμενων υποσυστημάτων από τη θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (T_m). Σύμφωνα με τα συμπεράσματα των πειραματικών δοκιμών, η απόκλιση των τιμών για τους θερμοκρασιακούς συντελεστές από τις αναφερόμενες σε πρότυπες συνθήκες αναγνωρίστηκε ως υψηλή. [*Kamkird et al.*,2012]

2.3.3 Μοντελοποίηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Αδιαμφισβήτητα, η σημασία της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (T_m) για την ενεργειακή απόκριση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον των ερευνητών και έθεσε τις αρχικές βάσεις για την ανάπτυξη μοντέλων, τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν για τον υπολογισμό της [*Trinuruk et al.*, 2009; *Skoplaki et al.*, 2009]. Ταυτόχρονα, έχουν υλοποιηθεί αρκετές μελέτες, προκειμένου να επιβεβαιωθούν και να ενισχυθούν οι ικανότητες πρόβλεψης των προτεινόμενων μοντέλων. Η παρούσα ενότητα περιλαμβάνει μια συνοπτική έκθεση ερευνητικών προσπαθειών που αναγνωρίστηκαν με υψηλή συνάφεια ως προς τις μεθόδους εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (T_m).

Το 2009, οι *Skoplaki* και *Palyvos* δημοσίευσαν μια εκτεταμένη επισκόπηση των μαθηματικών σχέσεων που δυνητικά μπορούν να εφαρμοστούν για τον άμεσο ή έμμεσο προσδιορισμό της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (T_m). Οι σχέσεις αυτές, βασίζονται στις κύριες μετεωρολογικές μεταβλητές, καθώς και ειδικές παραμέτρους που συνδέονται με τη μορφή και την τεχνολογία των φωτοβολταϊκών πλαισίων του συστήματος. Ως εκ τούτου, η προσαρμογή του κάθε μοντέλου με την ελεγχόμενη περίπτωση και οι πιθανοί περιοριστικοί παράγοντες προτείνεται να εξετάζονται επισταμένως. Τέλος, οι ερευνητές υπογράμμισαν ότι οι μαθηματικές εκφράσεις επιτυγχάνουν την εκτίμηση της θερμοκρασίας, ωστόσο δεν δύνανται να υποκαταστήσουν τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις στις συνθήκες της θέσης εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών συστημάτων. [*Skoplaki και Palyvos*, 2009]

Σε μεταγενέστερη μελέτη, οι *Koehl et al.* προχώρησαν στον έλεγχο της αξιοπιστίας και της απόδοσης ενός στατιστικού και ενός αναλυτικού μοντέλου για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (T_m). Για την ικανοποίηση των επιδιώξεων της μελέτης, τα φωτοβολταϊκά συστήματα του ινστιτούτου Fraunhofer που είχαν εγκατασταθεί σε πέντε (5) διαφορετικές περιοχές εξοπλίστηκαν με κατάλληλα συστήματα επιτήρησης των συνθηκών λειτουργίας τους. Εν συνεχεία, οι καταγεγραμμένες ανά 5 min πειραματικές μετρήσεις αξιοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της προβλεπτικής ικανότητας δύο (2) ευρύτατα διαδεδομένων μοντέλων. Το 1ο εξεταζόμενο μοντέλο, είχε παρουσιαστεί από τον *David King*, το έτος 2004, και προτάθηκε για την προσέγγιση της θερμοκρασίας λειτουργίας σε φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα οποία τοποθετούνται με ελεύθερη την οπίσθια επιφάνεια τους, σε πλαίσια με μονωμένη την οπίσθια επιφάνεια τους, ώστε να μιμηθούν τη συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών πλαισίων που ενσωματώνονται σε κτίρια, καθώς και σε συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά πλαίσια. Το 2ο μοντέλο, το οποίο προτάθηκε από τον *David Faiman*, προήλθε μέσω της εφαρμογής του ενεργειακού ισοζυγίου που λαμβάνεται υπόψη για την εκτίμηση της θερμοκρασίας σε ηλιακούς θερμικούς συλλέκτες. Σύμφωνα με τα στοιχεία της συγκριτικής αξιολόγησης των πειραματικών μετρήσεων και τιμών πρόβλεψης που προήλθαν από τα

ελεγχόμενα μοντέλα, ο προσδιορισμός της αναμενόμενης θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (T_m) παρατηρήθηκε με καλή ακρίβεια και μικρή αβεβαιότητα. [*Koehl et al.*, 2011]
Στο πλαίσιο της έρευνας για την ανάδειξη μιας έγκυρης μεθόδου προσδιορισμού της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, τα οποία τοποθετούνται σε κτιριακό περιβάλλον (T_m) και λειτουργούν υπό τις κλιματικές συνθήκες της Ταϊλάνδης, οι *Trinuruk et al.* προχώρησαν στον έλεγχο της προβλεπτικής ικανότητας για δύο (2) εκ των συνηθέστερα εφαρμοζόμενων μοντέλων πρόβλεψης. Συγκεκριμένα, η προτεινόμενη σχέση από τους *Ross* και *Smockler* (1986), και η εξίσωση του *David King* (2004), οι οποίες καθίστανται αναγνωρίσιμες ως μοντέλο NOCT και μοντέλο της *Sandia*, αντίστοιχα. Η ικανότητα των δύο (2) μοντέλων ελέγχθηκε στατιστικά με τον υπολογισμό του μέσου σφάλματος μεροληψίας (*MBE*) και του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (*RMSE*). Βάσει των σχετικών αποτελεσμάτων, οι τιμές του μοντέλου της *Sandia* συγκλίνουν προς τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές, χωρίς να αγνοείται το φαινόμενο της υπερεκτίμησης των τιμών της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (T_m) από τα δύο (2) μοντέλα. [*Trinuruk et al.*, 2009]
Σε μεταγενέστερο χρόνο, η ερευνητική ομάδα των *Quesada et al.* πραγματοποίησε συστηματική επιτήρηση μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης ισχύος 7,2 kWp που έχει εγκατασταθεί στο Πολυτεχνείο της Βαλένθια (Ισπανία). Στο πλαίσιο της μελέτης, υλοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των πειραματικών και θεωρητικών τιμών για τις παραμέτρους που συνδέονται με τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος. Παράλληλα, η ακρίβεια των προβλέψεων από πέντε (5) διαφορετικά μοντέλα εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας των πλαισίων (T_m) αναλύθηκε περαιτέρω. Τα τέσσερα (4) πρώτα μοντέλα (*Risser* και *Fuentes*, *Chenni et al.*, *Sandia*, *Servant*) εντάσσονται στην κατηγορία των μοντέλων άμεσου προσδιορισμού, ενώ το πέμπτο από αυτά (TRNSYS) επιτυγχάνει την έμμεση προσέγγιση της θερμοκρασίας. Τα στοιχεία που αξιοποιήθηκαν για τον στατιστικό έλεγχο των ανωτέρω μοντέλων, προήλθαν από το σύστημα επίβλεψης της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, και αναφέρονταν στην περίοδο Ιανουαρίου 2001 - Μαρτίου 2003. Συνοπτικά, τα αποτελέσματα της σχετικής διερεύνησης παρατίθενται στον Πίνακα 2-2 και υπέδειξαν ότι προβλέψεις των μοντέλων γραμμικής παλινδρόμησης σημειώθηκαν με μειωμένη απόκλιση από τις καταγεγραμμένες τιμές σε συνθήκες πεδίου. [*Quesada et al.*, 2011]

Σχέση	%MBE	%RMSE	$\%E_{output}$
Linear regression 1 $T_c = 0{,}899 \cdot Ta + 0{,}025 \cdot G_t + -1{,}3 \cdot v_w + 3{,}12$	-0,48	9,20	+0,93
Linear regression 2 $T_c = 0{,}943 \cdot Ta + 0{,}023 \cdot G_t - 1{,}528 \cdot v_w + 4{,}3$	-0,71	9,66	+1,01
Sandia $T_c = Ta + \frac{G_t}{G^*}[19{,}6e^{-0{,}223 \cdot v_w + 14{,}6}]$	1,58	9,21	+0,60
Servant $T_c = Ta + 0{,}0138 \cdot G_t(1 + 0{,}031 \cdot T_a)(1 - 0{,}042 \cdot v_w)$	-5,31	11,83	+1,80
TRNSYS $T_c = Ta + \frac{T_{NOCT} - T_{a,NOCT}}{G_{t,NOCT}} G_t \left(1 - \frac{\eta_c}{\tau_\alpha}\right) \frac{9{,}5}{5{,}7 + 3{,}8 \cdot v_w}$	-4,17	14,6	+1,90

Πίνακας 2-1: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου των εξεταζόμενων μοντέλων πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργία του φωτοβολταϊκού κελιού.

[*Quesada et al.*, 2011]

Οι *Jakhrani et al.* αξιολόγησαν διαφορετικές εμπειρικές σχέσεις που εφαρμόζονται για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (T_m). Ως δεδομένα εισόδου για τα εξεταζόμενες μαθηματικές εκφράσεις, χρησιμοποιήθηκαν τα κλιματικά στοιχεία από τον μετεωρολογικό σταθμό της περιοχής Κουτσίνγκ (01°33'N και 110°25'E, Μαλαισία. Βάσει των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν, η τάση διακύμανσης των ελεγχόμενων μοντέλων σημειώθηκε με σχεδόν όμοια χαρακτηριστικά, ενώ σε συγκεκριμένες περιπτώσεις εντοπίστηκαν αυξημένες αποκλίσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές πρόβλεψης από τη γραμμική συσχέτιση των *Risser και Fuentes* (1983), εμφανίζονταν με σημαντική διαφοροποίηση από τις καταγεγραμμένες τιμές για τη θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ενώ η θερμοκρασιακή απόκλιση κυμάνθηκε σε χαμηλότερα επίπεδα, όταν έλαβε χώρα η συγκριτική αξιολόγηση με τις τιμές που υπολογίστηκαν από τις σχέσεις των *Lasnier και Ang* (1990) και *Ross* (1976). Εν κατακλείδι, η ερευνητική ομάδα ανέφερε ότι οι παρατηρηθείσες διαφορές μεταξύ των θεωρητικών τιμών αποδίδονται κυρίως στις ανεξάρτητες μεταβλητές (π.χ. συντελεστής k_r), στις τοπικές κλιματικές συνθήκες, στη διαμόρφωση της ελεγχόμενης φωτοβολταϊκής διάταξης και της εμπειρίας του κάθε ερευνητή. [*Jakhrani et al.*, 2011]

Η απλούστερη σχέση άμεσης εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών, η οποία εντοπίζεται στη σχετική βιβλιογραφία είναι:

- $T_m = T\alpha + k_r \cdot G_t$ [2.1]

Σε αυτή τη γραμμική εξίσωση, ο συντελεστής k_r, εκφράζει την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ως αποτέλεσμα της ανάλογης αύξησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Η βασικότερη δυσκολία κατά την εφαρμογή της ανωτέρω συσχέτισης, συνδέεται με την επιλογή της τιμής του συντελεστή k_r, που μπορεί να εκτιμηθεί, όταν τα συμβατά δεδομένα για μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση είναι διαθέσιμα. Εν αντιθέσει, η προηγούμενη εκτίμηση του συντελεστή k_r, ειδικά όταν σημειώνονται αυξημένες τιμές για την ταχύτητα του ανέμου, χαρακτηρίζεται ως ιδιαίτερα δύσκολη. [*Skoplaki et al.*, 2009; *Ye et al.*, 2013; *Kurnik et al.*,2011]

Εν προκειμένω, η υλοποίηση συστηματικής μελέτης από αρκετές ερευνητικές ομάδες είχε ως αποτέλεσμα τον προσδιορισμό των αποδεκτών τιμών για τον συντελεστή *Ross* (k_r). Πιο συγκεκριμένα, ένας αριθμός ερευνητών υπέδειξε τις τιμές εντός του εύρους 0,02 - 0,04 $^oC \cdot m^2/W$ ως αποδεκτές τιμές για τον συντελεστή k_r, με την τιμή 0,025 $^oC \cdot m^2/W$ να αναγνωρίζεται ως καταλληλότερη επιλογή [*Ye et al.*, 2013]. Οι *Mondol et al.*, αξιοποιώντας τις πειραματικές μετρήσεις για τη θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκών πλαισίων - T_m, θερμοκρασία περιβάλλοντος - $T\alpha$, προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία - G_t), που πραγματοποιήθηκαν κατά τους θερινούς μήνες του έτους 2002 στην πόλη Μπαλιμένα (Βόρεια Ιρλανδία), εκτίμησαν μέσω γραμμικής παλινδρόμησης τον συντελεστή k_r ίσο με 0,031 $^oC \cdot m^2/W$ [*Mondol et al.*, 2005]. Λίγα χρόνια αργότερα, οι *Ayompe et al.*, χρησιμοποιώντας μια αντίστοιχη μέθοδο για τα κλιματικά δεδομένα του Δουβλίνου (Ιρλανδία), προσδιόρισαν τον συντελεστή k_r *ίσο με* 0,018 $^oC \cdot m^2/W$ [*Ayompe et al.*, 2010]. Επίσης, σε συναφή μελέτη από την International Energy Agency (IEA) υπογραμμίστηκε ότι η εκλογή του εύρους τιμών για τον συντελεστή k_r θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον τρόπο στήριξης του συστήματος και αερισμού των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Σε άλλη μελέτη, οι *Tamizhmani et al.*, περιέγραψαν

μια μέθοδο προσδιορισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας των πλαισίων με τη συμβολή τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Αρχικά, προέβλεψαν τις αναμενόμενες τιμές των κύριων περιβαλλοντικών μεταβλητών στη διάρκεια μιας καθορισμένης χρονικής περιόδου, ενώ ακολούθως, κατέληξαν στη διαμόρφωση ενός γραμμικού μοντέλου υπολογισμού:

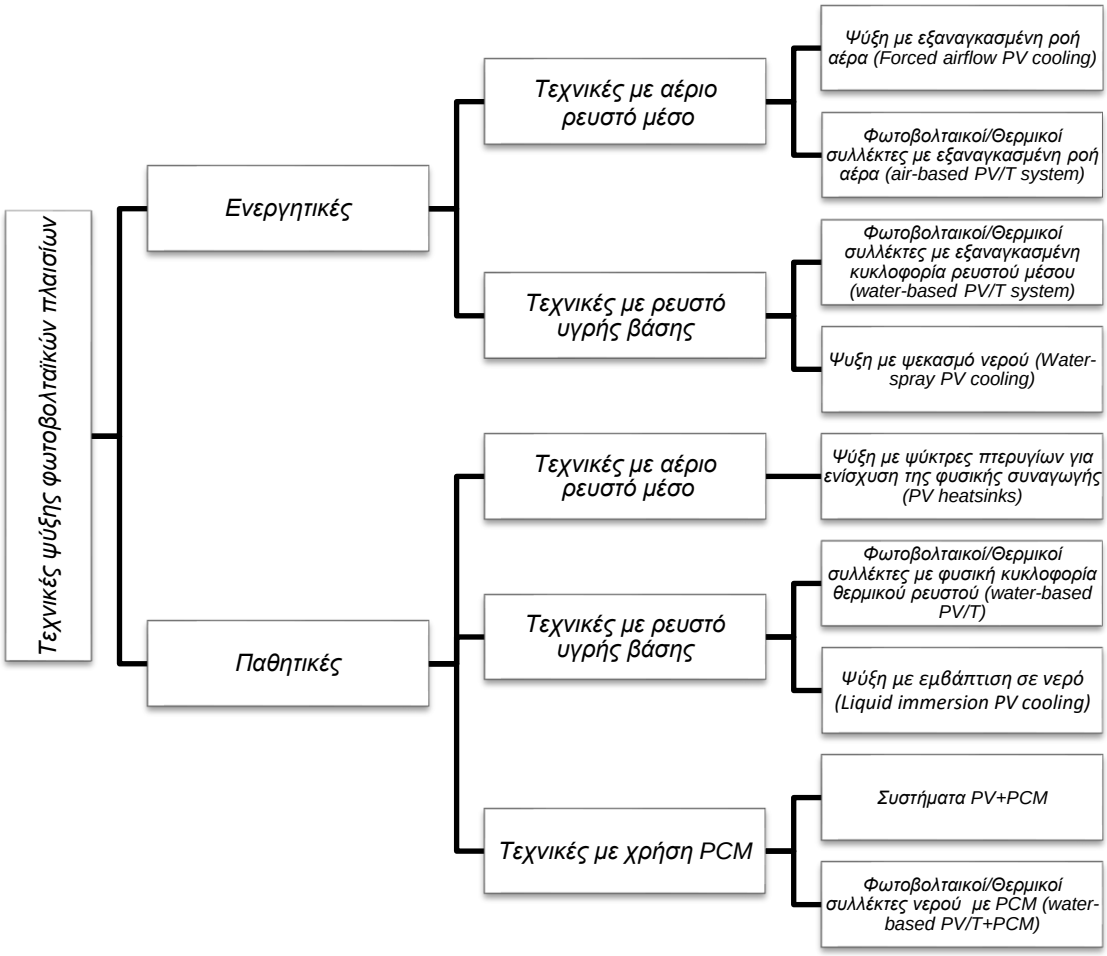
- $T_m = 4{,}3 + 0{,}028 \cdot G_t + 0{,}943 \cdot Ta - 1{,}528 \cdot v_w$ [2.2]

Δεδομένης της υψηλής ακριβείας των αποτελεσμάτων (R^2=0,96) της, η ανωτέρω μαθηματική έκφρασης [2.2] υποδείχθηκε ως αποδοτική για την εκτίμηση της θερμοκρασίας λειτουργίας, στην αναλυτική μέθοδο μοντελοποίησης φωτοβολταϊκών στοιχείων που ανέπτυξαν οι *Chenni et al.* [*Tamizhmani et al.,* 2003, *Chenni et al.*, 2007]. Σε μεταγενέστερη έρευνα, οι *Ayompe et al.* προχώρησαν στην κατάλληλη ανάλυση πεισματικών τιμών, οι οποίες προήλθαν από την εποπτεία μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης στην Ιρλανδία κατά τη διάρκεια της περιόδου Απριλίου 2009-Μαρτίου 2010, πρότειναν μια τροποποιημένη έκφραση της σχετικής εξίσωσης (:$T_m = -1{,}99 + 0{,}02 \cdot G_t + 1{,}102 \cdot Ta - 0{,}097 \cdot v_w$). Εν συνεχεία, η απόδοση της τροποποιημένης εξίσωσης τεκμηριώθηκε μέσω του σχετικού στατιστικού ελέγχου, καθώς η τιμή του ποσοστιαίου απόλυτου σφάλματος (*MAE*,%) εκτιμήθηκε ίση με 7,3%. [*Ayompe et al.*, 2010]

2.4 Τεχνικές διαχείρισης της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων

2.4.1 Γενικά

Η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων χαρακτηρίζεται ως ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος ελέγχου της ενεργειακής απόδοσης και της ωφέλιμης διάρκειας ζωής των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Εξαρτάται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, τις τοπικές κλιματικές συνθήκες (θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα ανέμου, κλπ.) και τα ειδικά χαρακτηριστικά που διαμορφώνονται ανάλογα με την τεχνολογία και τη διάταξη της εφαρμογής [*Chandel* και *Agarwal*, 2017; *Santhakumari* και *Sagar*, 2019). Ως εκ τούτου, οι δυνητικά εφαρμόσιμες τεχνικές διαχείρισης της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, τόσο ενεργητικές όσο και παθητικές (Διάγραμμα 2-1), έχουν αποτελέσει αντικείμενο μελέτης για σημαντικό αριθμό ερευνητών τα τελευταία χρόνια. Μεταξύ αυτών των τεχνικών, η αξιοποίηση των Υλικών Αλλαγής Φάσης (PCMs) συγκέντρωσε την προσοχή της επιστημονικής κοινότητας κατά την τελευταία δεκαετία, καθώς έχουν την ιδιότητα να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά θερμότητας σε ένα σταθερό εύρος θερμοκρασιών αλλαγής φάσης, και κατ' επέκταση, να επιτυγχάνουν τη δέσμευση της πλεονάζουσας θερμότητας και τη διαχείριση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων.



Διάγραμμα 2-1: Κατηγοριοποίηση τεχνικών ψύξης για εφαρμογή σε φωτοβολταικά πλαίσια.

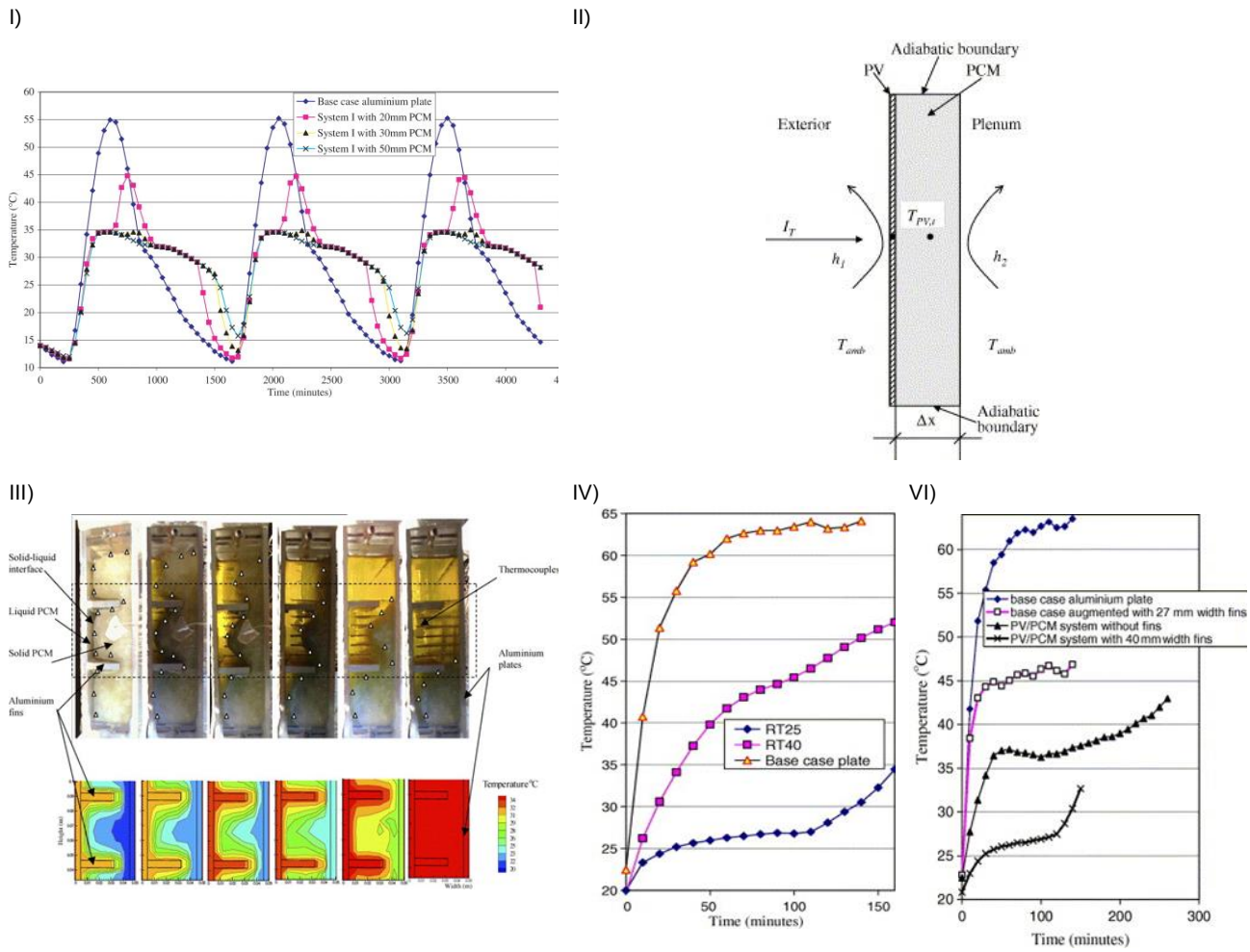
[*Dwivedi et al.*, 2020; *Nizetic et al.*,2017; *Nizetic et al.*,2018]

2.4.2 Η αξιοποίηση Υλικών Αλλαγής Φάσης (PCM) ως μέθοδος ψύξης των φωτοβολταϊκών συστημάτων

Στο πλαίσιο της διαδικασίας διερεύνησης του βασικού αντικειμένου της παρούσας διατριβής, παρατίθεται ένας αριθμός σχετικών μελετών που εντοπίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Οι ερευνητικές αυτές προσπάθειες εστιάζουν κυρίως, στην ανάπτυξη τεχνικών βασισμένων στη χρήση PCM, για τη διαχείριση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Ειδικότερα, μια τέτοια προσέγγιση παθητικής ψύξης συνδυάζει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο με έναν τύπο PCM, συνιστώντας μια ενιαία δομική οντότητα μέσω της οποίας καθίσταται εφικτή η αύξηση της απόδοσης ενεργειακής μετατροπής της ηλιακής ισχύος σε ηλεκτρική ενέργεια. Γενικά, ένα τυπικό σύστημα PV+PCM αποτελείται από μια ειδική διάταξη αποθήκευσης του χρησιμοποιούμενου PCM, η οποία βρίσκεται συνδεδεμένη με την οπίσθια επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου. Το PCM απορροφά μέρος της θερμότητας που αναπτύσσεται από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ως λανθάνουσα θερμότητα, συμβάλλοντας στη διατήρηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του εντός των οριακών τιμών θερμοκρασίας αλλαγής φάσης του PCM για ένα εύλογο χρονικό διάστημα. Αυτή η διαδικασία λαμβάνει χώρα, όταν η θερμότητα από το φωτοβολταϊκό προς το PCM οδηγεί σε αλλαγή φάσης στερεού-υγρού, χωρίς να απαιτείται πρόσθετη πηγή ενέργειας. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται η ψύξη του φωτοβολταϊκού πλαισίου, η προστασία των ηλιακών κυττάρων από την υπερθέρμανση και την υποβάθμιση, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνεται η απόδοση της μετατροπής ενέργειας. [*Ma et al.*, 2015]

2.4.2.1 Αριθμητική μοντελοποίηση και προσομοίωση της απόδοσης των συστημάτων PV+PCM

Το 2004 αποτέλεσε έτος - σταθμό για την ανάπτυξη των συστημάτων PV+PCM, καθώς η 1η συστηματική μελέτη φωτοβολταϊκών διατάξεων με χρήση PCM παρατίθεται από τους *Huang et al*. Στο πλαίσιο της μελέτης, ένα αριθμητικό μοντέλο (2-D) αναπτύχθηκε για την πρόβλεψη της θερμικής συμπεριφοράς των μελετημένων διατάξεων, το οποίο επικυρώθηκε μέσω της συγκριτικής αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης και δεδομένων που ελήφθησαν κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων μικρής κλίμακας. Ειδικότερα, τρείς (3) διατάξεις με διαφορετικά χαρακτηριστικά (PV+PCM1, PV+PCM2 και διάταξη αναφοράς), όπου: i. η διάταξη PV+PCM1 αναφέρεται σε σύστημα PV+PCM χωρίς τη συμπερίληψη πτερυγίων εντός του δοχείου PCM, ii. η διάταξη PV+PCM2 αντιστοιχούσε σε σύστημα PV+PCM με την ύπαρξη πτερυγίων εντός του δοχείου PCM, ενώ η διάταξη αναφοράς αποτελούνταν από επίπεδη πλάκα αλουμινίου επικαλυμμένη με ηλιακό-επιλεκτικό στρώμα, χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να αξιολογηθεί η θερμική απόκριση τους υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες (θερμοκρασία περιβάλλοντος και ακτινοβολία). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας, η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_m) παρατηρήθηκε μειωμένη έως και 20 ^oC με τη χρήση PCM, το οποίο χαρακτηρίζονταν από θερμοκρασία τήξης ($T_{PCM,melt}$) ίση με 32 ^oC, ενώ το πάχος του εφαρμοζόμενου στρώματος PCM ήταν 30 mm. Επιπλέον, υπογραμμίζεται ότι η συμπερίληψη κατάλληλου αριθμού πτερυγίων στο εσωτερικό του δοχείου PCM συμβάλλει περαιτέρω για την ομοιόμορφη κατανομή και τον βέλτιστο έλεγχο της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_m). Τέλος, οι συγγραφείς ανέφεραν ότι ο αριθμός πτερυγίων αποτελεί σημαντική παράμετρο, η οποία δύναται υπό συγκεκριμένες συνθήκες να επιφέρει περιορισμό της κίνησης του τηγμένου PCM [*Huang et al.*, 2004].



Διάγραμμα 2-2: Σχηματική απεικόνιση και αρχικά ερευνητικά αποτελέσματα από την 1η συστηματική μελέτη φωτοβολταϊκών διατάξεων με χρήση PCM

[*Huang et al.*, 2004; *Huang et al.*, 2006]

Δύο χρόνια αργότερα, η ίδια ερευνητική ομάδα πραγματοποίησε συμπληρωματική αξιολόγηση συστημάτων PV+PCM, τα οποία υιοθετούσαν την προσέγγιση της ύπαρξης εσωτερικών πτερυγίων εντός του δοχείου PCM. Ο στόχος της ενσωμάτωσης των πτερυγίων ήταν η ενίσχυση της θερμικής αγωγιμότητας ώστε να διασφαλίζεται η ομαλότητα της διαδικασίας αλλαγής φάσης για τον δεδομένο όγκο του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου PCM. Για τους σκοπούς της μελέτης, τρία (3) εναλλακτικά συστήματα PV+PCM, αξιοποιώντας διαφορετικά είδη PCM (RT25 και GR40), διερευνήθηκαν προκειμένου να προσδιοριστεί η επίδραση της γεωμετρίας στο εσωτερικό των δοχείων PCM (δηλ. διαστάσεων και διάταξης των πτερυγίων) στην εξέλιξη της θερμοκρασίας λειτουργίας τους. Τα στοιχεία της πειραματικής διαδικασίας έδειξαν ότι η θερμοκρασία της εμπρόσθιας επιφάνειας του συστήματος PV+PCM παρέμεινε κάτω από το επίπεδο των 29 ^{o}C για περίπου 2,2 h χρησιμοποιώντας RT25 πάχους 40 mm. Τέλος, επισημάνθηκε ότι η ύπαρξη πτερυγίων σε συστήματα PV+PCM υποστηρίζει αποτελεσματικά το PCM για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε σχέση με τα αντίστοιχα συστήματα χωρίς πτερύγια. [*Huang et al.*, 2006].

Σε μεταγενέστερη μελέτη, οι *Hasan et al.* επιχείρησαν την αξιολόγηση της θερμικής απόκρισης των ενσωματωμένων σε κτίρια φωτοβολταϊκών συστημάτων (BIPV), τα οποία

έφεραν κατάλληλες διατάξεις πληρωμένες με PCM. Για το σκοπό αυτό, μια σειρά εργαστηριακών δοκιμών έλαβε χώρα υπό συγκεκριμένες συνθήκες ακτινοβολίας (≥500 W/m^2) και χρησιμοποιώντας διαφορετικά είδη PCM. Ειδικότερα, η παραφίνη RT20, το ένυδρο άλας $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ και τα μείγματα καπρικού/παλμιτικού οξέος (C/P), καπρικού/λαυρικού οξέος (C/L) και παραφίνης/ένυδρου άλατος (SP22) ήταν τα εξεταζόμενα PCMs, τα οποία χαρακτηρίζονταν από σημείο τήξης και λανθάνουσα θερμότητα στο εύρος τιμών 25±4 ^oC και 140-213 kJ/kg, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας έδειξαν ότι η χρησιμοποίηση του $CaCl_2 \cdot 6H_2O$, με θερμοκρασία τήξης ($T_{PCM,melt}$) 29 ^oC, συνέβαλλε σημαντικά για τη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου κατά 10 °C υπό τιμή προσπίπτουσας ακτινοβολίας 1000 W/m^2 και για χρονική διάστημα 300 λεπτών. Εκτός αυτού, μια πτώση της τάξης των 18 ^oC στη θερμοκρασία της εμπρόσθιας επιφάνειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου σημειώθηκε όταν εφαρμόστηκε μείγμα καπρικού/παλμιτικού οξέος (C/P) και $CaCl_2 \cdot 6H_2O$. Εν κατακλείδι, οι ερευνητές ανέφεραν ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των τιμών των θερμικών χαρακτηριστικών των PCM (δηλ. θερμικής αγωγιμότητας και σημείου τήξης) και της θερμοκρασίας λειτουργίας της φωτοβολταϊκής μονάδας. [*Hasan et al.*, 2010]

Προκειμένου να αποσαφηνιστούν οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας σε ένα σύστημα PV+PCM και ο τρόπος λειτουργίας των PCM, οι *Brano et al.* ανέπτυξαν ένα αριθμητικό μοντέλο βασισμένο στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών για να προσομοιωθεί η ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας τους. Για την ανάλυση τους, ένα σύστημα PV+PCM, το οποίο είχε θεωρηθεί ως δομή πολλαπλών στρωμάτων (γυαλί, πυρίτιο, PET, αέρας, πλαστικό περίβλημα, PCM RT 27, πλαστικό περίβλημα), εγκαταστάθηκε στους χώρους του Πανεπιστημίου του Παλέρμο (Ιταλία) για την καταγραφή δεδομένων πεδίου. Κύριο εύρημα της μελέτης αποτέλεσε η περιορισμένη απόκλιση (~7%) μεταξύ των υπολογισμένων και των καταγεγραμμένων τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM. Τέλος, οι ερευνητές ανέφεραν τους προβληματισμούς τους για την εφαρμοσθείσα μέθοδο ενσωμάτωσης του PCM στην οπίσθια επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου, καθώς και την καταλληλόλητα του επιλεγμένου PCM για τη διαχείριση της θερμοκρασίας λειτουργίας του κατά τη θερινή περίοδο. [*Brano et al.*,2013]

Βάσει ενός επικυρωμένου μαθηματικού μοντέλου, οι *Khanna et al.* πραγματοποίησαν εκτεταμένη έρευνα σχετικά με την επίδραση των συνθηκών λειτουργίας (π.χ. προσανατολισμός, γωνία κλίσης, σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του δοχείου PCM, κλιματικές συνθήκες, κλπ.) στην απόδοση ενός συστήματος PV+PCM. Τα κύρια συμπεράσματά τους συνοψίζονται ως εξής: i. η κάθετη τοποθέτηση ενός συστήματος PV+PCM επιφέρει αύξηση του ρυθμού απομάκρυνσης θερμότητας επιτυγχάνοντας τη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου από 43,4 ^oC (υπό γωνία κλίσης 0°) σε 34,5 ^oC (υπό γωνία κλίσης 90°), ii. η αύξηση της γωνίας αζιμούθιου της διεύθυνσης/ της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί σε αύξηση/ πτώση του ρυθμού έκλυσης της αποθηκευμένης από το PCM θερμότητας στο περιβάλλον [*Khanna et al.*, 2017], iii. η διάταξη των πτερυγίων με μήκος προσαρμοσμένο στη διάσταση του δοχείου PCM, απόσταση 250 mm και πλάτος 2 mm θεωρήθηκε ως βέλτιστη για την επίτευξη υψηλής απόδοσης στα συστήματα PV+PCM που υιοθετούσαν αυτή την προσέγγιση, iv. το βάθος του δοχείου αποθήκευσης PCM (χωρίς πτερύγια) που υποστηρίζει αποτελεσματικά τη λειτουργία των συστημάτων PV+PCM σε περιοχές με υψηλό ηλιακό δυναμικό (5 kWh/m^2/d) προσδιορίστηκε ίσο με 390 mm [*Khanna et al.*, 2018a; *Khanna et al.*,

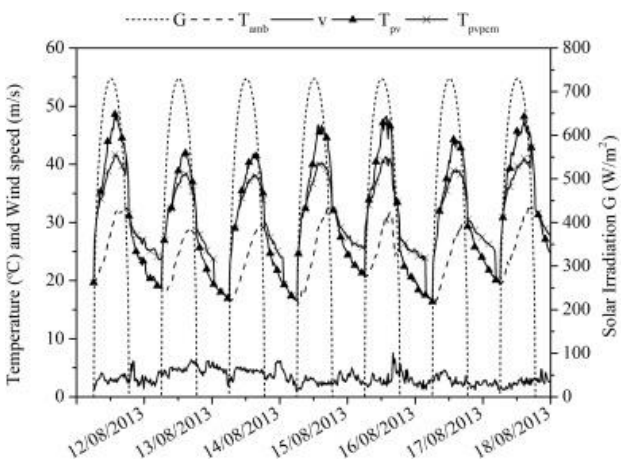
2019], v. η απόδοση ενός συστήματος PV+PCM συνδέεται άμεσα με τα κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής εγκατάστασης του, με την παρατήρηση περιορισμένων διακυμάνσεων στις τιμές των βασικών κλιματικών παραμέτρων μια περιοχής να αποτελεί ένδειξη καταλληλόλητας για τέτοιου τύπου εφαρμογές, vi. οι περιοχές με ψυχρότερο κλίμα βρέθηκαν ακατάλληλες για την εφαρμογή των PCM ως μέσο διαχείρισης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, όπως υποδεικνύεται από τη μικρή βελτίωση (~5,3%) της εξόδου ηλεκτρικής ισχύος [*Khanna et al.*, 2018b], vii. τα συστήματα PV+PCM (με πτερύγια) υποδείχθηκαν ως αποδοτικά κατά τη διάρκεια των ημερών με υψηλό δείκτη αιθριότητας, ιδιαίτερα σε περιοχές με θερμότερο κλίμα καθώς η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς αυξήθηκε κατά 12,1% [*Khanna et al.*, 2018c].

Σύμφωνα με τους *Smith et al.*, η ενσωμάτωση PCM στην οπίσθια επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου συμβάλλει για την αύξηση της ενεργειακής του απόδοσης, κυρίως στις περιοχές με υψηλό ηλιακό δυναμικό και μικρή ενδοετήσια εποχική διακύμανση των τιμών των κλιματικών παραμέτρων. Ειδικότερα, τα αποτελέσματα προσομοίωσης τους έδειξαν ότι η ετήσια ενεργειακή παραγωγή του συστήματος PV+PCM βελτιώθηκε κατά ποσοστό μεγαλύτερο του 5% σε περιοχές όπως το Μεξικό, η Ανατολική Αφρική και άλλες τοποθεσίες με παρόμοια κλιματικά χαρακτηριστικά. Επιπλέον, υπογράμμισαν την ισχυρή συσχέτιση των τιμών της θερμοκρασίας περιβάλλοντος μιας περιοχής με τις τιμές της θερμοκρασίας τήξης του χρησιμοποιούμενου PCM. [*Smith et al.*, 2014].

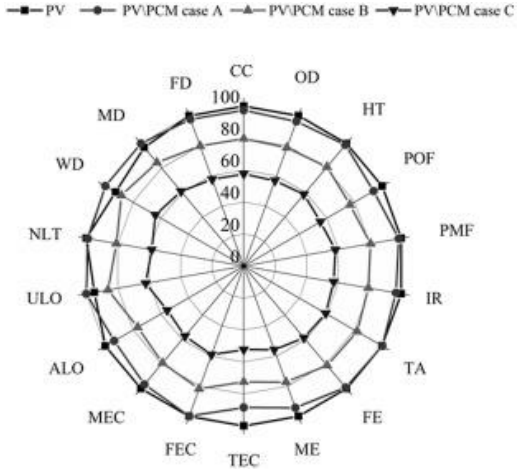
Σε προγενέστερη συναφή μελέτη, οι Hendricks και Van Sark πραγματοποιήσαν τον ποσοτικό προσδιορισμό της αναμενόμενης ενεργειακής παραγωγής και ανάλυση της οικονομικής βιωσιμότητας ενός συστήματος PV+PCM στην Ουτρέχτη (Ολλανδία) και τη Μάλαγα (Ισπανία) μέσω ενός απλοποιημένου υπολογιστικού μοντέλου. Τα ληφθέντα αποτελέσματα για την περιοχή της Μάλαγα υπέδειξαν οριακή αύξηση (1-3%) της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος σε σχέση με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς, ενώ τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την περιοχή της Ουτρέχτης δεν παρουσίαζαν σημαντική διαφοροποίηση. Τέλος, επισημάνθηκε ότι η υψηλή περίοδος αποπληρωμής (>20 έτη) δεν καθιστά βιώσιμη την επιλογή της εφαρμογής των συστημάτων PV+PCM. [*Hendricks & Van Sark*, 2013]

Το 2016, οι Royo et al. ανέπτυξαν ένα αριθμητικό μοντέλο για την εκτίμηση της θερμικής και ενεργειακής απόκρισης των ενσωματωμένων σε κτίρια φωτοβολταϊκών συστημάτων με PCM (BIPV+PCM) σε δύο επιλεγμένες περιοχές της Ισπανίας. Εκτός αυτού, οι ερευνητές προχώρησαν στην αξιολόγηση της περιβαλλοντικής απόδοσης ενός συστήματος BIPV+PCM κάνοντας χρήσης της μεθόδου της Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), προβάλλοντας μια επιπρόσθετη διάσταση για την ολοκληρωμένη ανάλυση των τεχνικών διαχείρισης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Τα στοιχεία της προσομοίωσης κατέδειξαν θετική επίδραση της εφαρμογής PCM (δηλ. Άλας Glauber) σε φωτοβολταϊκά πλαίσια συμβάλλοντας για τη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας τους κατά 7,5 ^{o}C και 10 ^{o}C υπό τις κλιματικές συνθήκες της Σαραγόσα και της Σεβίλλης, αντίστοιχα. Επιπλέον, η ενεργειακή απόδοση ($\eta_{BIPV+PCM}$) του συστήματος BIPV+PCM σημειώθηκε ενισχυμένη κατά 3% λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών λειτουργίας στις δεδομένες συνθήκες των περιοχών μελέτης. Εν κατακλείδι, οι ερευνητές υπογράμμισαν τη σημασία της ψύξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων για την αποφυγή του φαινομένου τοπικών υπερθερμάνσεων (hot-spots), τον έλεγχο του ρυθμού γήρανσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων τους, την αύξηση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής τους, και, κατ' επέκταση, τη βελτίωση της περιβαλλοντικής τους απόδοσης. [*Royo et al.*,2016]

I)



II)



Διάγραμμα 2-3: I) Ημερήσια διακύμανση της θερμικής συμπεριφοράς ενός συστήματος PV+PCM κατα η διάρκεια μιας εβομάδας του Αυγούστου 2013 υπό τις κλιματικές συνθήκες της Σαραγόσα, Ισπανία, II) Συγκριτική ανάλυση του κύκλου ζωής διατάξεων PV+PCM έναντι της περίπτωσης αναφοράς

[*Royo et al.*, 2016]

Προκειμένου να αξιολογηθεί και να βελτιωθεί η απόδοση ενός συστήματος PV+PCM σε εποχική και ετήσια βάση, οι *Zhao et al.* διαμόρφωσαν κατάλληλα ένα μοντέλο προσομοίωσης της θερμικής συμπεριφοράς του με χρήση της μεθόδου ισοδύναμου κυκλώματος θερμικών αντιστάσεων. Τα στοιχεία της προσομοίωσης για τις κλιματικές συνθήκες της Σαγκάης (Κίνα) οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η εποχικότητα πρέπει να αποτελεί κρίσιμη πτυχή της διαδικασίας σχεδιασμού του συστήματος. Ενδεικτικά, οι ερευνητές ανέφεραν ότι η επιλογή PCM με σχετικά υψηλή τιμή σημείου τήξης ($T_{PCM,melt}$) σε ένα σύστημα PV+PCM είχε ως αποτέλεσμα καλύτερη θερμική συμπεριφορά του συστήματος το καλοκαίρι και ελλιπή απόκριση κατά τη διάρκεια των ψυχρότερων ημερών του χειμώνα, καθώς παρατηρήθηκε παρεμπόδιση της διαδικασίας αλλαγής φάσης του PCM (στερεή→υγρή φάση). Επίσης, η ετήσια παραγωγή ενέργειας του συστήματος PV+PCM προσδιορίστηκε αυξημένη κατά 2,46%, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι μια τέτοια εφαρμογή δεν συνιστά μια οικονομικά βιώσιμη επιλογή. [*Zhao et al., 2019*]

Ο σχεδιασμός και η μοντελοποίηση μιας εναλλακτικής διαμόρφωσης συστήματος PV+PCM, η οποία βασίζεται στην ανταλλαγή θερμότητας με ακτινοβολία, αποτέλεσε βασικό αντικείμενο μελέτης για μια ερευνητική ομάδα στην Ταϊλάνδη. Η προσέγγιση τους επικεντρώθηκε στην αποτροπή της επαναμετάδοσης θερμότητας μέσω αγωγής από το PCM στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο και των ενδεχόμενων συνεπειών της (π.χ. υποβάθμιση της ενεργειακής απόδοσης, γήρανση υλικών). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι η εφαρμογή καθαρού PCM δεν υποστηρίζει επαρκώς την προτεινόμενη εφαρμογή. Αντίθετα, το σύστημα PV+PCM, το οποίο λειτουργούσε με χρήση μείγματος PCM/διογκωμένου γραφίτη σε μορφή στρώματος πάχους 5 cm, εμφάνιζε μέση ημερήσια απόδοση ενεργειακής μετατροπής της ηλιακής ισχύος σε ηλεκτρική ενέργεια ίση με 14,86% (αύξηση κατά 3%), εξαιτίας της μείωσης της μέσης ημερήσιας τιμής θερμοκρασίας λειτουργίας του κατά 6,7 ^{o}C σε σχέση το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς. [*Karthikeyan et al., 2020*]

Το 2020, οι *Elsehiniti et al.* ανέπτυξαν μια απλοποιημένη μαθηματική προσέγγιση (ECM model) για την άμεση και ακριβή πρόβλεψη της θερμικής απόκρισης ενός συστήματος

PV+PCM. Εκτός αυτού, ένα μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD model) θεωρήθηκε για την προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς του συστήματος PV+PCM, ώστε να αποτελέσει βάση συγκριτικής αξιολόγησης. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η χρησιμοποίηση του PCM RT25HC επιτυγχάνει την επαρκή ψύξη των φωτοβολταϊκών πλαισίων όταν το σύστημα PV+PCM λειτουργεί υπό τις συνθήκες της Αλεξάνδρειας (Αίγυπτος), εξαιρουμένων των μεσημβρινών ωρών στη διάρκεια της θερινής περιόδου. Ακόμη, οι ερευνητές ανέφεραν ότι η ενεργειακή απόδοση του συστήματος βελτιστοποιήθηκε όταν το πάχος του εφαρμοζόμενου PCM ήταν ίσο με 30 mm και εφαρμόζονταν γωνίες κλίσης 18°,17°,48° και 41° για την άνοιξη, το καλοκαίρι, το φθινόπωρο και το χειμώνα, αντίστοιχα. [*Elsehiniti et al.,* 2020]

Αντίστοιχες αριθμητικές μελέτες από περισσότερες ερευνητικές ομάδες έχουν διεξαχθεί προκειμένου να αποτιμηθεί ο αντίκτυπος της ενσωμάτωσης PCM για τη διαχείριση της θερμοκρασίας λειτουργίας και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Σε αυτές τις μελέτες, έχουν προταθεί και εξεταστεί διαφορετικά αριθμητικά μοντέλα, εναλλακτικές σχεδιαστικές προσεγγίσεις και συνδυασμοί για τη βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας, καθώς επίσης και τύποι PCM. Μολονότι η εξελισσόμενη έρευνα χαρακτηρίζεται ως εκτεταμένη και πολυδιάστατή, ο αριθμός των μελετών πειραματικής αξιολόγησης συστημάτων PV+PCM, τα οποία θα μπορούσαν να προσαρμοστούν κατάλληλα για πρακτική εφαρμογή, είναι περιορισμένος.

2.4.2.2 Πειραματική αξιολόγηση της απόδοσης των συστημάτων PV+PCM

Η επιστημονική κοινότητα, λαμβάνοντας υπόψη τα ενθαρρυντικά στοιχεία των μελετών προσομοίωσης συστημάτων PV+PCM που αναφέρουν βελτιωμένη θερμική συμπεριφορά και υψηλότερη ενεργειακή απόδοση, προχώρησε με τη διεξαγωγή πειραματικών ερευνών προκειμένου να τεκμηριωθούν επαρκώς οι ικανότητες των PCM για τη διαχείριση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων και να διαμορφωθούν κατάλληλα σημεία αναφοράς. Στην τρέχουσα ενότητα, παρουσιάζεται ένας ικανός αριθμός συναφών μελετών ώστε να καταστεί εφικτή η κατανόηση των κύριων λειτουργικών πτυχών ενός συστήματος PV+PCM υπό τις πραγματικές συνθήκες πεδίου.

Το 2009, οι *Hasan et al.* εκτέλεσαν μια σειρά πειραμάτων πεδίου προκειμένου να συγκρίνουν την απόδοση τριών (3) φωτοβολταϊκών πλαισίων πολυκρυσταλλικού πυριτίου (PC-Si), δύο εκ των οποίων έφεραν σύστημα παθητικής ψύξης με PCM. Για την ενσωμάτωση των PCM, όμοια δοχεία αποθήκευσης, τα οποία διέθεταν εσωτερικά κάθετα πτερύγια τοποθετημένα συμμετρικά με απόσταση 7,5 cm, κατασκευάστηκαν από κράμα αλουμινίου πάχους 5 mm. Για την εκπλήρωση των στόχων της μελέτης, έλαβαν χωρά διαδοχικά δοκιμές έκθεσης των ανεπτυγμένων διατάξεων (περίπτωση αναφοράς, PV+PCM1 και PV+PCM2) στις συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος του Δουβλίνου (Ιρλανδία) και του Βεχάρι (Πακιστάν), με σκοπό την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων λειτουργίας τους (π.χ. V_{OC}, I_{SC}, T_m) υπό διαφορετικά κλιματικά σενάρια. Τα ερευνητικά αποτελέσματα (Πίνακας 2-3), που προέκυψαν για την περιοχή του Δουβλίνου, έδειξαν μέγιστη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου κατά 7 ^{o}C και 10 ^{o}C με χρήση μείγματος καπρικού/παλμιτικού οξέος (C/P) και ένυδρου άλατος ($CaCl_2 \cdot 6H_2O$), αντίστοιχα. Ομοίως, τα αποτελέσματα των μετρήσεων από την περιοχή του Βεχάρι υπέδειξαν το θετικό αντίκτυπο της εφαρμογής των PCM (δηλ. C/P και $CaCl_2 \cdot 6H_2O$), καθώς παρατηρήθηκε μέγιστη μείωση της θερμοκρασίας

λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων κατά 17 ^{o}C και 21 ^{o}C, αντίστοιχα. Επιπλέον, η ενεργειακή απόδοση των συστημάτων PV+PCM παρουσίασε, κατά μέσο όρο, αύξηση από 1,8%-7,7% λόγω της βελτιωμένης θερμικής συμπεριφοράς των φωτοβολταϊκών στις δεδομένες συνθήκες των περιοχών μελέτης. Συμπερασματικά, το ένυδρο άλας $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ προσδιορίστηκε ως πιο αποτελεσματική επιλογή σε σχέση με το μείγμα καπρικού/παλμιτικού οξέος (C/P), ενώ η περαιτέρω ανάλυση των καταγεγραμμένων δεδομένων, ως προς της βιωσιμότητα της εφαρμογή συστημάτων PV+PCM, απέδειξε ότι αποτελεί μια δαπανηρή επιλογή για χώρες με χαμηλό δείκτη ηλιακού δυναμικού. [*Hasan et al.,* 2014*; Hasan et al.,* 2015].

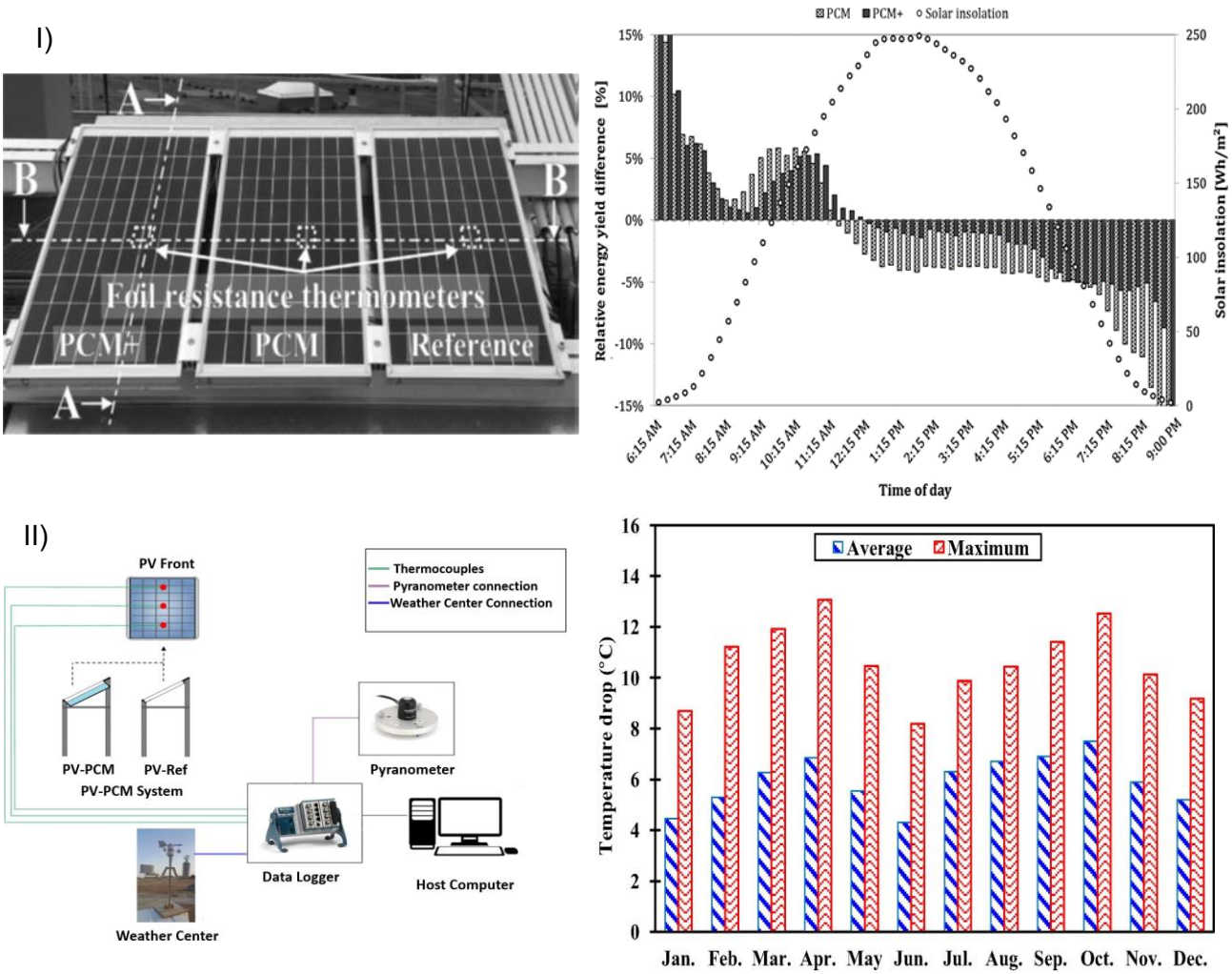
Παράμετρος		**Φωτοβολταϊκό αναφοράς**		**PV-PCM1**		**PV-PCM2**	
		Δουβλίνο	**Βεχάρι**	**Δουβλίνο**	**Βεχάρι**	**Δουβλίνο**	**Βεχάρι**
Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία - G_t (W/m^2)	At peak	970	950	970	950	970	950
	Average	674	660	674	660	674	660
Θερμοκρασία λειτουργίας - T_m (°C)	At peak	49	63	43	51	40	42
Απόκλιση των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας (°C)	At peak	-	-	7	17	10	21
Παράγων Πλήρωσης - *FF* (%)	Average	-	69,64	72,82	71,26	73,22	72,24
Τάση ανοικτού κυκλώματος - V_{OC} (V)	At peak	20,1	18,32	20,81	19,71	20,95	20,15
	Average	20,41	18,72	20,52	19,42	20,81	19,92
Ρεύμα βραχυκύκλωσης - I_{SC} (A)	At peak	3,74	3,42	3,70	3,34	3,68	3,33
	Average	2,82	2,45	2,77	2,41	2,78	2,39

Πίνακας 2-2: Σύνοψη των κύριων παραμέτρων ελέγχου των φωτοβολταϊκών πλαισίων με και χωρίς PCM (σύστημα PV-PCM1, σύστημα PV-PCM1), όπως σημειώθηκαν στις 12/9/2009 και 30/10/2009 υπό τις συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος του Δουβλίνου (Ιρλανδία) και του Βεχάρι (Πακιστάν), αντιστοιχα.

[*Hasan et al.,* 2014]

Σε μεταγενέστερο χρόνο, οι *Japs et al.* εξέτασαν τις δυνατότητες εφαρμογής καθαρού PCM (παραφίνη RT28 HC) και μείγματος PCM/διογκωμένου γραφίτη για την αποτελεσματική διαχείριση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών αξιοποιώντας μια κατάλληλα ανεπτυγμένη πειραματική διάταξη. Παρότι η τιμή $T_{PCM,melt}$ του εργαζόμενου ρευστού ήταν ίδια και στις δύο (2) περιπτώσεις, το μείγμα PCM/διογκωμένου γραφίτη PCM παρουσίαζε μικρότερη ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας και υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα λόγω της προσθήκης του γραφίτη. Σύμφωνα με τα στοιχεία της μελέτης, τα συνολικά ενεργειακά και οικονομικά οφέλη των διερευνημένων συστημάτων PV+PCM κατά τη διάρκεια του ημερήσιου κύκλου λειτουργίας τους ήταν περιορισμένα, παρά τα θετικά αποτελέσματα που καταγράφηκαν κατά το 1° μισό της ημέρας (πριν από το μεσημέρι). Ο παρατηρούμενος περιορισμός της απόδοσης των PV+PCM συστημάτων αιτιολογήθηκε βάσει του γεγονότος ότι τα εργαζόμενα ρευστά (καθαρό PCM και μείγμα PCM/διογκωμένου γραφίτη), τα οποία είχαν ενσωματωθεί στην οπίσθια επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων, λειτουργούσαν ως θερμομονωτική επίστρωση κατά τη διάρκεια του 2^{ου} μισού της ημέρας (μετά το μεσημέρι), αυξάνοντας παράλληλα τη θερμοκρασία λειτουργίας τους σε

υψηλότερες τιμές σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή της περίπτωσης αναφοράς. Τέλος, οι ερευνητές ανέφεραν ότι το μείγμα PCM/διογκωμένου γραφίτη ήταν καταλληλότερη επιλογή για τη βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου. [*Japs et al.*, 2016]



Διάγραμμα 2-4: Σχηματική απεικόνιση και ενδεικτικά αποτελέσματα από τη λειτουργία περιραματικής διάταξης με σύστημα PV+PCM και φωτοβολταικό πλαίσιο αναφοράς: I) στην περιοχή του Παντεμπορν, Γερμανία [*Japs et al*., 2016] και II) στην περιοχή του Αλ-ιν, Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα [*Hasan et al.*,2017]

Οι *Hasan et al*. υλοποίησαν έρευνα πεδίου ετήσιας διάρκειας προκειμένου να αξιολογήσουν τη λειτουργική απόδοση ενός συστήματος PV+PCM στις ιδιαίτερα θερμές συνθήκες των Ηνωμένων Αραβικών Εμιράτων. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η αξιοποίηση ενός PCM (παραφίνη RT42) με σημείο τήξης ($T_{PCM,melt}$) 42 ^{o}C επιτυγχάνει μέση μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου κατά 10,5 ^{o}C, οδηγώντας σε αύξηση της ετήσιας παραγωγής ενέργειας κατά 5,9%. Εν κατακλείδι, η ερευνητική ομάδα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το σύστημα PV+PCM παρουσιάζει σταθερή ενεργειακή συμπεριφορά κατά το μεγαλύτερο μέρος του έτους, εμφανίζοντας μεγιστοποίηση της απόδοσης του κατά τους μεταβατικούς μήνες [*Hasan et al.*, 2017]. Πρόσφατα, τα καταγεγραμμένα στοιχεία από την αξιολόγηση της θερμικής και της ενεργειακής απόδοσης όμοιων φωτοβολταϊκών πλαισίων στην πόλη Αλ-Κιάρα (Λίβανος), στα οποία είχαν προσαρμοστεί κατάλληλα PCM

διαφορετικής σύστασης, παρουσιάστηκαν από τους *Hachem et al.* Για τους σκοπούς της μελέτης, ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο θεωρήθηκε ως περίπτωσης αναφοράς, ενώ τα πρωτότυπα 2 και 3 έφεραν καθαρό PCM και μείγμα PCM/χαλκού/γραφίτη. Σύμφωνα με τα ληφθέντα αποτελέσματα, η αξιοποίηση των ιδιοτήτων του καθαρού και του μείγματος PCM οδήγησε σε μέση αύξηση της απόδοσης των δοκιμασμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων κατά 3% και 5,8%, αντίστοιχα. [*Hachem et al.*, 2017]

Παράλληλα, οι *Nada et al.* διεξήγαγαν προκαταρκτική πειραματική μελέτη εκτίμησης της επίδρασης στη συνολική απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, που επιτελείται από την ενσωμάτωση κεριού παραφίνης RT55 και μείγματος PCM/νανοσωματιδίων αλουμίνας (Al_2O_3). Τα αποτελέσματα της διερεύνησης αποκάλυψαν ότι η τοποθέτηση δοχείων πληρωμένων με μείγμα PCM/Al_2O_3 και καθαρό PCM συμβάλλει για τον περιορισμό της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων κατά 10,6 ^oC και 8,1 ^oC, καθώς επίσης και την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης κατά 13,2% και 5,7%, αντίστοιχα [*Nada et al.*, 2018].

Στο πλαίσιο μιας διευρυμένης διαδικασίας σχεδιασμού ηλιακών συστημάτων με βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση, οι *Li et al*. ανέπτυξαν σύστημα PV+PCM, το οποίο συνδυάζει ένα συμβατικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο ονομαστικής ισχύος 100 Wp και κερί παραφίνης με θερμοκρασία τήξης ($T_{PCM,melt}$) εντός της περιοχής 35-42 ^oC ως χρησιμοποιούμενο PCM. Το ανεπτυγμένο σύστημα εγκαταστάθηκε στο Πανεπιστήμιο Shanghai Jiao Tong στην Κίνα προκειμένου να τεθεί υπό πειραματική αξιολόγηση σε πραγματικές συνθήκες πεδίου. Έχοντας ένα όμοιο φωτοβολταϊκό πλαίσιο ως συγκριτική βάση, οι ερευνητές ανέφεραν ότι η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM παρατηρήθηκε μειωμένη έως και 23 ^oC, συμβάλλοντας καθοριστικά για την αύξηση της παραγόμενης ενέργειας κατά 18%. [*Li et al.*, 2019]

Το 2020, οι *Karthick et al.* εξέλιξαν μια εναλλακτική προσέγγιση ανάπτυξης των ενσωματωμένων σε κτίρια ημιπερατών φωτοβολταϊκών συστημάτων (BISTPV), η οποία βασίστηκε στην κατάλληλη ένταξη PCM, ώστε να διασφαλίζεται η μείωση της θερμοκρασία λειτουργείας των χρησιμοποιούμενων φωτοβολταϊκών κυψελίδων πολυκρυσταλλικού πυριτίου (PC-Si). Πιο συγκεκριμένα, ένα εύτηκτο μείγμα σε αναλογία 70% $Na_2SO_4{\cdot}10H_2O$ και 30% $N_2O_6Zn{\cdot}6H_2O$, το οποίο χαρακτηρίζονταν από θερμοκρασία τήξης ($T_{PCM,melt}$) ίση με 30^oC, εφαρμόστηκε σε πρωτότυπη φωτοβολταϊκή διάταξη (BISTPV+PCM) και αξιολογήθηκε πειραματικά για χρονικό διάστημα ενός έτους (2018) στην περιοχή Κοβιλπάττι (Ινδία). Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν βελτιωμένη θερμική απόκριση του συστήματος BISTPV+PCM σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς, καθώς η μέση και η μέγιστη (σε μηνιαία βάση) θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ τους ($\Delta T_{m,avg\ BISTPV/BISTPV+PCM}$, $\Delta T_{m,peak\ BISTPV/BISTPV+PCM}$) ήταν 4 ^oC και 11 ^oC, αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, η στιγμιαία μέγιστη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας σε σύστημα BISTPV+PCM ($T_{m,\ BISTPV+PCM}$) βρέθηκε ίση με 12 ^oC, η οποία συνεπάγονταν υψηλότερη ενεργειακή απόδοση κατά 8%. Εν κατακλείδι, οι ερευνητές τόνισαν την εξάρτηση της απόδοσης του αξιοποιημένος PCM από την εποχική μεταβλητότητα των μετεωρολογικών παραμέτρων. [*Karthick et al., 2020*]

Σημαντικός αριθμός επιστημονικών μελετών έχει αναδείξει το ζήτημα της χαμηλής τιμής θερμικής αγωγιμότητας των PCM, καθώς επίσης και των συνεπαγόμενων περιορισμών που ανακύπτουν σε δυνητικές εφαρμογές τους. Με βάση αυτή τη γενική διαπίστωση, οι *Singh et al.* πραγματοποίησαν μια εκτεταμένη πειραματική έρευνα για τη βελτίωση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο προς το εργαζόμενο ρευστό μέσο (δηλ.

PCM) μέσω της χρησιμοποίησης πολλαπλών ορθογώνιων δοχείων αποθήκευσης του, που είχαν κατασκευαστεί από αλουμίνιο. Για την εκτίμηση των επιδόσεων της προτεινόμενης διαμόρφωσης, μια κατάλληλη πειραματική διάταξη, η οποία περιλάμβανε σύστημα PV+PCM και φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς, εκτέθηκε υπό συνθήκες πεδίου στην περιοχή του Τσενάι (Ινδία) προκειμένου να καταγραφούν και να αξιολογηθούν συγκριτικά οι σχετιζόμενες παράμετροι τους (π.χ. ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, απόδοση μετατροπής, μέση ημερήσια ενεργειακή παραγωγή, κ.α.). Τα αποτελέσματα της μελέτης υπέδειξαν ότι η προτεινόμενη διαμόρφωση PV+PCM κατάφερε να περιορίσει περισσότερο από 18 ^{o}C τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου της, αξιοποιώντας τις θερμοφυσικές ιδιότητες του $CaCl_2 \cdot 6H_2O$. Ως εκ τούτου, η ενεργειακή παραγωγή του συστήματος PV+PCM παρατηρήθηκε βελτιωμένη κατά 6,2%, τον Ιανουάριο και 8,3%, τον Ιούνιο. [*Singh et al.*, *2020*] Ως επί το πλείστον, οι ερευνητικές προσπάθειες για την ανάπτυξη και εξέλιξη των συστημάτων PV+PCM εστιάζονται στην εφαρμογή εμπορικά διαθέσιμων PCM (π.χ. κεριά παραφίνης, εύτηκτα μείγματα, ένυδρα άλατα, κ.α.), καθιστώντας το κόστος κατασκευής τους μη αμελητέο. Στο πλαίσιο διερεύνησης εναλλακτικών επιλογών, οι *Wongwuttanasatian et al.* προχώρησαν στην ανάπτυξη μιας παθητικής τεχνικής ψύξης φωτοβολταϊκών πλαισίων, χρησιμοποιώντας καρναουβικό κερί ως PCM. Ειδικότερα, η ερευνητική ομάδα κατασκεύασε κατάλληλη πιλοτική διάταξη για να εξετάσει τη συμπεριφορά και την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής του PCM σε πραγματικές συνθήκες. Σύμφωνα με τα στοιχεία της μελέτης, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, το οποίο έφερε δοχείο αποθήκευσης (με εσωτερικά πτερύγια) πληρωμένο με καρναουβικό κερί, λειτούργησε υπό θερμοκρασία χαμηλότερη κατά 6,1 ^{o}C σε σχέση με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς, βελτιώνοντας ταυτόχρονα κατά 5,3% την αποδοτικότητά μετατροπής ηλιακή ισχύος σε ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης, υπογραμμίστηκε ο σημαντικός αντίκτυπος της αξιοποίησης PCM στην απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, ιδίως όταν η ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ήταν υψηλότερη από 500 W/m^2. [*Wongwuttanasatian et al.,* 2020]. Στον Πίνακα 2-3 παρουσιάζονται συνοπτικά τα κυριότερα ευρήματα, τα οποία προέκυψαν μέσω της πειραματικής αξιολόγησης των συστημάτων PV+PCM σε συνθήκες πεδίου και παρατίθενται στη διεθνή βιβλιογραφία.

Τοποθεσία	Τύπος φ/β	Ελεγχόμενο PCM	Συνθήκες ελέγχου	Διάρκεια πειραμάτων	Tm		Απόδοση συστήματος PV+PCM				Πηγή
					Avg	Peak	$\Delta T_{m(PV/PV+PCM)}$	Περίοδος χρονικής υστέρησης	Αύξηση απόδοσης μετατροπής	Αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	
Λιουμπλιάνα, Σλοβενία	MC-Si (250W)	RT28HC	Δοκιμές πεδίου & προσομοίωση	7 d & 1 y	54,6 ºC	75,5 ºC	12 ºC (peak:35,6 ºC)	4-6h	2,8%	17,91 kWh (7,3%)	*Stropnik & Stritih*, 2016
Αλ-ιν, ΗΑΕ	PC-Si (40W)	RT42	Δοκιμές πεδίου	1 y	-	53 ºC	10,5 ºC		-	5,9 %	*Hasan et al.*, 2017
Χεφέι, Κίνα	MC-Si (50W)	Οργανικό PCM ($T_{PCM,melt}$:30-32 ºC)	Δοκιμές πεδίου	2 d	-	55 ºC	2,4-2,8 ºC (peak: 6-9 ºC)	9h	2%	1,8-3%	*Waqas et al.*, 2019
Σονγκ-ντο, Ν. Κορέα	PC-Si (10,9 W)	Οργανικό PCM ($T_{PCM,melt}$: 25 ºC)	Δοκιμές πεδίου	30 d	-	36 ºC	(peak: 5 ºC)		3,1% (peak)	1-1,5%	*Park et al.*, 2014
Αλ-Κιάρα, Λίβανος	PC-Si (30 W)	Οργανικό PCM ($T_{PCM,melt}$:36-60 ºC)	Δοκιμές πεδίου	2 d	-	62 ºC	2,7 ºC (peak:6,5 ºC)			3%	*Hachem et al.*, 2017
Γκίζα, Αίγυπτος	PC-Si (30 W)	RT55	Δοκιμές πεδίου	3 mo	55 ºC	75 ºC	8,1-10,6 ºC (peak: ~11-17 ºC)	~4-6h	5,7-13,2%	4,15-5,7% (peak: 6,7-8,6%)	*Nada et al.*, 2018
Σαγκάη, Κίνα	MC-Si (100W)	Οργανικό PCM ($T_{PCM,melt}$:34,9-42 ºC)	Δοκιμές πεδίου	2 d	43,5 ºC	68,7 ºC	~10-20 ºC (peak: 23 ºC)	-	-	5,18%	*Li et al.*, 2019
Βεχάρι, Πακιστάν	PC-Si (65 W)	Λιπαρό οξύ ($T_{PCM,melt}$:22,5 ºC)	Δοκιμές πεδίου	1 d	-	63 ºC	21 ºC	-	6,1-10,7%	7,7%	*Hasan et al.*, 2015
Δουβλίνο, Ιρλανδία		Ένυδρο άλας ($T_{PCM,melt}$:29.8 ºC)	Δοκιμές πεδίου	1 d	-	49 ºC	10 ºC	-	7-10 %	1,8%	
Κουάλα-Λουμπούρ, Μαλαισία	-	RT 35	Δοκιμές πεδίου	1 d	41ºC	53 ºC	10 ºC	6h	-	-	*Mahamudul et al.*, 2016
Κοβιλπάττι, Ινδία	PC-Si (24 W)	Εύτηκτο μείγμα ($T_{PCM,melt}$:30 ºC)	Δοκιμές πεδίου	1 y	-	65 ºC	12 ºC	-	6-11%	2,74 kWh (8%)	*Karthick et al.*, 2020
	PC-Si (70 W)	Άλας Glauber ($T_{PCM,melt}$:32 ºC)	Δοκιμές πεδίου	12 d	-	52 ºC	peak : 8 ºC	-	10%	8%	*Karthick et al..*, 2018
Τσενάι, Ινδία	PC-Si (5 W)	Οργανικό PCM ($T_{PCM,melt}$:29 ºC)	Δοκιμές πεδίου	2 d	-	59,2 ºC	10,35 ºC	-	2%	(peak: 30%)	*Rajvikram et al.*, 2019
	MC-Si (175 W)	Ένυδρο άλας ($T_{PCM,melt}$:30 ºC)	Δοκιμές πεδίου	2 d	-	64,4 ºC, 77,1 ºC	(peak: ~18, 23 ºC)	-	10,5,15,9%	6,2%,8,3%	*Singh et al.*, 2020
Μασχάντ, Ιράν	MC-Si (40 W)	Οργανικό PCM ($T_{PCM,melt}$:46-48 ºC)	Δοκιμές πεδίου	~ 1 mo	61,7 ºC		7 ºC		4%	4,22%	*Kazemian et al.*, 2018

PC-Si: πολυκρυσταλλικού πυριτίου, MC-Si: μονοκρυσταλλικού πυριτίου, μc-Si: μικροκρυσταλλικού πυριτίου, a-Si: άμορφου πυριτίου, a-Si/μc-Si: μικρο-άμορφου πυριτίου

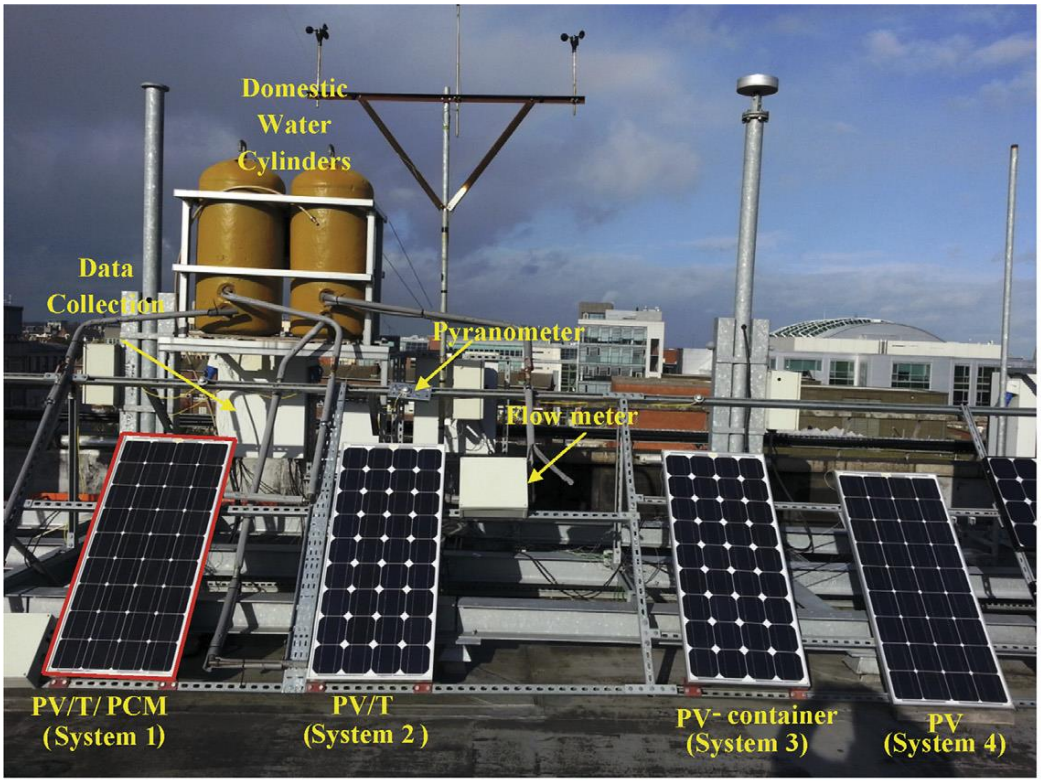
Πίνακας 2-3: Σύνοπτική παρουσίαση συναφών εργασιών που απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία .

2.4.2.3 Ανάπτυξη υβριδικών φωτοβολταϊκών συστημάτων με χρήση PCM

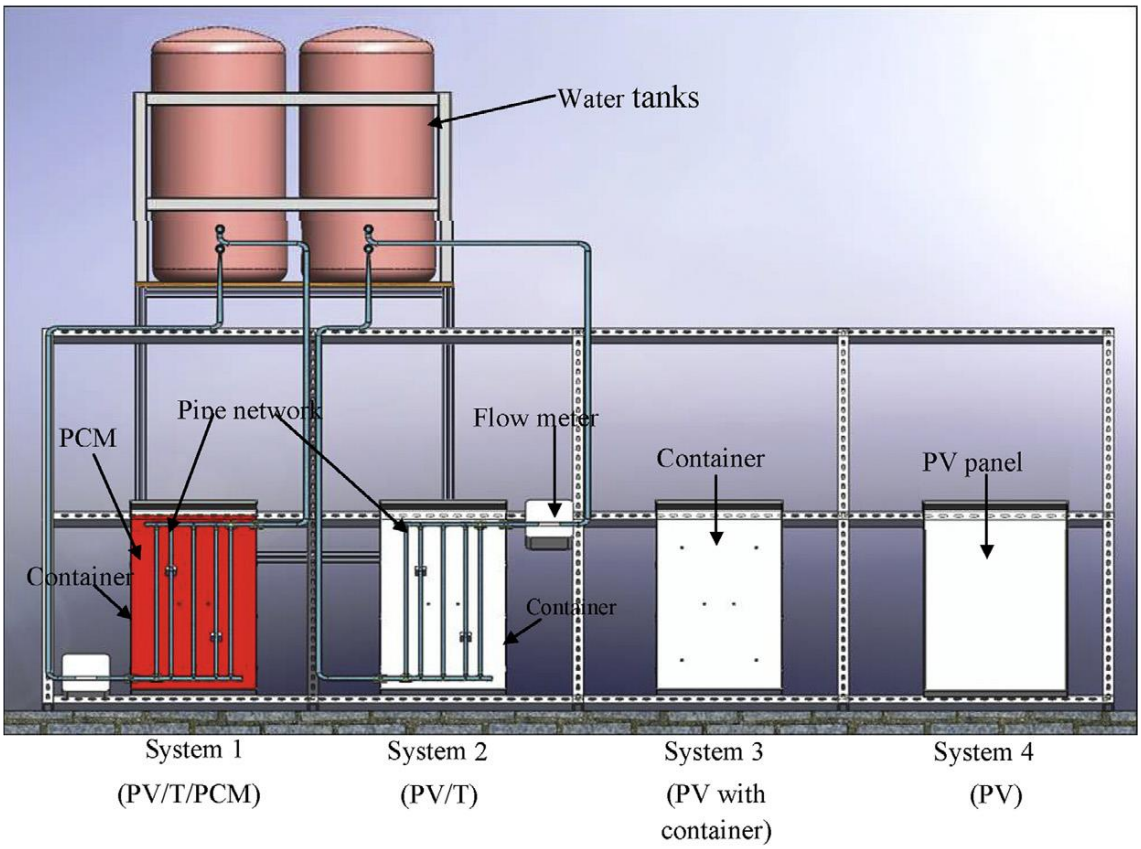
Πέραν της εφαρμογής των PCM για τη διαχείριση της θερμοκρασίας λειτουργίας και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ένας σημαντικός αριθμός ερευνητών έχει εστιάσει στην ανάπτυξη υβριδικών φωτοβολταϊκών/θερμικών συστημάτων με χρήση PCM, έτσι ώστε να πραγματοποιείται ανάκτηση της αποθηκευμένης θερμότητας για την επίτευξη υψηλότερου ολικού βαθμού απόδοσης μετατροπής της ηλιακής ενέργειας. Συγκεκριμένα, αρκετοί ερευνητές, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα φωτοβολταϊκά/ θερμικά (PV/T) συστήματα δύνανται να παράγουν τόσο ηλεκτρική όσο και θερμότητα, εξέτασαν τις προοπτικές περαιτέρω ενίσχυσης της ενεργειακής απόκρισης τους μέσω της ενσωμάτωσης PCM. Σε αυτά τα συστήματα, η πλεονάζουσα θερμότητα απορροφάται αρχικά από το PCM, επιτυγχάνοντας τη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας και την αύξηση της ηλεκτρικής απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου, ενώ στη συνέχεια μεταφέρεται στο εργαζόμενο ρευστό μέσο που ρέει εντός κατάλληλων αγωγών εμβαπτισμένων στο PCM, οδηγώντας σε υψηλότερη θερμική απόδοση [*Ali*, 2020].

Το 2011, οι *Malvi et al.* προχώρησαν στην ανάλυση της λειτουργίας ενός συστήματος PV/T+PCM, αφενός για την αναγνώριση της ωφέλειας του και αφετέρου για τη βελτιστοποίηση της ισορροπίας μεταξύ της παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού κατά την εφαρμογή του. Το προτεινόμενο σύστημα PV/T+PCM αποτελούνταν από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο συζευγμένο με μια επίπεδη πλάκα χαλκού, η οποία έφερε δίκτυο αγωγών στην οπίσθια πλευρά της, ένα στρώμα PCM και την τελική μονωτική επιφάνεια. Στο πλαίσιο της μελέτης, ένα μονοδιάστατο (1-D) αριθμητικό μοντέλο αναπτύχθηκε προκειμένου να διερευνηθεί ο βαθμός επίδρασης των λειτουργικών παραμέτρων του συστήματος PV/T+PCM (π.χ. ρυθμός ροής εργαζόμενου ρευστού, θερμοκρασία εισόδου νερού, πάχος PCM, κ.α.) στην ενεργειακή απόκριση του. Τα σχετικά αποτελέσματα κατέδειξαν ότι η αξιοποίηση κατάλληλου τύπου PCM (πάχος στρώματος: 5 cm) δύναται αυξήσει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη θερμοκρασία του νερού από το σύστημα PV/T κατά 9% και 20 ^{o}C, αντίστοιχα [*Malvi et al.*, 2011].

Λίγα χρόνια αργότερα, οι *Browne et al.* ανέπτυξαν ένα αντίστοιχο σύστημα PV/T+PCM, το οποίο αξιολογήθηκε πειραματικά υπό τις συνθήκες του περιβάλλοντος στην περιοχή του Δουβλίνου (Ιρλανδία). Η εκτέλεση των σχετικών πειραματικών μετρήσεων βασίστηκε σε κατάλληλη διάταξη δοκιμών (Εικόνα 2-2) αποτελούμενη από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο συνδεδεμένο με θερμικό συλλέκτη που είχε εμβαπτιστεί σε δοχείο πληρωμένο με PCM (σύστημα PV/T+PCM), ένα τυπικό σύστημα PV/T, καθώς επίσης και δύο (2) όμοια φωτοβολταϊκά με και χωρίς την προσαρμογή δοχείου, αντίστοιχα. Οι ερευνητές, μέσω της συγκριτικής αξιολόγησης των αποτελεσμάτων από τα επιμέρους υποσυστήματα, ανέφεραν ότι η ενσωμάτωση του PCM σε ένα συμβατικό σύστημα PV/T συνέβαλλε σημαντικά για την ενίσχυση τόσο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όσο και της θερμοκρασίας του νερού στην έξοδο του συστήματος, αυξάνοντας περαιτέρω την ολική ενεργειακή απόδοση του.



(a)



(b)

Εικόνα 2-2: Σχηματική απεικόνιση της ελεγχθείσας πειραματικής διάταξης στην περιοχή του Δουβλίνου (Ιρλανδία).

[*Browne et al.*, 2016]

Το 2017, μια ερευνητική ομάδα από την Ινδία εκτέλεσε κατάλληλη πειραματική διαδικασία για τη συγκριτική αποτίμηση της ενεργειακής συμπεριφοράς τριών (3) εναλλακτικών διατάξεων αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας, και ειδικότερα: i. ενός (1) υβριδικού συστήματος PV/T+PCM, ii. ενός (1) συμβατικού φωτοβολταϊκού πλαισίου και iii. ενός (1) τυπικού συστήματος PV/T. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια του πειράματος, μελετήθηκε ο αντίκτυπος των διαφορετικών επιλογών, σε ότι αφορά την τιμή της ταχύτητα ροής του νερού (μεταξύ 0,013-0,031 kg/s), στην απόδοση του συστήματος PV/T που έφερε κερί παραφίνης RT30. Βάσει των αποτελεσμάτων της ερευνάς, η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων στα συστήματα τύπου PV/T καταγράφηκε σημαντικά χαμηλότερη (μείωση ≥ 45%) σε σχέση με τις συμβατικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο, οδηγώντας στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης του υβριδικού συστήματος PV/T+PCM και του συμβατικού συστήματος PV/T κατά 12,8% και 10,6%, αντίστοιχα.

Προκειμένου να εξάγουν ακριβή συμπεράσματα όσον αφορά τις δυνατότητες περαιτέρω ενίσχυσης της απόδοσης των σύγχρονων ηλιακών συστημάτων μέσω της αξιοποίησης των PCM, οι *Li et al.* προχώρησαν στην εκτίμηση της ενεργειακής συμπεριφοράς ενός συστήματος PV+PCM/T υπό τις επικρατούσες συνθήκες στην περιοχή της Σαγκάης (Κίνα). Οι ερευνητές, αναλύοντας κατάλληλα τα συλλεχθέντα πειραματικά δεδομένα, παρατήρησαν ότι η αύξηση της θερμικής αδράνειας σε ένα τυπικό σύστημα PV/T, που επιτελείται μέσω της ενσωμάτωσης του PCM RT 35, συνετέλεσε για την επίτευξη βελτιωμένης ενεργειακής παραγωγής. Ωστόσο, επισημάνθηκε ότι η αποδοθείσα ηλεκτρική ισχύς από το σύστημα PV+PCM/T ήταν ελαφρώς μειωμένη σε σύγκριση με την ισχύ που παρήγαγε ένα τυπικό σύστημα PV+PCM σε όμοιες συνθήκες λειτουργίας [*Li et al.*, 2019].

Αντιστοίχως, οι *Kazemian et al.* υλοποίησαν πειραματικές δοκιμές για τον έλεγχο της ενεργειακής απόκρισης τριών (3) διαφορετικών τύπων ηλιακών συλλεκτών (δηλαδή ενός συμβατικού φωτοβολταϊκού πλαισίου, ενός συστήματος PV+PCM και ενός συστήματος PV/T+PCM) στις κλιματικές συνθήκες του περιβάλλοντος της πόλης Μασχάντ (Ιράν). Επιπρόσθετα, στο πλαίσιο της μελέτης τους, οι ερευνητές αξιολογήσαν την καταλληλόλητα της χρήσης του καθαρού νερού, της καθαρής αιθυλενογλυκόλης και ενός μείγματος σε αναλογία 50% αιθυλενογλυκόλης και 50% νερό ως ρευστό μέσο απαγωγής θερμότητας στο σύστημα PV/T+PCM. Σύμφωνα με τα ληφθέντα αποτελέσματα, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα συστήματα PV+PCM και PV/T+PCM, στα οποία είχε ενσωματωθεί κερί παραφίνης με θερμοκρασία τήξης ($T_{PCM,melt}$) εντός της περιοχής τιμών 46-48 ^{o}C και ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας ίση με 200-220 kJ/kg, παρουσιάστηκε ενισχυμένη κατά 4,2-8,81% σε σύγκριση με τη σχετική απόκριση από το συμβατικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Εν κατακλείδι, οι ερευνητές επεσήμαναν ότι το σύστημα PV/T+PCM εμφάνιζε βέλτιστη απόδοση στην περίπτωση της χρησιμοποίησης καθαρού νερού ως ρευστό λειτουργίας. [*Kazemian et al.,*2018]

Σε πρόσφατη μελέτη τους, οι *Shary* και *Arunachala* παρέθεσαν τα στοιχεία από τη διαδικασία εξέλιξης ενός αποδοτικού συστήματος PV/T+PCM, το οποίο είχε ως πρόσθετο χαρακτηριστικό την ενσωμάτωση μιας διάτρητης μεταλλικής μήτρας στη δεξαμενή αποθήκευσης του επιλεγμένου PCM. Για την ακρίβεια, οι ερευνητές ανέλυσαν τα πειραματικά δεδομένα για τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (δηλ. V_{OC}, I_{SC}, n_{ELEC}, P_M) ενός συστήματος PV/T+PCM/μεταλλική μήτρα, ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου και ενός συμβατικού συστήματος PV/T+PCM, προκειμένου να αξιολογήσουν συγκριτικά τα επίπεδα απόδοσης

του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε κάθε μια εκ των ελεγχόμενων περιπτώσεων εφαρμογής. Ως κύριο συμπέρασμα της μελέτης θεωρήθηκε η αύξηση της απόδοσης μετατροπής του συστήματος PV/T κατά 8,6% λόγω της αξιοποίησης ικανής ποσότητας PCM σε συνδυασμό με την ένθετη μεταλλική μήτρα βελτίωσης της μεταφοράς θερμότητας στο σύστημα. [*Shary* και *Arunachala,*2020]

Στη διεθνή βιβλιογραφία, πέραν των προταθέντων διατάξεων PV/T+PCM, οι οποίες δύνανται να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρισμού και ζεστού νερού χρήσης (ZNX), απαντώνται αρκετές περιπτώσεις μελετών όπου το εν λόγω ηλιακό σύστημα αξιοποιείται για την παραγωγή θερμού αέρα και ηλεκτρικής ενέργειας. Ενδεικτικά, οι *Su et al.* προχώρησαν στην ανάπτυξη, την προσομοίωση, την ανάλυση και την αξιολόγηση του αντικτύπου από την ενσωμάτωση PCM σε συλλέκτη PV/T με μηχανισμό εξαναγκασμένης ροής αέρα. Πιο συγκεκριμένα, τα μέλη της ερευνητικής ομάδας μελέτησαν επισταμένως τη σημασία της τοποθέτησης του στρώματος PCM ως προς τη ροή του αέρα εντός του συλλέκτη PV/T ώστε να επιτυγχάνεται η ενίσχυση της ενεργειακής του απόδοσης. Εν τέλει, η θέση του PCM άνωθεν της ροής αέρα σε ένα συλλέκτη PV/T προκρίθηκε ως αποτελεσματικότερη δεδομένου ότι η ολική απόδοση του παρατηρήθηκε αυξημένη κατά 10,7% σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς (συμβατικό σύστημα PV/T). [*Su et al.,* 2017]

Στην πλειονότητα των ανωτέρω παρατεθέντων μελετών υπογραμμίζεται ότι εξέλιξη των συμβατικών συλλεκτών PV/T σε συστήματα PV/T+PCM συμβάλλει για την επίτευξή υψηλής ενεργειακής απόδοσης κατά τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας. Ειδικότερα, οι ερευνητές επεσήμαναν τα πλεονεκτήματα των συστημάτων PV/T+PCM, εστιάζοντας κυρίως στην ικανότητα τους να παράγουν υψηλότερα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας που μπορεί να αξιοποιηθεί σε πολλαπλά πεδία εφαρμογών (π.χ. προθέρμανση νερού, ξήρανση, συστήματα HVAC, κλπ.). Σε επίπεδο πρακτικής εφαρμογής, μια διάταξη PV/T+PCM θα μπορούσε να υποκαταστήσει τα συμβατικά ηλιακά συστήματα παραγωγής ZNX ή θέρμανσης χώρου (με αέρα), συνιστώντας μια εναλλακτική επιλογή για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών στον οικιστικό τομέα, στον τομέα της βιομηχανίας και του τουρισμού. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τις εκτιμήσεις της Solar Power Europe και του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (IEA PVPS) που αναφέρουν ότι τα φωτοβολταϊκά έργα μεγάλης κλίμακας θα παραμείνουν η κυρίαρχος τύπος φωτοβολταϊκής εγκατάστασης με μερίδιο αγοράς> 65% τα επόμενα χρόνια, καθώς και τα σενάρια που προβλέπουν ότι το μέγιστο εφικτό μερίδιο για τα οικιακά δεν αναμένεται να υπερβεί το 35% της συνολικής νέας εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής ισχύς στο τέλος του 2024 [*IEA*, 2020; *SolarPower Europe*, 2020], γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η ανάπτυξη μιας ικανής τεχνικής, βασισμένης στη χρήση PCM, για τη διαχείριση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων αποκτά μεγαλύτερες προοπτικές εξέλιξης, καθώς δύναται να υιοθετηθεί από ένα σημαντικό μέρος των εμπλεκόμενων μερών για την περαιτέρω ανάπτυξη της αγοράς των φωτοβολταϊκών φωτοβολταϊκής αγοράς (π.χ. σχεδιαστές φωτοβολταϊκών πάρκων, σύμβουλοι ανάπτυξης φωτοβολταϊκών έργων, επενδυτές κλπ.).

Κεφάλαιο 3 : ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΕΡΕΥΝΑΣ

3.1 Συνοπτική περιγραφή μεθοδολογικής προσέγγισης

Η κριτική αξιολόγηση της διεθνούς βιβλιογραφίας αποτέλεσε το πρωταρχικό βήμα της ερευνητικής διαδικασίας, προκειμένου να εντοπιστούν οι κρίσιμες παράμετροι του σχεδιασμού ενός συστήματος διαχείρισης της θερμοκρασίας για φωτοβολταϊκά πλαίσια. Δεδομένου ότι η επιλογή των κύριων και των ειδικών παραμέτρων ενός τέτοιου συστήματος εμπεριέχει έντονη συνδυαστική πολυπλοκότητα, ο προσδιορισμός και η κατηγοριοποίηση των ερευνητικών στόχων αποτέλεσαν βασικές προϋποθέσεις για την ομαλή εξέλιξη της διδακτορικής έρευνας. Οι κύριοι άξονες της έρευνας επιμερίστηκαν ως εξής:

i. Θεωρητική ανάλυση και σχεδιασμός πειραματικών διατάξεων PV+PCM,
ii. Σχεδιασμός διαδικασιών-ανάπτυξη πρωτοκόλλου διεξαγωγής μετρήσεων,
iii. Υλοποίηση, συλλογή και επεξεργασία πειραματικών μετρήσεων,
iv. Παραμετροποίηση και εκτίμηση περιβαλλοντικής απόδοσης φωτοβολταϊκών διατάξεων,
v. Ανάλυση και συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων σε σχέση με τα στοιχεία που απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία,
vi. Εξαγωγή συμπερασμάτων διαμόρφωση σημείων αναφοράς.

3.1.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Έπειτα από την ανάλυση της διεθνούς βιβλιογραφίας, σημαντικό βήμα για την ορθολογική σχεδίαση μιας διάταξης παθητικής ψύξης (με χρήση PCM), ώστε να ενσωματωθεί σε ένα τυπικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο, αποτέλεσε η διαμόρφωση ενός κατάλληλου μοντέλου (ενεργειακού ισοζυγίου) απεικόνισης της θερμικής συμπεριφοράς του εξεταζόμενου συστήματος. Το αριθμητικό μοντέλο που αναπτύχθηκε επιτυγχάνει την προσομοίωση της απόκρισης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στην αναλυτική επεξεργασία των εναλλακτικών σχεδιαστικών προσεγγίσεων. Η ακρίβεια του μοντέλου εξασφαλίστηκε με την επικύρωση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Επιπρόσθετα, καθορίστηκαν τα κριτήρια καταλληλόλητας της χρήσης ενός PCM, τα οποία λαμβάνουν υπόψη μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής μελέτης, τις θερμικές-φυσικές ιδιότητες (δηλ. θερμοκρασία αλλαγής φάσης, ενθαλπία αλλαγής φάσης, τιμή της θερμικής αγωγιμότητας, αντιστρεψιμότητα του κύκλου ψύξης-τήξης, μεταβολή όγκου κατά την αλλαγή φάσης), τα χημικά χαρακτηριστικά (δηλ. χημική σταθερότητα, χαμηλή πίεση ατμών, συμβατότητα με άλλα υλικά) και τα κριτήρια περιβαλλοντικής συμβατότητας (δηλ. μη τοξικό, ανακυκλώσιμο).

Επόμενο στάδιο της μελέτης αποτέλεσε η κατασκευή των ειδικών διατάξεων ενσωμάτωσης των PCM στην οπίσθια επιφάνεια των επιλεχθέντων φωτοβολταϊκών πλαισίων. Η φάση αυτή περιλάμβανε την προμήθεια των απαιτούμενων υλικών - συστημάτων, τη συναρμολόγηση των προτεινόμενων διατάξεων βάσει των σχεδιαστικών προδιαγραφών που ορίστηκαν (επιλογή υλικών και PCM, διαστασιολόγηση, κλίση φωτοβολταϊκού πλαισίου, κλπ.) από την εφαρμογή αριθμητικού μοντέλου. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε η διαμόρφωση κατάλληλου πρωτοκόλλου μετρήσεων, ο σχεδιασμός και η κατασκευή αυτοματοποιημένου συστήματος καταγραφής μετρήσεων (ιχνηλάτης καμπύλης I-V - ιδιοκατασκευή), η εγκατάσταση των

διατάξεων, καθώς και η προκαταρκτική αξιολόγηση των διαμορφωμένων πειραματικών συστοιχιών. Η προκαταρκτική μελέτη είχε στόχο την καταγραφή πιθανών προβλημάτων και αβεβαιοτήτων, ώστε να διασφαλιστεί η ποιότητα των πειραματικών μετρήσεων κατά τη διάρκεια της περιόδου εκτέλεσης. Για πρακτικούς λόγους, η υλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας έλαβε χώρα σε δύο διακριτές χρονικές περιόδους. Κατά την 1η περίοδο (Ιούλιος 2016 - Ιούνιος 2017) έγινε η καταγραφή πειραματικών δεδομένων για φωτοβολταϊκά πλαίσια λεπτού υμένα (με ονομαστική ισχύ 130 Wp), ενώ κατά τη 2η περίοδο (Φεβρουάριος 2018 - Ιούλιος 2019) πραγματοποιήθηκαν αντίστοιχες μετρήσεις επί 2ης ειδικής πειραματικής συστοιχίας στην οποία συνδυάστηκαν φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου (με ονομαστική ισχύ 10 Wp) και PCM με διαφορετικές θερμικές ιδιότητες.

3.1.2 Περιοχή μελέτης

Οι πειραματικές διατάξεις συστημάτων PV+PCM, που αναπτύχθηκαν για την εκπλήρωση των ερευνητικών στόχων της μελέτης, εγκαταστάθηκαν στον εξωτερικό χώρο προκατασκευασμένου οικίσκου που εξυπηρετεί τις δραστηριότητες του εργαστηρίου Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων, της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος. Το κτίριο καλύπτει επιφάνεια 60 m^2 και εντοπίζεται στο βορειοανατολικό τμήμα του χωρικού πεδίου των εγκαταστάσεων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η θέση εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών διατάξεων απέχει περίπου 3 km από τις κοντινότερες ακτές της περιοχής, ενώ η υψομετρική διαφορά από το επίπεδο της θάλασσας αναφέρεται ίση με 137 m. Οι ακριβείς συντεταγμένες της θέσης εγκατάστασης των πειραματικών διατάξεων είναι:

- Γεωγραφικό πλάτος (latitude): **35º31'N**
- Γεωγραφικό μήκος (altitude): **24º04'E**

Εικόνα 3-1: Απεικόνιση της τοποθεσίας εγκατάστασης πειραματικών διατάξεων.

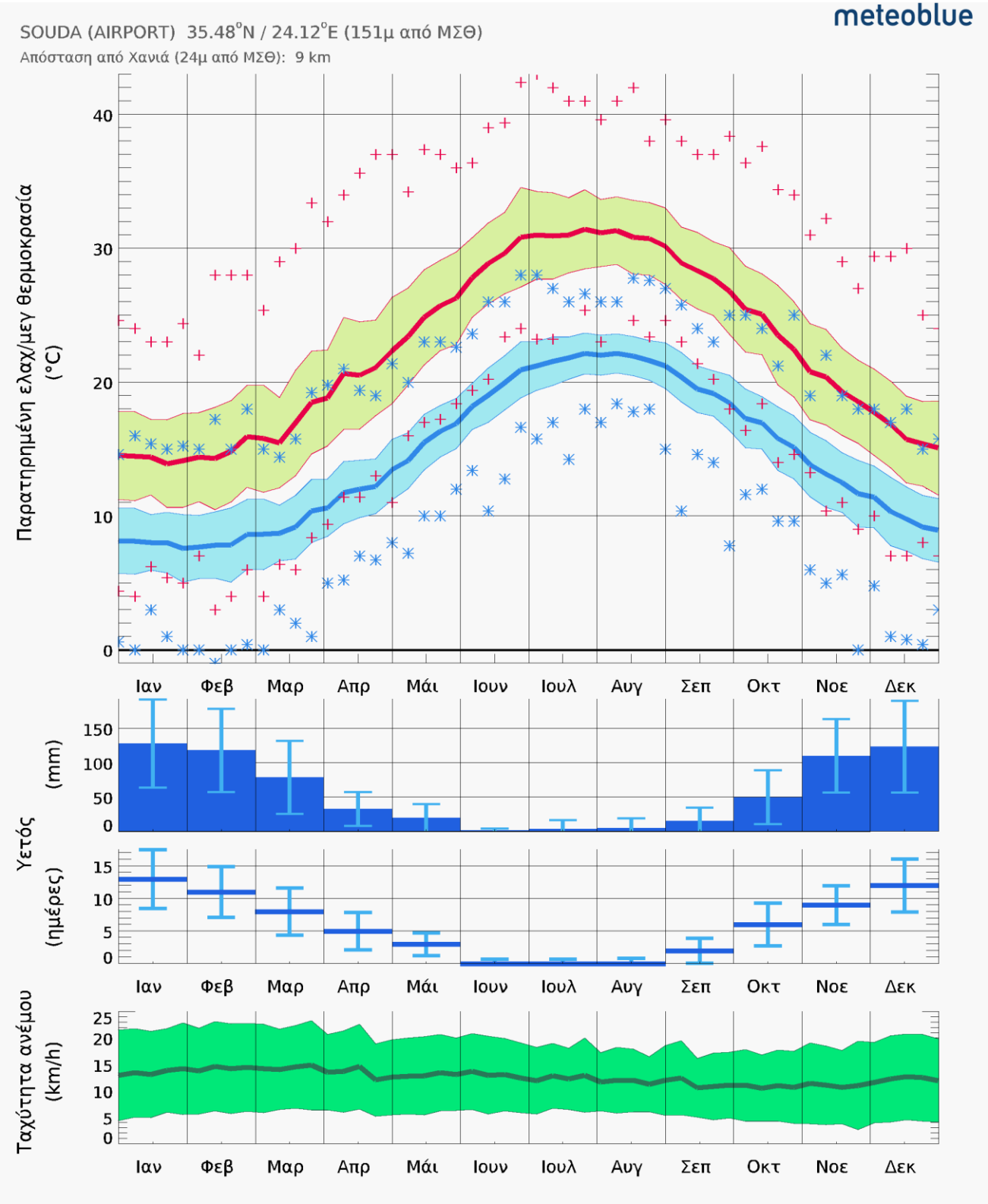
[*Google Earth*, 2020]

Εικόνα 3-2: Χώρος διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων (Εργαστήριο Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων, Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος)

3.2 Συνθήκες Περιβάλλοντος

3.2.1 Κλιματικά στοιχεία

Η μορφολογία του εδάφους και η θέση της Κρήτης, περίπου στο κέντρο της Μεσογείου, έχουν άμεση επίπτωση στο κλίμα της, το οποίο χαρακτηρίζεται ως μεταβατικό ενδιάμεσο και τοποθετείται μεταξύ του χερσαίου μεσογειακού και του ερημοειδούς μεσογειακού. Κατά το μεγαλύτερο μέρος της, η περιοχή της Κρήτης ανήκει στον ημίξηρο βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα ήπιο ή θερμό, ωστόσο η πλειονότητα των ημιορεινών και ορεινών περιοχών της εντάσσονται στον ύφυγρο και υγρό βιοκλιματικό όροφο, αντίστοιχα, με χειμώνα ήπιο ή ψυχρό. Σύμφωνα με στοιχεία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ) από τον κύριο σταθμό της πόλης των Χανίων (γεωγραφικό μήκος: 24°7'0", γεωγραφικό πλάτος: 35°29'0", ύψος: 150 m, περίοδος συλλογής δεδομένων: 1958 - 2010), οι ψυχροί μήνες είναι ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος, με τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες περιβάλλοντος ($T\alpha_{,m}$) να λαμβάνουν τις τιμές 11,6 °C και 11,8 °C, αντίστοιχα, ενώ ως πιο θερμοί αναγνωρίζονται ο Ιούλιος και ο Αύγουστος με 26,5 °C και 26,1 °C, αντίστοιχα. Ως βροχεροί μήνες χαρακτηρίζονται κυρίως ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος, με τις μέσες μηνιαίες τιμές για το ύψος της βροχόπτωσης να ανέρχεται περί τα 99,9 mm. Οι άνεμοι που πνέουν στην περιοχή είναι κυρίως βορειοδυτικής διεύθυνσης, ενώ οι υψηλότερες μέσες μηνιαίες τιμές της ταχύτητας ανέμου ($v_{w,m}$) παρατηρούνται τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο [*ΕΜΥ*, 2020]. Ακολούθως, παρατίθενται οι σχετικοί πίνακες μέσων μηνιαίων τιμών της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, της υγρασίας, της βροχόπτωσης και της ταχύτητας ανέμου στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.



Διάγραμμα 3-1: Συνοπτική περιγραφή των κλιματικών συνθηκών στην περιοχή των Χανίων.

[*Meteoblue*, 2020]

1ο Εξάμηνο		ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ
Ελάχιστη Μηνιαία Θερμοκρασία ($Τα_{,m,min}$)	°C	7,9	7,8	9	11,4	15	19
Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία($Τα_{,m}$)		11,0	11,0	12,7	15,9	20,2	24,7
Μέγιστη Μηνιαία Θερμοκρασία($Τα_{,m,max}$)		14,4	14,7	16,6	20	24,5	28,9
2ο Εξάμηνο		ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Ελάχιστη Μηνιαία Θερμοκρασία ($Τα_{,m,min}$)	°C	21,2	21,2	18,7	15,7	12,4	9,7
Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία($Τα_{,m}$)		26,7	26,3	23,2	19,4	15,8	12,7
Μέγιστη Μηνιαία Θερμοκρασία($Τα_{,m,max}$)		30,7	30,4	27,4	23,5	19,6	16,2

Πίνακας 3-1: Κλιματικά στοιχεία θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Τα) για την περιοχή των Χανίων (χρονική περίοδος μετρήσεων: 1958 - 2010).

[*ΕΜΥ*, 2020]

1ο Εξάμηνο		ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ
Μέση Μηνιαία Διεύθυνση Ανέμων		Ν	Ν	ΒΔ	ΒΔ	ΒΔ	ΒΔ
Μέση Μηνιαία ταχύτητα ανέμου ($v_{w,m}$)	m/s	3,1	3,1	3,1	2,8	2,5	2,6
2ο Εξάμηνο		ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Μέση Μηνιαία Διεύθυνση Ανέμων		ΒΔ	ΒΔ	ΒΔ	ΒΔ	Ν	Ν
Μέση Μηνιαία ταχύτητα ανέμου ($v_{w,m}$)	m/s	2,2	2,0	2,2	2,1	2,3	2,9

Πίνακας 3-2: Κλιματικά στοιχεία ταχύτητας (v_w) και διεύθυνσης ανέμων για την περιοχή των Χανίων.

[*ΕΜΥ*, 2020]

1ο Εξάμηνο		ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ
Μέση Μηνιαία Υγρασία	%	73,4	71,3	69,9	64,7	58,3	50,5
2ο Εξάμηνο		ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Μέση Μηνιαία Υγρασία	%	50,2	54,3	61,7	68,5	72,2	73,3

Πίνακας 3-3: Κλιματικά στοιχεία υγρασίας για την περιοχή των Χανίων (χρονική περίοδος μετρήσεων: 1958 - 2010).

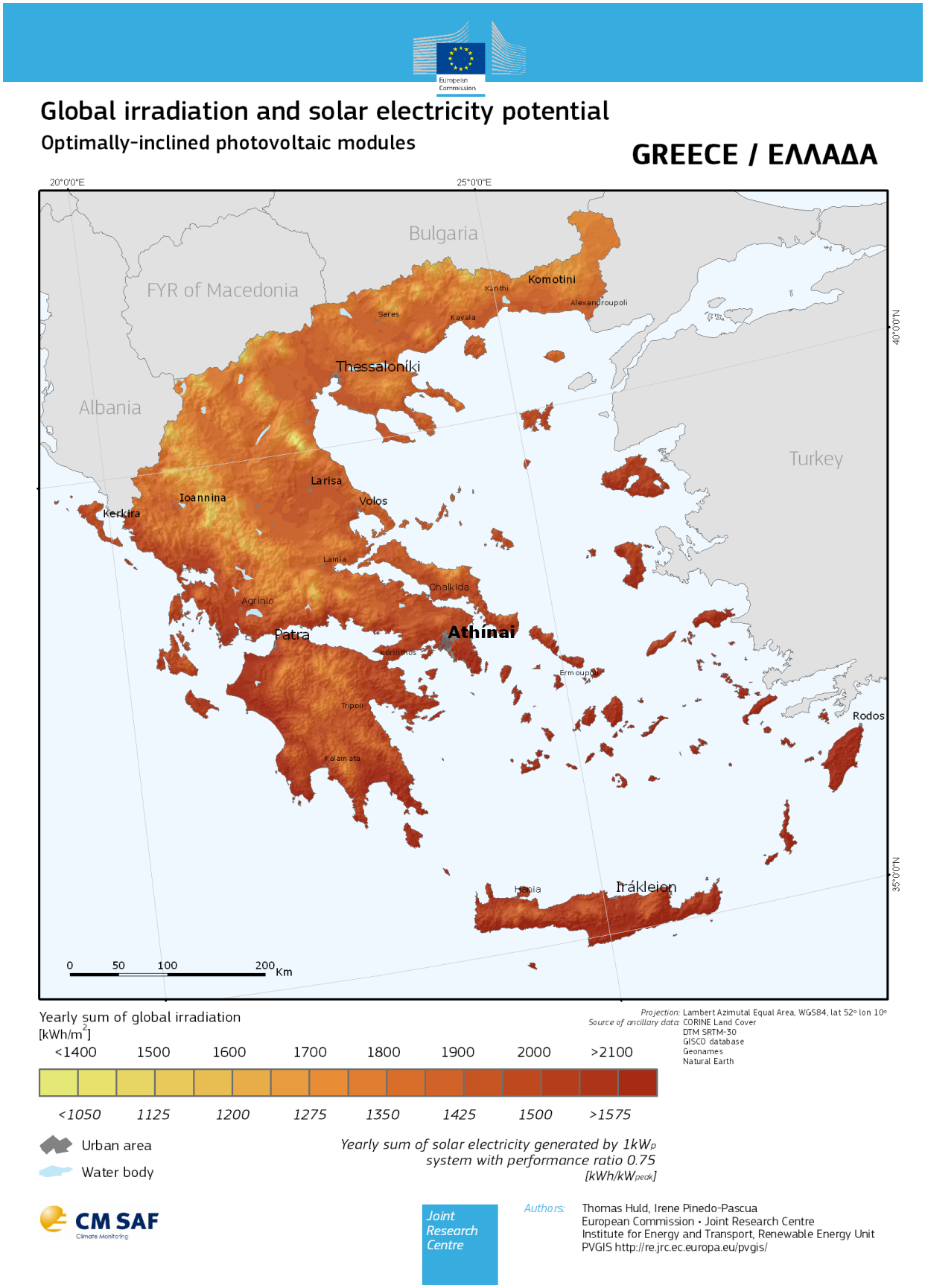
[*ΕΜΥ*, 2020]

1ο Εξάμηνο		ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ
Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση	mm	129,5	104,0	76,0	31,5	13,5	3,4
Ημέρες Βροχής	d	16,3	14,5	11,5	7,7	4,2	1,2
2ο Εξάμηνο		ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση	mm	1,0	1,4	15,4	67,7	77,0	101,9
Ημέρες Βροχής	d	0,4	0,6	3,2	9,3	11,2	16,1

Πίνακας 3-4: Κλιματικά στοιχεία βροχόπτωσης για την περιοχή των Χανίων (χρονική περίοδος μετρήσεων 1958 - 2010).

[*ΕΜΥ*, 2020]

Σε γενικές γραμμές, η Ελλάδα παρουσιάζει υψηλό ηλιακό δυναμικό, περίπου 1400,0-1800,0 kWh/m^2 ετησίως σε οριζόντιο επίπεδο, ανάλογα το γεωγραφικό πλάτος (φ) και το ανάγλυφο της περιοχής. Η ηλιακή ακτινοβολία συνιστά μια μορφή ενέργειας που παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή της κατά τις μεσημβρινές ώρες (μέγιστο ηλιακό ύψος), τόσο κατά τη θερινή όσο και τη χειμερινή περίοδο. Συνήθως, οι τιμές της παρατηρούνται αυξημένες κατά τη θερινή περίοδο, λόγω της θέσης του Ήλιου και της αύξησης των ωρών ηλιοφάνειας. Η εκτίμηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε οποιαδήποτε κεκλιμένη επιφάνεια (G_t), εδράζεται στη γνώση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο (G_h). Στην Ελλάδα, η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ) καταγράφει τις ώρες ηλιοφάνειας ανά ημέρα (h/d) και την ολική ηλιακή ακτινοβολία (kWh/m^2) για διάφορες περιοχές. Ενδεικτικά, η ετήσια μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή της Κρήτης ανέρχεται στις 1800,0 kWh/m^2, υποδεικνύοντας την καταλληλόλητα της για την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών εφαρμογών. [*ΤΟΤΕΕ*, 2010]

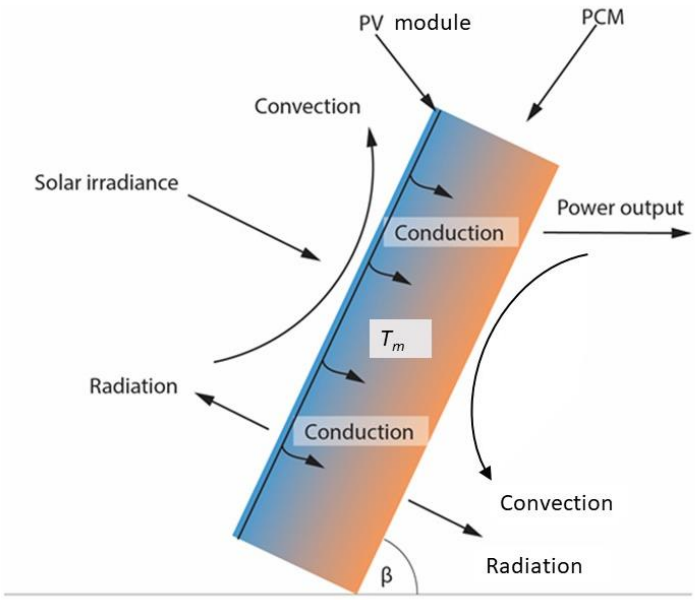


Εικόνα 3-3: Χάρτης ηλιακού δυναμικού της Ελλάδας.

[*PVGIS*, 2020]

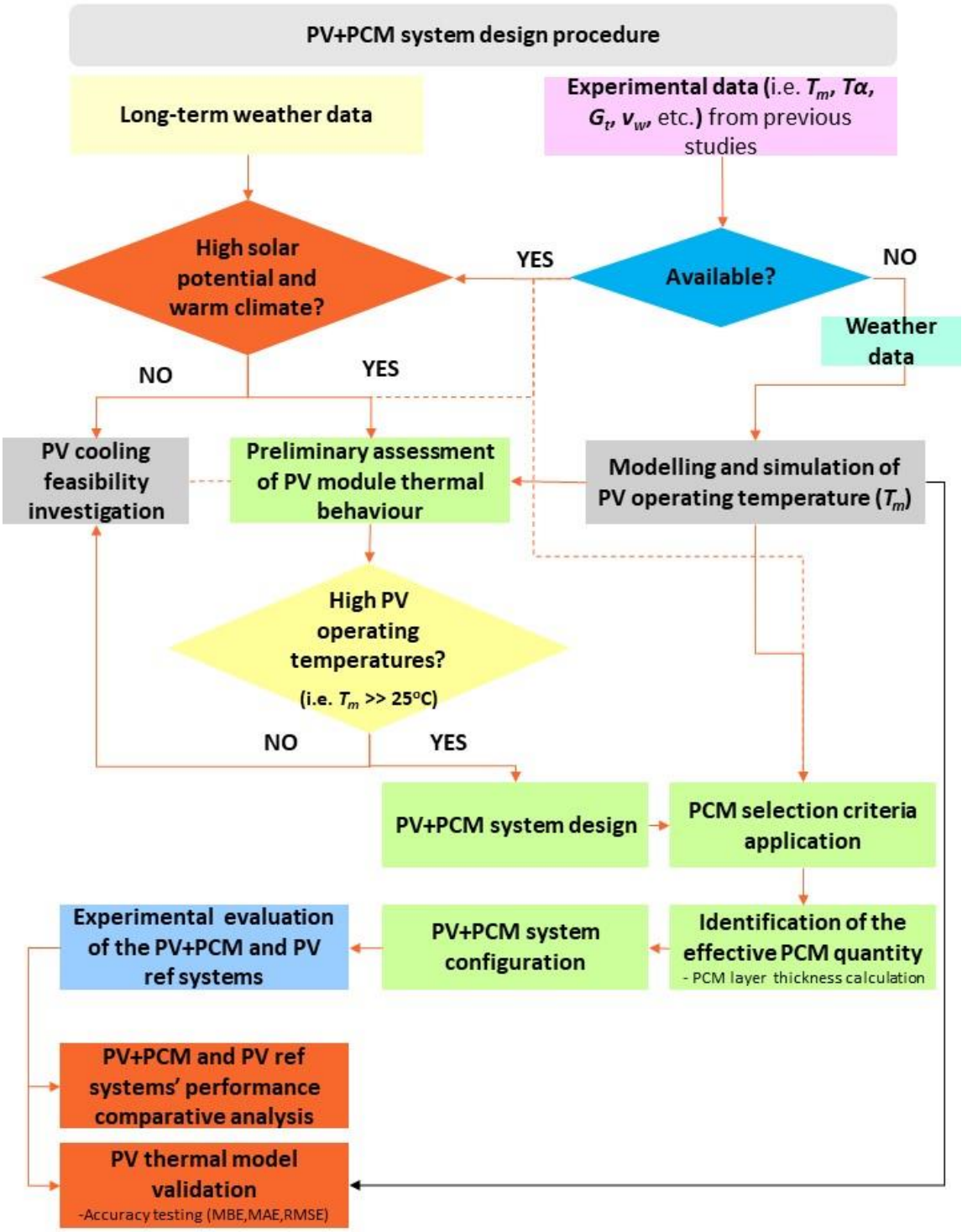
3.3 Σχεδιασμός πειραματικών διατάξεων

Ως κύριοι άξονες του σχεδιασμού ενός συστήματος παθητικής ψύξης για φωτοβολταϊκά πλαίσια καθορίζονται το είδος του χρησιμοποιούμενου ρευστού μέσους απαγωγής θερμότητας, οι ιδιότητες της ειδικής διάταξης που αξιοποιείται για την απομάκρυνση θερμότητας, καθώς και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της βασικής πηγής ενέργειας (π.χ. διαλείπουσα φύση της ηλιακής ενέργειας). Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, ένα σύστημα PV+PCM σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε προκειμένου να τεθεί υπό πειραματική αξιολόγηση σε πραγματικές συνθήκες πεδίου. Η σχηματική απεικόνιση του συστήματος PV+PCM και των αναμενόμενων ενεργειακών ροών επί αυτού παρατίθεται στην Εικόνα 3-3, συνιστώντας την βασική υπόθεση μελέτης. Ειδικότερα, η ανάπτυξη της σχεδιαστικής προσέγγισης εστιάζεται στη σύνδεση της οπίσθιας πλευράς του φωτοβολταϊκού πλαισίου με κατάλληλο μεταλλικό δοχείο, πληρωμένο με το επιλεγμένο PCM, κατά τρόπο που να διασφαλίζεται η ομαλή απορρόφηση της πλεονάζουσας θερμότητας του. Επιπρόσθετα, στην τρέχουσα ενότητα περιγράφεται μια γενική μεθοδολογία, η οποία εφαρμόστηκε για το σχεδιασμό του προτεινόμενου συστήματος PV+PCM (Εικόνα 3-4). Η μεθοδολογική αυτή προσέγγιση περιλαμβάνει τρία κύρια βήματα, τα οποία μπορούν να συνοψιστούν ως εξής: i. Κριτήρια επιλογής PCM, ii. εκτίμηση της πραγματικής ποσότητας PCM, iii. διαμόρφωση συστήματος PV+PCM.



Εικόνα 3-4: Σχηματικό διάγραμμα ενεργειακών ροών σε ένα τυπικό σύστημα PV+PCM.

[*Savvakis* και *Tsoutsos*, 2021]



Διάγραμμα 3-2: Αποτύπωση της γενική μεθοδολογίας (διάγραμμα ροής) που υιοθετηθηκε για το σχεδιασμό και την πειραματική αξιολόγηση του συστήματος PV+PCM

[*Savvakis* και *Tsoutsos*, 2021]

3.3.1 Κριτήρια επιλογής PCM για εφαρμογές ψύξης φωτοβολταϊκών συστημάτων

Σε γενικές γραμμές, η επιλογή ενός PCM για εφαρμογές ψύξης βασίζεται στην υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης (λ) και το επιθυμητό σημείο τήξης ($T_{PCM,melt}$). Ωστόσο, στη διεθνή βιβλιογραφία, το θερμοκρασιακό εύρος, το οποίο χαρακτηρίζει τη διαδικασία μετάβασης φάσης για ένα PCM, συνιστά κριτήριο πρωτεύουσας σημασίας για τον ορθολογικό σχεδιασμό διατάξεων ψύξης για φωτοβολταϊκά πλαίσια, καθότι επιτρέπει τη συνεκτίμηση τους πλήρους και αναστρέψιμου κύκλου λειτουργίας του (διαδικασία τήξης/ στερεοποίησης). Παράλληλα, τα ερευνητικά αποτελέσματα για τις διαφορετικές περιπτώσεις συστημάτων PV+PCM, στις οποίες το σημείο τήξης του ($T_{PCM,melt}$) είχε θεωρηθεί βασικό στοιχείο για την εκλογή του χρησιμοποιούμενου PCM, υπέδειξαν την ανεπάρκεια του ως αντικειμενικό κριτήριο δεδομένου ότι δεν είχε διασφαλιστεί η ομαλότητα του κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης του PCM για την πλήρη αναγέννηση του [*Ali*, 2020; *Waqas et al.*, 2018].
Με βάση αυτά τα ευρήματα, οι *Hasan et al.* (2017) και οι *Ma et al.* (2019) πρότειναν μια σειρά πρακτικών κριτηρίων για τον προσδιορισμό του κατάλληλου θερμοκρασιακού εύρους μετάβασης φάσης, και κατ' επέκταση, την επιλογή του αποτελεσματικού PCM σε ένα σύστημα PV+PCM. Συνοπτικά, τα κριτήρια αυτά αναφέρουν ότι:

- Η τιμή της αρχικής θερμοκρασίας τήξης του επιλεγμένου PCM ($T_{PCM,\ melt1}$) θα πρέπει να είναι υψηλότερη από τη μέση ημερήσια τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά τις νυχτερινές ώρες της θερινής περιόδου ($T\alpha_{,\ summer\text{-}night,\ d}$), έτσι ώστε να διασφαλίζεται η στερεοποίηση του PCM.
- Η μέση τιμή της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_m) κατά τις ώρες λειτουργίας του στη διάρκεια της χειμερινής περιόδου θα πρέπει να είναι υψηλότερη από το άνω όριο του θερμοκρασιακού εύρους αλλαγής φάσης ($T_{PCM,\ melt2}$) για μια λογική περίοδο, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η απορρόφηση της θερμότητας του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Στο πλαίσιο της διαδικασίας επιλογής του κατάλληλου PCM, που θα ληφθεί υπόψη για το σχεδιασμό του συστήματος PV+PCM, τα διαθέσιμα στοιχεία από την επιτήρηση φωτοβολταϊκού συστήματος κατά την περίοδο Ιουνίου 2010 - Μαΐου 2012, το οποίο ήταν ήδη εγκατεστημένο στην περιοχή μελέτης, αξιοποιηθήκαν κατάλληλα προς αυτή την κατεύθυνση. Σύμφωνα με τα ληφθέντα αποτελέσματα, η μέση ημερήσια τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά τις νυχτερινές ώρες της θερινής περιόδου ($T\alpha_{,night,d}$) ήταν 24,2 ^oC, ενώ η μέση τιμή της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_m) κατά τις ώρες λειτουργίας του, στη διάρκεια των ψυχρότερων μηνών, προσδιορίστηκε ίση με 26,3 ^oC. Επομένως, ένα PCM με αρχική θερμοκρασία τήξης ($T_{PCM,melt1}$) υψηλότερη από 24,2 ^oC και τελική θερμοκρασία τήξης ($T_{PCM,melt2}$) χαμηλότερη από 26,3 ^oC αναγνωρίστηκε ως συμβατό για την εξεταζόμενη περίπτωση. Πέραν αυτού, η καταλληλόλητα του PCM για την προτεινόμενη εφαρμογή εξαρτάται άμεσα από τις θερμοφυσικές και χημικές ιδιότητες του. Ανάμεσα στις διαφορετικές κατηγορίες PCM, τα κεριά παραφίνης παρατηρήθηκαν να ικανοποιούν την πλειονότητα των βασικών απαιτήσεων (π.χ. μη τοξικά, μη διαβρωτικα, υψηλή λανθάνουσα θερμότητα τήξης, κλπ.) για χρήση σε εφαρμογές φωτοβολταϊκής ψύξης [*Hasan et al.*, 2017]. Συμπερασματικά, η χρήση του κεριού παραφίνης (RT27) με αρχική θερμοκρασία τήξης ($T_{PCM,melt1}$) ίση με 25 ^oC και τελική θερμοκρασία τήξης ($T_{PCM,melt2}$) ίση 28 ^oC επιλέχθηκε για το

προτεινόμενο σύστημα PV+PCM, καθώς διαθέτει τα περισσότερα εκ των επιθυμητών χαρακτηριστικών για την εξεταζόμενη εφαρμογή και τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής μελέτης.

3.3.2 Ενεργειακό ισοζύγιο σχεδιασμού τους συστήματος PV+PCM

Η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (T_m) αποτελεί σημαντικό παράγοντα καθορισμού της απόδοσης του (n_{ELEC}). Η παραπάνω διαπίστωση έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον σημαντικού αριθμού ερευνητών και αποτέλεσε το έναυσμα για την ανάπτυξη αναλυτικών και απλοποιημένων μοντέλων πρόβλεψης, ως απόρροια της συστηματικής διερεύνησης των στοιχείων που περιγράφουν τον μηχανισμό δημιουργίας της. Στις περιπτώσεις που η διαθεσιμότητα κατάλληλων και αξιόπιστων δεδομένων για τη συνεπή προσέγγιση του μηχανισμού αύξησης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (T_m) είναι περιορισμένη, προκρίνεται συνήθως η εφαρμογή του απλοποιημένου μοντέλου ισοζυγίου ενέργειας. Το μοντέλο αυτό δύναται να καταφέρει την εκτίμηση των τιμών της ελεγχόμενης παραμέτρου (T_m) με ικανοποιητική ακρίβεια, τον ποσοτικό προσδιορισμό της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος και τον υπολογισμό της θερμικής ισχύος που αποθηκεύεται στα επιμέρους στρώματα του φωτοβολταϊκού πλαισίου ή διαχέεται από την εμπρόσθια και οπίσθια όψη του στο περιβάλλον. Δεδομένου ότι τα σχετικά ποσά ενέργειας αντικατοπτρίζουν τη συνολική απόκριση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα, η προσέγγιση του δυναμικού θερμικής ισχύος προς απορρόφηση από ένα ρευστό μέσο απαγωγής θερμότητας (π.χ. PCM) καθίσταται εφικτή.

Αναλυτικά, το μοντέλο, το οποίο προτάθηκε αρχικά από τους *Jones* και *Underwood* (2001), δείχνει ότι η επενέργεια των παραμέτρων που σχετίζονται με τις μετεωρολογικές συνθήκες και τα υλικά ενθυλάκωσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων στη θερμοκρασία λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_m) μπορεί να προσεγγιστεί μέσω των κύριων μηχανισμών ανταλλαγής θερμότητας των επιφανειών του φωτοβολταϊκού πλαισίου με το περιβάλλον του.

Στην παρούσα μελέτη, η προτεινόμενη προσέγγιση εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό της αποτελεσματικής ποσότητας PCM, θέτοντας ως βασική υπόθεση εργασίας τη θεώρηση ότι η θερμότητα που το PCM καλείται να απορροφήσει ισούται με το άθροισμα της θερμότητας που αποθηκεύεται από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, προκαλώντας την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του, και της απορριπτόμενης θερμότητας από την πίσω πλευρά του προς το περιβάλλον. Στην πράξη, η υπόθεση αυτή καθορίζει ένα ανώτερο όριο για την απορρόφηση θερμότητας από το PCM, απλοποιώντας τη διαδικασία σχεδιασμού ενός συστήματος PV+PCM καθώς η ανάπτυξη σύνθετων αριθμητικών μοντέλων δεν συνιστά βασική προϋπόθεση. Στην τρέχουσα υποενότητα παρουσιάζεται λεπτομερώς το μοντέλο ενεργειακής ισορροπίας ως μέρος μιας συνεκτικής θεωρητικής προσέγγισης σχεδιασμού για τυπικά σχήματα PV+PCM. Οι κύριες παραδοχές που υιοθετήθηκαν για το προτεινόμενο μοντέλο ήταν:

- Οι συντελεστές απορρόφησης (α) και εκπομπής (ε) του φωτοβολταϊκού πλαισίου νοούνται σταθεροί και χωρίς εξάρτηση από το μήκος κύματος (w_l).
- Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των υλικών του φωτοβολταϊκού πλαισίου λαμβάνονται ως ανεξάρτητες από τη θερμοκρασία.
- Η ανταλλαγή θερμότητας από τα πλαϊνά όρια του φωτοβολταϊκού πλαισίου θεωρείται μη σημαντική.

- Η κατανομή της θερμοκρασίας στην εμπρόσθια και οπίσθια επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου νοείται ομοιόμορφη.
- Οι συνθήκες καθαρού ουρανού λαμβάνονται υπόψη ως επικρατούσες.
- Την αρχική χρονική στιγμή (t_0), η θερμοκρασία των επιμέρους στρωμάτων του φωτοβολταϊκού πλαισίου ταυτίζεται με την τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Ειδικότερα, η γενική έκφραση για το ενεργειακό ισοζύγιο μεταξύ της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο, της ανταλλασσόμενης ισχύος (με ακτινοβολία) του με το περιβάλλον, της απορριπτόμενης ισχύος του μέσω συναγωγής και της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος περιγράφεται από τη σχέση:

- $$\frac{dT_m}{dt} = \frac{P_{sol} - P_{rad} - P_{conv} - P_M}{C_M} \quad [3.1]$$

όπου,
P_{sol}: η ηλιακή ισχύς που απορροφάται ως θερμότητα από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, (W).
P_M : η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς από το φωτοβολταϊκό πλαισίου, (W).
P_{rad}: η συναλλαγή ισχύος με ακτινοβολία μεταξύ των επιφανειών (εμπρόσθια όψη/οπίσθια πλευρά) του φωτοβολταϊκού πλαισίου και του ουρανού/εδάφους, (W).
P_{conv}: η ενεργειακή ροή ισχύος μέσω συναγωγής από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο προς το περιβάλλον, (W).
C_M: η θερμική χωρητικότητα του φωτοβολταϊκού πλαισίου (J/K)
t: ο χρόνος (s)

[*Schiro et al.*, 2017; *Jones* και *Underwood*, 2001; *Notton et al.*, 2005; *Lobera και Valkealahti,* 2013]

Ειδικότερα, η ηλιακή ισχύς, η οποία απορροφάται ως θερμότητα από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

- $$P_{sol} = a \cdot G_t \cdot S \quad [3.2]$$

όπου,
a: συντελεστής απορρόφηση της προσπίπτουσας ηλιακης ακτινοβολίας,(-)
S: η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου, (m^2)
G_t: η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην εμπρόσθια όψη του φωτοβολταϊκού πλαισίου (W/m^2)

[*Jones* και *Underwood*, 2001; *Lobera και Valkealahti,* 2013; *Hasan et al.*, 2016]

Ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας που αποδίδεται στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (θερμικής ακτινοβολίας) μεταξύ του φωτοβολταϊκού πλαισίου και του περιβάλλοντος του (ουρανός/ έδαφος) σχετίζεται άμεσα με τη θερμοκρασία τους. Εν προκειμένω, η σχετική ανταλλαγή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας μπορεί να υπολογιστεί με εφαρμογή της γενικής εξίσωσης:

- $P_{rad} = P_{rad,F} + P_{rad,B}$ [3.3]
- $P_{rad,F} = \sigma \cdot S \cdot \left\{\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) \cdot \varepsilon_{\mathrm{mF}} \cdot (T_{mF}^4 - T_S^4) + \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \cdot \varepsilon_{\mathrm{mF}} * \left(T_{mF}^4 - T_{gF}^4\right)\right\}$ [3.3a]
- $P_{rad,B} = \sigma \cdot S \cdot \left\{\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \cdot \varepsilon_{\mathrm{mB}} \cdot (T_{mB}^4 - T_S^4) + \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) \cdot \varepsilon_{\mathrm{mB}} * \left(T_{mB}^4 - T_{gB}^4\right)\right\}$ [3.3b]

όπου,
σ: η σταθερά του νόμου των Stefan-Boltzmann, ($W/K^4 \cdot m^2$).
β: η γωνία κλίσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου, (°).
ε_{mF}: η ικανότητα εκπομπής της εμπρόσθιας επιφάνειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου.
ε_{mB}: η ικανότητα εκπομπής της οπίσθιας επιφάνειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου.
T_{mF}: η θερμοκρασία της εμπρόσθιας επιφάνειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου,(K).
T_{mB}: η θερμοκρασία της οπίσθιας επιφάνειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου,(K).
T_S: η θερμοκρασία του ουρανού,(K).
Ta: η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ,(K).
T_{gF}: η θερμοκρασία της επιφάνεια τους εδάφους έμπροσθεν του φωτοβολταϊκού πλαισίου,(K).
T_{gB}: η θερμοκρασία της επιφάνεια τους εδάφους όπισθεν του φωτοβολταϊκού πλαισίου, (K).

[*Φραγκιαδάκης,* 2006; *Armstrong και Hurley*, 2010; *Lobera και Valkealahti,* 2013]

Γενικά, ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας του ουρανού είναι μια συνθέτη και εξαντλητική διαδικασία. Συνήθως, η εφαρμογή της εξίσωσης, η οποία προτάθηκε από τον *Swinbank* (1963), μπορεί να εφαρμοστεί για την επαρκή προσέγγιση της:

- $T_S = 0.0552 \cdot Ta^{1.5}$ [3.4]

Εκτός αυτής, μια απλούστερη έκφραση, που προτάθηκε από τον Schott και υιοθετήθηκε από τους *Jones* και *Underwood* (2001), μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της τιμής της θερμοκρασίας του ουρανού:

- $T_S = Ta - \delta T$ [3.5]

όπου,
$\delta T = 20K$ σε συνθήκες καθαρού ουρανού.

Στη διεθνή βιβλιογραφία, αρκετοί ερευνητές έχουν υιοθετήσει την άποψη ότι η τιμή της θερμοκρασίας του εδάφους (T_g) ισούται με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (*Τα)* [*Armstrong και Hurley*, 2010; *Notton et al.*, 2005; *Barroso et al.*, 2016]. Ωστόσο, υπό συνθήκες καθαρού ουρανού κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών, έχει παρατηρηθεί ότι η τιμή της θερμοκρασίας του εδάφους αποκλίνει από την αντίστοιχη τιμή περιβάλλοντος (*Τα*) [*Kitsara et al.*, 2018; *Good et al.*, 2017]. Επιπλέον, η διάκριση έμπροσθεν-όπισθεν για τη σχετική παράμετρο (T_g), ανάλογα με την τοποθέτηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου/ συστήματος, χαρακτηρίζεται ως

ουσιώδης στο πλαίσιο ενός γενικού μοντέλου, καθώς η επίδραση της σκίασης, λόγω της επικλινούς διάταξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων του συστήματος, στη θερμοκρασία του εδάφους (T_g), ιδιαιτέρως στις περιπτώσεις εναλλακτικών διαμορφώσεων φωτοβολταϊκών συστημάτων στέγης (δηλ. PV-cool roof, PV-green roof), έχει επισημανθεί σε σημαντικό αριθμό μελετών [*Scherba et al.*, 2011; *Chemisana και Lamnatou*, 2014; *Golden et al.*,2007]. Στην παρούσα διατριβή, η τιμή της θερμοκρασίας του εδάφους υπολογίζεται μέσω των σχέσεων:

- $T_{gF} = Ta + \delta T$ [3.6 a]
- $T_{gB} = Ta$ [3.6 b]

όπου $\delta T = 5K$ σε συνθήκες καθαρού ουρανού.

Σύμφωνα με τον νόμο ψύξης του Newton, η έκθεση ενός θερμού στερεού σώματος σε ένα ψυχρότερο κινούμενο ρευστό (π.χ. αέρας) διεγείρει τη συναγωγή θερμότητας από το σώμα προς το ρευστό λόγω της θερμοκρασιακής τους διαφοράς. Στην εξεταζόμενη περίπτωση, οι η ανταλλαγή θερμότητας με συναγωγή από τις πλευρές του φωτοβολταϊκού πλαισίου, προσεγγίζεται από τις σχέσεις:

- $P_{conv} = P_{conv,F} + P_{conv,B}$ [3.7]
- $P_{conv,F} = h_{mF} \cdot S \cdot (T_{mF} - Ta_F)$ [3.7a]
- $P_{conv,B} = h_{mB} \cdot S \cdot (T_{mB} - Ta_B)$ [3.7b]

[*Kant et al.,*2016*; Schiro et al.,* 2017*; Notton et al.,* 2005]

όπου,
h: ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητα με συναγωγής (W/m^2·K), ο οποίος μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της εμπειρικής σχέσης:

- $h = 1{,}31 \cdot \left((T_m - Ta)\right)^{\frac{1}{3}} + 2{,}8 + 3 \cdot v_w$ [3.8]

[*Duffie και Beckmann*,1991; *Notton et al.,* 2005]:

Επιπλέον, η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο μπορεί να υπολογιστεί από τη συνδυαστική εφαρμογή των εξισώσεων 3.9 και 3.10:

- $P_M = P_{STC} * n_T * \frac{G_t}{G_{STC}}$ [3.9]

όπου,

- $n_T = 1 + \gamma_{PM} * (T_m - 25\ ^oC)$ [3.10]

με n_T να αναγνωρίζεται ο συντελεστής διόρθωσης που λαμβάνει υπόψη την επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου στην αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ του.

[*Savvakis* και *Tsoutsos*, 2015]

Η θερμική χωρητικότητα ενός σώματος αποτελεί σημαντική ένδειξη του ποσού θερμότητας που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία της μάζας του σώματος. Για ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ο σχετικός δείκτης υπολογίζεται από το άθροισμα των τιμών θερμικής χωρητικότητας που προσδιορίστηκαν για τα επιμέρους στρώματα του, ως εξής:

- $C_m = \sum_{X=1}^{N} S \cdot d_X \cdot \rho_X \cdot C_{p,X}$ [3.11]

όπου,

ρ_X: πυκνότητα του στρώματος X, (kg/m^3).
d_X: πάχος του στρώματος X, (m).
$C_{p,X}$: Ειδική θερμότητα του στρώματος X, (J/kg·K).

[*Jones και Underwood*, 2001; *Lobera και Valkealahti,* 2013; *Hasan et al.*, 2016]

Στον Πίνακα 3-6 συνοψίζονται οι τιμές που δύναται να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να εκτιμηθεί η θερμική χωρητικότητα του ελεγχόμενου φωτοβολταϊκού πλαισίου, ενώ οι σχετικές τιμές των φυσικών παραμέτρων, οι οποίες λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό των εξισώσεων 3.2, 3.3 και 3.9, εμφανίζονται στον Πίνακα 3-7.

	Στρώμα	**ρ_X**	**$C_{p,x}$**	**d_X**	**k_X**	**λ**	**$C_x = S \cdot d_X \cdot \rho_X \cdot C_{p,x}$**
		kg/m^3	J/kg·K	m	W/m·K	J/kg	J/K
Φωτοβολταϊκό πλαίσιο	Γυαλί	2500	500	0,003	1,8		5250
	ARC	2400	691	$1 \cdot 10^{-7}$	32		0,232
	Φωτοβολταϊκά στοιχεία	2330	677	$2,25 \cdot 10^{-4}$	148		497
	EVA	960	2090	$5 \cdot 10^{-4}$	0,35		1404
	Οπίσθια επαφή	2700	900	$1 \cdot 10^{-7}$	237		0,342
	Γυαλί	2500	500	0,003	1,8		5250
	Σύνολο						12402
Δοχείο PCM	Γαλβανισμένος σίδηρος	7800	470		52		
	PCM (στερεή φάση)	880	2000		0,2		
	PCM (υγρή φάση)	880	2300		0,2		
	Γαλβανισμένος σίδηρος	7800	470		52		
	Ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας του PCM (θερμοκρασιακό εύρος μετάβασης φάσης: 25-28 ^oC)	880				179000	

Πίνακας 3-5: Συνοπτικός πίνακας τιμών για τις παραμέτρων που χρησιμοποιούνται κατά τον υπολογισμό της θερμικής χωρητικότητας του ελεγχόμενου φωτοβολταϊκού πλαισίου και του ανεπτυγμένου δοχείου PCM.

[*Smith et al.,* 2014; *Notton et al.*, 2005; *Ma et al.*, 2018; *Matweb*,2020]

Παράμετρος	τιμή	Μονάδες	Πηγή
G_{STC}	1000	W/m^2	
α	0,88	-	*Notton et al.*, 2005
β	30	^{o}	
ε_{mF}	0,92	-	*Kant et al.*,2016; *Smith et al.,* 2014; *Schiro et al.*, 2017; *Notton et al.*, 2005; *Jones και Underwood*, 2001; Engineering Toolbox, 2020
ε_{mB}	0,92	-	
σ	$5{,}67\cdot10^{-8}$	W/K$^4\cdot$ m^2	*Duffie και Beckmann*,1991

Πίνακας 3-6: Τιμές των φυσικών παραμέτρων που αποτελούν μεταβλητες εισόδου στο μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, η μέγιστη θερμική ισχύς (P_c) που θα μπορούσε να μεταβιβαστεί από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο στο επιλεγμένο PCM εντός της θερμοκρασιακής περιοχής τήξης του σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της εξίσωσης:

- $P_c = P_{sol} - P_{rad,F} - P_{conv,F} - P_m$ [3.12]

Ενώ, η θερμότητα που απορροφάται τελικά από το PCM για μια επιλεγμένη χρονική περίοδο [t_1,t_N] μπορεί να εκτιμηθεί, μεσώ της εφαρμογής του κανόνα του Simpsons, από τη απλοποιημένη σχέση:

- $E_c = \Delta t \cdot \sum_{i=1}^{N} P_c(t_i)$ [3.13]

όπου,
E_c: η θερμότητα που μεταφέρεται στο PCM κατά τη διάρκεια μια επιλεγμένης περιόδου, (kWh).
Δt: χρονικό διάστημα μεταξύ των διαδοχικών μετρήσεων, (h).
P_c: μέγιστη θερμική ισχύς που μεταφέρεται στο PCM, (W).

3.3.3 Προσδιορισμός της απαιτούμενης ποσότητας PCM

Σε ένα σύστημα PV+PCM, η θερμότητα που προέρχεται από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο μεταφέρεται με αγωγή στο δοχείο PCM, όπου αποθηκεύεται για εύλογο χρονικό διάστημα. Ιδιαίτερα σημαντικές παράμετροι για αυτή τη διαδικασία αποτελούν τόσο η ειδική θερμοχωρητικότητα και η ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας του PCM, δεδομένου ότι συνιστούν το κύριο μέρος της θερμοχωρητικότητας του δοχείου PCM. Το έτος 2017, οι *Klugmann-Radziemska* και *Wcisło-Kucharek* πρότειναν μια πρακτική εξίσωση για τη γρήγορη εκτίμηση του κατάλληλου πάχους του στρώματος PCM, λαμβάνοντας υπόψη τα απαραίτητα δεδομένα (π.χ. μέση ημερήσια ενεργειακή απολαβή από τον Ήλιο στο κεκλιμένο επίπεδο - H_t, θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκού πλαισίου T_m) απο την εκάστοτε περιοχής μελέτης. Ωστόσο, η χρήση της εξίσωσης αυτής προϋποθέτει την αρχική εκτίμηση της θερμότητας που θα αποθηκευτεί από το επιλεγμένο PCM. Στο πλαίσιο του σχεδιασμού του προτεινόμενου συστήματος PV+PCM υιοθετήθηκε μια τροποποιημένη μορφή της

σχετικής εξίσωσης, για τη λογική σύνδεση της με τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του ανωτέρω περιγραφόμενου μοντέλου ενεργειακού ισοζυγίου. Συνοπτικά, η εξίσωση αυτή περιγράφεται ως εξής:

- $$d_{PCM} = \frac{z \cdot H_{t,d} \cdot (1 - n_{ELEC}) \cdot S}{\rho_{PCM} \cdot S \cdot [C_{p,PCM} \cdot (T_{PCM,melt} - T_{m,i}) + \lambda + C_{p,PCM} \cdot (T_{m,f} - T_{PCM,melt})]} \cong \frac{E_c}{\rho_{PCM} \cdot S \cdot [C_{p,PCM} \cdot (T_{PCM,melt} - T_{m,i}) + \lambda + C_{p,PCM} \cdot (T_{m,f} - T_{PCM,melt})]} \quad [3.14]$$

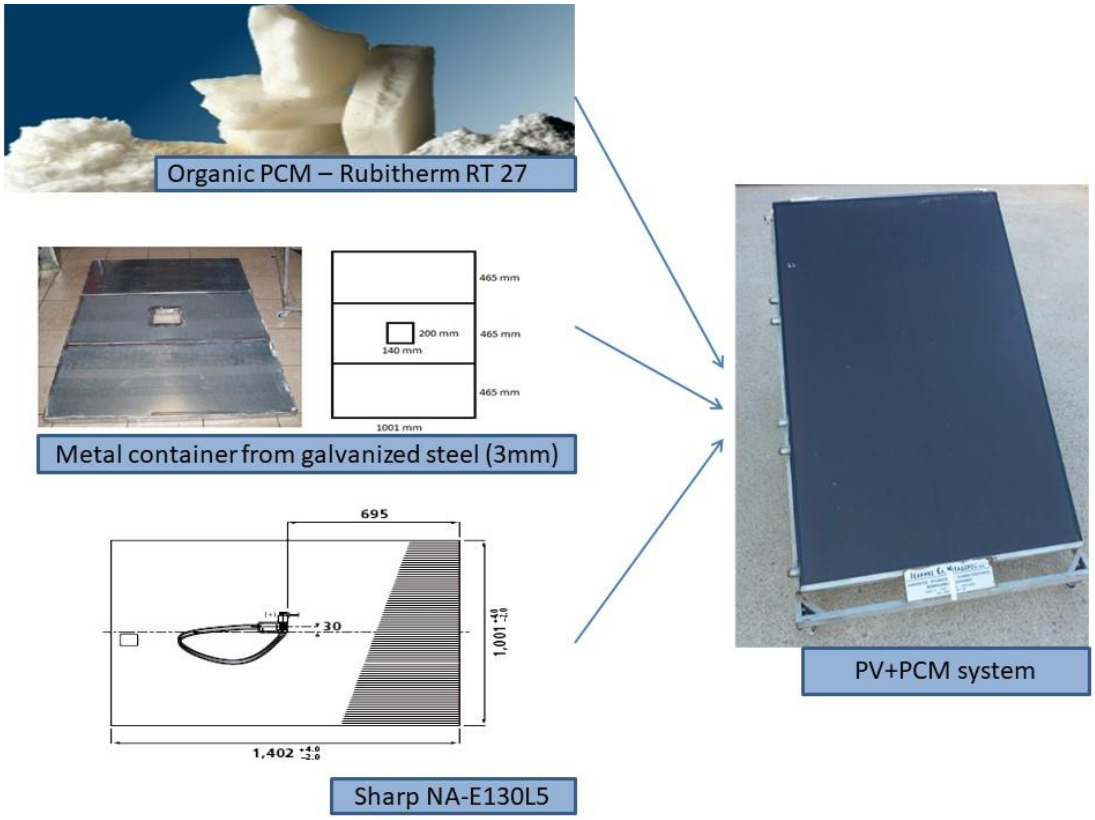
όπου,

z: το ποσοστό θερμότητας του φωτοβολταϊκού πλαισίου που απορροφάται από το PCM, (%)
$H_{t,d}$: η μέση ημερήσια ενεργειακή απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο, (kWh/m^2)
n_{ELEC}: η απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου (%)
$T_{m,i}$: η αρχική θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (θεωρήθηκε ίση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στην αρχή της ημέρας), (^{o}C).
$T_{m,f}$: η επιθυμητή τελική θερμοκρασία φωτοβολταϊκού, (^{o}C).

Στη παρούσα μελέτη, τα διαθέσιμα στοιχεία από την επιτήρηση γειτνιάζοντος φωτοβολταϊκού συστήματος κατά την περίοδο Ιουνίου 2010 και τα σχετικά δεδομένα που συνοψίζονται στον Πίνακα 3-6 και τον Πίνακα 3-7 χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα για την εκτίμηση του πάχους στρώσης PCM (d_{PCM}) μέσω της εξίσωσης 3.14.

3.3.4 Διαμόρφωση συστήματος PV+PCM (1η σχεδιαστική προσέγγιση)

Για την επίτευξη των στόχων της παρούσας διατριβής, ένα πρωτότυπο σύστημα PV+PCM αναπτύχθηκε προκειμένου να αξιολογηθεί η θερμική και ενεργειακή συμπεριφορά του υπό τις κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου στη Νότια Ελλάδα (Κρήτη). Συγκεκριμένα, το σύστημα PV+PCM (Εικόνα 3-5) αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο τεχνολογίας λεπτών υμενίων διπλής επίστρωσης, μικροάμορφου τύπου - α-Si/ μc-Si (Sharp NA-E130L5), και ένα κατάλληλο μεταλλικό δοχείο διηρημένο σε τρία (3) διαμερίσματα ίσου όγκου. Οι σχετικές διαστάσεις του μεταλλικού δοχείου PCM επιλέχθηκαν, κατά τρόπο, ώστε να ταιριάζουν απόλυτα με τις αντίστοιχες διαστάσεις του διαθέσιμου φωτοβολταϊκού πλαίσιού. Επιπλέον, το επιλεγμένο βάθος για το δοχείο PCM ήταν 4,0 cm, ενώ το κερί παραφίνης RT27 επιλέχθηκε ως το κατάλληλο PCM για τη διαχείριση της θερμότητας που προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού. Μια σύνοψη των τεχνικών προδιαγραφών για το συμβατικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο και το επιλεγμένο PCM παρέχεται στον Πίνακα 3-8.



Εικόνα 3-5: Πρωτότυπο σύστημα PV+PCM

[*Savvakis και Tsoutsos*, 2021]

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου (Sharp NA-E-130L5)*	
Παράμετρος	
Ονομαστική ισχύς - P_n (Wp)	130
Τάση ανοικτού κυκλώματος - V_{OC} (V)	60,4
Ρεύμα βραχυκύκλωσης - I_{SC} (A)	3,41
Τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος - $V_{M,\,STC}$ (V)	46,1
Ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος - $I_{M,STC}$ (A)	2,82
Απόδοση – n_{ELEC} (%)	9,3
NOCT (ºC)	46
Θερμικός συντελεστής τάσης ανοιχτού κυκλώματος - α_{VOC} (%/ºC)	-0,30
Θερμικός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης - α_{ISC} (%/ºC)	+0,07
Θερμικός συντελεστής ισχύος – γ_{PM} (%/ºC)	-0,24

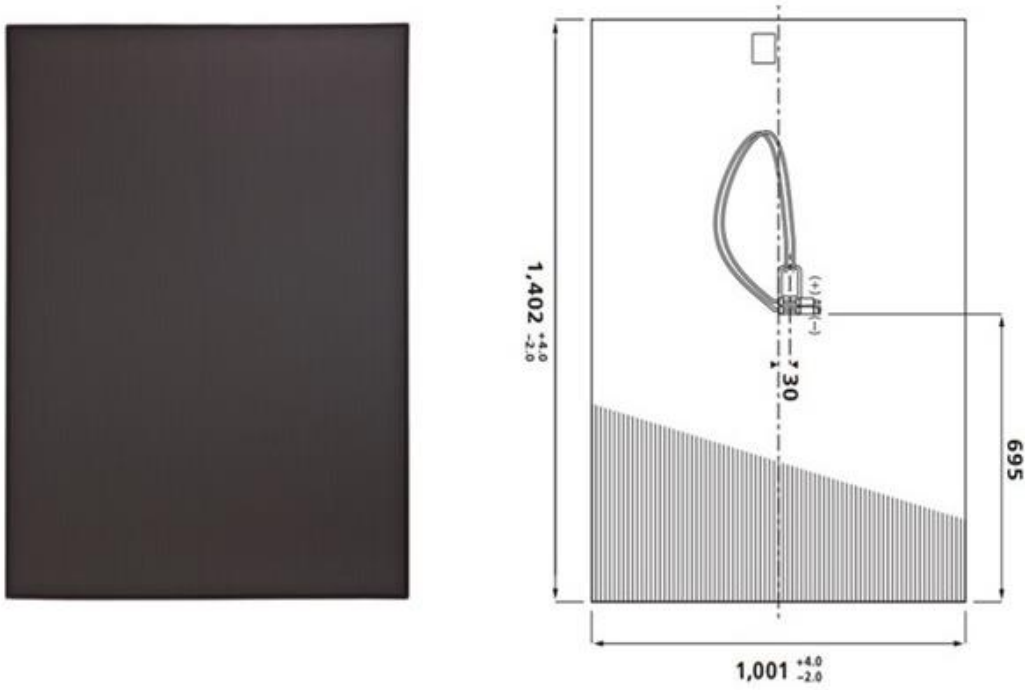
PCM (Rubitherm RT27)	
Παράμετρος	
Θερμοκρασιακό εύρος τήξης (ºC)	25-28 (typical:27)
Θερμοκρασιακό εύρος στερεοποίησης (ºC)	28-25 (typical:27)
Ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας ± 7,5% (kJ/kg)	179
Ειδική θερμοχωρητικότητα (kJ/kg·K)	2
Πυκνότητα στερεής κατάστασης σε θερμοκρασία 15°C (kg/L)	0,88
Πυκνότητα στερεής κατάστασης σε θερμοκρασία 40°C (kg/L)	0,76
Αύξηση όγκου κατά τη μετάβαση φάσης (%)	12,5
Μέγιστη λειτουργική θερμοκρασία (ºC)	50

*Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ισχύουν σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC): Ακτινοβολία 1000 W/m^2, με φάσμα φωτός AM 1,5 και θερμοκρασία κυψέλης 25 ºC. Η ωφέλιμη ισχύς υπόκειται σε μία ανοχή διαδικασίας ύψους -5%/10%. Προϋποθέσεις NOCT: Ακτινοβολία 800 W/m^2, θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 ºC και ταχύτητα ανέμου 1 m/s

Πίνακας 3-7: Χαρακτηριστικές παράμετροι για τα τεχνικά στοιχεία που συνθέτουν το ανεπτυγμένο σύστημα PV+PCM.

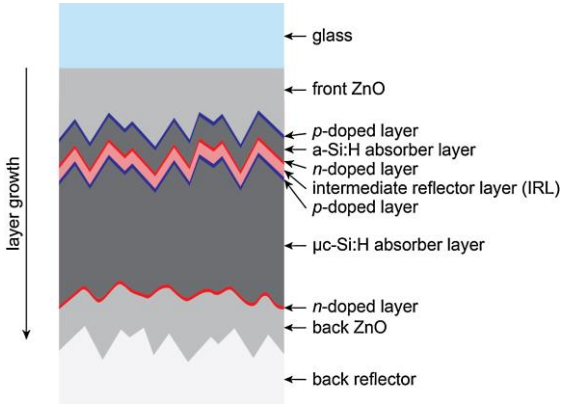
3.3.4.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Στην εξεταζόμενη πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκαν δύο (2) φωτοβολταϊκά πλαίσια τεχνολογίας λεπτών υμενίων διπλής επίστρωσης (a-Si/μc-Si), τύπου Sharp NA-E130(L5), με ονομαστική ισχύ 130 Wp έκαστο. Επίσης, κάθε ένα εκ των εξεταζόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων έχει βάρος 24 kg, ενώ οι σχετικές διαστάσεις τους ήταν 1402 mm x 1001 mm x 67 mm. Η κατασκευή τους από διαφανές γυαλί (glass/glass) και χωρίς πλαίσιο αλουμινίου επιτυγχάνει αξιόπιστη και συνεχή προστασία από τις συνθήκες του περιβάλλοντος (π.χ. επικαθίσεις σκόνης) και τις θερμικές διαστολές. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι πιστοποιημένα κατά IEC/EN 61646, IEC/EN 61730 και Safety Class II/CE και η χρήση τους ενδείκνυται για πολλαπλές εφαρμογές (π.χ. οικιακό φωτοβολταϊκό σύστημα, φωτοβολταϊκό πάρκο, ενσωμάτωση φωτοβολταϊκού συστήματος σε κτίρια, κ.α.). [*Sharp NA series*, 2015]



Εικόνα 3-6: Σχηματική απεικόνιση του φωτοβολταϊκού πλαισίου Sharp NA-E130(L5).

[*Sharp NA series*, 2015]

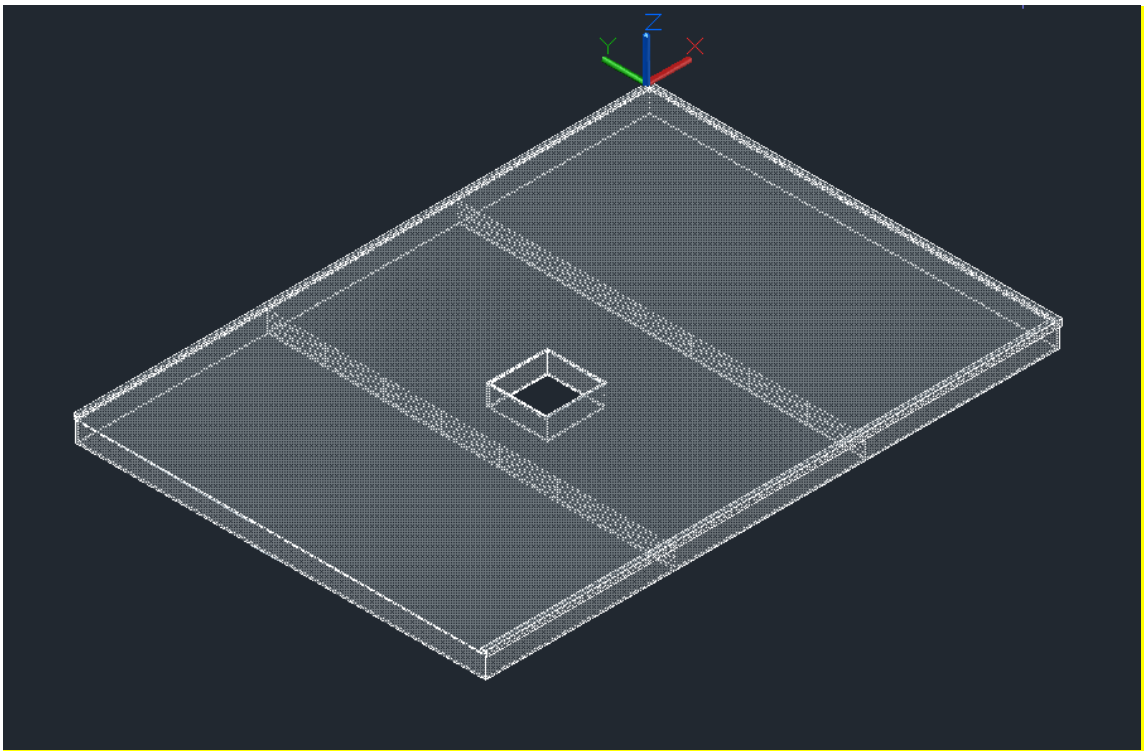


Εικόνα 3-7: Σχηματική απεικόνιση της τομής τυπικού φωτοβολταϊκού πλαισίου λεπτών υμενίων διπλής επίστρωσης (a-Si/μc-Si)

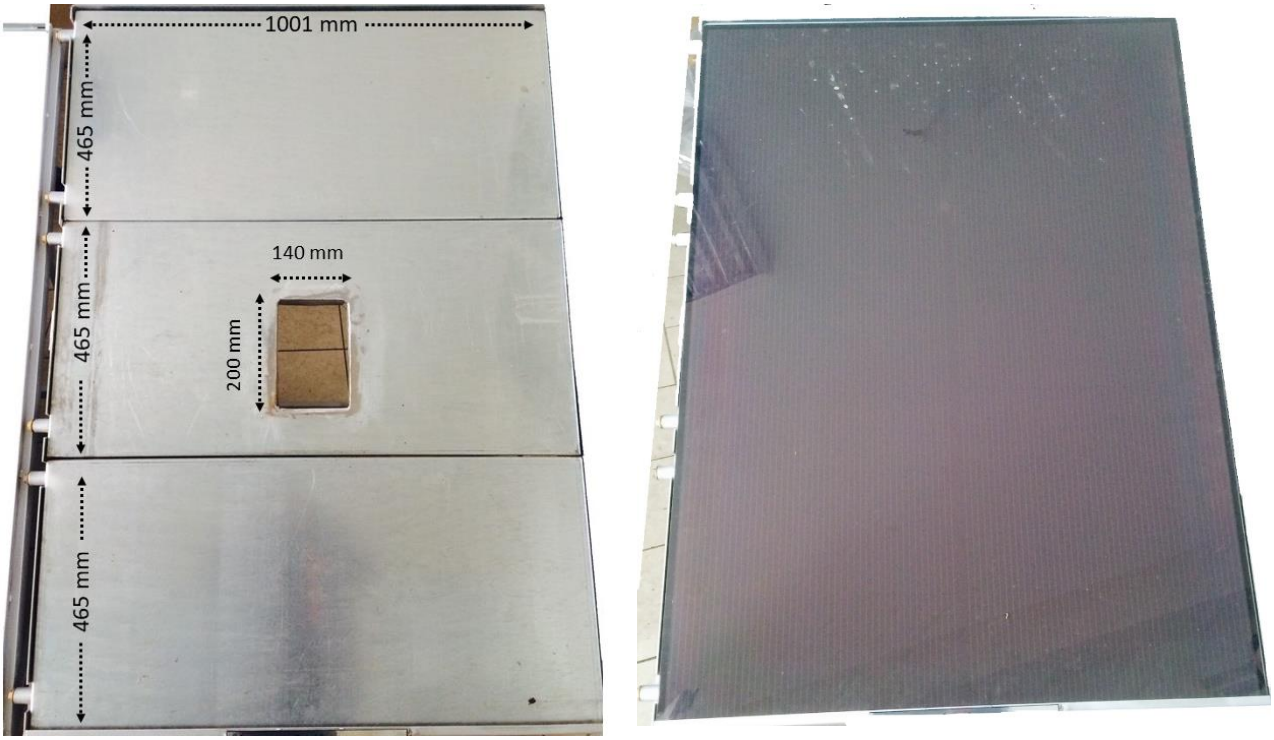
[*Meillaud et al.*, 2015]

3.3.4.2 Κατασκευή περιβλημάτων αποθήκευσης PCM

Στο πλαίσιο της παρούσας ερευνητικής εργασίας, βασικό ζητούμενο αποτέλεσε η κατασκευή κατάλληλου δοχείου για την αποθήκευση του PCM με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφευχθούν ενδεχόμενα τεχνικά προβλήματα κατά την περίοδο διεξαγωγής των πειραματικών μετρήσεων. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, ένα σύνολο κριτηρίων, όπως η αντοχή σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και μηχανικής καταπόνησης, η στεγανότητα, η συμβατότητα με τον επιλεγμένο τύπο PCM, η τιμή θερμικής αγωγιμότητας, το κόστος, η κατασκευαστική εμπειρία, κ.α., τέθηκαν προς εξέταση προκειμένου να διασφαλιστεί η αξιόπιστη και ασφαλής λειτουργία του συστήματος PV+PCM. Κατά συνέπεια, ο γαλβανισμένος σίδηρος (χάλυβας) επιλέχθηκε ως το υλικό κατασκευής του περιβλήματος PCM, δεδομένου ότι διαθέτει ικανοποιητικά χαρακτηριστικά για τις απαιτήσεις της εφαρμογής, σε χαμηλό κόστος, ενώ και η πιθανότητα τεχνικών αστοχιών ήταν μειωμένη. Ειδικότερα, το δοχείο αποθήκευσης του PCM κατασκευάστηκε από φύλλα γαλβανισμένου χάλυβα πάχους 3 mm, προσαρμοσμένο στις σχεδιαστικές λεπτομέρειες που είχαν οριστεί από προηγούμενα στάδια της μελέτης (τύπος και ποσότητα PCM, διατάσεις φωτοβολταϊκού πλαισίου, κ.λπ.)., με τρόπο ώστε να διευκολύνεται η μετάδοση θερμότητας από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο προς το PCM, και εν συνεχεία στο περιβάλλον. Εν κατακλείδι, το περίβλημα του επιλεγμένου PCM διαμορφώθηκε με διακριτό διαχωρισμό των σχετικών διαμερισμάτων ίσου όγκου και κατάλληλες διαστάσεις για την βέλτιστη προσαρμογή στην οπίσθια πλευρά του εξεταζόμενου φωτοβολταϊκού πλαίσιού (Εικόνα 3-8, Εικόνα 3-9).



Εικόνα 3-8: 1η Σχεδιαστική προσέγγιση για τη δημιουργία του περιβλήματός PCM.



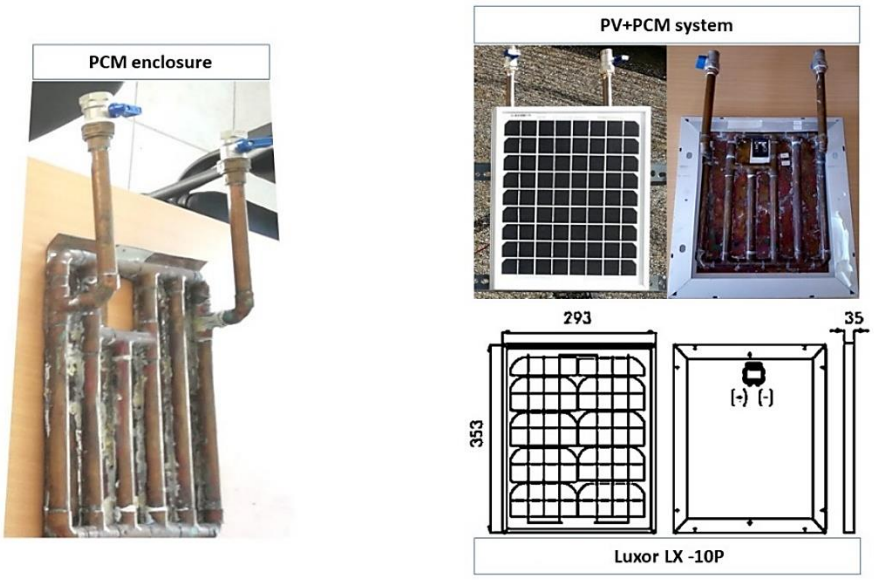
Εικόνα 3-9: Σχηματική απεικόνιση του περιβλήματός PCM (αριστερά) και της τελικής διαμόρφωσης του συστήματος PV+PCM (δεξιά).

3.3.5 Διαμόρφωση συστήματος PV+PCM (2η σχεδιαστική προσέγγιση)

Τα τελευταία χρόνια, ένας σημαντικός αριθμός ερευνητών τάσσεται υπέρ της άποψης ότι βασική προϋπόθεση για την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας PV+PCM αποτελεί η βελτιστοποίηση της σχέσης μεταξύ του κόστους της ενσωμάτωσης μιας διάταξης παθητικής ψύξης (με χρήση PCM) σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο και της αποτελεσματικότητας της. Υπό αυτήν την έννοια, ο σχεδιασμός ενός συστήματος PV+PCM θα πρέπει να επικεντρώνεται στην αναγνώριση των πραγματικών αναγκών και των πιθανών περιορισμών της εφαρμογής, καθώς επίσης και στην επίτευξη της υψηλότερης δυνατής απόδοσης με την ενσωμάτωση της ελάχιστης απαιτούμενης ποσότητας PCM. Ως εκ τούτου, η εισαγωγή εναλλακτικών προσεγγίσεων αναφορικά με τις σχεδιαστικές λεπτομέρειες της ειδικής διάταξης ψύξης αναμένεται να συμβάλει σημαντικά για τη βελτίωση του ρυθμού απομάκρυνσης της θερμότητας από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, και κατ' επέκταση της σχέσης κόστους-αποτελεσματικότητας και της βιωσιμότητας αυτών των ηλιακών συστημάτων.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η διαμόρφωση και η αξιολόγηση μιας εναλλακτικής πρότασης σχεδιασμού για τη διάταξη αποθήκευσης του PCM σε ένα σύστημα PV+PCM τέθηκαν ως ειδικοί στόχοι της παρούσας διατριβής. Πιο αναλυτικά, δύο όμοια (2) δοχεία σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν, με τη μορφή θερμικού συλλέκτη, για την ενσωμάτωση των επιλεγμένων PCM (κεριά παραφίνης RT27 και RT31) σε φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου (MC-Si), ώστε να συμβάλλουν για την ικανή διαχείριση της θερμοκρασίας λειτουργία τους. Βασικό κριτήριο για την υιοθέτηση της προαναφερθείσας προσέγγισης ήταν η "ενεργοποίηση" του μηχανισμού μεταφοράς θερμότητας με ελεύθερη συναγωγή από την οπίσθια πλευρά κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου στο περιβάλλον, ο οποίος

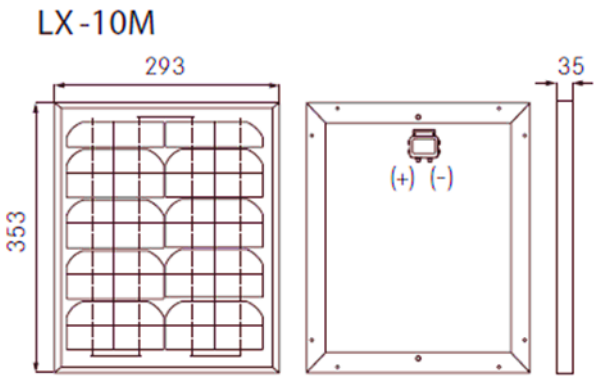
συχνά τίθεται ανενεργός στα συστήματα PV+PCM που φέρουν συμβατικού τύπου δοχείο αποθήκευσης PCM και χαρακτηρίζεται ως ρυθμιστικός παράγοντας για την εξέλιξη της διαδικασίας τήξης/πήξης των PCM [*Kamkari* και *Groulx*, 2018; *Groulx et al.*, 2020]. Για τους σκοπούς της μελέτης, τα συστήματα PV+PCM, τα οποία κατασκευάστηκαν υιοθετώντας τη 2η σχεδιαστική προσέγγιση (Εικόνα 3-10), μελετήθηκαν πειραματικά υπό τις κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου (Χανιά, Κρήτη), ώστε να αποτιμηθούν και να αξιολογηθούν συγκριτικά τα οφέλη των προτεινόμενων επιλογών.



Εικόνα 3-10:Σχηματική απεικόνιση της 2ης προσέγγισης σχεδιασμού για το σύστημα PV+PCM

[*Savvakis et al.*, 2020]

3.3.5.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια



Εικόνα 3-11: Σχηματική απεικόνιση του φωτοβολταϊκού πλαισίου Luxor LX-10M

[*LUXOR*, 2020]

Προκειμένου να αναγνωριστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της εναλλακτικής πρότασης σχεδιασμού της διάταξη αποθήκευσης του PCM σε ένα σύστημα PV+PCM, μια συστηματική διαδικασία μετρήσεων επί 2ης πειραματικής διάταξης έλαβε χώρα κατά τη διάρκεια της περιόδου Φεβρουαρίου-Ιουλίου 2019. Η διάταξη αυτή αποτελούνταν από τρία φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου (MC-Si) της εταιρίας LUXOR Solar GmbH (τύπου: Solo Line LX-10M), με ονομαστική ισχύ 10 Wp. Τα ελεγχόμενα φωτοβολταϊκά πλαίσια είχαν διαστάσεις 353 mm x 293 mm x 35 mm και βάρος 1,5 kg, ενώ στην επιφάνεια τους βρίσκονταν ενθυλακωμένα 36 στοιχεία (4

x 9 σε παράλληλη διάταξη). Επίσης, η δομή των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων από υψηλής ποιότητας υλικά διασφάλιζε την κάλυψη των απαιτήσεων για διαρκή προστασία από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. υγρασία) και μηχανική αντοχή. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι πιστοποιημένα κατά IEC/EN 61215 και IEC/EN 61730, καταλληλά για πολλές διαφορετικές εφαρμογές (π.χ. οικιακές εφαρμογές, ηλιακά συστήματα άντλησης νερού, παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε σκάφη αναψυχής, κ.α.).

3.3.5.2 Κατασκευή περιβλημάτων αποθήκευσης PCM

Μετά τη φάση σχεδιασμού και επιλογής του κατάλληλου φωτοβολταϊκού τύπου, η διαδικασία κατασκευής των απαραίτητων περιβλημάτων για την ενσωμάτωση των επιλεγμένων PCM (κεριά παραφίνης RT27 και RT31) υλοποιήθηκε βάσει των καθορισμένων προδιαγραφών (είδος υλικών, διαστασιολόγηση, κλπ.). Ειδικότερα, για τη δημιουργία των εν λόγω δοχείων χρησιμοποιήθηκαν εξαρτήματα και σωλήνες χαλκού με εσωτερική διάμετρο 20 mm, τα οποία είχαν τοποθετηθεί κατάλληλα επί πλάκας χαλκού με πάχος 2 mm, και κατά τρόπο, ώστε να καθίσταται εφικτός ο συνδυασμός των διαφορετικών λειτουργικών χαρακτηριστικών μιας τυπικής διάταξης ψύξης με πτερύγια (δηλ. ενισχυμένη μεταφορά θερμότητας με φυσική συναγωγή) και ενός θερμικού συλλέκτη (δηλ. απορρόφηση θερμότητας). Για την ακρίβεια, σε μια τέτοια διαμόρφωση συστήματος PV+PCM, οι πληρωμένοι με PCM σωλήνες εκλαμβάνονταν ως εξωτερικά πτερύγια (fins) διασφαλίζοντας την ομαλή απόρριψη της αποθηκευμένης θερμότητας από το PCM και το συζευγμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο προς το περιβάλλον. Επιπρόσθετα, οι διαστάσεις των περιβλημάτων PCM (δηλ. 340 mm x 280 mm) ήταν συμβατές με αυτές των φωτοβολταϊκών πλαισίων ώστε να δημιουργούνται οι προϋποθέσεις για την ομοιόμορφη κατανομή της ψύξης στην οπίσθια επιφάνεια τους.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η πλήρωση των δοχείων προσαρμόστηκε κατάλληλα για την αποφυγή των πιθανών δυσλειτουργιών στα συστήματα PV+PCM27 και PV+PCM27, οι οποίες μπορεί να προκύψουν λόγω της μεταβολής του όγκου και της πυκνότητας των επιλεγμένων PCM κατά τη διαδικασία αλλαγής φάσης τους. Ως εκ τούτου, ο μέγιστος λειτουργικός όγκος των ανεπτυγμένων περιβλημάτων θεωρήθηκε ίσος με 340 ml παρέχοντας τη δυνατότητα ενσωμάτωσης καθαρής ποσότητας 260 g από το καθένα εκ των επιλεγμένων PCM. Συνοπτικά, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ελεγχόμενου τύπου φωτοβολταϊκού πλαισίου και των διαθέσιμων PCM παρατίθενται στον Πίνακα 3-9.

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου (Luxor LX - 10M)*	
Παράμετρος	
Ονομαστική ισχύς - P_n (Wp)	10
Τάση ανοικτού κυκλώματος - V_{OC} (V)	21,60
Ρεύμα βραχυκύκλωσης - I_{SC} (A)	0,64
Τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος - $V_{M,\,STC}$ (V)	`17,39
Ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος - $I_{M,STC}$ (A)	0,58
Απόδοση – n_{ELEC} (%)	12%
NOCT (ºC)	45
Θερμικός συντελεστής τάσης ανοιχτού κυκλώματος - α_{VOC} (%/ºC)	-0,49
Θερμικός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης - α_{ISC} (%/ºC)	+0,05
Θερμικός συντελεστής ισχύος – γ_{PM} (%/ºC)	-0,35

PCM	RT27	RT31
Παράμετρος		
Θερμοκρασιακό εύρος τήξης (ºC)	25-28 (typical:27)	27-33 (typical:31)
Θερμοκρασιακό εύρος στερεοποίησης (ºC)	28-25 (typical:27)	33-27 (typical:31)
Ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας ± 7,5% (kJ/kg)	179	169
Ειδική θερμοχωρητικότητα (kJ/kg·K)	2	2
Πυκνότητα στερεής κατάστασης σε θερμοκρασία 15°C (kg/L)	0,88	0,88
Πυκνότητα στερεής κατάστασης σε θερμοκρασία 40°C (kg/L)	0,76	0,76
Αύξηση όγκου κατά τη μετάβαση φάσης (%)	12,5	12,5
Μέγιστη λειτουργική θερμοκρασία (ºC)	50	50

*Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ισχύουν σε πρότυπες συνθήκες δοκιμασίας (STCs): Ακτινοβολία 1000 W/m^2 με φάσμα φωτός AM 1,5 με θερμοκρασία κυψέλης 25 ºC. Η ωφέλιμη ισχύς υπόκειται σε μία ανοχή διαδικασίας ύψους -5%/10%. Προϋποθέσεις NOCT: Ακτινοβολία 800 W/m^2, θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 ºC και ταχύτητα ανέμου 1 m/s

Πίνακας 3-8: Χαρακτηριστικές παράμετροι για τα τεχνικά στοιχεία που συνθέτουν το ανεπτυγμένο σύστημα PV+PCM.

3.3.6 Χωροθέτηση των πειραματικών διατάξεων

Η βασικότερη επιδίωξη μιας μελέτης χωροθέτησης για φωτοβολταϊκά συστήματα είναι ο ακριβής προσδιορισμός των θέσεων τοποθέτησης των βάσεων στήριξης και των φωτοβολταϊκών πλαισίων επί του χωρικού πεδίου εγκατάστασης τους, ώστε να καθίσταται εφικτός ο περιορισμός των απωλειών ενέργειας, που ενδέχεται να προκύψουν σε κάθε φωτοβολταϊκό σύστημα λόγω των σκιάσεων. Οι σκιάσεις δύνανται να προκληθούν από φυσικά εμπόδια ή μεταξύ των συστοιχιών της ίδιας διάταξης σε περίπτωση λανθασμένου σχεδιασμού. Κατά συνέπεια, η αξιολόγηση των παραμέτρων που συνδέονται άμεσα με την πιθανότητα εμφάνισης σκιάσεων στις εξεταζόμενες πειραματικές διατάξεις κρίθηκε αναγκαία. Συνήθως, οι κύριες παράμετροι που μελετώνται για τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι:

- Ο προσανατολισμός και η κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων
- Η σκίαση
- Η στήριξη των φωτοβολταϊκών πλαισίων

3.3.6.1 Προσανατολισμός και κλίση της πειραματικών διατάξεων

Ο προσανατολισμός της επιφάνειας που προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με την κατεύθυνση της, αποτελεί ζήτημα υψηλής σημασίας κατά την φάση σχεδιασμού ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Ειδικότερα, η ορθή επιλογή του προσανατολισμού, της κλίσης και της αζιμούθιας γωνίας του φωτοβολταϊκού συστήματος συμβάλλουν για τη βέλτιστη

αξιοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και την επίτευξη αυξημένης ενεργειακής παραγωγής. Στην Ελλάδα, η αύξηση της ετήσιας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια σταθερή κλίσης παρατηρείται με νότιου προσανατολισμό και γωνία κλίσης περί των 30°. Εν προκειμένω, η τοποθέτηση των πειραματικών φωτοβολταϊκών διατάξεων περιφέρεται ως εξής:

- Γεωγραφικό πλάτος (latitude): **35°31'N**
- Γεωγραφικό μήκος (altitude): **24°04'E**
- Κλίση: **30°**
- Γωνία αζιμουθίου: **0°** (Νότιος προσανατολισμός)

Κεφάλαιο 4 : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

4.1 Στόχοι της διαδικασίας πειραματικών μετρήσεων

Στην παρούσα ενότητα συνοψίζονται οι κύριοι στόχοι της μεθοδολογίας διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων, η οποία εφαρμόστηκε κατά την Α' και τη Β' φάση της έρευνας πεδίου, σχετικά με την αξιολόγηση της ανεπτυγμένης τεχνικής διαχείρισης (με χρήση PCM) για τη διαχείριση της θερμοκρασίας των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών τύπων. Ειδικότερα οι κυρίαρχοι στόχοι των μετρήσεων ήταν:

- Η καταγραφή και η συγκριτική αξιολόγηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών τύπων με και χωρίς τη χρήση PCM σε ημερήσια, μηνιαία και ετήσια βάση υπό τις επικρατούσες συνθήκες της Μεσογείου,
- Η διερεύνηση του ρόλου της εποχικότητας και των μετεωρολογικών συνθηκών στη θερμική απόκριση των συστημάτων PV+PCM,
- Η επικύρωση της προτεινόμενης μεθοδολογίας σχεδιασμού των συστημάτων PV+PCM, βάσει της ακρίβειας του ενεργειακού ισοζυγίου,
- Ο χαρακτηρισμός της ενεργειακής απόκρισης (αποδιδόμενη ισχύς, παραγόμενη ενέργεια, απόδοση) των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης (φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς, συστήματα PV+PCM) σε ημερήσια, μηνιαία και ετήσια βάση,
- Ο καθορισμός βασικών κριτηρίων για την ομαλή λειτουργία των συστημάτων PV+PCM υπό τις συνθήκες της Μεσογείου και η αναγνώριση των κύριων σημείων για τη βελτιστοποίηση της,
- Η σύγκριση των ληφθέντων αποτελεσμάτων με συναφή στοιχεία άλλων σχετικών μελετών που απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία,
- Η διαμόρφωση κατάλληλης βάσης αναφοράς για την περιβαλλοντική αξιολόγηση των συστημάτων PV+PCM.

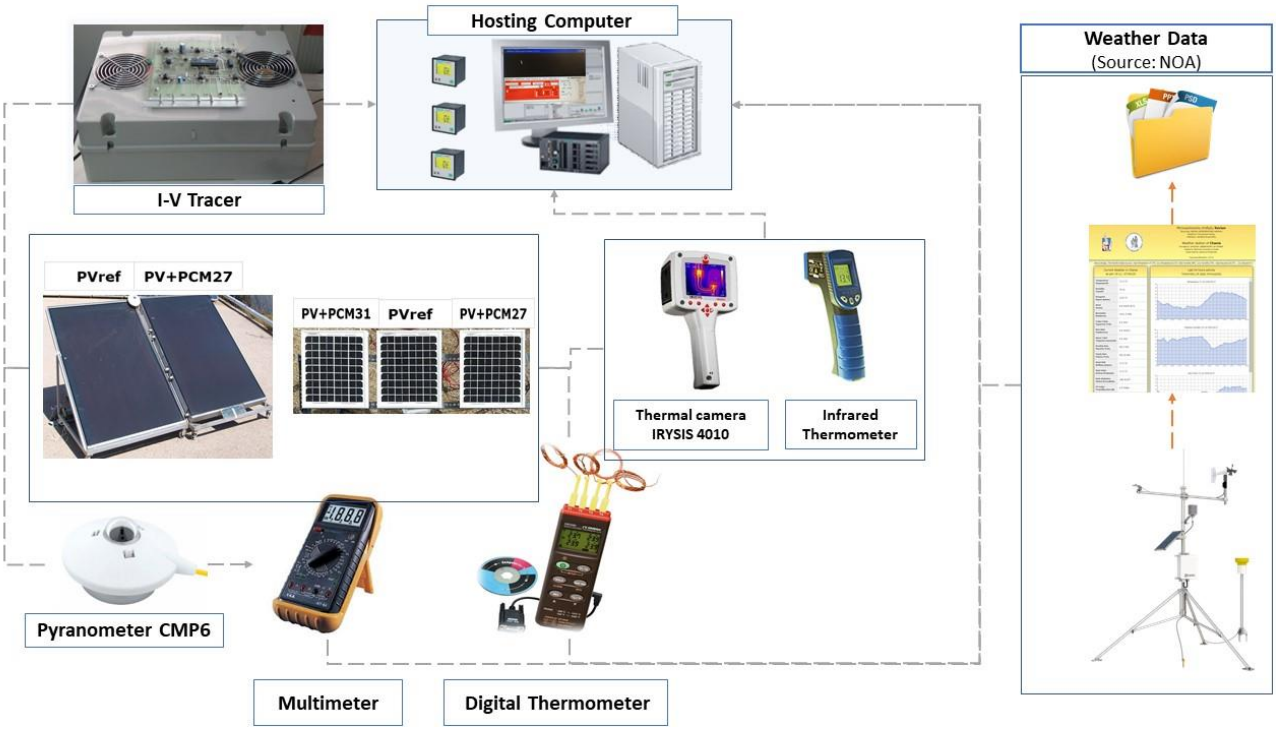
4.2 Περιγραφή συστήματος επίβλεψης και πρωτόκολλο διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων

Συνήθως, οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν κατάλληλους αισθητήρες για τη μέτρηση και την καταγραφή των μετεωρολογικών παραμέτρων και των δεδομένων που σχετίζονται με τη λειτουργία τους σε πραγματικό χρόνο (π.χ. αισθητήρες έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, αισθητήρες εξωτερικής θερμοκρασίας και θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, μετρητές για τη στιγμιαία αποδιδόμενη ισχύ και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, κλπ.). Επίσης, τα συστήματα επιτήρησης έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύουν δεδομένα, έτσι ώστε να καθίσταται εφικτή η ανάλυση της λειτουργικής απόδοσης του εκάστοτε εξεταζόμενου φωτοβολταϊκού συστήματος. Εναλλακτικά, η χρησιμοποίηση κατάλληλου εξοπλισμού που αποτελείται από φορητά όργανα μετρήσεων προκρίνεται ως ρεαλιστική και αξιόπιστη επιλογή.

Εν προκειμένω, η συλλογή δεδομένων για τα στοιχεία λειτουργίας των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών τύπων με και χωρίς τη χρήση PCM βασίστηκε στην αξιοποίηση διαθέσιμου

εργαστηριακού εξοπλισμού και την ανάπτυξη κατάλληλης διάταξης ηλεκτρικών μετρήσεων, ενώ για τη διασφάλιση συνθηκών ομαλής εξέλιξης της διαδικασίας πειραματικών μετρήσεων διαμορφώθηκε συμβατή μεθοδολογία διεξαγωγής πριν την έναρξη της Α' φάσης. Ως εκ τούτου, στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, ένας σημαντικός αριθμός δεδομένων καταγράφηκε κατά την εκτέλεση της Α' και της Β' φάσης πειραματικών μετρήσεων για την αξιολόγηση των ανεπτυγμένων σχεδιαστικών προσεγγίσεων συστήματος PV+PCM υπό τις πραγματικές συνθήκες πεδίου. Ειδικότερα, η διαδικασία πειραματικών μετρήσεων έλαβε χώρα στις εγκαταστάσεις του εργαστηρίου Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων (γεωγραφικό πλάτος: 35º31'N, γεωγραφικό μήκος: 24º04'E), της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος, για συνολικό χρονικό διάστημα περίπου δύο (2) ετών (Μάρτιος 2015 - Οκτώβριος 2015, Ιούλιος 2016 - Ιούνιος 2017, Φεβρουάριος 2019 - Ιούλιος 2019). Γενικά, η πλειονότητα των μετρήσεων καταγράφονταν σε χρονικά διαστήματα 10 min, από τις 8:00 έως τις 18:00 για κάθε ελεγχόμενη ημέρα των διαφορετικών χρονικών περιόδων παρακολούθησης, ενώ ως κύριες παράμετροι ελέγχου θεωρήθηκαν οι μετεωρολογικοί δείκτες (θερμοκρασία περιβάλλοντος, ταχύτητα ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο), τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, η θερμοκρασία λειτουργίας και η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων για καθεμιά εκ των εξεταζόμενων πειραματικών διατάξεων.

Πιο συγκεκριμένα, για τον προσδιορισμό της θερμικής απόκρισης των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων με ή χωρίς τη χρήση PCM στις επικρατούσες συνθήκες της περιοχής μελέτης, το ψηφιακό θερμόμετρο καταγραφής δεδομένων HH309A του οίκου Omega συνδεδεμένο με τέσσερις (4) κατάλληλους αισθητήρες θερμοκρασίας (θερμοζεύγη τύπου K), οι οποίοι είχαν τοποθετηθεί στην οπίσθια πλευρά φωτοβολταϊκών πλαισίων αναφοράς και ενδιάμεσα στα επιμέρους στοιχεία των ανεπτυγμένων συστημάτων PV+PCM, χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή της θερμοκρασίας λειτουργίας των. Οι θερμικοί αισθητήρες είχαν εγκατασταθεί σε επιλεγμένα σημεία μέτρησης, ενώ κατά την εφαρμογή τους προστέθηκε θερμοαγώγιμη πάστα για τη βελτίωση της αγωγιμότητας στην επαφή του άκρου του αισθητήρα με την οπίσθια επιφάνεια κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου ώστε να διασφαλίζεται η ακρίβεια των μετρήσεων θερμοκρασίας. Ακόμη, η θερμική κάμερα IRYSIS 4000 συνέβαλλε για την απεικόνιση της κατανομής της θερμοκρασίας και τον έλεγχο πιθανών σφαλμάτων κατά τη διάρκεια της περιόδου λειτουργίας των ελεγχόμενων υποσυστημάτων που συνιστούσαν τις πειραματικές διατάξεις. Επιπρόσθετα, ένα πυρανόμετρο CMP6 της εταιρείας Kipp Zonen είχε προσαρμοστεί στο επάνω μέρος της μεταλλικής βάσης στήριξης της εκάστοτε πειραματικής διάταξης για τη μέτρηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών, ενώ τα σχετικά μετεωρολογικά δεδομένα ελήφθησαν από τον μετεωρολογικό σταθμό εγκατεστημένο στο χωρικό πεδίο του Πολυτεχνείου Κρήτης. Τέλος, το σύστημα παρακολούθησης ηλεκτρικών δεδομένων, το οποίο αποτελούνταν από έναν ιχνηλάτη της καμπύλης I-V (I-V tracer) και έναν υπολογιστή, παρείχε τη δυνατότητα καταγραφής των σημάτων ρεύματος (I) και της τάσης (V) εξόδου από τα φωτοβολταϊκά αναφοράς ή τα συστήματα PV+PCM, τα οποία ελήφθησαν ως τυπικές μετρήσεις μέσω του κατάλληλου λογισμικού RealTerm (έκδοση 2.0.0.70).



Εικόνα 4-1: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης και των χρησιμοποιούμενων μέσων για τη διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων.

Παράμετρος	Όργανο Μέτρησης	Μοντέλο	Εύρος Λειτουργίας	Ακρίβεια μέτρησης
Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία	Πυρανόμετρο Kipp & Zonen	CMP6	0 - 2000 W/m^2	<4%
Ρεύμα φωτοβολταϊκού πλαισίου	I-V tracer	NA	0,5 – 40 A	±2%
Τάση φωτοβολταϊκού πλαισίου			10 – 250 V	
Θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκού πλαισίου (οπίσθιας επιφάνειας)	Ψηφιακό θερμόμετρο καταγραφής δεδομένων Omega	HH309A	-200 to 1370 °C	±0,2% (rdg +1 °C)
Θερμοκρασία εμπρόσθιας όψης φωτοβολταϊκού πλαισίου	Θερμόμετρο υπερύθρων Powerfix		-50 to 380 °C	±0,5 °C
Θερμική απεικόνιση	Θερμική κάμερα Irisys	4010	NA	NA
Θερμοκρασία περιβάλλοντος[1]	Μετεωρολογικός σταθμός Davis	Wireless Vantage Pro2	-40 - 65 °C	±0,3 °C (rdg 16 - 38 °C)
Ταχύτητα ανέμου [1]			3 – 241 km/h	±5%
Διεύθυνση ανέμου[1]			0 – 360°	±3°
Ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο[1]			0 - 1800 W/m^2	±5%

[1] (Πηγή: *Lagouvardos et al., 2017*)

Πίνακας 4-1: Βασικές παράμετροι και όργανα πειραματικών μετρήσεων

[*Savvakis et al.*, 2020]

Κεφάλαιο 5 : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Η παρούσα ενότητα αφορά την ανάλυση των διακριτών φάσεων και των υπολογιστικών μεθόδων που αξιοποιήθηκαν για την εκπλήρωση των βασικών στόχων της διδακτορικής διατριβής. Πιο συγκεκριμένα, το θεωρητικό υπόβαθρο που σχετίζεται με τις διαφορετικές πτυχές των προτεινόμενων συστημάτων PV+PCM αναλύεται επιστάμενα, έτσι ώστε να καταστεί εφικτή η αξιολόγηση της θερμικής και ενεργειακής συμπεριφοράς και να απαντηθούν οι συσχετισμοί που προκύπτουν για τις δεδομένες συνθήκες λειτουργίας τους. Εν συντομία, τα βασικά ζητήματα που αποτέλεσαν αντικείμενο διερεύνησης, ήταν:

- Η ανάλυση της θερμικής απόκρισης και της ενεργειακής απόδοσης των ανεπτυγμένων συστημάτων PV+PCM σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας,
- Ο προσδιορισμός του μηχανισμού και του βαθμού επίδρασης των αυξημένων τιμών θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των συστημάτων PV+PCM,
- Η αναγνώριση των συσχετισμών που προκύπτουν μεταξύ των μετεωρολογικών μεταβλητών και των λειτουργικών παραμέτρων των συστημάτων PV+PCM,
- Η επικύρωση της μεθοδολογίας σχεδιασμού για συστήματα PV+PCM (τυπικού σχήματος) και των μοντέλων πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας τους,
- Η αξιολόγηση της περιβαλλοντικής απόδοσης των ανεπτυγμένων συστημάτων PV+PCM βάσει των πραγματικών δεδομένων λειτουργίας τους.

5.2 Ηλιακή ενέργεια και φωτοβολταϊκά συστήματα

5.2.1 Η Ηλιακή ενέργεια εκτός Ατμόσφαιρας

Είναι γεγονός ότι η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει μέχρι την επιφάνεια της Γης, αποτελεί σαφώς μικρότερο μέρος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον Ήλιο. Ειδικότερα, η ενέργεια από τον Ήλιο, ανά μονάδα χρόνου, που προσπίπτει κάθετα σε μια μοναδιαία επιφάνεια τοποθετημένη στο ανώτατο όριο της ατμόσφαιρας, στη μέση απόσταση Ήλιου-Γης, εκφράζεται μέσω της ηλιακής σταθεράς (G_{sc}). Στη βιβλιογραφία, η τιμή 1367 W/m^2 έχει αναγνωριστεί ως τυπική, με τη σχετική αβεβαιότητα να εκτιμάται σε περίπου 1% [*Duffie* και *Beckman*, 1991]. Ακόμη, η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλεται κατά τα διάρκεια μιας ημέρας, λόγω περιστροφής της Γης γύρω από τον άξονα της, και κατά τη διάρκεια του έτους, λόγω περιστροφής της Γης στο εκλειπτικό επίπεδο. Παράλληλα, η μεταβολή της απόστασης της Γης από τον Ήλιο συνεπάγεται τη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας. Επομένως, η ηλιακή ακτινοβολία εκτός της ατμόσφαιρας (G_{on}), η οποία πρακτικά αποδίδει την άμεση ακτινοβολία σε επίπεδο κάθετο προς τις ακτίνες του Ήλιου, υπολογίζεται μέσω της τιμής της ηλιακής σταθερά (G_{sc}), ως εξής:

- $$G_{on} = G_{sc} \cdot \left(1 + 0{,}033 \cdot cos\frac{360n}{365}\right) \quad [5.1]$$

όπου, n=1 (1η Ιανουαρίου) έως 365 (31η Δεκεμβρίου): η ημέρα του έτους,

[*Duffie και Beckman*,1991]

5.2.2 Ορισμοί

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμη η παράθεση χρήσιμων ορισμών για την κατανόηση των πτυχών της ηλιακής ακτινοβολίας:

i. *Αέρια Μάζα* (*AM*): Ο λόγος της ατμοσφαιρικής μάζας που διαπερνά η ακτινική συνιστώσα της ακτινοβολίας προς τη μάζα που θα διαπερνούσε αν ο Ήλιος βρισκόταν στο ζενίθ (στην κατακόρυφο). Συνεπώς AM=1 στο επίπεδο της θάλασσας όταν ο Ήλιος είναι στο ζενίθ και AM=2 για ζενιθιακή γωνία θ_z=60°. Για ζενιθιακές γωνίες από 0° έως 70° ως προς το επίπεδο της θάλασσας μια εκτίμηση παρέχεται από την σχέση:

- $m = \frac{1}{cos\theta_z}$ [5.2]

ii. *Άμεση ή Ακτινική ακτινοβολία*: Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που λαμβάνεται από τον Ήλιο δίχως να υποστεί διάχυση από την ατμόσφαιρα.

iii. *Διάχυτη ακτινοβολία*: Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που λαμβάνεται από τον Ήλιο έπειτα από την αλλαγή κατεύθυνσης της (σκέδαση), λόγω της διάχυσης στην ατμόσφαιρα.

iv. *Ολική Ηλιακή Ακτινοβολία*: Το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο οριζόντιο επίπεδο.

v. *Ένταση Ακτινοβολίας*: Ο ρυθμός πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια μοναδιαία επιφάνεια, ανά μονάδα επιφάνειας (W/m^2). Το σύμβολο *G* υποδεικνύει την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας.

vi. *Πυκνότητα Ενέργειας*: Η προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας (J/m^2 ή kWh/m^2). Το σύμβολο *H* χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ακτινοβολίας σε διάστημα μιας ημέρας.

vii. *Ηλιακός Χρόνος*: Ο χρόνος βασισμένος στη φαινόμενη κίνηση του Ήλιου στον ουρανό, με το ηλιακό μεσημέρι να είναι η χρονική στιγμή που ο Ήλιος περνά από το μεσημβρινό του παρατηρητή. Η σχέση μεταξύ ηλιακού και τοπικού χρόνου είναι:

- Για τη χειμερινή ώρα: $AST = LST + E - 4 \cdot (SL - LL)$ [5.3a]
- Για τη θερινή ώρα: $AST = LST + E - 4 \cdot (SL - LL) - 1h$ [5.3b]

όπου,
AST: ο ηλιακός χρόνος, (h).
LST: ο τοπικός χρόνος σε ώρες, (h).
SL: η ζώνη ώρας της θέσης μελέτης (για την Ελλάδα 30°),
LL: το γεωγραφικό μήκος της θέσης μελέτης, (°).
E: μια εξίσωση χρόνου,(h).

- $E = 229{,}2 \cdot (0{,}000075 + 0{,}001868 \cdot cosB - 0{,}032077 \cdot sinB - 0{,}014615 \cdot cos2B - 0{,}04089 \cdot sin2B)$ [5.4a]

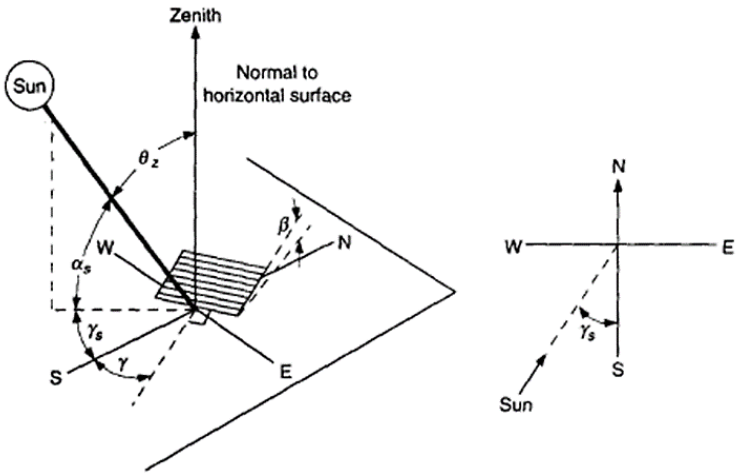
όπου $B = (n-1) \cdot \frac{360}{365}$ [5.4b]

και *n*: η n-οστή ημέρα του έτους,1 ≤ n ≤ 365.

[*Duffie και Beckman*,1991; *Eicker*, 2003]

5.2.3 Κατεύθυνση ακτινικής συνιστώσας ακτινοβολίας

Οι σχέσεις που συνδέουν τη γεωμετρία ανάμεσα σε μια επίπεδη επιφάνεια τυχαίου προσανατολισμού, οποιαδήποτε χρονική στιγμή, και της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία ταυτόχρονα υποδεικνύει τη θέση του Ήλιου έναντι της θέσης της ελεγχόμενης επιφάνειας, περιγράφονται μέσω των κατάλληλων γωνιών. [*Duffie* και *Beckman*, 1991]



Εικόνα 5-1: Γωνίες ορισμού θέσης μιας επίπεδης επιφάνειας και του Ήλιου.

[*Duffie και Beckman*,1991]

Οι γωνίες αυτές ορίζονται ως εξής:

i. <u>*γεωγραφικό πλάτος*</u> (*φ*): η γωνιακή θέση της τοποθεσίας βόρεια ή νότια από τον ισημερινό. Σημειώνεται θετικό/αρνητικό στο βόρειο/νότιο ημισφαίριο (-90°≤φ≤90°).

ii. <u>*ηλιακή απόκλιση*</u> (*δ*): η γωνιακή θέση του Ήλιου το ηλιακό μεσημέρι (δηλ. όταν ο Ήλιος είναι στον τοπικό μεσημβρινό) σε σχέση με το επίπεδο του ισημερινού. Παρατηρείται θετική/αρνητική στο βόρειο/νότιο ημισφαίριο (-23,45°≤*δ*≤23,45°). Υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση:

   - $\delta = 23{,}45 \cdot sin\left(360 \cdot \frac{284+n}{365}\right)$ [5.5]

   όπου *n*: η n-οστή ημέρα του έτους,1≤*n*≤365.

iii. <u>*κλίση*</u> (*β*): η γωνία μεταξύ μιας επίπεδης επιφάνειας και του ορίζοντα, 0°≤β≤180°.

iv. <u>*αζιμούθια γωνία*</u> (*γ*): η γωνιακή απόκλιση της προβολής της καθέτου της επιφάνειας στο οριζόντιο επίπεδο από τον τοπικό μεσημβρινό, με τιμή μηδενική στο νότο, αρνητική στην ανατολή και θετική στη δύση (–180°≤*γ*≤180°).

v. <u>*Ωριαία γωνία*</u> (*ω*): η γωνιακή απόκλιση του Ήλιου ανατολικά ή δυτικά από τον τοπικό μεσημβρινό που σχετίζεται με την περιστροφή της Γης γύρω από τον άξονα της κατά 15° την ώρα. Ο υπολογισμός της βασίζεται στην εξίσωση:

   - $\omega = (AST - 12) \cdot 15$ [5.6]

vi. <u>*γωνία πρόσπτωσης*</u> (*θ*): η γωνία μεταξύ της ακτινικής συνιστώσας της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια και της καθέτου στην επιφάνεια αυτή.

Ακόμη, οι συμπληρωματικές γωνίες που ορίζουν τη θέση του Ήλιου στον ουρανό:

vii. *ζενιθιακή γωνία* (θ_z): η γωνία μεταξύ της κατακόρυφου και της ευθείας με τον Ήλιο, ή η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια.

viii. *γωνία ανύψωσης Ήλιου* (α_s): η γωνία μεταξύ του ορίζοντα και της ευθείας με τον Ήλιο, συμπληρωματική της ζενιθιακής γωνίας.

ix. *αζιμούθια γωνία Ήλιου* (γ_s): η γωνιακή απόκλιση από το νότο της προβολής της ακτινικής συνιστώσας στο οριζόντιο επίπεδο. Οι τιμές της απόκλισης ανατολικά/δυτικά του νότου είναι αρνητικές/θετικές.

Οι μαθηματικές εκφράσεις που συνδέουν τη γωνία πρόσπτωσης (θ) της ακτινικής συνιστώσας της ακτινοβολίας που δέχεται μια επίπεδη επιφάνεια, με τις γωνίες που επιτρέπουν την αναγνώριση της θέσης του Ήλιου σε σχέση με την ελεγχόμενη επιφάνεια, είναι:

- $cos\theta = sin\delta \cdot sin\varphi \cdot cos\beta - sin\delta \cdot cos\varphi \cdot sin\beta \cdot cos\gamma + cos\delta \cdot cos\varphi \cdot cos\beta \cdot cos\omega + cos\delta \cdot sin\varphi \cdot sin\beta \cdot cos\gamma \cdot cos\omega + cos\delta \cdot sin\beta \cdot sin\gamma \cdot sin\omega$ [5.7]

και

- $cos\theta = cos\theta_z \cdot cos\beta + sin\theta_z \cdot sin\beta \cdot \cos(\gamma_s - \gamma)$ [5.8]

Σε πολλές περιπτώσεις, η ανωτέρω εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί:

i. Για κεκλιμένες επιφάνειες με νότιο ή βόρειο προσανατολισμό, οπότε η αζιμούθια γωνία (γ) είναι 0° ή 180°, ο τελευταίος όρος της εξίσωσης μηδενίζεται,

ii. Για κάθετες επιφάνειες, οπότε η κλίση (β) είναι ίση με 90°, η προαναφερθείσα σχέση τροποποιείται ως εξής:

- $cos\theta = -sin\delta \cdot cos\varphi \cdot cos\gamma + cos\delta \cdot sin\varphi \cdot sin\beta \cdot cos\gamma \cdot cos\omega + cos\delta \cdot sin\gamma \cdot sin\omega$ [5.9]

iii. Για οριζόντιες επιφάνειες, η γωνία πρόσπτωσης (θ) ταυτίζεται με τη ζενιθιακή γωνία του Ήλιου (θ_z), λαμβάνοντας τιμές από 0° έως 90°, όταν ο Ήλιος εντοπίζεται πάνω από τον ορίζοντα. Σε αυτό το ενδεχόμενο, β=0°, και η εξίσωση γίνεται:

- $cos\theta_z = cos\varphi \cdot cos\delta \cdot cos\omega + sin\varphi \cdot sin\delta$ [5.10]

iv. Η ωριαία γωνία δύσης του Ήλιου (ω_s) ανακύπτει θέτοντας θ_z= 90°:

- $cos\omega_s = -\frac{sin\varphi \cdot sin\delta}{cos\varphi \cdot cos\delta} = -tan\varphi \cdot tan\delta$ [5.11]

Επομένως, ο Ήλιος ανατέλλει σε γωνία ($-\omega_s$) και δύει σε ($+\omega_s$). Η διάρκεια κάθε ημέρας σε ώρες, δηλαδή ο χρόνος από την ανατολή μέχρι τη δύση του Ήλιου, καθίσταται εφικτή μέσω της σχέσης 5.12:

- $N = \frac{2}{15} cos^{-1}(-tan\varphi \cdot tan\delta)$ [5.12]

[*Duffie και Beckman*,1991]

5.2.4 Η επίδραση της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας

Πέραν των στοιχείων που ορίζουν τη συλλογή της άμεσης ακτινοβολίας που λαμβάνεται απευθείας από τον Ήλιο, η ολική ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τιμή της κλίσης του συλλέκτη, ανεξάρτητα από τη θέση του Ήλιου. Στην πράξη, όσο περισσότερο απέχει η κλίση από το οριζόντιο επίπεδο, τόσο αυξάνεται το ποσό ανακλώμενης ακτινοβολίας από το έδαφος που προσπίπτει σε μια συλλεκτική επιφάνεια, ενώ μειώνεται το ποσό διάχυτης ακτινοβολίας από τον ουρανό. Γενικά, η ανακλώμενη από το έδαφος ηλιακή ακτινοβολία, εκφράζεται μέσω του συντελεστή ανάκλασης (albedo), ο οποίος λαμβάνει τιμές από 0 για πλήρη απορρόφηση της ακτινοβολίας, έως 1 για πλήρη ανάκλαση. Στον Πίνακα 5-1, παρουσιάζονται κάποιες ενδεικτικές τιμές του συντελεστή ανάκλασης (*ρ*) για ορισμένα από τα είδη επιφανειών που εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης.

[*Φραγκιαδάκης*, 2008]

Είδος επιφάνειας	***Συντελεστής ανάκλασης (ρ)***
Επιφάνεια νερού, θάλασσα	0,05
Άσφαλτος	0,07
Αγρός με σκοτεινόχρωμο χώμα	0,08
Πράσινος αγρός	0,15
Βραχώδης επιφάνεια	0,20
Επιφάνεια παλαιού τσιμέντου	0,24
Επιφάνεια νέου τσιμέντου ή χρωματισμένη με ανοιχτό χρώμα	0,30
Χιόνι	0,60

Πίνακας 5-1: Κατηγοριοποίηση του δείκτη ανάκλασης (ρ).

[*Φραγκιαδάκης*, 2006]

5.2.5 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στο συλλέκτη

Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι τιμές της έντασης της ηλιακής ισχύος καταγράφονται κατά κανόνα στο οριζόντιο επίπεδο ($G_h/I_h/H_h$), σημαντικό ζήτημα αποτελεί η συσχέτιση ανάμεσα στη μετρούμενη τιμή ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο ($G_h/I_h/H_h$) και την αντίστοιχη τιμής για την προσπίπτουσα στη επίπεδη επιφάνεια του συλλέκτη ($G_t/I_t/H_t$).

5.2.5.1 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός της ατμόσφαιρας

Σε γενικές γραμμές, η ηλιακή ακτινοβολία στο ανώτερο όριο της ατμόσφαιρας αναγνωρίζεται ως σταθερή κατά τη διάρκεια του έτους. Ωστόσο, η περιορισμένη απόκλιση της αποδίδεται σε μικρής κλίμακας μεταβολές της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από τον Ήλιο, ενώ για την πλειονότητα των σχετικών εφαρμογών η ηλιακή ακτινοβολία εκτός της ατμόσφαιρας λαμβάνεται ως αμετάβλητη. Μολαταύτα, λόγω της μεταβολής της απόστασης μεταξύ του Ήλιου και της Γης, κάποιες μικρές αποκλίσεις της τάξης του ±3% διακρίνονται. Εν κατακλείδι, η ηλιακή ακτινοβολία, η οποία προσπίπτει επί οριζόντιας επιφάνειας, εκτός της ατμόσφαιρας, δύναται να εκτιμηθεί μέσω της εξίσωσης:

- $$G_{on} = G_{sc} \cdot \left[\left(1 + 0{,}033 \cdot cos\frac{360n}{365}\right)\right] \cdot cos\theta_z \qquad [5.13]$$

. [*Duffie* και *Beckman*,1991]

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να διευκρινιστεί ότι η ηλιακή ακτινοβολία (πυκνότητα ισχύος) θα συμβολίζεται με (*G)* όταν αφορά τη στιγμιαία τιμή της, με (*I)* όταν πρόκειται για την ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια μίας δεδομένης ώρας και με (*H)* όταν σχετίζεται με την ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια ενός ορισμένου χρονικού διαστήματος.
Εν προκειμένω, ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός ατμόσφαιρας, που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια στη διάρκεια μιας ώρας (1 h), δύναται να επιτευχθεί ολοκληρώνοντας τη σχέση 5.1 για κάθε χρονικό διάστημα (1 h) που ορίζεται από τις ανάλογες γωνίες (ω_1) και (ω_2) ($\omega_1<\omega_2$):

- $I_o = \frac{12}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot \left(1 + 0{,}033 \cdot cos\frac{360n}{365}\right) \cdot [cos\varphi \cdot sin\delta \cdot (sin\omega_2 - sin\omega_1) + \frac{\pi \cdot (\omega_2 - \omega_1)}{180} \cdot sin\varphi \cdot sin\delta]$ [5.14]

Η εκτίμηση της ημερήσιας ενέργειας H_o (kWh/m^2/d) εκτός ατμόσφαιρας σε οριζόντια επιφάνεια στηρίζεται στην ολοκλήρωση της ανωτέρω μαθηματικής έκφρασης [5.14] ως προς το χρονικό διάστημα μεταξύ ανατολής και δύσης του ηλίου, δηλαδή $\omega_1=-\omega_s$ και $\omega_2=+\omega_s$.

- $H_o = \frac{24}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot \left[1 + 0{,}033 \cdot \cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right] \cdot \left[cos\varphi \cdot cos\delta \cdot sin\omega_s + \frac{2\pi \cdot \omega_s}{360} \cdot sin\varphi \cdot sin\delta\right]$ [5.15]

5.2.5.2 Υπολογισμός των συνιστωσών της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο

Η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, πέρα από τις μεταβολές που γνωρίζει λόγω της κίνησης της Γης γύρω από τον Ήλιο, εμφανίζει αυξημένες διακυμάνσεις εξαιτίας της διαδρομής της μέσω της γήινης ατμόσφαιρας. Οι σχετικές διακυμάνσεις δύναται να αναγνωριστούν ανάλογα με τις συνθήκες της ατμόσφαιράς ως αίθρια (δηλ. δεν υπάρχουν νέφη) ή μη αίθρια (νεφελώδης). Για το σκοπό αυτό, οι διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (στο οριζόντιο επίπεδο) σε μια πιθανή θέση εγκατάστασης, δύναται να αξιοποιηθούν κατάλληλα για τον υπολογισμό του δείκτης αιθριότητας της ατμόσφαιρας:

i. <u>*Ημερήσιος δείκτης αιθριότητας,(K_t)*</u>: αποδίδει το λόγο της μέσης ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο προς την ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας την ίδια ημέρα:
   - $K_t = \frac{H_h}{H_o}$ [5.16]

ii. <u>*Μηνιαίος δείκτης αιθριότητας,($\overline{K}_t$)*</u>: αποδίδει το λόγο της μηνιαίας μέσης ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο προς την αντίστοιχη τιμή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο εκτός ατμόσφαιρας:
   - $\overline{K}_t = \frac{\overline{H}_h}{\overline{H}_o}$ [5.17]

Ο δείκτης αιθριότητας χαρακτηρίζει έναν τόπο εγκατάστασης και σε αρκετές περιπτώσεις συμπεριλαμβάνεται σε τεχνικές οδηγίες ως μέση μηνιαία τιμή ($\overline{K}_t$). Ανεξάρτητα από το γεωγραφικό πλάτος (φ) μιας περιοχής, το χρονικό διάστημα, κατά το οποίο η συνολική ημερήσια ακτινοβολία είναι μικρότερη ή ίση από μια ορισμένη τιμή, εξαρτάται άμεσα από την τιμή του (K_t), ενώ έχει τεκμηριωθεί επαρκώς ότι όσο πιο αίθρια είναι η ατμόσφαιρα, τόσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας και μικρότερο το ποσοστό της διάχυτης επί της ολικής.

Στη διεθνή βιβλιογραφία, παρατίθεται ένας σημαντικός αριθμός εμπειρικών εξισώσεων για τη συσχέτιση της διάχυτης και ολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο, αξιόλογο είναι το γεγονός ότι η πλειονότητα των ερευνητών προσεγγίζει το λόγο της διάχυτης ακτινοβολίας προς την ολική, ως συνάρτηση του συντελεστή αιθριότητας (K_t). Η ευρύτερα διαδεδομένη μαθηματική έκφραση θεωρείται αυτή των *Liu και Jordan*:

- $\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}_h} = 1{,}39 - 4{,}027 * \overline{K}_t + 5{,}531 * \overline{K}_t^2 - 3{,}108 * \overline{K}_t^3$ [5.18]

Βάσει των ανωτέρω,] καθίσταται εφικτή η εκτίμηση της προσπίπτουσας άμεσης ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο αφαιρώντας τη διάχυτη από την ολική:

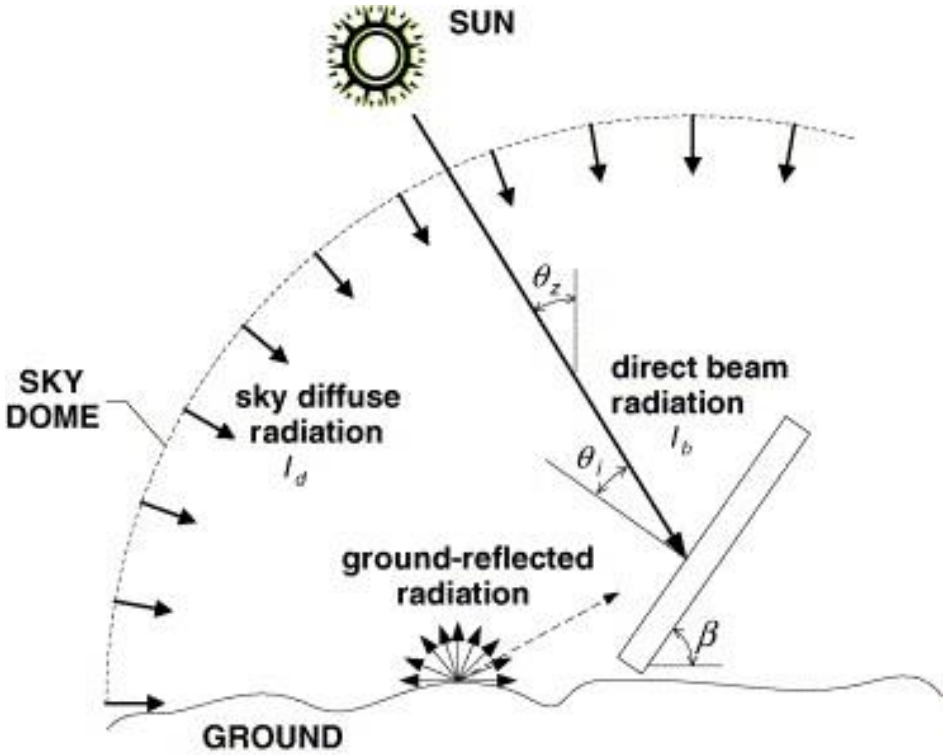
- $\overline{H}_b = \overline{H}_h - \overline{H}_d$ [5.19]

Όπου,
$\overline{H}_b$:η μηνιαία μέση ημερήσια της άμεσης ηλιακής ακτινοβολία,(kWh/m^2/d).
$\overline{H}_h$: η μηνιαία μέση ημερήσια τιμή της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, (kWh/m^2/d).
$\overline{H}_d$: η μηνιαία μέση ημερήσια τιμή της διάχυτης ακτινοβολίας, (kWh/m^2/d).

[*Klein*,1977]

5.2.6.3 Υπολογισμός της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο

Ακολούθως, οι συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο δύνανται να υπολογιστούν. Γενικά, η ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνει ένα κεκλιμένο επίπεδο στην επιφάνεια της Γης αποτελείται από τρείς συνιστώσες, την ακτινική που προέρχεται απευθείας από τον Ήλιο, τη διάχυτη που προέρχεται από τον ουράνιο θόλο και την ανακλώμενη που προέρχεται από το έδαφος της γύρω περιοχής.



Εικόνα 5-2: Συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας.

[*Thevenard* και *Haddad*, 2006]

Η άμεση ακτινοβολία που λαμβάνεται σε ένα κεκλιμένο επίπεδο εξαρτάται κυρίως από τη γωνία πρόσπτωσης (*θ*). Εν αντιθέσει, η διάχυτη και ανακλώμενη ακτινοβολία δεν παρουσιάζουν σημαντική εξάρτηση από τον προσανατολισμό του επιπέδου, ούτε προέρχονται από όλο τον ουράνιο θόλο ή το έδαφος στην εξεταζόμενης θέσης. Επιπλέον, η διάχυτη ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο προέρχεται μόνο από το τμήμα του ουρανού που έχει οπτική επαφή με το επίπεδο. Κατά συνέπεια, η εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο προϋποθέτει την θεώρηση ενός κατάλληλου συντελεστή διόρθωσης για κάθε μία από τις αντίστοιχες συνιστώσες της.

Ο γεωμετρικός παράγοντας, (R_b): ο λόγος της ακτινικής συνιστώσας που προσπίπτει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια προς την ακτινική συνιστώσα που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια, οποιαδήποτε χρονική στιγμή, προκύπτει μέσω της εξίσωσης:

- $R_b = \frac{G_{b,t}}{G_b} = \frac{G_{b,n} * \cos\theta}{G_{b,n} * \cos\theta_z} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z}$ [5.20]

Επομένως, η άμεση ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο εκτιμάται ως εξής:

- $\overline{H}_{b,} = R_b * \overline{H}_b$ [5.21]

Κατά αντίστοιχο τρόπο, η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία, ενσωματώνοντας τον συντελεστή διόρθωσης, υπολογίζεται ως:

- $\overline{H}_{r,t} = \overline{H}_h \cdot \rho \cdot \frac{(1-\cos\beta)}{2}$ [5.22]

Ακόμη, η αναγωγή της μηνιαίας μέσης ημερήσιας διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας προσδιορίζεται από την εξίσωση:

- $\overline{H}_{d,t} = \overline{H}_d * \frac{(1+\cos\beta)}{2}$ [5.23]

Τέλος, η ολική μέση μηνιαία ημερήσια ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας στο κεκλιμένο επίπεδο υπολογίζεται από την εξίσωση:

- $\overline{H}_t = \overline{H}_{b,t} + \overline{H}_{d,t} + \overline{H}_{r,t}$ [5.24]

5.2.6.4 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες με νότιο προσανατολισμό

Η μηνιαία μέση ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο με νότιο υπολογισμό, δύναται να εκτιμηθεί βάσει του ισοτροπικού μοντέλου των *Liu, Jordan* και *Klein* από τις εξισώσεις που ακολουθούν, ως εξής:

- $\overline{H}_t = \overline{R} \cdot \overline{H} = \overline{R} \cdot \overline{K}_t \cdot \overline{H}_o$ [5.25]

όπου,

- $\overline{R} = \left(1 - \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}}\right) \cdot \overline{R}_b + \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} \cdot \frac{(1+\cos\beta)}{2} + \rho \cdot \frac{(1-\cos\beta)}{2}$ [5.26]

Ο μέσος μηνιαίος γεωμετρικός παράγοντας ($\bar{R}_b$), ο οποίος αποτελεί τον λόγο της άμεσης ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο προς την άμεση ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο, υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\bar{R}_b = \frac{[\cos(\varphi-\beta)\cdot\cos\delta\cdot\sin\omega_{ss}+\frac{\pi}{180}\cdot\omega_{ss}\cdot\sin(\varphi-\beta)\cdot\sin\delta]}{[\cos\varphi\cdot\cos\delta\cdot\sin\omega_{ss}+\frac{\pi}{180}\omega_{ss}\cdot\sin\varphi\cdot\sin\delta]} \quad [5.27]$$

όπου,

ω_{ss}: η ωριαία γωνία δύσης της κεκλιμένης επιφάνειας (°) για τη μέση αντιπροσωπευτική ημέρα του μήνα στην εξεταζόμενη περιοχή, η οποία προκύπτει από την εξίσωση:

- $\omega_{ss} = \min\,[\omega_s, \cos^{-1}(-\tan(\varphi-\beta) * tan\delta)]$ [5.28]

Ο υπολογισμός της μέσης μηνιαίας τιμής της ηλιακής ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα κεκλιμένο επίπεδο ($\bar{H}_T$) με νότιο προσανατολισμό (γ=0), για διαφορετικές τιμές κλίσης (β), δύναται να εκτιμηθεί κάνοντας χρήση των παραπάνω εξισώσεων. Οι προσδιορισθείσες τιμές αναφέρονται σε καθαρό ορίζοντα χωρίς εμπόδια, ενώ στην περίπτωση που υπάρχουν φυσικά ή τεχνητά εμπόδια η προσπίπτουσα ακτινοβολία μειώνεται ανάλογα. [*Klein*,1977]

5.3 Μεθοδολογία ανάλυσης της ενεργειακής απόδοσης συστημάτων PV+PCM

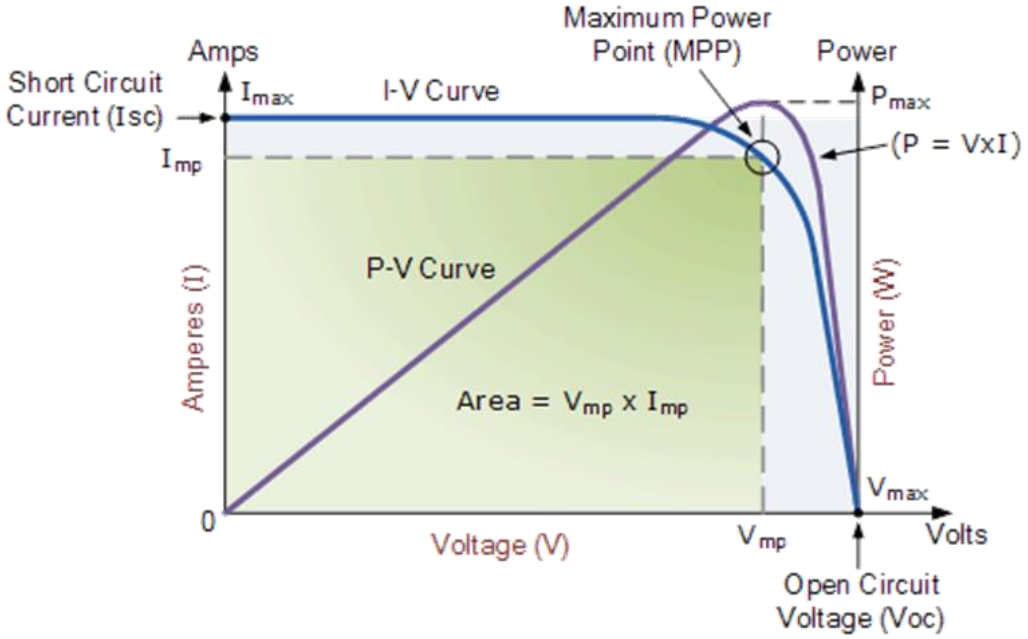
5.3.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα, η υιοθετημένη μεθοδολογία για την ανάλυση των καταγεγραμμένων ενεργειακών δεδομένων από τα ελεγχόμενα φωτοβολταϊκά πλαίσια περιγράφεται λεπτομερώς, με σκοπό την κατανόηση της συμβολής των PCM στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης τους σύμφωνα με το θεωρητικό πλαίσιο που ορίζει τη λειτουργία τους. Ειδικότερα, η αποδιδόμενη ισχύς από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμός από τις επικρατούσες συνθήκες κατά τη λειτουργία του, οι οποίες προτείνεται να μελετώνται συστηματικά για την κατανόηση της σχετικής επίδρασης τους. Πέραν αυτής, η ετήσια ενεργειακή απόδοση, επισημαίνεται ως κατάλληλη παράμετρος για τον ορθολογικό σχεδιασμό των φωτοβολταϊκών συστημάτων, καθώς επίσης και το καλύτερο μέτρο αξιολόγησης της μακροχρόνιας συμπεριφοράς των. Επιπρόσθετα, σε αυτήν την ενότητα, αναλύονται τα βασικά δευτερογενή μεγέθη, τα οποία συμβάλλουν ώστε να γίνει αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των εξεταζόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων. Ως δευτερογενή αναφέρονται τα μεγέθη, τα οποία προκύπτουν μέσω της υπολογιστικής επεξεργασίας των μετρούμενων τιμών από τους αισθητήρες. Η χρησιμότητα τους εντοπίζεται στο προσδιορισμό της στιγμιαίας παραγωγής ενέργειας, επιτρέποντας τη συσχέτιση με τα αντίστοιχα τεχνικά χαρακτηριστικά ή/και τα μετεωρολογικά δεδομένα.

5.3.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου

Σε γενικές γραμμές, η μέτρηση της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου (P_M) σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας προϋποθέτει τη χρήση ειδικής διάταξης για την άμεση καταγραφή της χαρακτηριστική του καμπύλης I-V, σε σταθερή πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας (G_t) και λειτουργική θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_m). Η καταγραφή των σχετικών καμπυλών I-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου σε σταθερά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια μιας ημέρας επιτρέπει την αναγνώριση της ημερήσιας εξέλιξης της αποδιδόμενης ισχύς (P_M), και κατ' επέκταση τον προσδιορισμό της παραγόμενης ενέργειας του (E_{DC}). Ενδεικτικά, στην Εικόνα 3-5 αποτυπώνεται γραφικά ένα τυπικό διάγραμμα I-V, όπου δύναται να αναγνωριστεί η εξάρτηση του ρεύματος (I) που διαρρέει το κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου σε συνάρτηση με την τάση (V) που δημιουργείται στα άκρα του. Όπως διακρίνεται, το ρεύμα ξεκινά από τη μέγιστη τιμή (I_{SC}), παραμένοντας σχεδόν αμετάβλητο στην αύξηση της τιμής της τάσης (V) μέχρι το σημείο μέγιστης ισχύος (V_M, I_M), και στη συνέχεια μειώνεται έντονα έως ότου η τάση να προσεγγίσει τη μέγιστη τιμή της (V_{OC}), οπού το ρεύμα μηδενίζεται (I=0). Η μέγιστη τιμή του ρεύματος (I_{MAX}) καλείται ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{SC}) και είναι η τιμή που λαμβάνει το ρεύμα (I) στην ιδανική περίπτωση όπου η τιμή των αντιστάσεων είναι μηδενική. Η μέγιστη τιμή της τάσης (V) ονομάζεται τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{OC}) και είναι ίση με την τάση (V) που παρατηρείται στα άκρα του φωτοβολταϊκού πλαισίου όταν το φωτόρευμα γίνει ίσο με το ρεύμα της διόδου (I_{ph}=I_D). Η ηλεκτρική ισχύς (P) που μπορεί να παράξει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο εξαρτάται από το γινόμενο της τάσης (V) και της έντασης του ρεύματος (I). Κατά συνέπεια, στο σημείο της καμπύλης I-V που οι τιμές της έντασης του ρεύματος (I) και της τάσης (V) είναι τέτοιες ώστε

η αποδιδόμενη ισχύς (*P*) από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της αναφέρεται ως σημείο μέγιστης ισχύος. [*Τσούτσος* και *Κανάκης*, 2013]



Εικόνα 5-3: Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V και P-V φωτοβολταϊκού πλαισίου.

[*Alternative Energy Tutorials*, 2021]

Στην εξεταζόμενη περίπτωση, η ενεργειακή απόκριση των φωτοβολταϊκών πλαισίων με ή χωρίς PCM προσδιορίστηκε μέσω ενός συνόλου δεικτών, οι οποίοι βασίζονται στα δεδομένα που καταγράφηκαν κατά τη διαδικασία διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων (δηλαδή θερμοκρασία λειτουργίας φωτοβολταϊκού πλαισίου - T_m, προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία G_t, ρεύμα - *I*, τάση - *V*, ρεύμα βραχυκύκλωσης - I_{SC} ,τάση ανοιχτού κυκλώματος - V_{OC}) και ήταν:

i. <u>*Στιγμιαία μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς (P_M)*</u>: Ο δείκτης της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφέρεται στο σημείο, όπου το γινόμενο των σχετικών τιμών ρεύματος-τάσης (I-V) λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του, και ορίζεται από τη σχέση:

- $P_M = I_M \cdot V_M$ [5.29]

ii. <u>*Παράγων ή Συντελεστής πλήρωσης (FF)*</u>: Ο παράγων πλήρωσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου περιγράφει τη σύγκλιση ή απόκλισή προς/από την ιδανική συμπεριφορά του ως πηγής σταθερού ρεύματος, με τις σχετικές τιμές του να καθορίζονται από τα υλικό των φωτοβολταϊκών κυψελών του πλαισίου και τις συνθήκες του περιβάλλοντός λειτουργίας του. Οι τιμές του παράγοντα πλήρωσης κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 0 και 1, με την προσέγγιση του άνω ορίου να αποτελεί ένδειξη υψηλής ενεργειακής απόδοσης για το ελεγχόμενο φωτοβολταϊκό. Η τιμή του σχετικού δείκτη (*FF*) μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

- $FF = \frac{I_M \cdot V_M}{I_{SC} \cdot V_{OC}}$ [5.30]

iii. *Απόδοση φωτοβολταϊκού πλαισίου (n_{ELEC})*: Ο δείκτης αποδοτικότητας ή απόδοση ενεργειακής μετατροπής συνδέεται με το ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας που το φωτοβολταϊκό πλαίσιο επιτυγχάνει να μετατρέψει σε ηλεκτρική ενέργεια. Συνήθως, ορίζεται ως το πηλίκο της μέγιστης αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο προς την προσπίπτουσα ηλιακή ισχύ στην επιφάνεια του, σύμφωνα με τη σχέση:

- $n_{ELEC} = \frac{P_M}{P_{INC}} = \frac{I_M \cdot V_M}{G_t \cdot S}$ [5.31]

όπου,
P_{INC}: η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου, (W).
I_M: το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος, (A)
V_M: η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος,(V)
S: η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου, (m^2)

[*Kalogirou,* 2009]

5.3.2 Ενεργειακή ανάλυση φωτοβολταϊκών συστημάτων

Η ενεργειακή παραγωγή συνιστά μια εκ των βασικότερων παραμέτρων σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα και εξετάζεται επιμελώς από τους τελικούς χρήστες του. Πιο συγκεκριμένα, το κύριο ζητούμενο των επενδυτών είναι η αυξημένη παραγωγή ενέργειας (kWh) ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος (kWp), ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ωφέλεια κατά τη λειτουργική περίοδο του συστήματος. Η ολική ημερήσια *($E_{DC,d}$)*, για μια επιλεγμένη χρονική περίοδο [t_1,t_N],η ολική μηνιαία *($E_{DC,m}$)* και η μηνιαία μέση ημερήσια *($E_{DC,m,avg}$)* παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος ορίζονται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

- $E_{DC,d} = \Delta t \cdot \sum_{i=1}^{N} P_M\,(t_i)$ [5.32a]

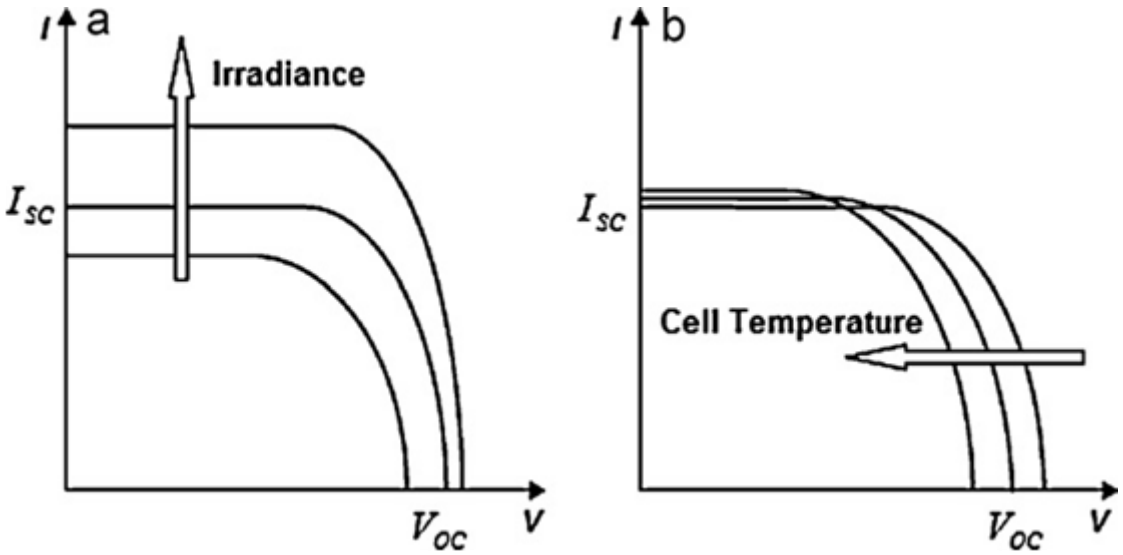
όπου,
P_M: η στιγμιαία μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς, (W).
Δt: χρονικό διάστημα μεταξύ δυο διαδοχικών μετρήσεων, (h).
N:ο αριθμός των μετρήσεων

- $E_{DC,m} = \sum_{d=1}^{N} E_{DC,d}$ [5.32b]
- $E_{DC,m,avg} = \frac{1}{N}\sum_{d=1}^{N} E_{DC,d}$ [5.32c]

[*Savvakis και Tsoutsos*, 2015]

5.3.3 Εξάρτηση της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V από τη θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου

Οι δύο κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την παραγόμενη ενέργεια από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (G_t) και η θερμοκρασία λειτουργίας του (T_m). Η μεταβολή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (G_t) προκαλεί ανάλογη μεταβολή στην τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{SC}), ενώ η τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{OC}) και η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος (V_M) επηρεάζονται πολύ λιγότερο. Απόρροια των ανωτέρω, είναι η σχεδόν αναλογική σχέση μεταξύ της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος του φωτοβολταϊκού πλαισίου (P_M) και της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας (G_t), υπό την προϋπόθεση της διατήρησης σταθερών τιμών για τη θερμοκρασία λειτουργίας του (T_m). Εν αντιθέσει, η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_m) επηρεάζει κυρίως την τάση εξόδου (V) του. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_m), οδηγεί στην αύξηση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{OC}), και της τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος (V_M), ενώ η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{SC}) και του ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος (I_M) του φωτοβολταϊκού πλαισίου μειώνονται ελαφρά [*Kalogirou*, 2009]. Συνολικά, η αποδιδόμενη ηλεκτρικής ισχύς από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (P_M) μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του (T_m), γεγονός που τεκμηριώνει την ανάπτυξη τεχνικών ψύξης για φωτοβολταϊκά πλαίσια [*Savvakis et al.*, 2020].



Εικόνα 5-4: Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική καμπύλη ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

[*Meral* και *Dinçer*, 2011]

5.5 Αξιολόγηση μοντέλου ενεργειακού ισοζυγίου

5.5.1 Κλίμακες χαρακτηρισμού των περιβαλλοντικών συνθηκών

Γενικά, η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και των θεωρητικών εκτιμήσεων από εμπειρικά μοντέλα λαμβάνει χώρα σε σχέση με τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες των επιλεχθέντων χαρακτηριστικών ημερών, κατά τη διάρκεια της Α' και της Β' φάσης διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων. Κατά συνέπεια, η αναφορά στις κλίμακες χαρακτηρισμού των συνθηκών που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, βάσει των μέσων ημερήσιων τιμών των αντίστοιχών κλιματικών παραμέτρων κρίνεται σκόπιμή πριν την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Εποχή	***Περίοδος έτους***
Χειμώνας	1 Δεκεμβρίου - 28 Φεβρουαρίου
Άνοιξη	1 Μαρτίου - 31 Μαΐου
Καλοκαίρι	1 Ιουνίου - 31 Αυγούστου
Φθινόπωρο	1 Σεπτεμβρίου - 30 Νοεμβρίου

Πίνακας 5-2: Διαχωρισμός του έτους σε εποχές

Χαρακτηρισμός ημέρας	***Δείκτης αιθριότητας (K_t)***
Αίθρια	≥0,65
Συνθήκες αραιής συννεφιάς	0,5-0,65
Νεφελώδης ημέρα	0,35-0,5
Βροχερή ήμερα	<0,35

Πίνακας 5-3: Χαρακτηρισμός ημέρας βάσει του δείκτη αιθριότητας.

ΚΛΙΜΑΚΑ BEAUFORT	***Χαρακτηρισμός***	***Ταχύτητα ανέμου (v_w)***		
B		m/s	km/h	κόμβοι
0	*Άπνοια*	0-0,2	< 1	< 1
1	*Σχεδόν άπνοια*	0,3-1,5	1-5	< 1
2	*Πολύ ασθενής*	1,6-3,3	6-11	4-6
3	*Ασθενής*	3,4-5,4	12-19	7-10
4	*Σχεδόν μέτριος*	5,5-7,9	20-28	11-16
5	*Μέτριος*	8,0-10,7	29-38	17-21
6	*Ισχυρός*	10,8-13,8	39-49	22-27
7	*Πολύ ισχυρός*	13,9-17,1	50-61	28-33
8	*Θυελλώδης*	17,2-20,7	62-74	34-40
9	*Πολύ θυελλώδης*	20,8-24,4	75-88	41-47
10	*Θύελλα*	24,5-28,4	89-102	48-55
11	*Ισχυρή θύελλα*	28,5-32,6	103-117	56-63
12	*Τυφώνας*	≥ 32,7	≥ 118	≥ 64

Πίνακας 5-4: Διαχωρισμός της έντασης του ανέμου βάσει της κλίμακας Beaufort.

[*ΕΜΥ*, 2020]

5.5.2 Μεθοδολογία αξιολόγησης της απόδοσης των μοντέλων

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι προβλέψεις των μοντέλων περιέχουν σφάλματα και δεν μπορούν εύλογα να προσδιοριστούν ως απολυτά ακριβείς. Ωστόσο, ανάλογα με την εφαρμογή, η ευαισθησία στα σφάλματα διαφέρει σημαντικά. Ο προσδιορισμός της αβεβαιότητας αποτελεί ζήτημα βαρύνουσας σημασίας για κάθε διαδικασία πρόβλεψης, όχι μόνο για την αποτίμηση της λειτουργίας της επιλεγμένης προσέγγισης, αλλά και για την απόκτηση μιας βαθύτερης κατανόησης των χαρακτηριστικών της. Σε γενικές γραμμές, δύναται να αναγνωριστούν τρείς (3) τύποι "καλής" εφαρμογής για τα μοντέλα πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (T_m): i. οι προβλέψεις λαμβάνουν υπόψη τις σχετικές υποθέσεις των δημιουργών ενός μοντέλου (δηλ. συνέπεια-consistency προς τον τρόπο εφαρμογής του), ii. η ποιότητα (quality) που εκφράζει τη συμφωνία μεταξύ των προβλεπόμενων και των πειραματικών τιμών, και iii. η αξία (value), η οποία σχετίζεται άμεσα με την εφαρμογή της πρόβλεψης και περιγράφει τα οφέλη που προκύπτουν από τη χρησιμοποίηση της πρόβλεψης σε διαδικασίες λήψης αποφάσεων.

Η εκτίμηση της ποιότητας των προβλέψεων μπορεί να θεωρηθεί ως κάτι κοινότοπο, δεδομένου ότι δύνανται να συγκριθούν άμεσα με τις καταγεγραμμένες μετρήσεις, ωστόσο μια σειρά κριτηρίων είναι διαθέσιμα, τα οποία, συστήνεται να εφαρμοστούν και να σχεδιαστούν με τρόπο, ώστε να ληφθούν αξιόπιστα συμπεράσματα. Εν προκειμένω, η μεθοδολογία αξιολόγησης της ακρίβειας των προβλέψεων υλοποιείται σε δύο (2) στάδια. Κατά το 1ο στάδιο, οι εκτιμώμενες τιμές της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων μέσω της εφαρμογής των θεωρητικών και εμπειρικών μοντέλων, για τις δεδομένες συνθήκες, υπόκεινται σε γραφική σύγκριση με τις τιμές που προήλθαν από το σύστημα παρακολούθησης. Στο 2ο στάδιο, ο υπολογισμός της απόδοσης των εξεταζόμενων μοντέλων, ανακύπτει από την εκτίμηση των αντίστοιχων δεικτών καλής προσαρμογής. Στην παρούσα μελέτη, ως κατάλληλοι δείκτες για τον έλεγχο της επάρκειας των προβλέψεων θεωρήθηκαν το μέσο σφάλμα μεροληψίας (*MBE, %*), το μέσο απόλυτο σφάλμα (*MAE-%*) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (*RMSE, %*):

- $MBE(\%) = 100 * \frac{\frac{1}{N}*\sum_{i=1}^{N}(S_i - E_i)}{\frac{1}{N}*\sum_{i=1}^{N}(Ei)}$
- $MAE(\%) = 100 * \frac{\frac{1}{N}*\sum_{i=1}^{N}|S_i - E_i|}{\frac{1}{N}*\sum_{i=1}^{N}(Ei)}$ [5.33]
- $RMSE(\%) = 100 * \frac{\sqrt{\frac{1}{N}*\sum_{i=1}^{N}(S_i - E_i)^2}}{\frac{1}{N}*\sum_{i=1}^{N}(Ei)}$

όπου,

N: ο αριθμός των μετρήσεων

S_i : η *i (i=1,2,3..)* εκτιμώμενη τιμή από το μοντέλο υπολογισμού

E_i: η *i (i=1,2,3..)* τιμή που λαμβάνεται από την πειραματική μέτρηση μιας παραμέτρου

5.6 Ανάπτυξη εμπειρικού μοντέλου πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των συστημάτων PV+PCM

Πολλές φορές, κατά την αξιολόγηση των διαφόρων μοντέλων πρόβλεψης, προκύπτει το ερώτημα αν επιλέχθηκε η πιο ενδεδειγμένη μέθοδος-μοντέλο, καθότι συχνά παρατηρείται το φαινόμενο ένα (1) μοντέλο να προσαρμόζεται καλύτερα ως προς κάποια συγκεκριμένη συνθήκη, αλλά να μην εμφανίζει την ίδια επάρκεια ως προς κάποια άλλη. Συνηθισμένη πρακτική, ώστε να ξεπεραστούν οι σχετικές αβεβαιότητες, αποτελεί η ανάπτυξη ενός "νέου" εμπειρικού μοντέλου. Εν προκειμένω, για τις δεδομένες συνθήκες τυπικών ημερών που αποτελούν περίπου το 70% του συνόλου (K_t≥0,5), διαμορφώνονται κατάλληλα γραμμικά μοντέλα σύμφωνα με τις βασικές αρχές της στατιστικής ανάλυσης. Για την επεξεργασία δεδομένων, αξιοποιήθηκαν οι δυνατότητες του λογισμικού υπολογιστικών φύλλων Microsoft Excel. Επιγραμματικά, τα βήματα για τη μοντελοποίηση (πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση) της θερμοκρασίας λειτουργίας των συστημάτων PV+PCM, που αναπτύχθηκαν βάσει της 2ης σχεδιαστικής προσέγγισης, ήταν:

- Επιλογή ανεξάρτητών μεταβλητών και μεθόδου ανάλυσης,
- Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση,
- Έλεγχος προσαρμογής του μοντέλου,
- Έλεγχος σημαντικότητας του μοντέλου - Ανάλυση διακύμανσης του μοντέλου (πίνακας ANOVA),
- Έλεγχος των συντελεστών μερικής παλινδρόμησης,
- Ερμηνεία του μοντέλου,
- Γραφική ανάλυση του μοντέλου.

Ειδικότερα, λαμβάνοντας υπόψη τις σχεδιαστικές λεπτομέρειες των συστημάτων PV+PCM, (π.χ. ποσότητα χρησιμοποιούμενου PCM, μορφή του δοχείου αποθήκευσης του PCM, κλπ.), ένα εμπειρικό μοντέλο πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας ($T_{mb\ (PV+PCM)}$) αναπτύχθηκε μέσω της στατιστικής μεθόδου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Πιο συγκεκριμένα, η γραμμική εξίσωση για την εκτίμηση της εξαρτημένης μεταβλητής ($T_{mb\ (PV+PCM)}$), χρησιμοποιώντας τρεις ανεξάρτητες μεταβλητές X_1, X_2 και X_3 που αντιπροσωπεύουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G_t), τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος (Ta) και την ταχύτητα ανέμου (v_W), αντίστοιχα, μπορεί να δοθεί σε μια γενική μορφή, ως εξής:

- $y_i = b_0 + b_1 \cdot x_{i,1} + b_2 \cdot x_{i,2} + \cdots + b_{k-1} \cdot x_{i,k-1} + e_i$ [5.34]

όπου,

y_i: η προβλεπόμενη τιμή για τη θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{mb\ (PV+PCM)}$), θεωρώντας i_{th} πειραματικό σφάλμα $e_i \sim N(0,\sigma^2)$

[*Savvakis* και *Tsoutsos*, 2015; *Charles Lawrence Kamuyu et al*., 2018]

Αντίστοιχα, το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να περιγράφει ως εξής:

- $T_{mb\ (PV+PCM)} = b_0 + b_1 \cdot G_t + b_2 \cdot Ta + b_3 \cdot v_W$ [5.35]

όπου, b_0, b_1, b_2, b_3, οι σχετικοί συντελεστές παλινδρόμησης για το μοντέλο

Κεφάλαιο 6 : ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ Α' ΦΑΣΗΣ

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την ολοκλήρωση της 1ης περιόδου πειραματικής αξιολόγησης, ενώ παράλληλα λαμβάνει χώρα η συγκριτική ανάλυση των τιμών των εξεταζόμενων παραμέτρων για τα ελεγχόμενα φωτοβολταϊκά πλαίσια της πειραματικής διάταξης (δηλ. περίπτωση αναφοράς, σύστημα PV+PCM). Σημειώνεται δε, ότι η διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων πεδίου, η διαδικασία συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων και η ανάλυση των αποτελεσμάτων είχαν υλοποιηθεί σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές που ορίζονται από τη διεθνή εμπειρία σε ανάλογες επιστημονικές μελέτες και το διεθνές πρότυπο IEC 61724, διασφαλίζοντας την ακρίβεια και την αξιοπιστία τους. Για την επίτευξη των στόχων της μελέτης, οι κύριες παράμετροι ελέγχου (μετεωρολογικές, θερμικές και ενεργειακές) καταγράφηκαν και αναλύθηκαν σύμφωνα με την ανεπτυγμένη μεθοδολογία, ώστε να καταστεί εφικτή η ολοκληρωμένη αξιολόγηση της εξεταζόμενης εφαρμογής και να προκύψουν κατάλληλα συμπεράσματα.

Εικόνα 6-1 Κοντινή άποψη της εξεταζόμενης πειραματικής διάταξης κατά τη Α' φάση μετρήσεων.

6.2 Τοπικά Κλιματικά δεδομένα

6.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Γενικά, η ενεργειακή απόδοση ενός κεκλιμένου συλλέκτη (π.χ. φωτοβολταϊκού πλαισίου) εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο επίπεδο της συλλεκτικής επιφάνειας του. Στο πλαίσιο της διεξαχθείσας πειραματικής διαδικασίας, οι καταγεγραμμένες, ανά 10 min, τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο (G_h) και το κεκλιμένο επίπεδο (G_t) αποτέλεσαν τη βάση προσδιορισμού του ηλιακού

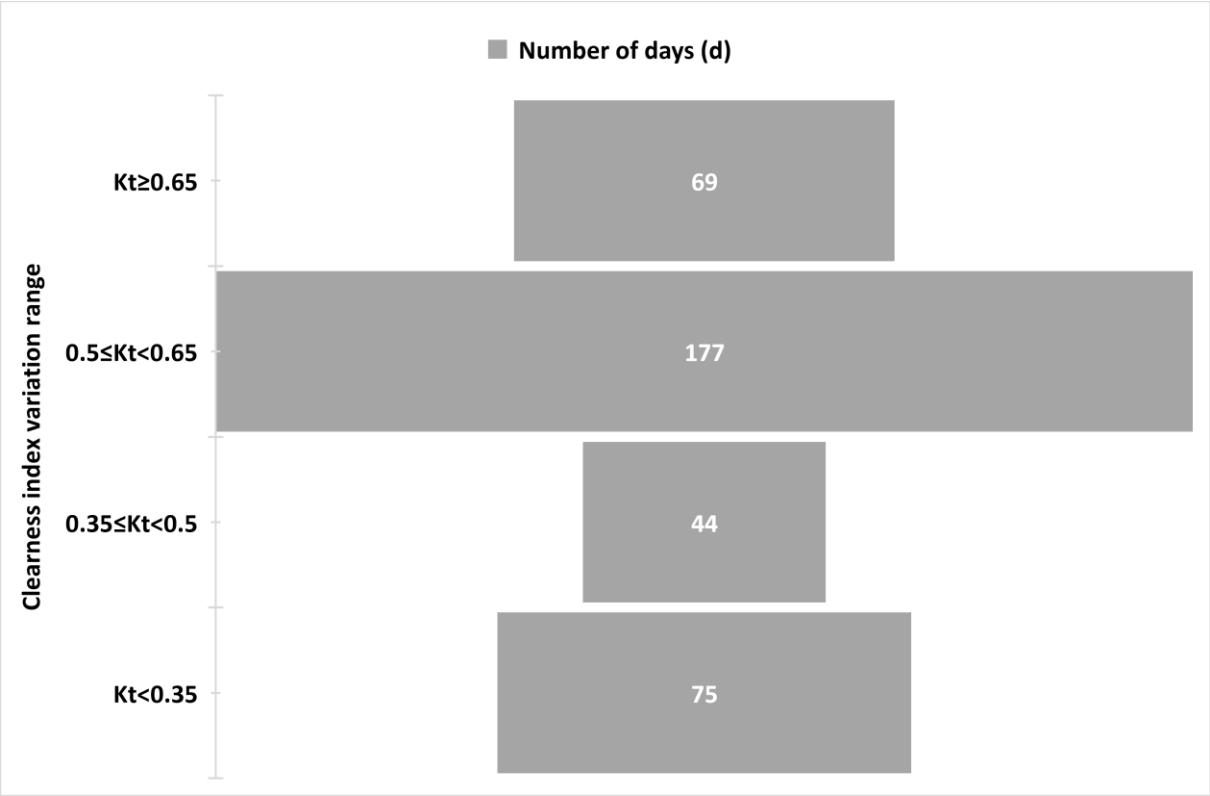
δυναμικού στη θέση εγκατάστασης της πειραματικής διάταξης. Ειδικότερα, οι πειραματικές μετρήσεις της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας (*G, G_t*) αξιοποιήθηκαν περαιτέρω, μέσω κατάλληλης υπολογιστικής επεξεργασίας, για την εκτίμηση της μέσης ημερήσιας ενεργειακής απολαβής από τον Ήλιο ($\overline{H}_h$, $\overline{H}_t$) και τη δημιουργία βάσης δευτερογενών δεδομένων. Στον Πίνακα 6-1, συνοψίζονται οι τιμές που αφορούν το μηνιαίο μέσο όρο της ημερήσιας ενεργειακής απολαβής ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο ($\overline{H}_t$) και το οριζόντιο ($\overline{H}_h$) επίπεδο και το συντελεστή αιθριότητας ($\overline{K}_t$) για την περίοδο πειραματικής αξιολόγησης (Ιούλιος 2016 - Ιούνιος 2017), όπως επίσης και τα συναφή κλιματικά στοιχεία μακρόχρονης παρατήρησης (χρονική περίοδο 1958-2001) από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ) για την περιοχή μελέτης.

Μήνας	**1η περίοδος πειραματικής αξιολόγησης (Ιούλιος 2016 – Ιούνιος 2017)**			**ΤΟΤΕΕ (Χρονική περίοδος: 1958-2001)**	
	$\overline{H}_t$	$\overline{H}_h$	$\overline{K}_t$	$\overline{H}_h$	$\overline{K}_t$
	kWh/m²/d		**-**	**kWh/m²/d**	**-**
Ιούλιος	7,37	7,58	0,64	7,26	0,64
Αύγουστος	6,92	6,12	0,59	6,61	0,64
Σεπτέμβριος	6,86	5,00	0,57	5,37	0,61
Οκτώβριος	5,59	3,42	0,49	3,58	0,52
Νοέμβριος	4,50	2,93	0,55	2,60	0,50
Δεκέμβριος	2,97	1,90	0,40	1,90	0,41
Ιανουάριος	2,36	1,47	0,30	2,21	0,40
Φεβρουάριος	3,83	2,63	0,42	2,58	0,42
Μάρτιος	4,70	3,70	0,45	4,00	0,49
Απρίλιος	5,93	5,60	0,56	5,57	0,56
Μάιος	6,06	6,33	0,57	6,84	0,62
Ιούνιος	6,48	7,02	0,61	7,33	0,63
Ετήσιος Μέσος όρος	5,30	4,48	0,51	4,65	0,54

Πίνακας 6-1: Συγκριτικός πίνακας μέσων μηνιαίων τιμών των παραμέτρων: ημερήσια ενεργειακή απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο ($\overline{H}_t$) και το οριζόντιο ($\overline{H}_h$) επίπεδο, συντελεστή αιθριότητας ($\overline{K}_t$) για τις περιόδους αναφοράς Ιουλίου 2016 - Ιουνίου 2017 και 1958 - 2001.

Σύμφωνα με τα δεδομένα της πειραματικής μελέτης, η ετήσια μέση ημερήσια ενεργειακή απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο ($\overline{H}_{h,y}$) και το κεκλιμένο ($\overline{H}_{t,y}$) επίπεδο ήταν 4,48 kWh/m²/d και 5,30 kWh/m²/d, αντίστοιχα. Επιπλέον, η μηνιαία μέση ημερήσια ενεργειακή απολαβή από τον Ήλιο στο επίπεδο της κεκλιμένης επιφάνειας ($\overline{H}_t$) κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 2,36 kWh/m²/d (Ιανουάριος 2016) και 7,37 kWh/m²/d (Ιούλιος 2016). Αναλυτικά, κατά τους θερινούς μήνες της περιόδου πειραματικής αξιολόγησης (Ιουλίου 2016 - Ιουνίου 2017), η μηνιαία μέση ημερήσια τιμή της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας στην επιφάνεια της πειραματικής διάταξης ($\overline{H}_t$) κυμαίνονταν από 6,48 kWh/m²/d έως 7,37 kWh/m²/d, κατά του χειμερινούς από 2,36 kWh/m²/d έως 3,83 kWh/m²/d, κατά τους φθινοπωρινούς από 4,50 kWh/m²/d έως 6,86 kWh/m²/d και τους ανοιξιάτικους από 4,70 kWh/m²/d έως 6,06 kWh/m²/d.

Το μεγαλύτερο εύρος διακύμανσης των τιμών της μηνιαίας μέσης ημερήσιας ενεργειακή απολαβής από τον Ήλιο ($\overline{H}_t$), που εντοπίζεται κυρίως την περίοδο της άνοιξης και του φθινοπώρου, έγκειται στην υψηλότερη εποχική μεταβλητότητα και τεκμηριώνεται από τη διακύμανση του δείκτη αιθριότητας ($\overline{K}_t$) κατά τις αντίστοιχες περιόδους αναφοράς. Ακόμη, η μηνιαία μέση ημερήσια ενεργειακή απολαβή στο οριζόντιο επίπεδο ($\overline{H}_h$) παρατηρήθηκε εντός του εύρους διακύμανσης 1,47-7,37 kWh/m^2/d, ενώ παρουσιάζει σχετική σύγκλιση με τις αντίστοιχες τιμές μακρόχρονης παρατήρησης υποδεικνύοντας μια σχετική σταθερότητα των ηλιακών δεδομένων στην περιοχή μελέτης.

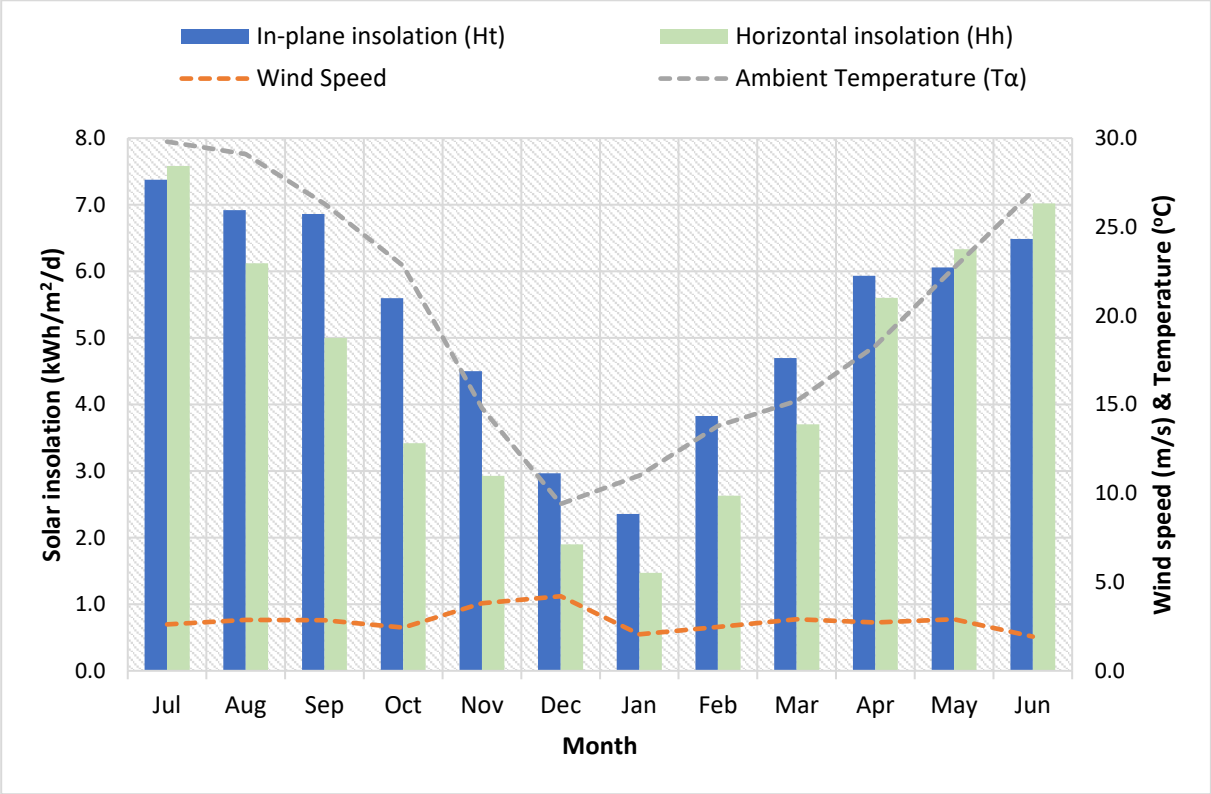


Διάγραμμα 6-1: Συχνότητα εμφάνισης συνθηκών αιθριότητας κατά την περίοδο παρακολούθησης Ιουλίου 2016 – Ιουνίου 2017.

Στο Διάγραμμα 6-1, παρουσιάζεται η κατανομή των συχνοτήτων εμφάνισης αίθριων (K_t≥0,65), σχεδόν αίθριων (0,5≤K_t<0,65), νεφελωδών (0,35≤K_t<0,5) ή βροχερών συνθηκών (K_t<0,35), ως ο αριθμός των ημερών εντός προκαθορισμένου εύρους τιμών του δείκτη αιθριότητας για τη περίοδο Ιουλίου 2016 - Ιουνίου 2017. Ειδικότερα, στην περιοχή μελέτης καταγράφηκαν αίθριες ή σχεδόν αίθριες συνθήκες για 245 d από τις 365 d της εξεταζόμενης περιόδου, τιμή που αναλογεί σε ποσοστό 67,4% του συνόλου. Ακόμη, παρατηρήθηκαν νεφελώδεις και βροχερές συνθήκες για 44 d και 75 d, αντίστοιχα, με τις τιμές αυτές να αναλογούν σε ποσοστά 12% και 20% επί του συνολικού αριθμού των ημερών παρακολούθησης.

6.2.2 Θερμοκρασία περιβάλλοντος, Ταχύτητα ανέμου

Στο Διάγραμμα 6-2 απεικονίζεται η μεταβολή των μηνιαίων μέσων τιμών για την ημερήσια απολαβή ηλιακής ενέργειας στο κεκλιμένο ($\overline{H}_t$) και το οριζόντιο ($\overline{H}_h$) επίπεδο, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος ($Ta_{,m}$) και την ταχύτητα ανέμου ($v_{w,m}$), οι οποίες παρατηρήθηκαν για τις ώρες διεξαγωγής των πειραματικών μετρήσεων κατά την περίοδο αναφοράς (Ιουλίου 2016 - Ιουνίου 2017). Βάσει των πειραματικών δεδομένων που προκύπτουν, η μέση μηνιαία τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ($Ta_{,m}$) κυμάνθηκε μεταξύ 9,4 ^{o}C, τον Δεκέμβριος του 2016, και 29,8 ^{o}C, τον Ιούλιο του 2016, ενώ η ετήσια μέση τιμή της ($Ta_{,y}$) ήταν 20,1 ^{o}C. Επιπλέον, η μηνιαία μέση ταχύτητα του ανέμου ($v_{w,y}$) παρατηρήθηκε κυρίως μεταξύ 2,1-2,9 m/s, με εξαίρεση τις τιμές 3,8 m/s και 4,2 m/s που σημειώθηκαν τον Νοέμβριο και τον Δεκέμβριο του έτους 2016, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 6-2: Μεταβολή της μηνιαίας μέσης ημερήσιας ενεργειακής απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο ($\overline{H}_t$) και το οριζόντιο ($\overline{H}_h$) επίπεδο, θερμοκρασία περιβάλλοντος ($Ta_{,m}$) και της ταχύτητας ανέμου ($v_{w,m}$) κατά τις ώρες διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων την περίοδο Ιουλίου 2016 - Ιουνίου 2017.

6.3 Συνθήκες λειτουργίας φωτοβολταϊκής πειραματικής διάταξης

Η θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (T_m) αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την τελική απόδοση κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος και εξαρτάται άμεσα από τις τοπικές κλιματικές συνθήκες (ταχύτητα ανέμου, θερμοκρασία περιβάλλοντος, ηλιακή ακτινοβολία). Στην εξεταζόμενη περίπτωση, τέσσερις (4) αισθητήρες θερμοκρασίας (θερμοζεύγη), οι οποίοι ήταν συνδεδεμένοι σε ψηφιακό θερμόμετρο καταγραφής δεδομένων και βρίσκονταν τοποθετημένοι στην οπίσθια επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης, παρείχαν τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τις θερμοκρασίες λειτουργίας του

φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) και του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) κατά την περίοδο παρακολούθησης του. Επιπλέον, τα στοιχεία για τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες προήλθαν από σύγχρονο μετεωρολογικό σταθμό εγκατεστημένο στους χώρους του Πολυτεχνείου Κρήτης και σε κοντινή θέση σε σχέση με το σημείο εγκατάστασης της εξεταζόμενης πειραματικής διάταξης.

Στον Πίνακα 6-2 συνοψίζονται τα κύρια αποτελέσματα όσον αφορά την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G_t), τη θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T\alpha$), τη θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) και του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) και τη ταχύτητα ανέμου ($v_{w,}$) κατά τις ώρες διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας στη διάρκεια της 1ης περιόδου αξιολόγησης (Ιούλιος 2016 – Ιούνιος 2017). Σύμφωνα με τα καταγεγραμμένα στοιχεία, η ετήσια μέση ημερήσια τιμή της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference),y}$) και του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM),y}$) ήταν 38,1 ^oC και 32,6 ^oC, αντίστοιχα. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι οι μέγιστες καταγεγραμμένες τιμές για τη θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου με και χωρίς PCM ($T_{m\ (PV+PCM),peak}$ και $T_{m\ (PV\ reference),peak}$) εντοπίστηκαν ίσες με 71,9 ^oC και 69,9 ^oC τον Αύγουστο και τον Ιούλιο του έτους 2016, αντίστοιχα. Κατά τους ίδιους μήνες, οι τιμές για τη μηναία μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T\alpha_{,mo}$) εντοπίστηκαν ίσες με 29,1 ^oC και 29,8 ^oC, αντίστοιχα. Γενικά, τους θερινούς μήνες της περιόδου επιτήρησης, το εύρος διακύμανσης της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($T_{m\ (PV+PCM)_avg}$ και $T_{m\ (PV\ reference)_avg}$) ήταν 37,9-48,2 ^oC και 46,5-51,7 ^oC για τις θερμοκρασιακές συνθήκες περιβάλλοντος ($T\alpha_{,mo}$) που κυμάνθηκαν μεταξύ 27,0 ^oC και 29,8 ^oC, ενώ τους χειμερινούς ήταν 18,1-26,6 ^oC και 19,4-31,7 ^oC για τις συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος 9,4-14,3 ^oC. Τέλος, η σύγκριση ανάμεσα στη μέση μηνιαία θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)\ _avg}$) και του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)_avg}$) υπέδειξε τη μέγιστη διαφορά (12,6 ^oC) τον Μάιο του 2017 και ελάχιστη (-0,8 ^oC) τον Δεκέμβριο του 2016.

6.3.1 Αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς της πειραματικής διάταξης

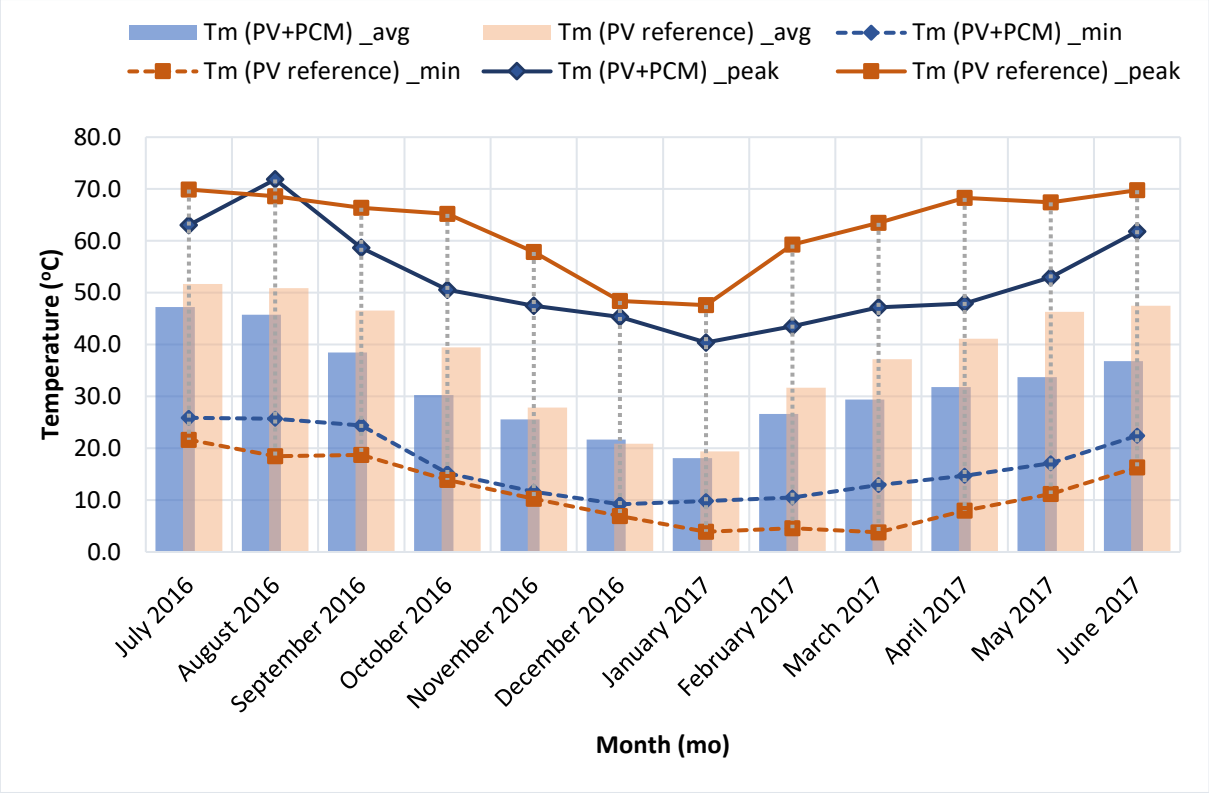
Στο πλαίσιο διερεύνησης του βαθμού επίδρασης της ενσωμάτωσης PCM στη θερμοκρασία λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_m), και κατ' επέκταση στην ενεργειακή απόδοση του (n_{ELEC}), εξετάστηκε ένας σημαντικός αριθμός δεδομένων που αφορούσαν την περίοδο Ιουλίου 2016 – Ιουνίου 2017, προκειμένου να εκτιμηθεί η απόκριση του συστήματος PV+PCM στις επικρατούσες συνθήκες του περιβάλλοντος στην περιοχή μελέτης. Στο Διάγραμμα 6-3 παρατίθενται γραφικά τα διαστήματα διακύμανσης των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) και του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) κατά τη διάρκεια της ελεγχόμενης περιόδου. Επιπλέον, η μέση και μέγιστη απόκλιση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_peak}$, $\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_avg}$), ως απόρροια της ένταξης του PCM, αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 6-4. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόκλιση μεταξύ των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_peak}$, $\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_avg}$) παρατηρήθηκε περιορισμένη ιδιαιτέρως κατά τους χειμερινούς και του καλοκαιρινούς μήνες, ενώ προσδιορίστηκε σαφώς υψηλότερη για τους μήνες της άνοιξης και του φθινοπώρου. Ειδικότερα, οι τιμές των σχετικών δεικτών $\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_peak}$, $\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_avg}$, για τον Δεκέμβριο του 2016, ήταν 9,4 °C και -0,8 °C,

οι οποίες παρατηρήθηκαν σημαντικά αυξημένες τον Μάιο του 2017, όπως προκύπτει από τις προσδιορισθείσες τιμές 26,1 °C και 12,6 °C, αντιστοίχως. Επίσης, η περιορισμένη απόκλιση που παρατηρήθηκε, κυρίως τον Ιούλιο και τον Αύγουστο του 2016, μπορεί να αποδοθεί στην πρώιμη τήξη του PCM κατά τις πρώτες πρωινές ώρες των καλοκαιρινών ημερών.

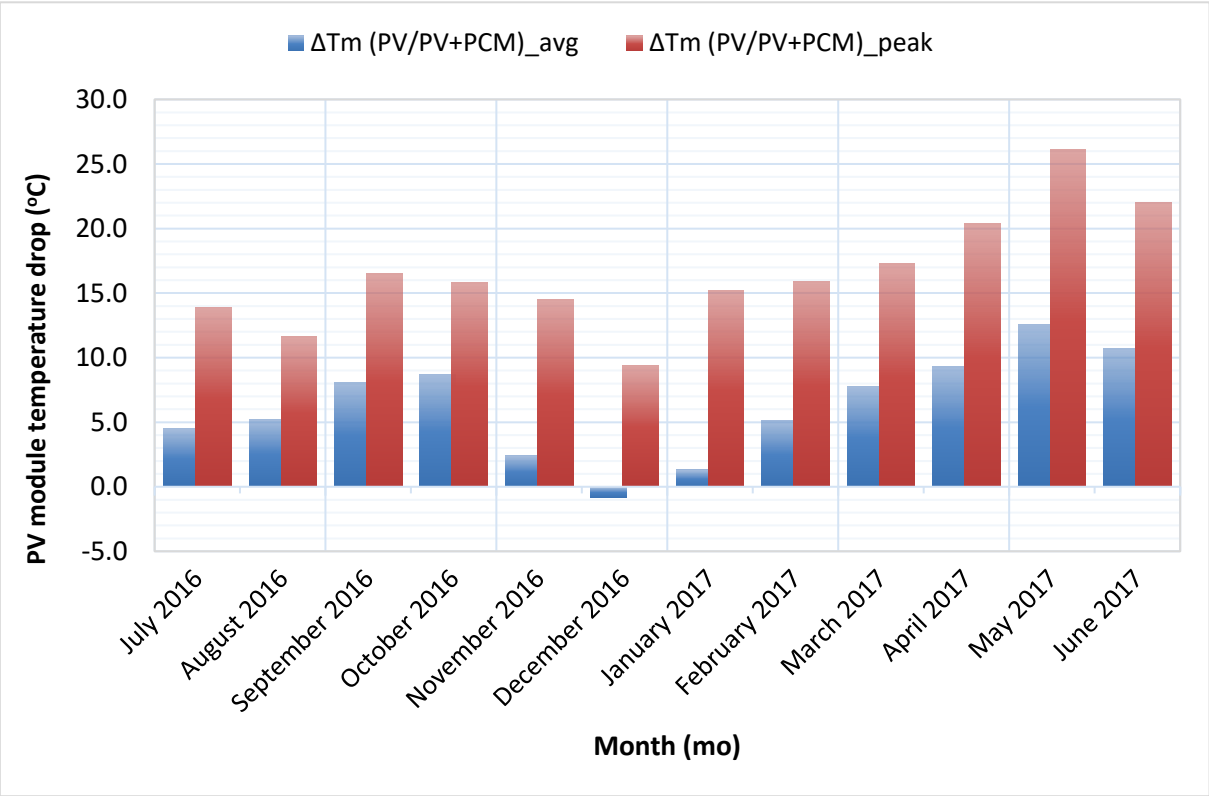
Στα διαγράμματα που ακολουθούν (Διάγραμμα 6-5 – Διάγραμμα 6-16), η ημερήσια διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_t), της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) και του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$), της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Ta) και της ταχύτητας ανέμου ($v_{w,}$), αναπαρίστανται γραφικά σε σχέση με το χρόνο για μια αντιπροσωπευτική ημέρα από κάθε ελεγχόμενο μήνα της περιόδου αναφοράς. Καθώς οι μετρήσεις που αφορούν στη θερμοκρασία λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων ελήφθησαν από δυο διαφορετικά σημεία της οπίσθιας πλευράς τους, οι καμπύλες που αναφέρονται στις κατατομές της θερμοκρασίας λειτουργίας φέρουν την ένδειξη "Higher point" και "Lower point".

	1η περίοδος πειραματικής αξιολόγησης (Ιούλιος 2016 – Ιούνιος 2017)											
	Μήνας	G_t		Ta		v_w		$T_{m\ (PV\ reference)}$		$T_{m\ (PV+PCM)}$		
		W/m²		***°C***		***m/s***		***°C***		***°C***		
		Peak	**Avg.**	**Peak**	**Avg.**	**Peak**	**Avg.**	**Peak**	**Avg.**	**Peak**	**Avg.**	
2016	*Ιούλιος*	1031	729	33,4	29,8	8,1	2,6	69,9	51,7	63,0	48,2	
	Αύγουστος	1014	711	32,0	29,1	5,8	2,9	68,6	50,9	71,9	46,7	
	Σεπτέμβριος	1009	659	30,4	26,3	7,1	2,9	66,4	45,6	58,6	39,2	
	Οκτώβριος	1012	624	27,3	22,8	7,6	2,4	65,2	39,5	50,5	30,3	
	Νοέμβριος	977	452	19,5	14,8	11,1	3,8	57,9	27,8	47,5	25,5	
	Δεκέμβριος	911	297	16,7	9,4	9,8	4,2	48,4	20,9	45,3	21,7	
2017	*Ιανουάριος*	875	229	18,4	11,0	7,6	2,3	47,6	19,4	40,4	18,1	
	Φεβρουάριος	953	304	21,8	14,3	7,6	2,5	59,3	31,7	43,5	26,6	
	Μάρτιος	1010	393	21,6	15,2	8,5	2,9	63,5	37,2	47,2	30,4	
	Απρίλιος	1039	523	27,6	18,3	7,5	2,7	68,3	40,1	48,9	31,8	
	Μάιος	1047	594	36,3	22,7	9,2	2,9	67,4	45,3	53,0	35,2	
	Ιούνιος	1021	687	40,2	27,0	6,7	1,9	69,8	46,5	61,8	37,9	
Μέσος όρος		991,6	516,8	27,1	20,1	8,1	2,8	62,7	38,1	52,6	32,6	

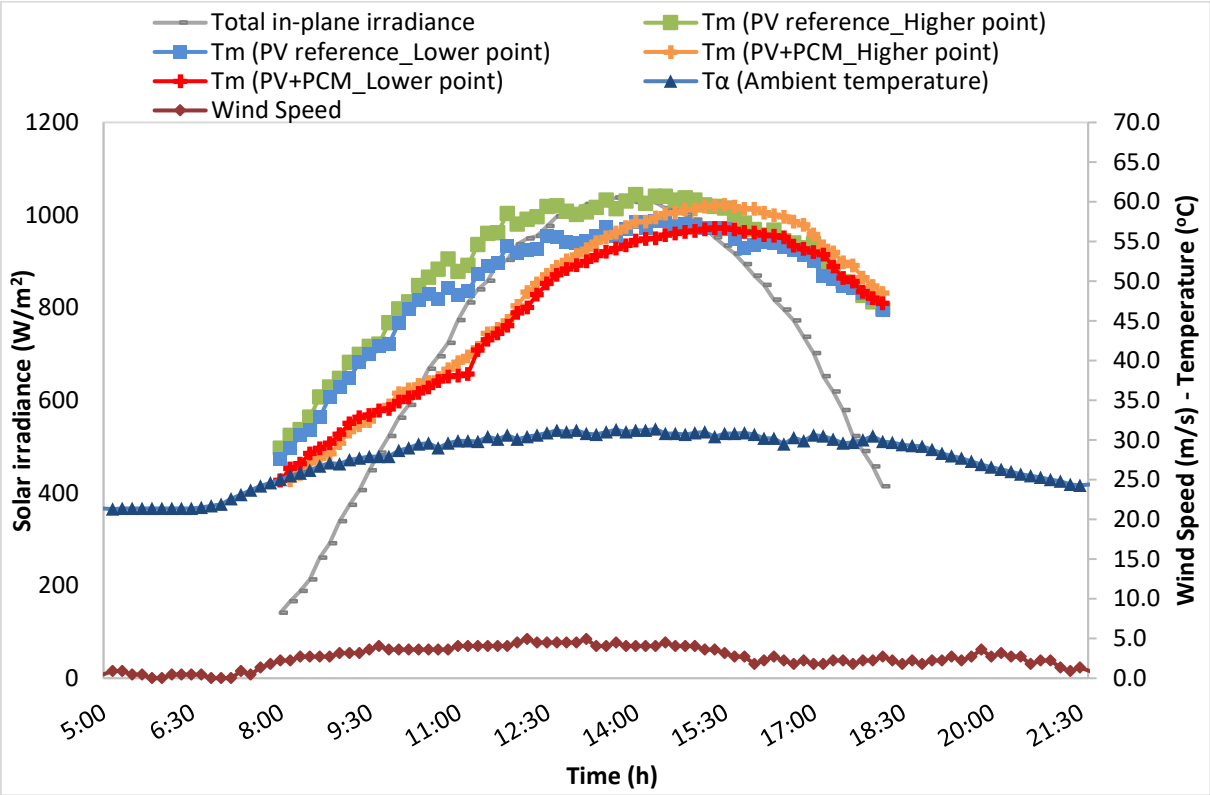
Πίνακας 6-2: Σύνοψη των βασικών μετεωρολογικών παραμέτρων (G_t, Ta, v_w) και των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας των εξεταζόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων ($T_{m\ (PV\ reference)}$, $T_{m\ (PV+PCM)}$) κατά τις ώρες διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας για την 1η περίοδο αξιολόγησης (Ιούλιος 2016 – Ιούνιος 2017).



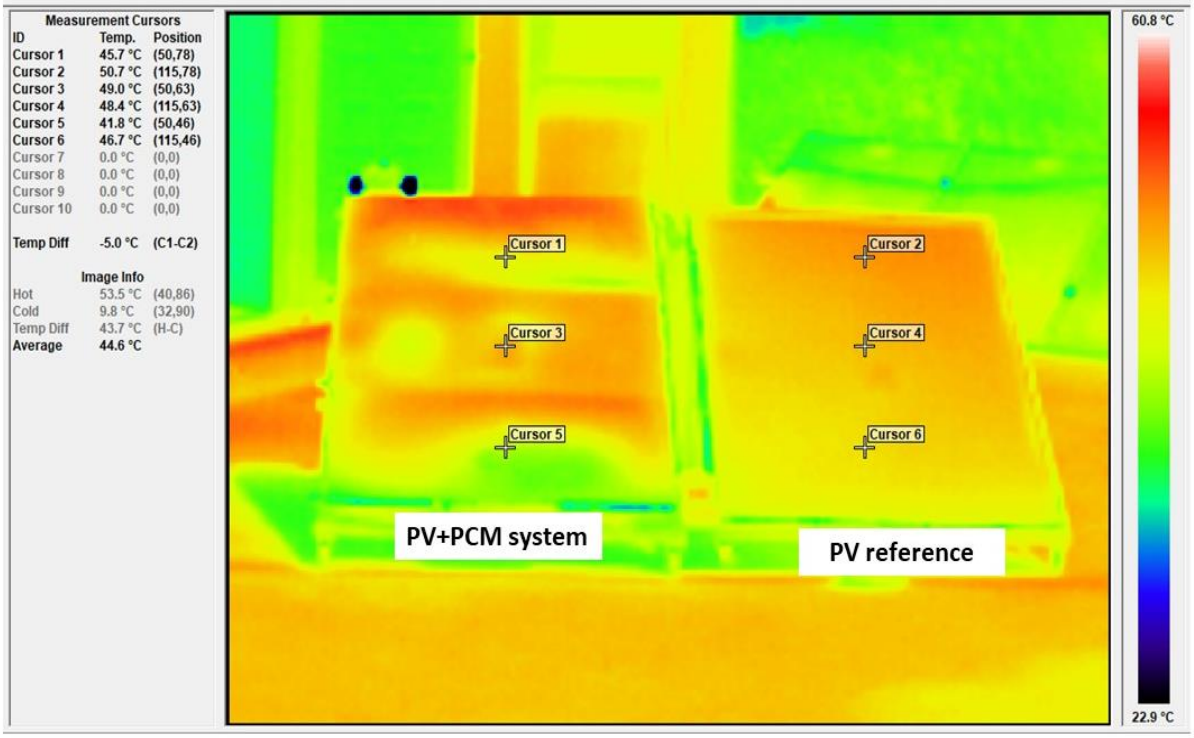
Διάγραμμα 6-3: Διακύμανση της μέσης μηνιαίας, της μέγιστης και της ελάχιστης στιγμιαίας θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (T_m) κατά τις ώρες διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας για την 1η περίοδο αξιολόγησης (Ιούλιος 2016 – Ιούνιος 2017).



Διάγραμμα 6-4: Μέση και μέγιστη απόκλιση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των εξεταζόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_peak}$, $\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_avg}$).



Διάγραμμα 6-5: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας (21/7/2016).



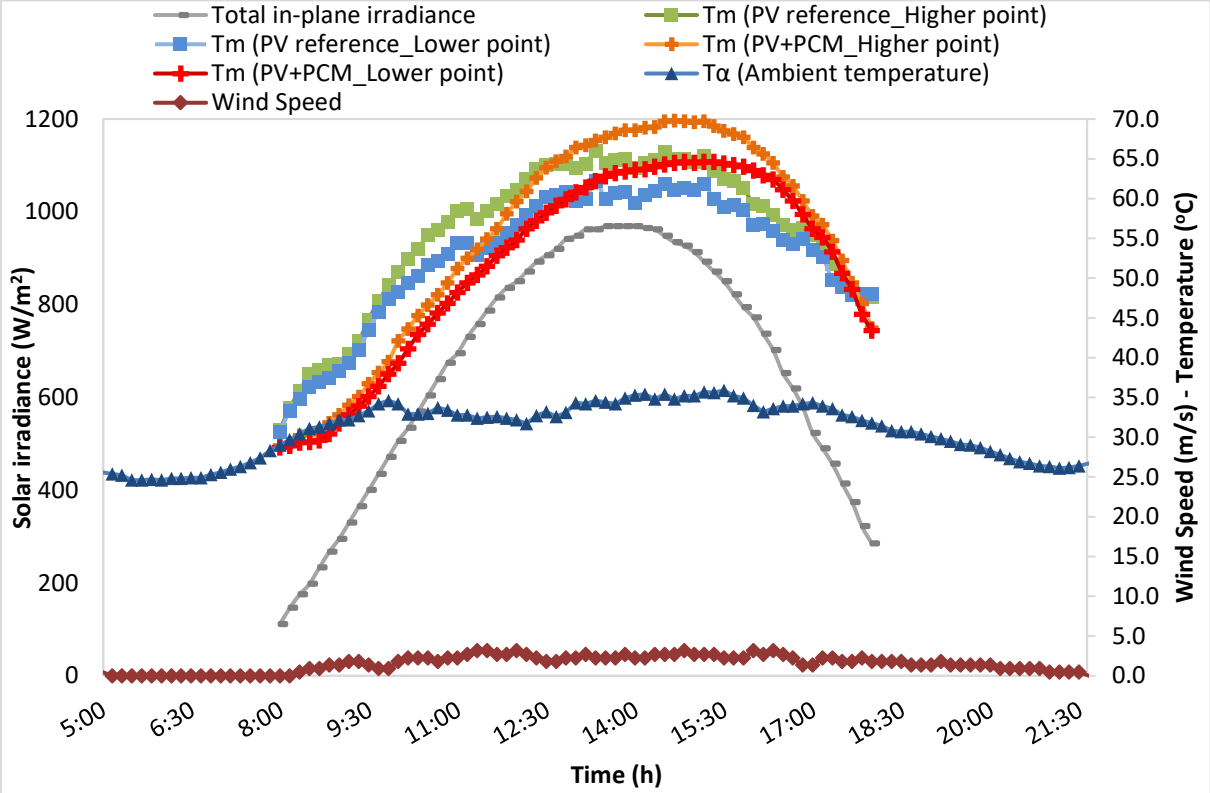
Εικόνα 6-2: Θερμική εικόνα της πειραματικής διάταξης (εμπρόσθια όψη) ληφθείσα στις 12:30 μ.μ., 21/7/2016.

Όπως διακρίνεται από το Διάγραμμα 6-5, η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) στο σημείο μέτρησης με ένδειξη "Higher point" αυξήθηκε σταδιακά με ρυθμό περίπου 6,7 ºC/h κατά τις πρωινές ώρες, από τους 28,9 ºC στις 8:00, μέχρι τους 59,4 ºC στις 12:30 (σε 4,5 h), και παρέμενε πάνω από τους 59 ºC για περίπου 3 h (μεταξύ 12:30 και 15:30). Η μέγιστη τιμή των 60,9 ºC καταγράφηκε στις 14:00, η οποία ήταν κατά 29,7 ºC υψηλότερη από την τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ($T\alpha$) την ίδια χρονική στιγμή. Οι αντίστοιχες τιμές της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) στο σημείο μέτρησης με ένδειξη "Lower point" καταγράφηκαν ελαφρώς μειωμένες, ενώ παρατηρείται ανάλογη διακύμανση.

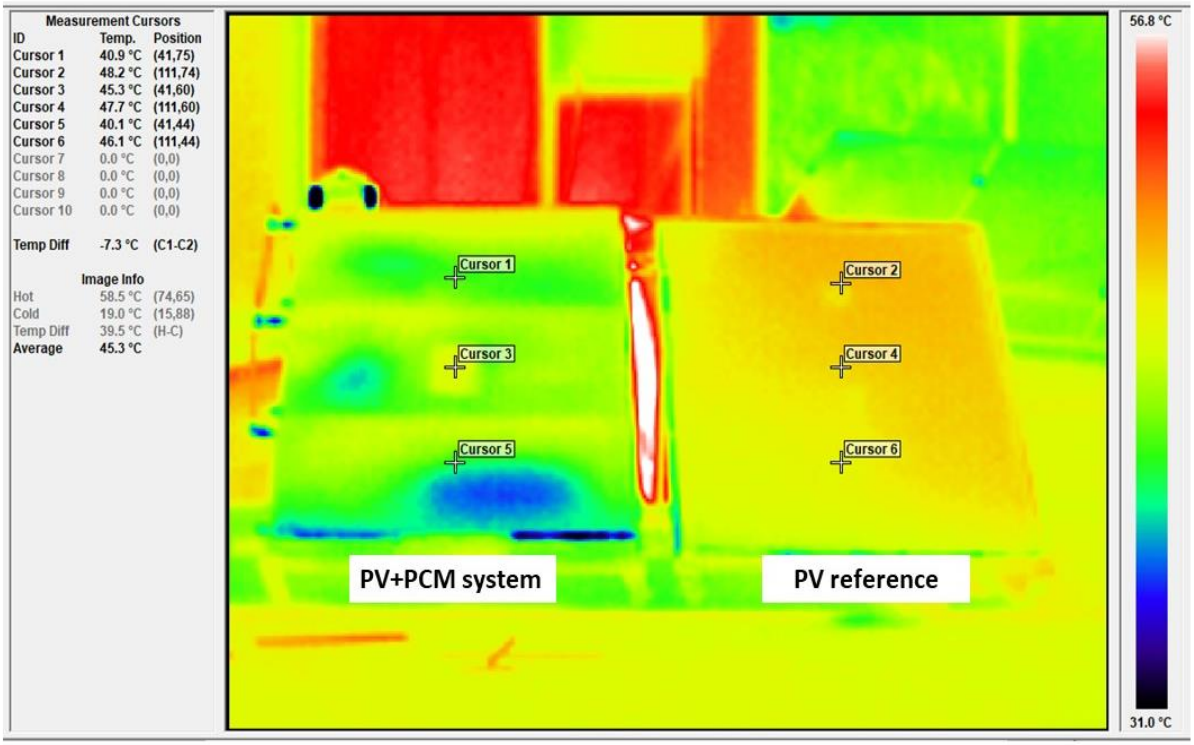
Αντίθετα, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) στο σημείο μέτρησης με ένδειξη "Higher point" σημειώθηκε μεταξύ τιμών 24,6 - 29,6 ºC από τις 8:00 έως τις 9:00 (Διάγραμμα 6-5). Ωστόσο, ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας του συστήματος PV+PCM αυξήθηκε κατά 1,2 ºC/h από τις 9:00 έως τις 12:30, λόγω της υψηλότερης ροής θερμότητας από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο προς το PCM. Στις 13:30, όταν η διαδικασία αλλαγής φάσης είχε ολοκληρωθεί, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) και του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) ήταν 55,5 ºC και 60,2 ºC, αντίστοιχα. Ακόμη, η μέγιστη επιτευχθείσα μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου λόγω της αξιοποίησης PCM ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_peak}$) κατά 13,9 ºC σημειώθηκε στις 10:50, ενώ η θερμοκρασιακή διαφορά ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)}$) μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξής παρέμενε θετική για περισσότερο από 4 h μετά τις 10:50. Η παραπάνω παρατήρηση εξηγείται εν μέρει από το γεγονός ότι ένας ασθενής βορειοδυτικός άνεμος, ο οποίος έπνεε κατά το ίδιο χρονικό διάστημα στην περιοχή μελέτης, συνέβαλλε για την απόρριψη μέρους της απορροφημένης θερμότητας από το PCM στο εξωτερικό περιβάλλον αυξάνοντας περαιτέρω τη δυνατότητα φόρτισης του. Έπειτα από την πλήρη φόρτιση του PCM, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) στο σημείο μέτρησης με ένδειξη "Higher point" παρατηρήθηκε υψηλότερη από τη θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) από τις 15:30 έως τις 18:00. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποδοθεί στον αθροιστικό αντίκτυπο της θερμικής μόνωσης που προκαλείται από το ορθογώνιο δοχείο αποθήκευσης PCM στην οπίσθια πλευρά του φωτοβολταϊκού πλαισίου του συστήματος PV+PCM, των υψηλών τιμών της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και τη σχετικής μείωση της ταχύτητας του ανέμου.

Συγκρίνοντας τις μέσες ημερήσιες τιμές για τη θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)_avg}$ στο σημείο με ένδειξη "Higher point": 52,1 ºC και $T_{m\ (PV\ reference)_avg}$ στο σημείο με ένδειξη "Lower point": 49,7 ºC) με τις αντίστοιχες τιμές που εκτιμήθηκαν για το σύστημα PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)_avg}$ στο σημείο με ένδειξη "Higher point": 47,2 ºC και $T_{m\ (PV+PCM)_avg}$ στο σημείο με ένδειξη "Lower point": 45,9 °C) διαπιστώθηκε ότι η εφαρμογή του PCM συνέβαλε για τη μείωση της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου περισσότερο από 4 ºC. Ως εκ τούτου, η χρήση PCM που χαρακτηρίζεται από σημείο τήξης ($T_{PCM,melt}$) ≥ 30 ºC θα μπορούσε να ενισχύσει περαιτέρω τη γενική θερμική απόκριση ενός συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου. Τέλος, η θερμική απεικόνιση της εμπρόσθιας όψης της πειραματικής διάταξης (Εικόνα 6-2)

υπέδειξε σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή και μέση διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων της ίση με 5 °C.

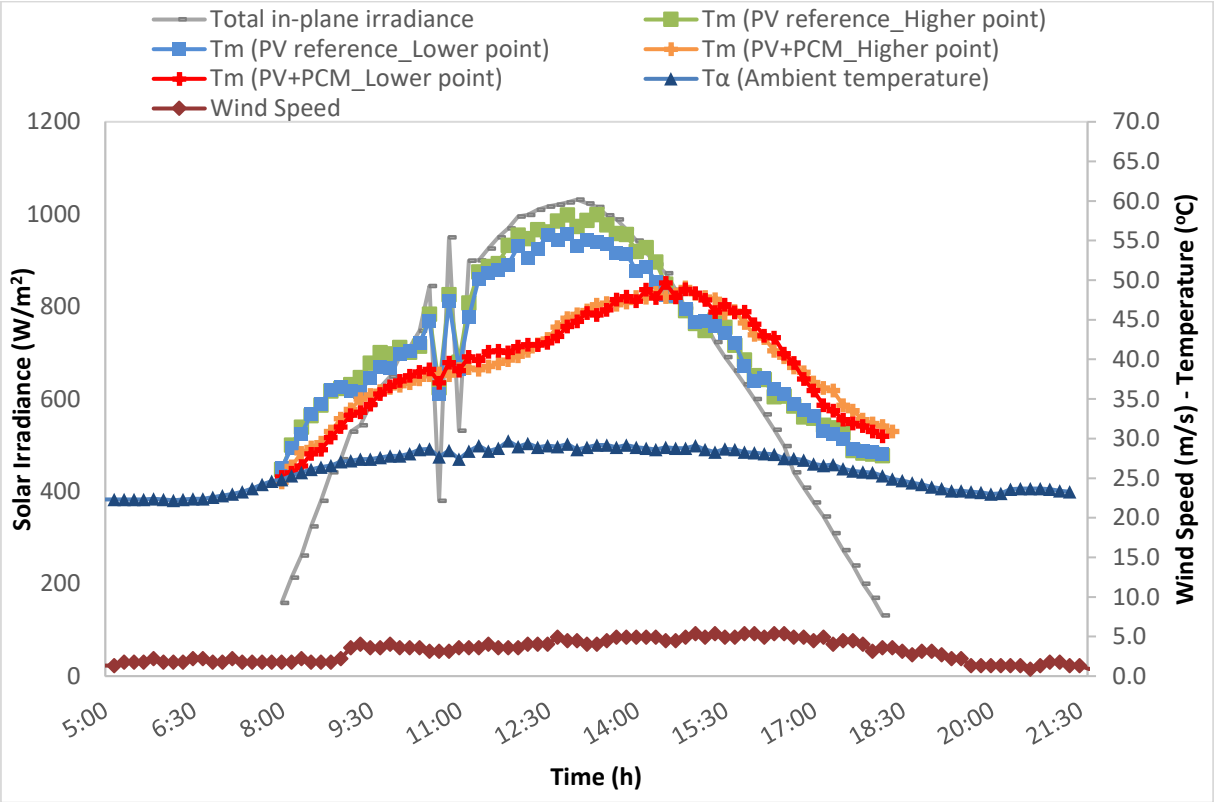


Διάγραμμα 6-6: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας (2/8/2016).

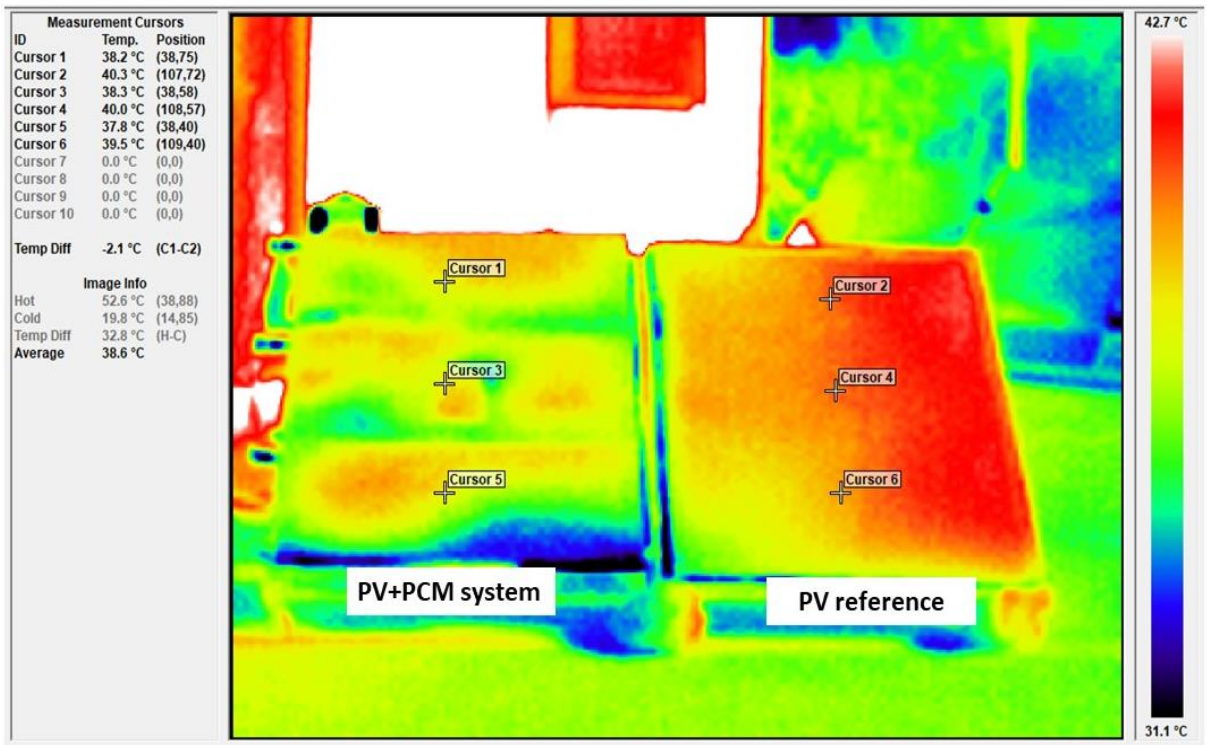


Εικόνα 6-3: Θερμική εικόνα της πειραματικής διάταξης (εμπρόσθια όψη) ληφθείσα στις 11:00 π.μ., 2/8/2016.

Η μεταβολή των παραμέτρων λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας του Αυγούστου με πολύ ασθενή άνεμο (2/8/2016) απεικονίζεται γραφικά στο Διάγραμμα 6-6. Σύμφωνα με τα ληφθέντα αποτελέσματα, η μέση ημερήσια τιμή της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) στο σημείο μέτρησης με ένδειξη "Lower point" βρέθηκε ίση με 52,8 ^{o}C, ενώ η μέγιστη τιμή της (62,2 ^{o}C), η οποία καταγράφηκε στις 13:20, ήταν σημαντικά υψηλότερη (~27,0 ^{o}C) από την αντίστοιχη τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ($T\alpha$). Γενικά, η ημερήσια μεταβολή της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference}$) βρέθηκε να ακολουθεί την τάση διακύμανσης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_t) και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ($T\alpha$).
Αντιστοίχως, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) στο σημείο μέτρησης με ένδειξη "Lower point" κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 28,7-64,6 ^{o}C, ενώ η μέση τιμή της ήταν 51,5 ^{o}C. Αναλυτικά, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) διατηρήθηκε σε χαμηλά επίπεδα (28,7-32,7 ^{o}C) κατά την 1^{η} ώρα διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων (8:00 - 9:00) και αυξήθηκε σταθερά από 32,7 ^{o}C στις 9:00 έως 50,5 ^{o}C στις 11:20, ενώ στη συνέχεια παρέμεινε πάνω από τους 50 ^{o}C για χρονικό διάστημα 6 h. Σαφώς, η επίδραση του χρησιμοποιούμενου PCM περιορίστηκε από τις 11:20, ενώ η μέγιστη απόκλιση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των αξιολογημένων φωτοβολταϊκών πλαισίων $\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_peak}$) προσδιορίστηκε ίση με 9,6 ^{o}C στις 9:50. Εκτός αυτού, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) καταγράφονταν υψηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) στο σημείο μέτρησης με ένδειξη "Lower point" από τις 12:50 ως τις 18:00. Αυτή η τάση εμφανίστηκε ως αποτέλεσμα υπέρβασης της ικανότητας απορρόφησης θερμότητας πέραν της θερμοχωρητικότητας του πληρωμένου με PCM δοχείου, χωρίς να προκύψει το επαρκές χρονικό περιθώριο για την απόρριψη σημαντικού ποσού θερμότητας στο περιβάλλον. Ως εκ τούτου, η χρησιμοποίηση PCM με σημείο τήξης ($T_{PCM,\ melt}$) υψηλότερο των 30 ^{o}C θα μπορούσε να αποτελέσει προτιμότερη επιλογή καθώς θα βελτίωνε σημαντικά τη γενικότερη θερμική απόκριση ενός συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου.
Η κατανομή θερμοκρασίας στην εμπρόσθια όψη του συστήματος PV+PCM και του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς, όπως αποτυπώθηκε μέσω θερμογραφικού ελέγχου στις 11:00, της εξεταζόμενης θερινής ημέρας, απεικονίζεται στην Εικόνα 6-3. Εστιάζοντας στα επιλεγμένα σημεία μπορεί να παρατηρηθεί ότι η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) ήταν σημαντικά χαμηλότερη (~ 7,3 ^{o}C) σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή για το φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$), καθώς το "εργαζόμενο" ρευστό μέσο διατηρούσε τη δυνατότητα απορρόφησης της πλεονάζουσας θερμότητας από το εφαπτόμενο φωτοβολταϊκό πλαίσιο μέχρι το όριο της θερμοχωρητικότητας του. Αυτή η συνθήκη υποδηλώνει την αποτελεσματικότητα του σχεδιασμού του συστήματος PV+PCM σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών, κυρίως κατά τις πρωινές ώρες λειτουργίας του.



Διάγραμμα 6-7: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας φθινοπωρινής ημέρας (11/9/2016).

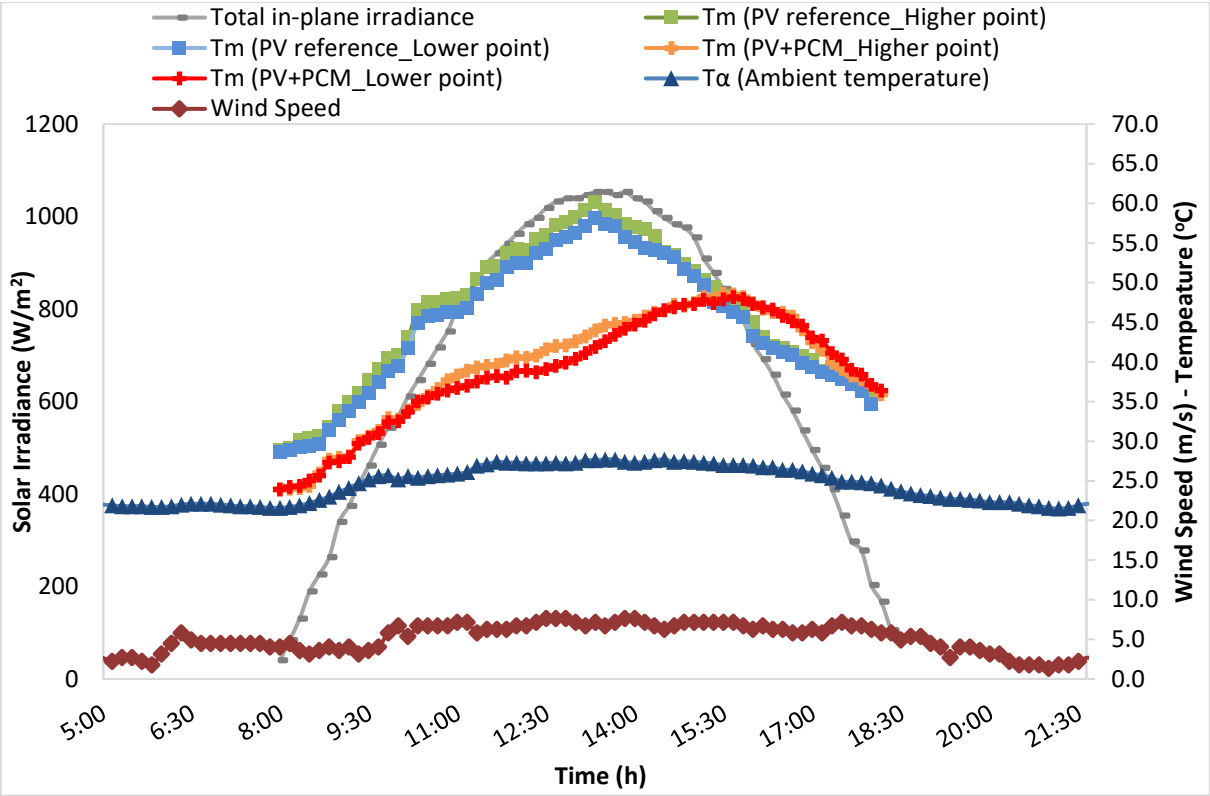


Εικόνα 6-4: Θερμική εικόνα της πειραματικής διάταξης (εμπρόσθια όψη) ληφθείσα στις 10:30 π.μ., 11/9/2016.

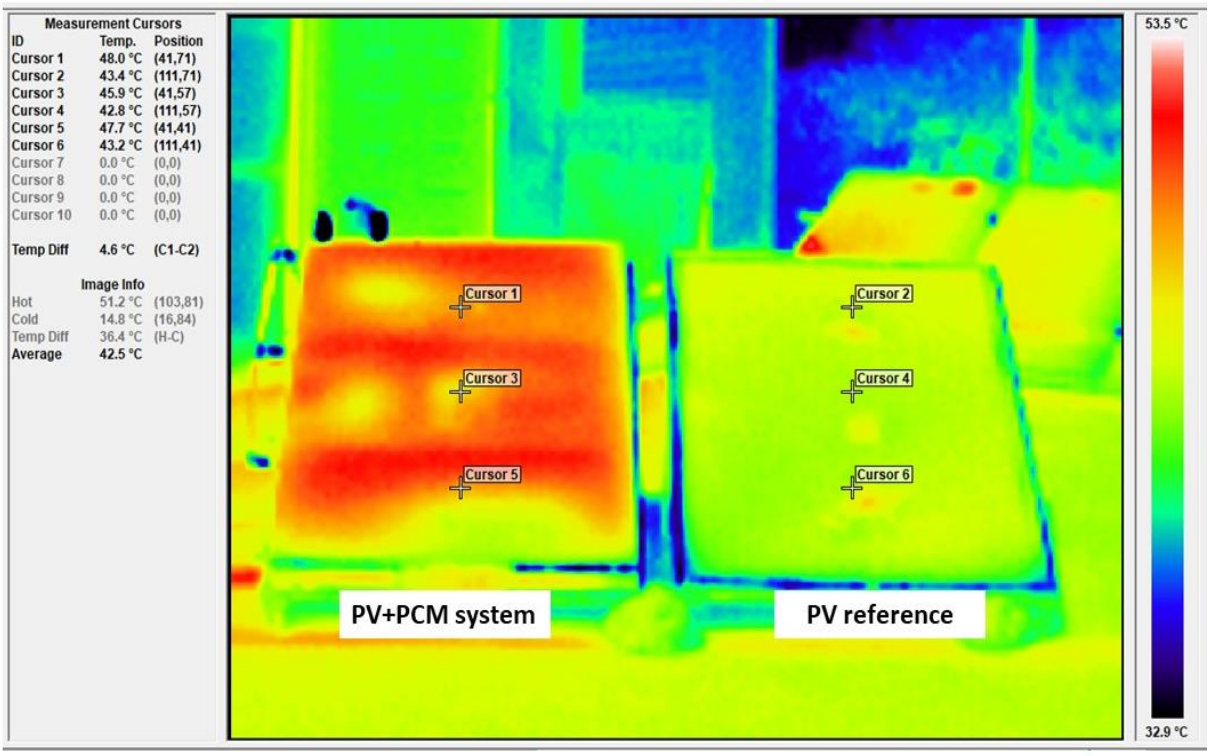
Η διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας φθινοπωρινής ημέρας απεικονίζεται στο Διάγραμμα 6-7. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) στα σημεία μέτρησης ("Higher point"/"Lower point") αυξήθηκε με ρυθμό ελαφρώς μεγαλύτερο των 7 ^{o}C/h κατά τις πρωινές ώρες, από τους 26,3 ^{o}C/26,1 ^{o}C στις 8:00 μέχρι τους 54,3 ^{o}C/55,7 ^{o}C στις 12:00, ενώ διατηρήθηκε με τιμή υψηλότερη των 50 ^{o}C για χρονικό διάστημα 2,5 h (μεταξύ 12:00 και 14:30). Η μέγιστη τιμή των 58,3 ^{o}C, ληφθείσα από το σημείο μέτρηση με ένδειξη "Lower point", σημειώθηκε στη 13:20 και ήταν σχεδόν 30 ^{o}C υψηλότερη από την τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Ta) την ίδια χρονική στιγμή.

Αντίθετα, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) βρέθηκε μεταξύ των τιμών 24,5 - 41,6 ^{o}C από τις 8:00 έως τις 12:00 (Διάγραμμα 6-7), ενώ συνέχισε με αυξητική τάση έως τις 15:00 καθώς η θερμική φόρτιση του PCM είχε ολοκληρωθεί νωρίτερα στις 14:10. Επίσης η μέση τιμή για τη θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) και του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) ήταν 39,8 ^{o}C και 42,9 ^{o}C, αντίστοιχα. Ωστόσο, η μέγιστη απόκλιση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_peak}$) υπολογίστηκε ίση με 14,7 ^{o}C (11/9/2016, 11:50) τεκμηριώνοντας την επάρκεια του εφαρμοζόμενου PCM για τη διαχείριση της θερμότητας στο σύστημα PV+PCM. Μετά τις 15:00 και ως τη λήξη του ημερήσιου κύκλου διεξαγωγής μετρήσεων στις 18:00, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) στα σημεία μέτρησης ("Higher point"/ "Lower point") παρατηρήθηκε υψηλότερη από τις αντίστοιχες τιμές της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$). Το γεγονός αυτό φανερώνει ότι η απόρριψη της αποθηκευμένης, μέχρι την πλήρη μετάβαση του PCM σε υγρή φάση, θερμότητας εξελίχθηκε με πιο αργό ρυθμό σε σχέση με την αντίστοιχη διαδικασία για το συμβατικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Συνεπώς, η επιλογή ενός PCM με μεγαλύτερη ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας θα οδηγούσε σε εξάλειψη του φαινομένου "κόπωσης" του συστήματος PV+PCM, το οποίο παρατηρήθηκε κατά τις απογευματινές ώρες της εξεταζόμενης φθινοπωρινής ημέρας. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το σύστημα PV+PCM αντιστάθηκε στις άμεσες μεταβολές της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου, οι οποίες προέκυψαν από τις αντίστοιχες μεταβολές των καιρικών συνθηκών, διατηρώντας μια σχετικά ομαλή καμπύλη θέρμανσης.

Η ροή θερμότητας στην εμπρόσθια όψη της πειραματική διάταξης, βάσει του θερμογραφικού ελέγχου που υλοποιήθηκε τις πρώτες ώρες λειτουργίας της πειραματικής διάταξης (στις 10:30), αναπαρίσταται στην Εικόνα 6-4. Στην περίπτωση αυτή, διακρίνεται η έναρξη της διαδικασίας αλλαγής φάσης του "εργαζόμενου ρευστού", παρότι η απόκλιση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)}$= ~2,3 ^{o}C) παρατηρήθηκε περιορισμένη τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Επιπλέον, η όποια ανομοιογένεια στην κατανομή της θερμοκρασίας του συστήματος PV+PCM οφείλεται σε μικρής κλίμακας αστοχίες κατά τη κατασκευή του δοχείου αποθήκευσης PCM και της ανύψωσης του υγρού μέρους PCM κατά την εξέλιξη της αλλαγής φάσης του.



Διάγραμμα 6-8: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας φθινοπωρινής ημέρας (12/10/2016).

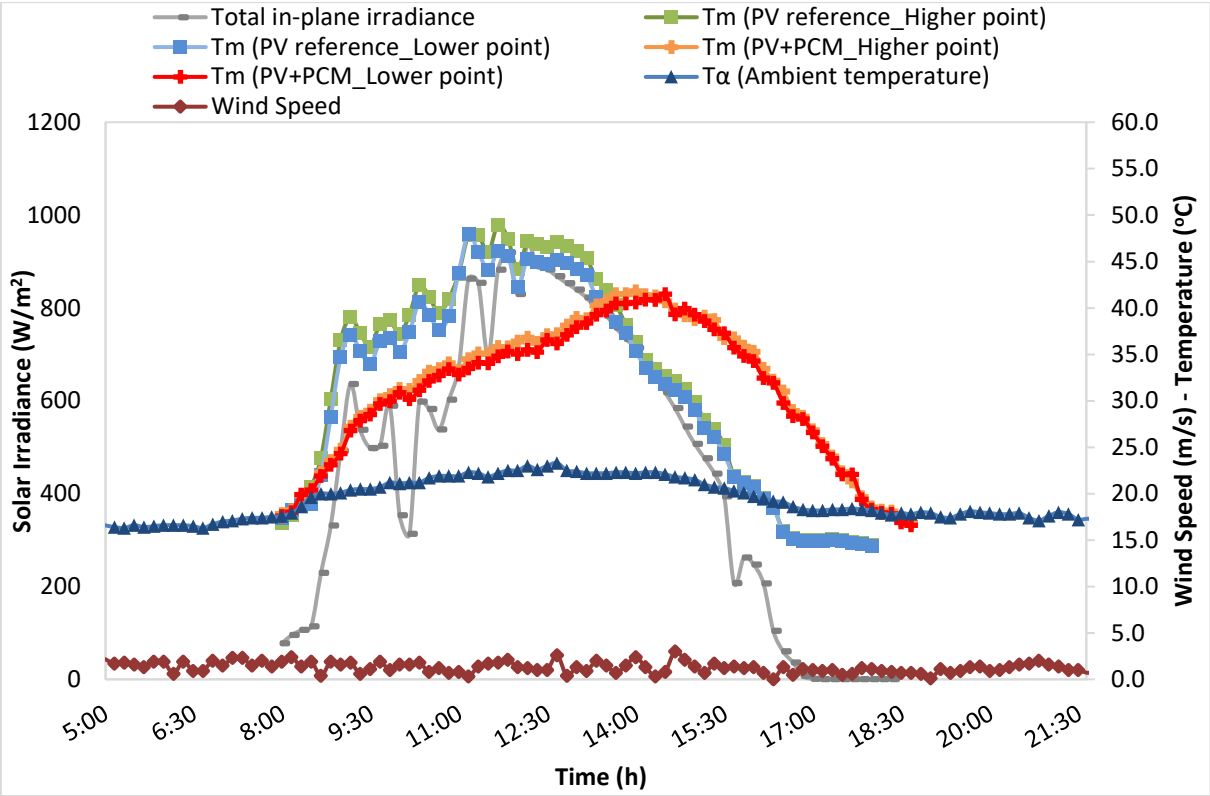


Εικόνα 6-5: Θερμική εικόνα της πειραματικής διάταξης (εμπρόσθια όψη) ληφθείσα στις 17:00, 12/10/2016.

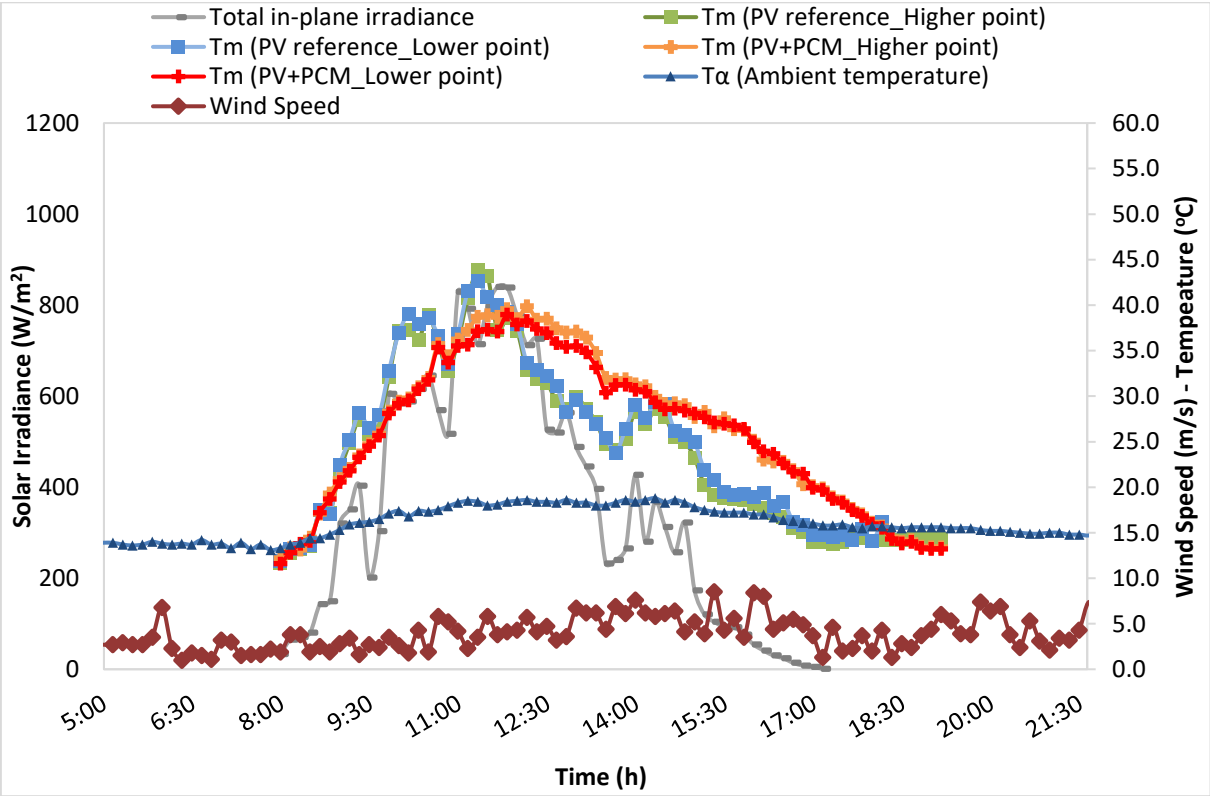
Οι καμπύλες μεταβολής των λειτουργικών συνθηκών του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας αίθριας ημέρας του Οκτωβρίου (12/10/2016), με σχεδόν μέτριο άνεμο, παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 6-8. Με βάση τα δεδομένα καταγραφής, η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) στο σημείο μέτρησης με ένδειξη "Higher point" έφτασε τη μέγιστη τιμή της (60,1 ^oC) στη 13:20, όταν η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G_t), η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T\alpha$) και η ταχύτητα ανέμου (v_w) ήταν 1053 W/m^2, 27,6 ^oC και 7,14 m/s, αντίστοιχα. Εν αντιθέσει, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) στο αντίστοιχο σημείο μέτρησης παρατηρήθηκε σημαντικά χαμηλότερη, εντός της περιοχής τιμών 23,9 - 48,6 ^oC, λόγω της θετικής επίδρασης του συνδεδεμένου PCM. Τις πρώτες ώρες της ημέρας, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) αυξήθηκε σταθερά από 23,9 ^oC στις 8:00 έως 32,5 ^oC στις 10:00 (σε 2 h), παραμένοντας ωστόσο κάτω από τους 45 ^oC για διάστημα 4 h (10:00-14:00). Η αποτελεσματικότητα του PCM ελαχιστοποιήθηκε στις 15:00, όταν οι τιμές θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM (στο "Higher point") ήταν 51,5 ^oC και 47,4 ^oC, αντίστοιχα. Η μέση τιμή της μεταβολής της θερμοκρασίας του συστήματος PV+PCM έναντι της φωτοβολταϊκής του αναφοράς ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_avg}$) βρέθηκε ίση με 11,6 ^oC κατά το χρονικό διάστημα 8:00-15:00, ενώ η σχετική μέγιστη τιμή ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_peak}$) των 16,1 ^oC σημειώθηκε στις 13:20.

Εκτός αυτού, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) παρατηρούνταν οριακά υψηλότερη από τη θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) από τις 15:40 έως τις 18:00. Η εξέλιξη αυτή εντοπίστηκε, λόγω του περιορισμού της ικανότητας απορρόφησης θερμότητας από το δοχείο PCM και απόρριψης της στο περιβάλλον. Στην κατάσταση αυτή, η σχετική αύξηση της ποσότητας του χρησιμοποιούμενου PCM θα μπορούσε να συνεισφέρει για την αύξηση της θερμικής αδράνειας προκειμένου να αποτραπεί η "κόπωση" του συστήματος PV+PCM προς το τέλος του ημερήσιου κύκλου πειραματικών μετρήσεων.

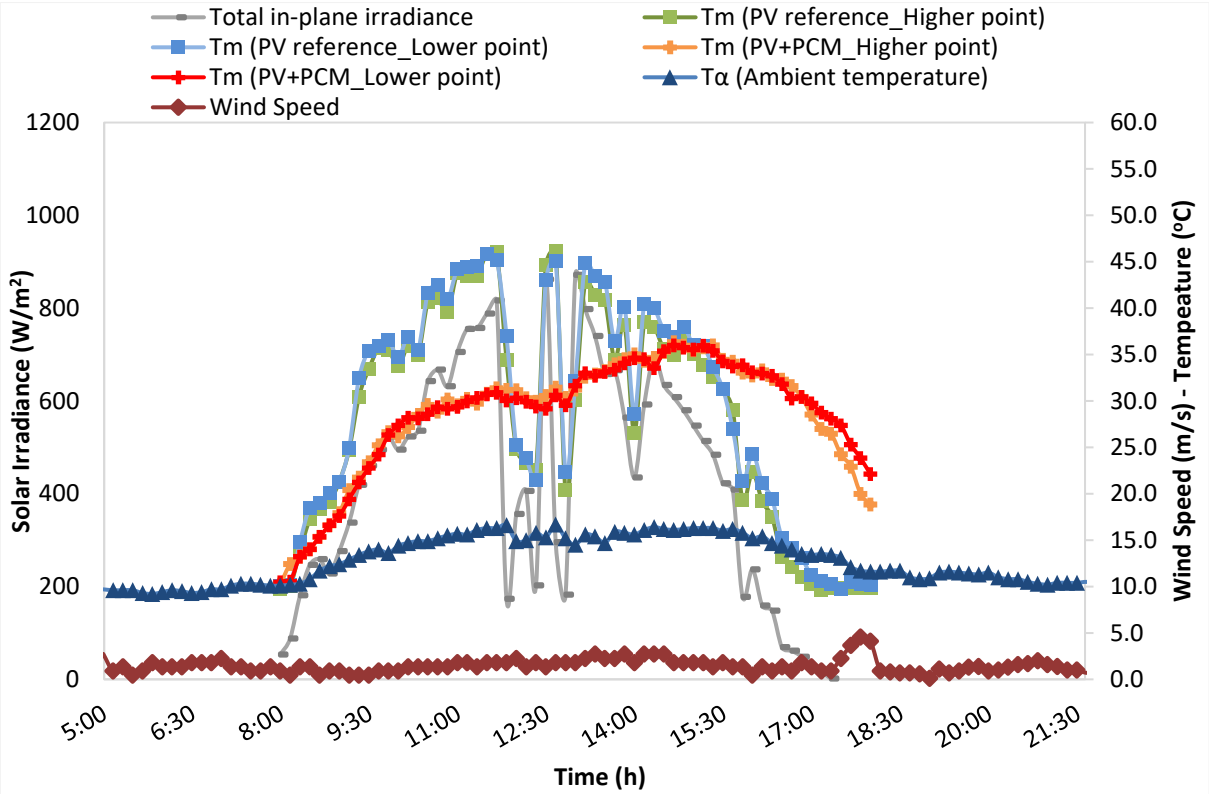
Η θερμική αποτύπωση της εμπρόσθιας όψης της πειραματικής διάταξης, η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-5, έδειξε την υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας για το σύστημα PV+PCM κατά τις απογευματινές ώρες, συγκριτικά με την αντίστοιχη τιμή για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς. Το παραπάνω φαινόμενο παρατηρείται καθώς το "εργαζόμενο" μέσο υπολειπόταν της δυνατότητας απορρόφησης του συνόλου της πλεονάζουσας θερμότητας από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ενώ λειτουργούσε ως αντίσταση που αποτρέπει την απόρριψη της θερμότητας του. Αυτή η συνθήκη υποδηλώνει την ανάγκη επανεξέτασης του σχεδιασμού του συστήματος PV+PCM, εστιάζοντας σε τρόπους για τη βελτίωση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία ανάμεσα στην οπίσθια πλευρά του περιβλήματος PCM και του περιβάλλοντα χώρου.



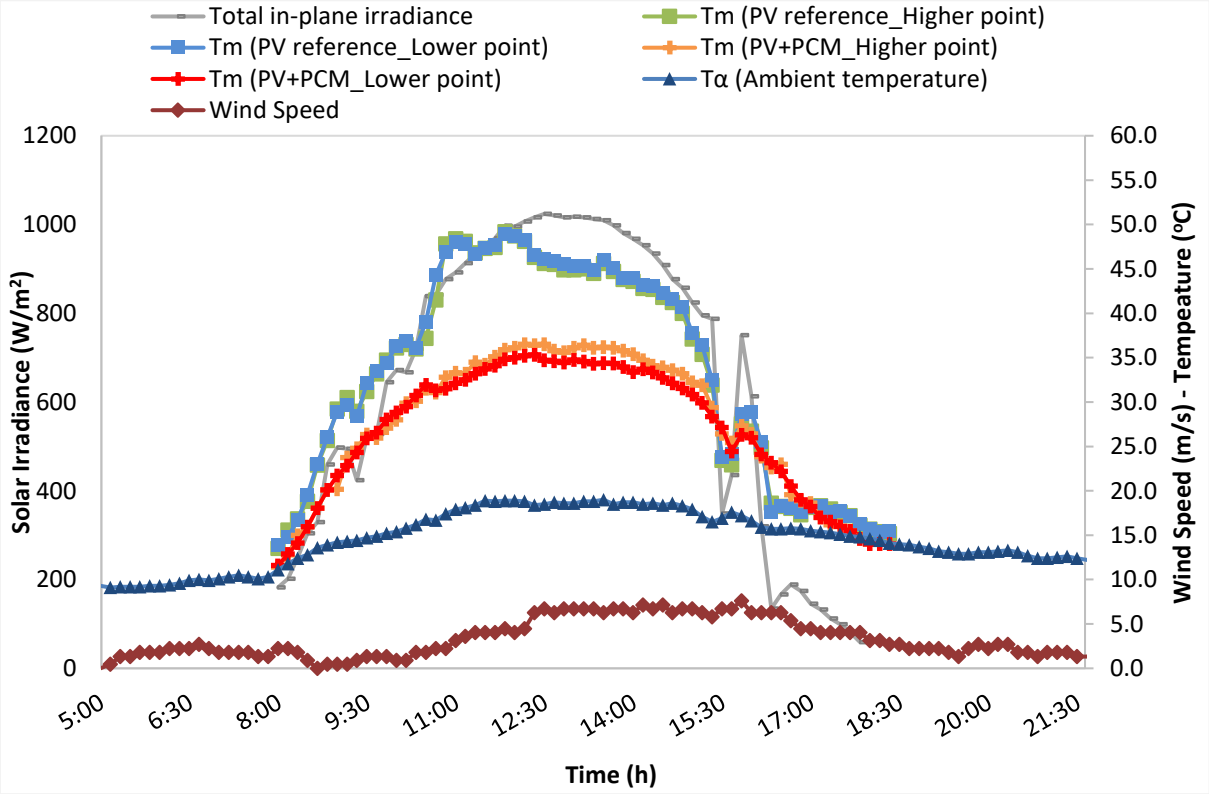
Διάγραμμα 6-9: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας φθινοπωρινής ημέρας (17/11/2016)



Διάγραμμα 6-10: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής ημέρας (19/12/2016)



Διάγραμμα 6-11: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής ημέρας (17/1/2017).



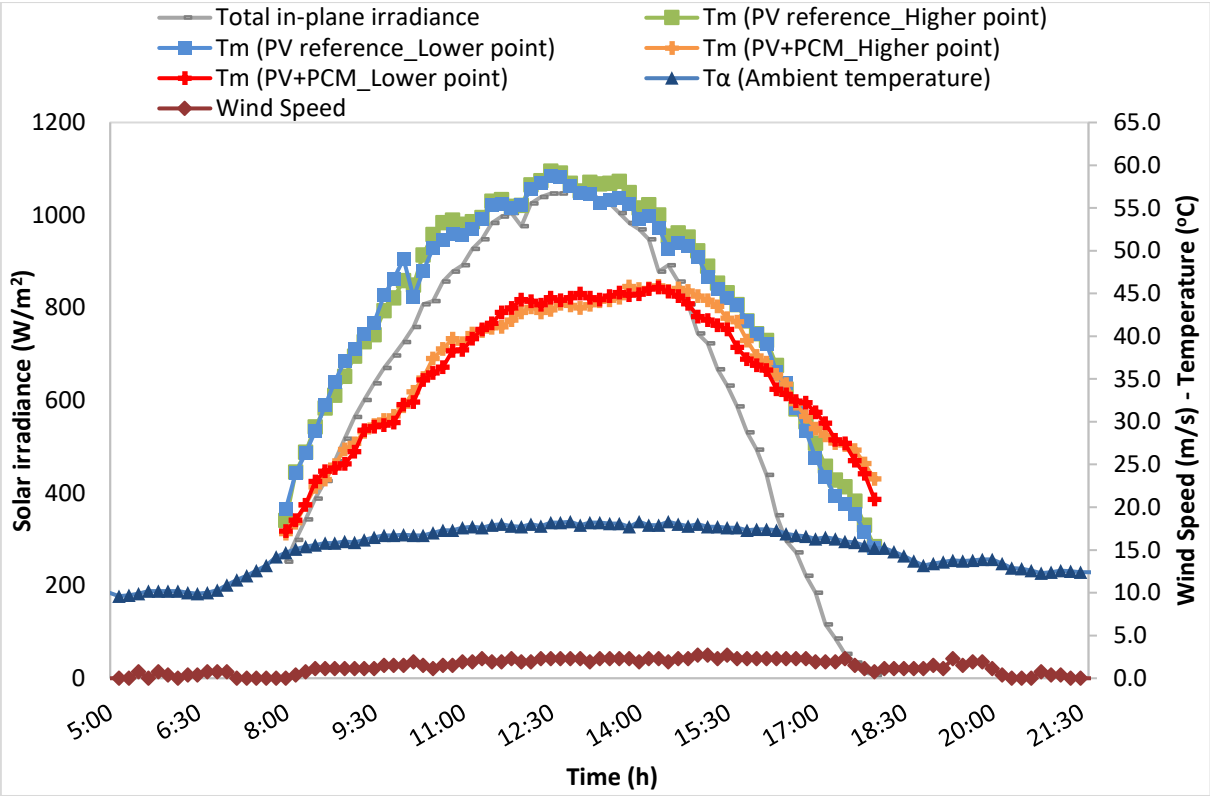
Διάγραμμα 6-12: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής ημέρας (21/2/2017).

Η ημερήσια εξέλιξη των παραμέτρων που ορίζουν τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μια φθινοπωρινής ημέρας (17/11/2016) παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 6-9. Το εύρος διακύμανσης των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) στα σημεία μέτρησης με ένδειξη "Higher point" και "Lower point" ήταν 14,4-48,0 ºC και 14,3-48,9 ºC, αντίστοιχα. Επιπλέον, η μέγιστη θερμοκρασία των 48,9 ºC σημειώθηκε στις 11:40, όταν η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G_t), η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T\alpha$) και η ταχύτητα ανέμου (v_w) ήταν 882 W/m^2, 22,2 ºC και 1,7 m/s, αντίστοιχα. Την ίδια στιγμή, η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) βρέθηκε μειωμένη κατά 13,1 ºC λόγω της αξιοποίησης του PCM για τη διαχείριση θερμοκρασίας. Πιο αναλυτικά, κατά το χρονικό διάστημα από τις 9:30 έως τις 13:30, η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$), στο σημείο μέτρησης με ένδειξη "Lower point" κυμάνθηκε από 33,9 ºC έως 48,9 ºC, ενώ συγχρόνως η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) κυμάνθηκε μεταξύ 24,3 ºC και 39,7 ºC. Ομοίως, η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$), στο σημείο μέτρησης με ένδειξη "Higher point" καταγράφηκε στην περιοχή τιμών 35,8-48,0 ºC, ενώ παράλληλα η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) σημειώθηκε από 24,7 ºC έως 40,5 ºC. Ακόμη, διαπιστώθηκε ότι η μέση τιμή απόκλισης των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_avg}$) την περίοδο αυτή ήταν 8,4 ºC. Κατά τη διάρκεια του δευτέρου μισού της ημέρας (13:30-18:00), όταν το PCM είχε μειωμένη ικανότητα απορρόφησης θερμότητας λόγω της πλήρους τήξης του, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) σημειώθηκε λογικά υψηλότερη από τη θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$), όπως παρουσιάζεται με ευκρίνεια στο Διάγραμμα 6-9.

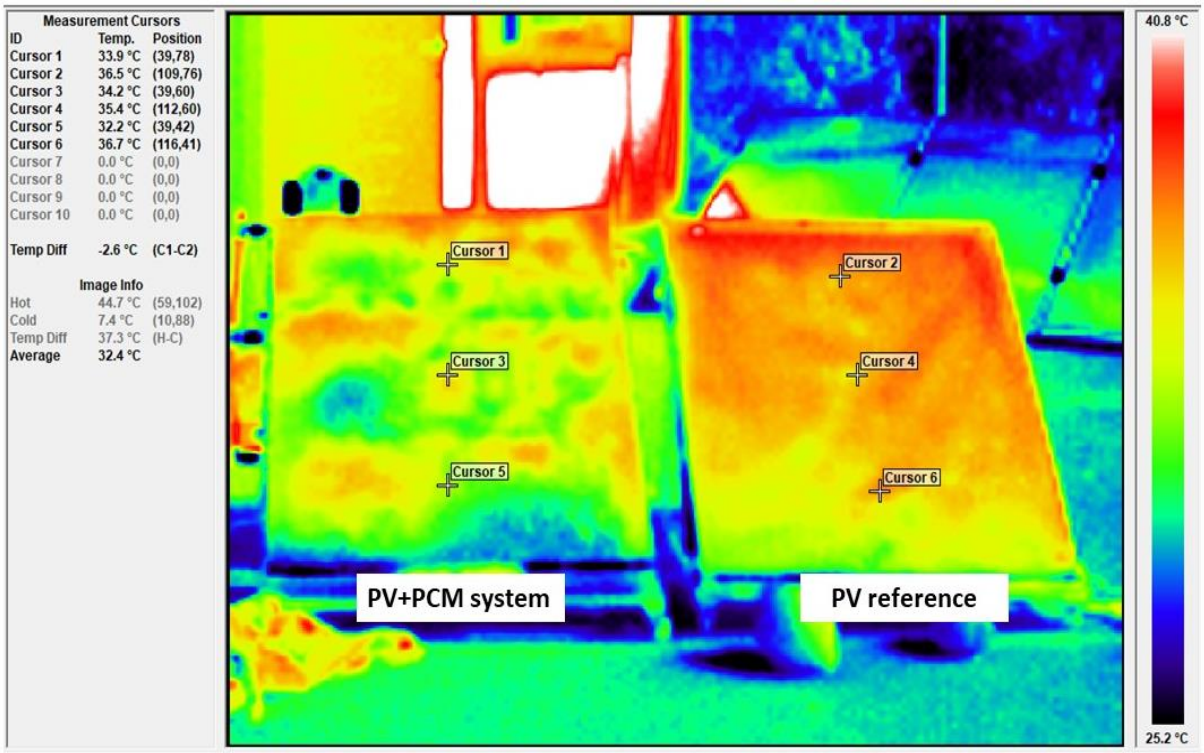
Παραπλήσια αποτελέσματα προέκυψαν από την επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων που εκτελέστηκαν κατά τη διάρκεια μιας τυπικής χειμερινής ημέρας (19/12/2016). Ειδικότερα, η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) στα σημεία μέτρησης με ένδειξη "Higher point" και "Lower point" σημειώθηκε εντός της περιοχής τιμών 11,1-43,9 ºC και 11,0-42,6 ºC, ενώ οι σχετικές μέσες τιμές της ήταν 24,9 ºC και 25,5 ºC, αντίστοιχα (Διάγραμμα 6-10). Εν αντιθέσει, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) στα αντίστοιχα σημεία μέτρησης κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 12,2-39,7 ºC και 11,6-38,9 ºC, ενώ οι σχετικές μέσες τιμές της ήταν 27,8 ºC και 27,3 ºC, αντίστοιχα. Στις δεδομένες συνθήκες μια τυπικής χειμερινής ημέρας, η μέση τιμή της μεταβολής της θερμοκρασίας του συστήματος PV+PCM έναντι της φωτοβολταϊκής του αναφοράς ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_avg}$) βρέθηκε ίση με -2,1 ºC, καθώς το σύστημα PV+PCM λειτούργησε υπό την επίδραση οριακά υψηλότερων τιμών θερμοκρασίας για το μεγαλύτερο τμήμα της. Η παραπάνω διαπίστευση ανέκυψε εξαιτίας των καιρικών συνθηκών στην περιοχή μελέτης, οι οποίες απέτρεπαν την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων και κατέστησαν πρακτικά ανέφικτη τη συμβολή του PCM. Σε συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών που απαντώνται κυρίως του χειμερινούς μήνες, η χρησιμοποίηση PCM με χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης ($T_{PCM,melt}$<27 ºC) θα ήταν πιο αποτελεσματική επιλογή καθώς θα βελτίωνε σημαντικά τη θερμική συμπεριφορά του συστήματος PV+PCM.

Στα διαγράμματα 6-11 και 6-12 παρουσιάζεται η μεταβολή των συνθηκών λειτουργίας της πειραματικής διάταξης κατά τη διάρκεια δυο ημερών της χειμερινής περιόδου. Όπως διακρίνεται από το Διάγραμμα 6-11, η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) στο σημείο μέτρησης με ένδειξη "Higher point" αυξήθηκε με ρυθμό περίπου 9,9 $^oC/h$ κατά τις πρωινές ώρες, από τους 9,7 ^oC στις 8:00, μέχρι τους 46 ^oC στις 11:40 (σε 3,67 h), ενώ στη συνέχεια παρουσίασε σημαντικές αυξομειώσεις για περίπου 3 h (μεταξύ 11:50 και 14:30) ακολουθώντας τη μεταβολή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολία (G_t). Ακόμη, η σχετική μέση ημερήσια τιμή της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) βρέθηκε ίση με 28,2 ^oC, ενώ η μέγιστη τιμή της (46,1 ^oC) καταγράφηκε στις 12:40. Επίσης, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) στο αντίστοιχο σημείο μέτρησης παρατηρήθηκε να αυξάνει σταθερά από τους 10,2 ^oC στις 8:00 μέχρι τους 28,2 ^oC στις 10:10 (σε 2,67 h), ενώ διατηρήθηκε χωρίς αξιόλογες μεταβολές κάτω από το επίπεδο των 35 ^oC για περισσότερο από 4 h (μεταξύ 10:10 και 14:20). Μετά τις 15:00, όταν η δυνατότητα απορρόφησης θερμότητας από το PCM ήταν σημαντικά περιορισμένη, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) καταγράφονταν υψηλότερη σε σχέση με τη θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$), ως συνέπεια του αργού ρυθμού προσαρμογής της στις άμεσες μεταβολές των καιρικών παραμέτρων. Τέλος, η μέση διαφορά των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_avg}$) εκτιμήθηκε ίση με 1,2 ^oC, υποδεικνύοντας την ανάγκη επανεξέτασης των σχεδιαστικών παραμέτρων του συστήματος PV+PCM ώστε να αναβαθμιστεί η θερμική συμπεριφορά του του κατά τη χειμερινή περίοδο.

Στον αντίποδα, η θερμική απόκριση του συστήματος PV+PCM ήταν σημαντικά βελτιωμένη κατά τη διάρκεια μια τυπικής χειμερινής ημέρας του Φεβρουαρίου (Διάγραμμα 6-12), καθώς η μέση τιμή της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) διαφοροποιήθηκε κατά 8,6 ^oC από την αντίστοιχη τιμή του φωτοβολταϊκού αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) μεταξύ 8:00 και 15:20. Η σχετική μέγιστη τιμή απόκλισης ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_peak}$) των 15,9 ^oC σημειώθηκε στις 11:00, όταν η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G_t), η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T\alpha$) και η ταχύτητα ανέμου (v_w) ήταν 892 W/m^2, 17,9 ^oC και 3,1 m/s, αντίστοιχα. Εκτενέστερα, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) στα σημεία μέτρησης με ένδειξη "Higher point" και "Lower point" παρατηρήθηκε εντός της περιοχής τιμών 11,4-36,5 ^oC και 11,6-35,3 ^oC, αντίστοιχα, ενώ οι σχετικές καμπύλες διακύμανσης επισημάνθηκαν ομαλές και χωρίς σημαντική παρέκκλιση από την εξέλιξη των καιρικών παραμέτρων. Σε ότι αφορά τη θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) στα προκαθορισμένα σημεία μέτρησης, αξίζει να σημειωθεί ότι ο ρυθμός αύξησης της ήταν περίπου 11,6 $^oC/h$ κατά τις πρωινές ώρες (8:00-11:00), ενώ έλαβε τη μέγιστη τιμή των 49,2 ^oC στις 11:50. Πέραν αυτού, η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου (v_w) κατά τη διάρκεια του δευτέρου μισού της ημέρας (12:00-18:00) έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην περαιτέρω εξέλιξη της, συμβάλλοντας στη διατήρηση των σχετικών τιμών της κάτω από τους 46 ^oC.



Διάγραμμα 6-13: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (23/3/2017).

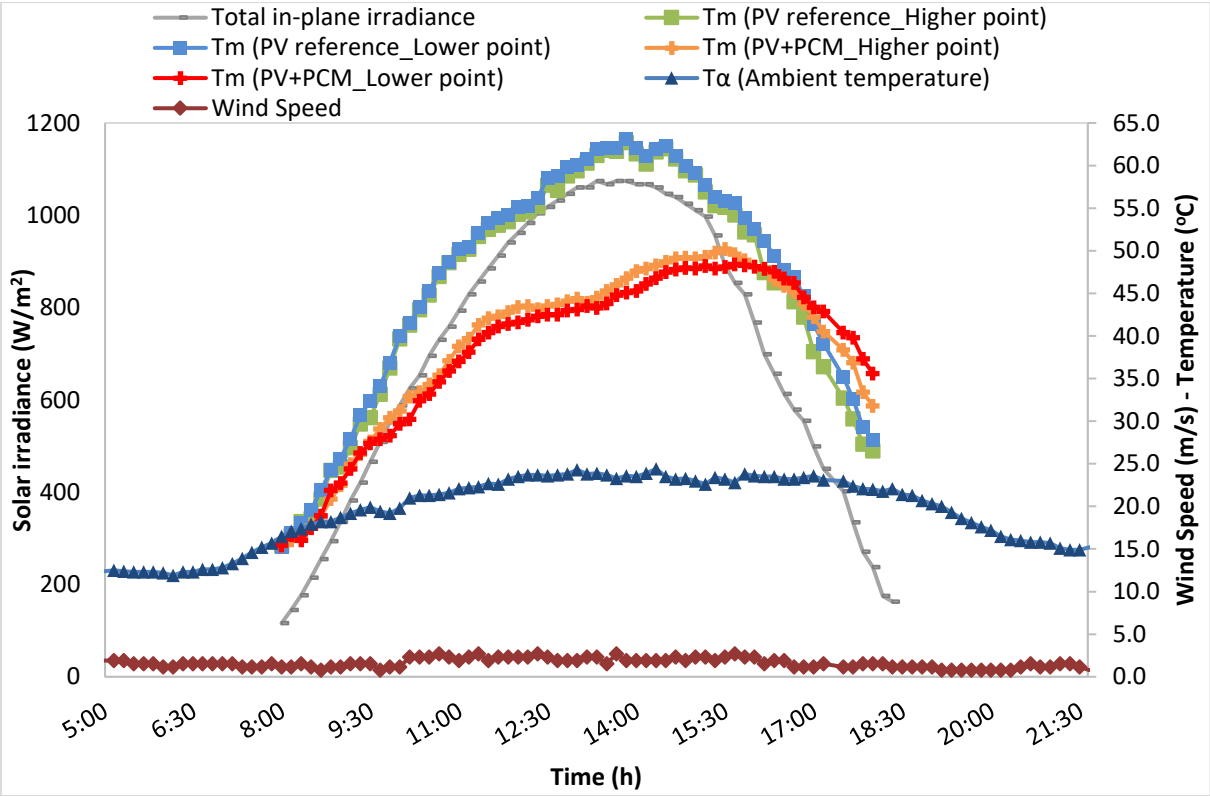


Εικόνα 6-6: Θερμική εικόνα της πειραματικής διάταξης (εμπρόσθια όψη) ληφθείσα στις 9:00, 23/3/2017

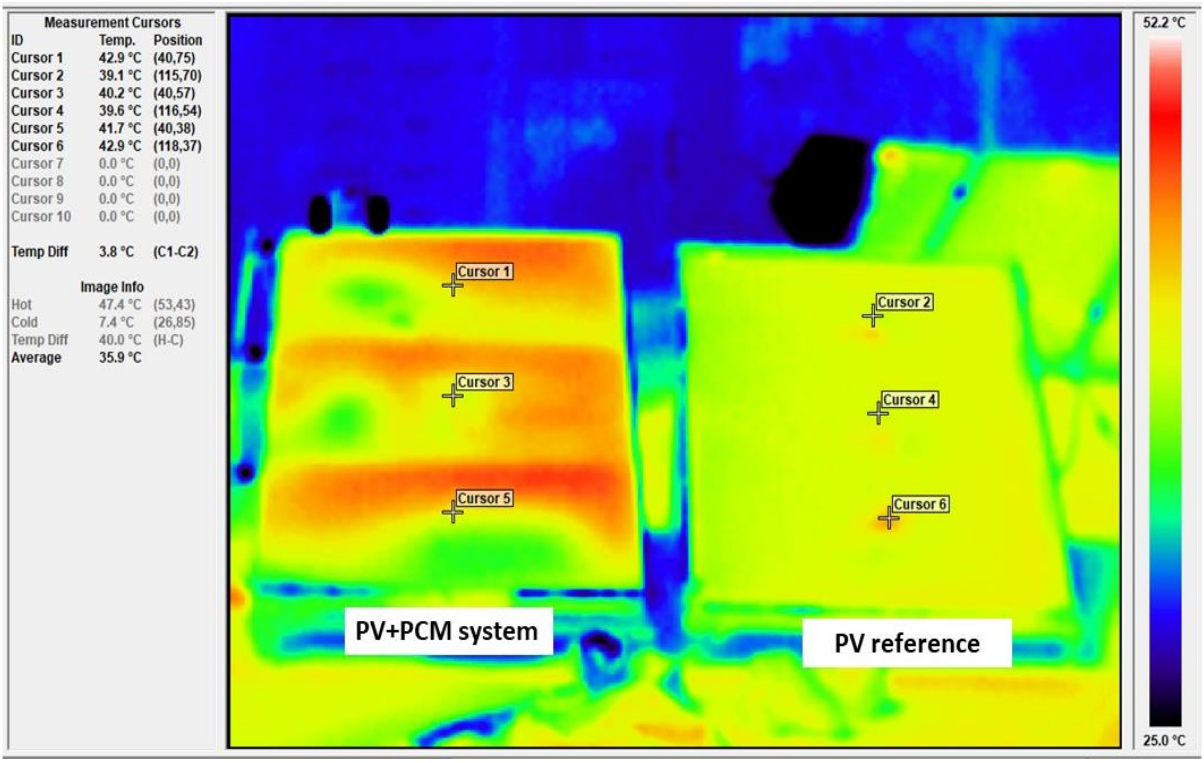
Στο Διάγραμμα 6-13 αποτυπώνεται η διακύμανση των συνθηκών λειτουργίας της πειραματικής διάταξης κατά τη διάρκεια μιας αίθριας ημέρας του Μαρτίου με πολύ ασθενή άνεμο (23/3/2017). Σύμφωνα με τα στοιχεία, η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) στο σημείο μέτρησης με ένδειξη "Higher point" αυξήθηκε σταδιακά με ρυθμό περίπου 9,2 $^oC/h$, από τους 18,5 ^oC στις 8:00, μέχρι τους 55,3 ^oC στις 12:00, και διατηρήθηκε πάνω από τους 50 ^oC για περίπου 3 h (μεταξύ 12:00 και 15:00). Επίσης, η σχετική μέγιστη τιμή των 60,1 ^oC προσδιορίστηκε στη 12:30, όταν η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G_t), η θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_a) και η ταχύτητα ανέμου (v_w) ήταν 1046 W/m^2, 18,2 ^oC και 2,3 m/s, αντίστοιχα. Ωστόσο, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) στο αντίστοιχο σημείο μέτρησης εμφανίστηκε σαφώς χαμηλότερη, εντός της περιοχής τιμών 16,9-46 ^oC, λόγω της επίδρασης του χρησιμοποιούμενου PCM. Για την ακρίβεια, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) αυξήθηκε σταθερά από 16,9 ^oC στις 8:00 έως 41 ^oC στις 11:30 (σε 3,5 h), ενώ δεν ξεπέρασε τους 46 ^oC ως το τέλος του ημερήσιου κύκλου διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων (12:30-18:00). Γενικά, η μέση τιμή μεταβολής της θερμοκρασίας του συστήματος PV+PCM έναντι της περίπτωσης αναφοράς ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_avg}$) βρέθηκε ίση με 10,2 ^oC κατά το χρονικό διάστημα 8:00-16:20, ενώ η σχετική μέγιστη τιμή ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_peak}$) των 17,1 ^oC σημειώθηκε στις 10:20. Μετά τις 16:30 και ως τις 18:00, οι σχετικές τιμές θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_avg}$) είχαν μέση απόκλιση -4,2 ^oC, καθότι η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) παρατηρούνταν υψηλότερη από τη θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$). Εν προκειμένω, η διαχείριση της θερμότητας θα μπορούσε να βελτιστοποιηθεί με την ανάλογη αύξηση της ικανότητας θερμικής απορρόφησης του PCM, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα "κόπωσης" του συστήματος PV+PCM.

Η θερμική απεικόνιση της εμπρόσθιας όψης της πειραματικής διάταξης, η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-6, επιτρέπει την αναγνώριση της θερμικής απόκρισης του συστήματος PV+PCM τις πρώτες ώρες της ημέρας. Συγκεκριμένα στις 9:00, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) ήταν χαμηλότερη κατά 2,6 ^oC σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή για το φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) στα επιλεγμένα σημεία, ως επακόλουθο της αρχόμενης μεταφοράς θερμότητας από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο στο PCM μέχρι το όριο της δεδομένης θερμοχωρητικότητας του.

Επιπλέον, το παραπάνω φαινόμενο μη ομοιογενούς κατανομής της θερμοκρασίας στο σύστημα PV+PCM μπορεί να αποδοθεί σε αστοχίες κατά τη κατασκευή του περιβλήματος του PCM και της φυσικής του κατάστασης κατά την εξέλιξη της μετάβασης του σε υγρή φάση. Εν κατακλείδι, το σύστημα PV+PCM εμφάνιζε βελτιωμένη θερμική συμπεριφορά κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ανοιξιάτικης ημέρας του Μαρτίου, εξαιρουμένων των απογευματινών ωρών λειτουργίας του.



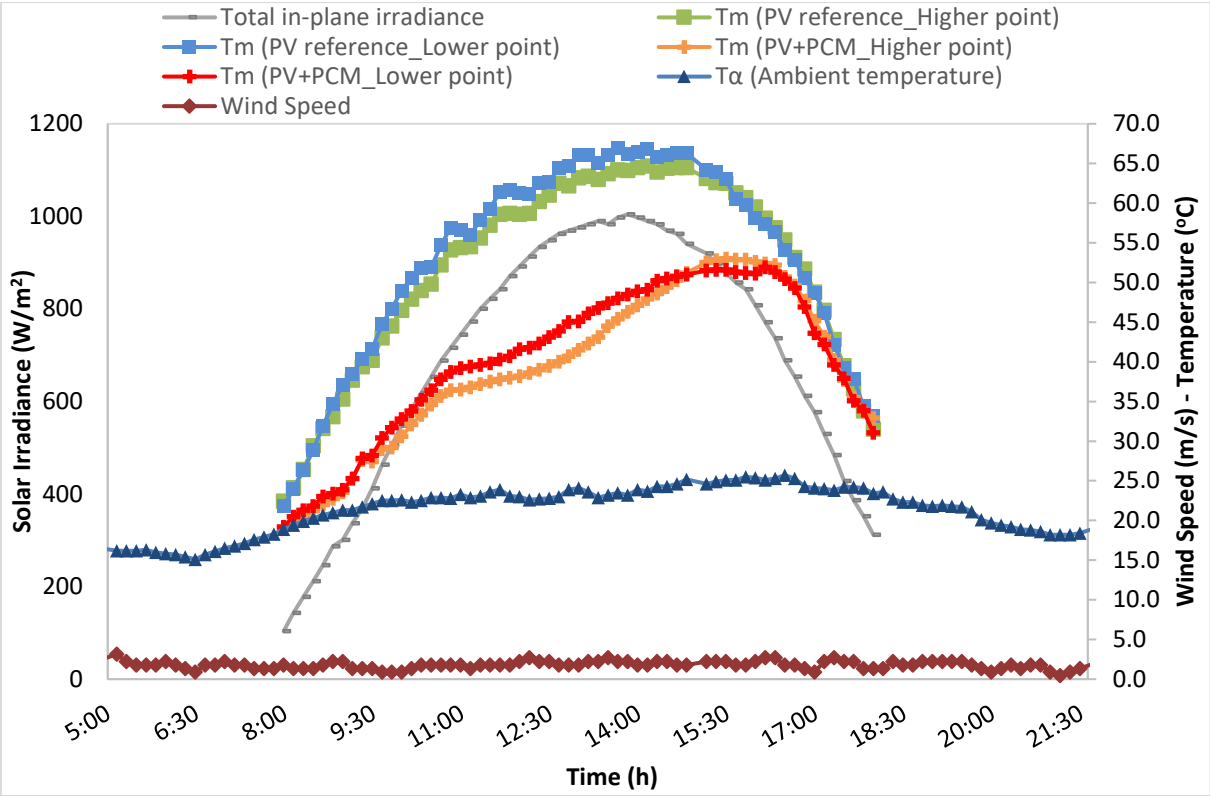
Διάγραμμα 6-14: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (27/4/2017).



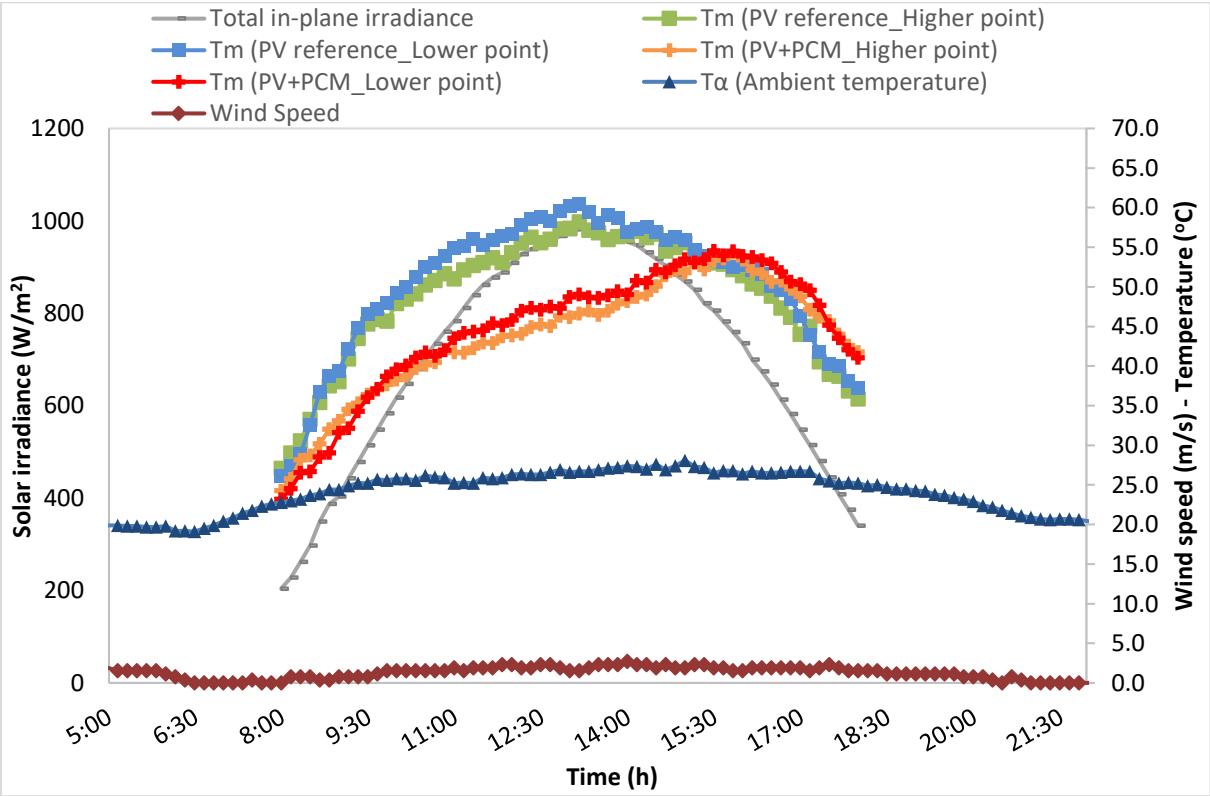
Εικόνα 6-7: Θερμικής εικόνα της πειραματικής διάταξης (εμπρόσθια όψη) ληφθείσα στις 17:00, 27/4/2017

Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας κατά τη διάρκεια μιας αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας (27/4/2017) απεικονίζονται στο Διάγραμμα 6-14. Πιο συγκεκριμένα, η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) στα σημεία μέτρησης ("Higher point"/"Lower point") αυξήθηκε με ρυθμό ελαφρώς μεγαλύτερο των 8,8 $^oC/h$ μέχρι τις πρώτες μεσημβρινές ώρες, από τους 15,4 ^oC/15,2 ^oC στις 8:00 μέχρι τους 59,4 ^oC/60,1 ^oC στις 13:00, ενώ η τιμή της καταγράφονταν υψηλότερη των 50 ^oC για χρονικό διάστημα 3 h (μεταξύ 13:00 και 16:00). Η μέγιστη τιμή των 63,1 ^oC, η οποία εντοπίστηκε στο σημείο μέτρησης με ένδειξη "Lower point", ήταν σχεδόν 40 ^oC υψηλότερη από την τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ($T\alpha$) και σχετίζονταν άμεσα με τις συνθήκες υψηλής έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_t=1074 W/m^2) και χαμηλής ταχύτητας ανέμου (v_w =1,9 m/s) που επικρατούσαν την ίδια χρονική στιγμή. Ακόμη, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) παρατηρήθηκε εντός του εύρους τιμών 15,4-43,4 ^oC από τις 8:00 έως τις 12:00 (Διάγραμμα 6-14), ενώ αυξήθηκε περαιτέρω με χαμηλό ρυθμό 2 $^oC/h$ έως τις 15:30. Μετά τις 15:30, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) στα σημεία μέτρησης ("Higher point"/ "Lower point") είχε αρχίσει να μειώνεται με ρυθμό -7,4 $^oC/h$, ακολουθώντας την εξέλιξη της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_t), ενώ συγχρόνως ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) ήταν -11,4 $^oC/h$. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέση και η μέγιστη απόκλιση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_peak}$) ήταν 9,8 ^oC και 18,6 ^oC, αντίστοιχα, τεκμηριώνοντας την επάρκεια του επιλεγμένου PCM για τον περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε όμοιες συνθήκες. Παρόλο που το σύστημα PV+PCM εμφάνιζε βέλτιστη θερμική συμπεριφορά για το μεγαλύτερο τμήμα της ημέρας, μια μέση απόκλιση της τάξης των -3,1 ^oC μεταξύ των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_avg}$) παρατηρήθηκε λόγω του χαμηλότερου ρυθμού απόρριψης της αποθηκευμένης θερμότητας στο περιβάλλον.

Η κατανομή της θερμότητας στην εμπρόσθια όψη της εξεταζόμενης διάταξης, βάσει της θερμογραφικής αποτύπωσης στις 17:00, παρατίθεται στην Εικόνα 6-7. Στην περίπτωση αυτή, διακρίνεται η φόρτιση του εργαζόμενο ρευστού, παρότι η διαφοροποίηση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)}$) δεν υπερέβη τους -4 ^oC για τη δεδομένη χρονική στιγμή. Ακόμη, η σχετική ανομοιογένεια της θερμοκρασιακής κατανομής στο σύστημα PV+PCM αναδεικνύει τα βασικά σημεία για τη βελτίωση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών του δοχείου αποθήκευσης PCM και των συνεπαγόμενων φυσικών φαινομένων κατά την τήξη του PCM.



Διάγραμμα 6-15: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (11/5/2017).



Διάγραμμα 6-16: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής ημέρας (9/6/2017).

Η ημερήσια εξέλιξη των δεικτών που προσδιορίζουν τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (11/5/2017) προβάλλονται στο Διάγραμμα 6-15. Το εύρος διακύμανσης των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) ήταν 21,8-66,9 ºC και 22,5-64,7 ºC στα σημεία μέτρησης με ένδειξη "Lower point" και "Higher point", αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, η μέγιστη θερμοκρασία των 66,9 ºC σημειώθηκε στις 13:40, όταν η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G_t), η θερμοκρασία περιβάλλοντος (Ta) και η ταχύτητα ανέμου (v_w) ήταν 997 W/m^2, 23,5 ºC and 1,8 m/s m/s, αντίστοιχα. Την ίδια στιγμή, η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) βρέθηκε μειωμένη κατά 18,9 ºC λόγω της ικανότητας του PCM να διαχειρίζεται την αύξηση της θερμοκρασίας. Ενδεικτικά, κατά το χρονικό διάστημα από τις 11:30 έως τις 13:30, η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$), στο σημείο μέτρησης με ένδειξη "Lower point" κυμάνθηκε από 59,3 ºC έως 66,1 ºC, ενώ συγχρόνως η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) κυμάνθηκε μεταξύ 39,8 ºC και 47,4 ºC. Ομοίως, η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$), στο σημείο μέτρησης με ένδειξη "Higher point" καταγράφηκε στην περιοχή τιμών 57,2-63,7 ºC, ενώ παράλληλα η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) σημειώθηκε από 37,5 ºC έως 44,5 ºC. Ακόμη, διαπιστώθηκε ότι η μέση τιμή απόκλισης των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_avg}$) για τα δεδομένο χρονικό διάστημα (11:30-13:30) ήταν 20,3 ºC. Τέλος, η μέση ημερήσια τιμή όσον αφορά τη θερμοκρασιακή διαφοροποίηση του συστήματος PV+PCM έναντι της περίπτωσης αναφοράς ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_avg}$) βρέθηκε ίση με 12,5 ºC (μεταξύ 8:00-18:00), ενώ η σχετική μέγιστη τιμή ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_peak}$) των 22,5 ºC καταγράφηκε στις 12:40. Στο Διάγραμμα 6-16 παρατίθενται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των καταγεγραμμένων μετρήσεων κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας του Ιουνίου (9/6/2017). Αναλυτικά, η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) στο σημείο μέτρησης με ένδειξη "Higher point" αυξήθηκε με ρυθμό περίπου 6.3 ºC/h κατά τις πρωινές ώρες, από τους 27,1 ºC στις 8:00 μέχρι τους 55,6 ºC στις 12:30 (σε 4,5 h), ενώ αυξήθηκε περαιτέρω μέχρι τη μέγιστη τιμή των 58,2 ºC στις 13:10. Έπειτα, μια τάση μείωσης, η οποία συνδέονταν με την εξέλιξη της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_t), εμφανίστηκε έως την ολοκλήρωση του πειραματικού κύκλου στις 18:00. Επιπλέον, η μέση ημερήσια τιμή της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) στα σημεία μέτρησης με ένδειξη "Lower point" και "Higher point" ήταν ίση με 50,2 ºC και 48,8 ºC, αντίστοιχα. Στον αντίποδα, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$) στο σημείο μέτρησης με ένδειξη "Higher point" προσδιορίστηκε με σταθερή ανοδική τάση από τους 24,3 ºC στις 8:00 μέχρι τους 45,3 ºC στις 12:30, ενώ η σχετική μέγιστη τιμή των 54,3 ºC καταγράφηκε στις 15:50. Είναι φανερό, ότι η χρησιμοποίηση του PCM συντελούσε για το μετριασμό του ρυθμού ανόδου της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου του συστήματος PV+PCM μέχρι τη στιγμή πλήρους υγροποίησης του (15:50), όταν βαθμός απορρόφησης θερμότητας από το PCM είχε περιοριστεί σημαντικά. Τέλος, η μέση απόκλιση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_avg}$) εκτιμήθηκε ίση με 8,3 ºC, ενώ η αξιοποίηση PCM με υψηλότερη θερμοκρασία τήξης ($T_{PCM,melt}$ ≥30 ºC) να εκτιμάται ως η πιο ενδεδειγμένη επιλογή για το σύστημα PV+PCM τη θερινή περίοδο.

6.4 Αξιολόγηση της ενεργειακής απόκρισης της πειραματικής διάταξης

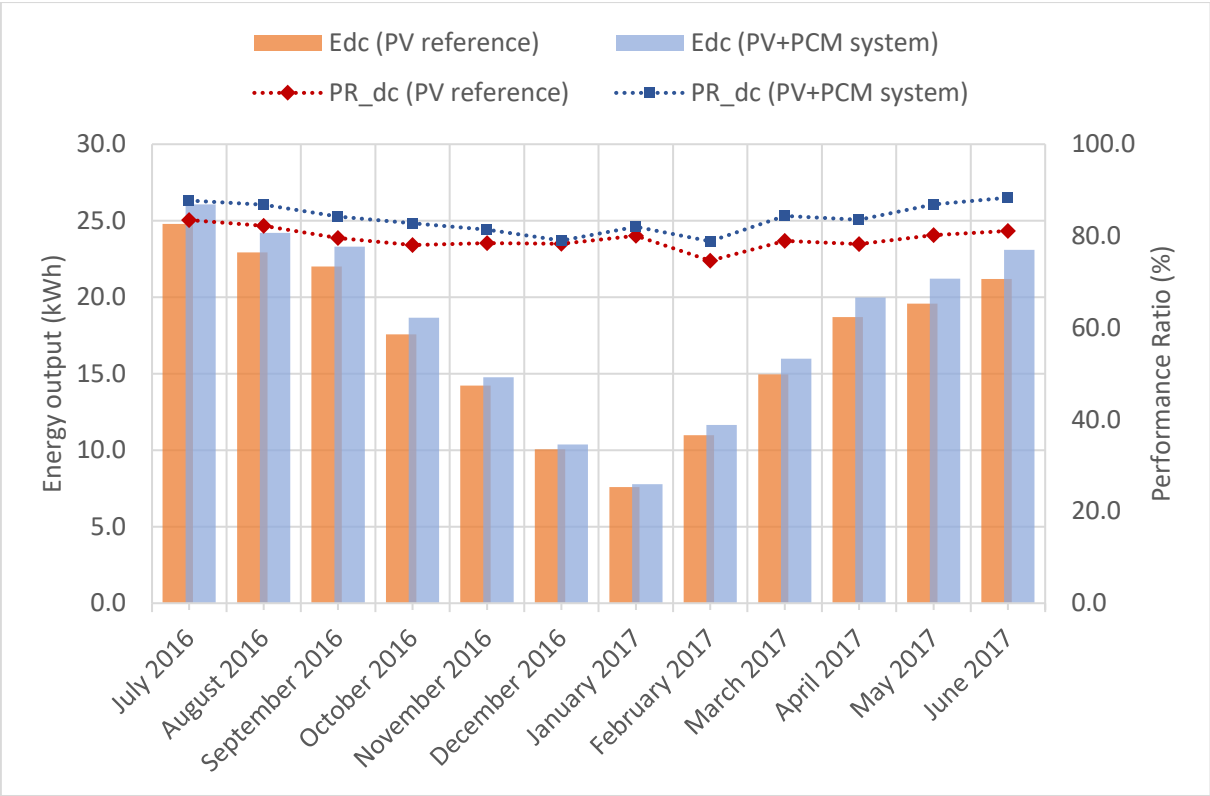
Γενικά, η έννοια της απόδοσης στα συστήματα παραγωγής ενέργειας αποτελεί βασικό δείκτη και εκφράζει το βαθμό μετατροπής της εισερχόμενης ενέργειας σε αξιοποιήσιμη μορφή μέσω ενός συστήματος. Στο πλαίσιο εκπλήρωσης των ερευνητικών στόχων της παρούσας διατριβής, τα δεδομένα καταγραφής των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών της πειραματικής διάταξης, κατά τη διάρκεια της περιόδου Ιουλίου 2016 - Ιουνίου 2017, υποβλήθηκαν σε περαιτέρω επεξεργασία και αναλύθηκαν διεξοδικά σε ημερήσια, μηνιαία και ετήσια βάση προκειμένου να καταστεί εφικτή η ολοκληρωμένη αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM υπό τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας τους.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ενεργειακής ανάλυσης (Πίνακα 6-3), η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ($E_{DC,y}$) του συστήματος PV+PCM ανήλθε σε 215,10 kWh, όντας αυξημένη κατά 12,43 kWh (αύξηση περίπου 5,72%) σε σχέση με την ενέργεια (202,67 kWh) που παρήγαγε το φωτοβολταϊκού πλαίσιο αναφοράς. Πιο αναλυτικά, η ολική μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ($E_{DC,m}$) του συστήματος PV+PCM κυμάνθηκε από 7,79 kWh τον Δεκέμβριο του 2016 έως 26,07 kWh τον Ιούλιο του 2016, ενώ διαπιστώθηκε αυξημένη σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς κατά 0,19 kWh (Δεκέμβριο 2016) και 1,27 kWh (Ιούλιο 2016), αντίστοιχα. Επιπροσθέτως, είναι χρήσιμο να τονιστεί ότι η ποσοστιαία αύξηση της ολική μηνιαίας ενεργειακής παραγωγής του συστήματος PV+PCM έναντι του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($\Delta E_{DC,m\ (PV+PCM/PV)}$) προσδιορίστηκε από 3,04% (Δεκέμβριος 2016) έως 8,91% (Ιούνιος 2017). Πέραν αυτού, η βελτιωμένη ενεργειακή απόκριση του συστήματος PV+PCM αντικατοπτρίζεται επίσης στην αύξηση των τιμών της απόδοσης του, η οποία ήταν της τάξεως του 0,18% (Ιανουάριος 2017) και 0,67% (Ιούνιος 2017), αντίστοιχα.

Όπως διακρίνεται στο Διάγραμμα 6-17, η παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια της πειραματικής διάταξης παρατηρήθηκε μειωμένη κατά τους χειμερινούς μήνες, καθώς ο αριθμός των ωρών πραγματικής ηλιοφάνειας ήταν σημαντικά μικρότερος σε σχέση με τα καταγεγραμμένα χρονικά διαστήματα αιθριότητας κατά τους μήνες της άνοιξης, του καλοκαιριού και του φθινοπώρου. Αντίθετα, η παραχθείσα ενέργεια από το σύστημα PV+PCM και από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς εκτιμήθηκε σημαντικά υψηλότερη τους θερμότερους μήνες του καλοκαιριού (Ιούλιος 2016 - Αύγουστος 2016), ενώ παράλληλα αποδεικνύεται η βελτιωμένη, σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς, επίδοση του συστήματος PV+PCM λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική αύξηση της μηνιαίας ενεργειακής παραγωγής του ($\Delta E_{DC,m\ (PV+PCM/PV)}$) από 5,11% έως 5,58 %. Ωστόσο, οι αντίστοιχες ποσοστιαίες τιμές 8,38% και 8,91%, οι οποίες χαρακτηρίζουν την βέλτιστη απόκριση του συστήματος PV+PCM κατά την περίοδο επιτήρησης, βρέθηκαν για τον Μάιο και τον Ιούνιο του 2017, υποδεικνύοντας την καλύτερη προσαρμογή του στις μεταβατικές συνθήκες μεταξύ άνοιξης και καλοκαιριού, όπως ήταν αναμενόμενο δεδομένου του εύρους θερμοκρασιών μετάβασης φάσης του επιλεγμένου PCM. Τέλος, η μέση μηνιαία τιμή για το λόγο επίδοσης ($PR_{DC,m}$) του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM παρατηρήθηκαν μεταξύ των ποσοστιαίων τιμών 74,6-83,5% και 83,8-88,4%, αντίστοιχα, ακολουθώντας την τάση που καταγράφεται για τη μηνιαία παραγωγή ενέργειας από τα ελεγχόμενα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

	Μήνας	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (E_{DC})			Μεταβολή ($\Delta E_{DC\ (PV+PCM/PV)}$)		Απόδοση ενεργειακής μετατροπής (n_{ELEC})		Μεταβολή ($\Delta n_{ELEC\ (PV+PCM/PV)}$)
			Σύστημα PV+PCM	Φωτοβολταϊκό αναφοράς			Σύστημα PV+PCM	Φωτοβολταϊκό αναφοράς	
		(kWh/m²/d)	(kWh)		(kWh)	(%)	(%)		(%)
2016	*Ιούλιος*	7,37	26,07	24,80	1,27	5,11	8,13	7,74	0,40
2016	*Αύγουστος*	6,91	24,20	22,93	1,28	5,58	7,87	7,44	0,43
2016	*Σεπτέμβριος*	6,86	23,30	22,00	1,31	5,94	7,78	7,34	0,44
2016	*Οκτώβριος*	5,59	18,66	17,58	1,07	6,10	7,61	7,17	0,44
2016	*Νοέμβριος*	4,50	14,76	14,23	0,53	3,71	7,41	7,14	0,27
2016	*Δεκέμβριος*	2,97	10,38	10,07	0,31	3,04	7,75	7,52	0,22
2017	*Ιανουάριος*	2,36	7,79	7,60	0,19	2,46	7,23	7,05	0,18
2017	*Φεβρουάριος*	3,83	12,16	11,50	0,65	5,67	7,43	7,00	0,43
2017	*Μάρτιος*	4,70	15,98	14,95	1,03	6,87	7,63	7,13	0,50
2017	*Απρίλιος*	5,93	19,98	18,70	1,28	6,83	7,86	7,35	0,51
2017	*Μάιος*	6,06	21,22	19,58	1,64	8,38	8,06	7,42	0,64
2017	*Ιούνιος*	6,49	23,09	21,20	1,89	8,91	8,12	7,45	0,67
Σύνολο			215,10	202,67	12,43				
Μέσος όρος		5,31	18,14	17,10	1,04	5,72	7,75	7,32	0,43

Πίνακας 6-3: Συγκεντρωτικός πίνακας των παραμέτρων προσδιορισμού της ενεργειακής απόκρισης του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά την περίοδο Ιουλίου 2016 – Ιουνίου 2017.



Διάγραμμα 6-17: Ολική μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ($E_{DC,m}$) και μηνιαία διακύμανση του λόγου επίδοσης ($PR_{DC,m}$) φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά την περίοδο Ιουλίου 2016 – Ιουνίου 2017.

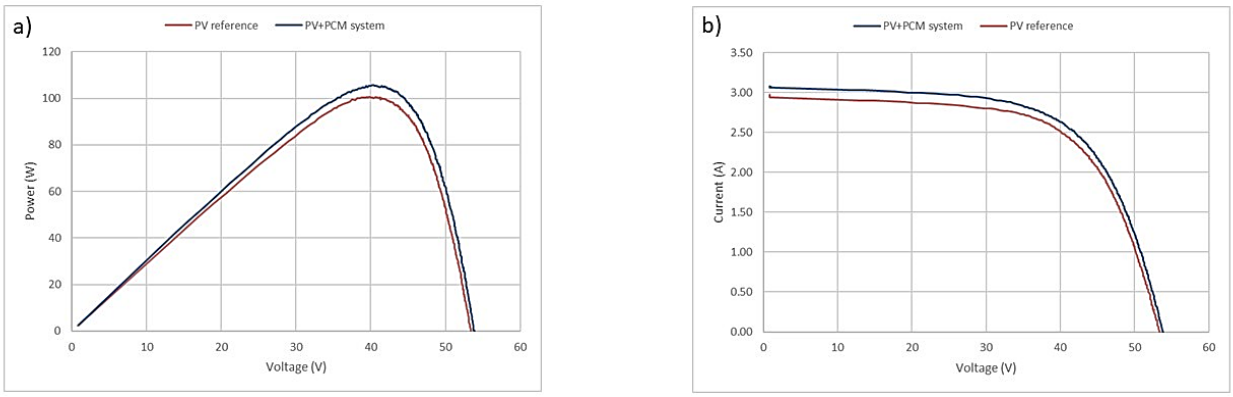
6.4.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM

Στην ενότητα που ακολουθεί αναλύονται λεπτομερώς οι πτυχές που σχετίζονται με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων προκειμένου να αξιολογηθεί ο βαθμός επίδρασης της θερμοκρασίας λειτουργίας στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Για το σκοπό αυτό, τα καταγεγραμμένα στοιχεία για την τάση (V) και την ένταση ρεύματος (I) του φωτοβολταϊκό πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, πέραν της χρησιμοποίησης τους για τον προσδιορισμό της αποδιδόμενης ισχύος κατά τις ημέρες διεξαγωγής πειραμάτων, μελετήθηκαν περαιτέρω προκειμένου να αξιολογηθεί η εξάρτηση τους από τις συνθήκες λειτουργίας της πειραματικής διάταξης.

Γενικά, οι τιμές της τάσης (V) και της έντασης ρεύματος (I) καθορίζονται, αφενός από τη θερμοκρασία λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, και αφετέρου από την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του. Ειδικότερα, μια στιγμιαία μεταβολή της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, που προσπίπτει στη φωτοβολταϊκή επιφάνεια (G_t), προκαλεί ανάλογη αλλαγή στην τιμή της έντασης του ρεύματος (I), ενώ παρατηρείται αμελητέα μεταβολή της τάσης (V). Αντίθετα, η τάση (V) ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (T_m), ενώ η τιμή της έντασης του ρεύματος (I) αυξάνει ελαφρώς. Βάσει των παραπάνω καθίσταται σαφές ότι η αύξηση της θερμοκρασίας ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου επιφέρει μείωση της ηλεκτρικής ισχύος του (P_M), δεδομένου ότι η ποσοστιαία ελάττωση της τάσης (V), ανά βαθμό θερμοκρασίας, είναι

σημαντικά υψηλότερη (περίπου μια τάξη μεγέθους) της αντίστοιχης αύξησης της έντασης ρεύματος (*I*).

Στο Διάγραμμα 6-18 (a-b), οι καμπύλες μεταβολής Ισχύος-Τάσης (P-V) και Έντασης ρεύματος-Τάσης (I-V), ληφθείσες στις 11:40 μιας ανοιξιάτικης ημέρας (11/5/2017), παρουσιάζονται προκειμένου να καταστεί διακριτή η σχέση εξάρτησης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης από τις συνθήκες λειτουργίας τους. Πιο συγκεκριμένα, η ηλεκτρική ισχύς που απέδωσε το σύστημα PV+PCM ($P_{M,PV+PCM}$) καταγράφηκε σαφώς υψηλότερη σε σχέση με την τιμή που προσδιορίστηκε για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς ($P_{M,PV\ reference}$), όπως ήταν αναμενόμενο λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας λειτουργίας του τη δεδομένη στιγμή. Η σχετική αύξηση απεικονίζεται επίσης από τη λογική αύξηση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{OC}) και τη σχεδόν αμελητέα μεταβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{SC}) του συστήματος PV+PCM. Σύμφωνα με τα ληφθέντα αποτελέσματα (Πίνακας 6-4), η αποδιδόμενη ισχύς και η απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου χωρίς PCM ($P_{M,PV\ reference}$, $n_{ELEC\ ,PV\ reference}$) ήταν 100,65 W και 8,48%, αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες τιμές για το σύστημα PV+PCM ($P_{M,PV+PCM}$, $n_{ELEC,\ PV+PCM}$) σημειώθηκαν αυξημένες κατά 5,22 W (105,86 W) και 0,5% (8,94%), αντίστοιχα.



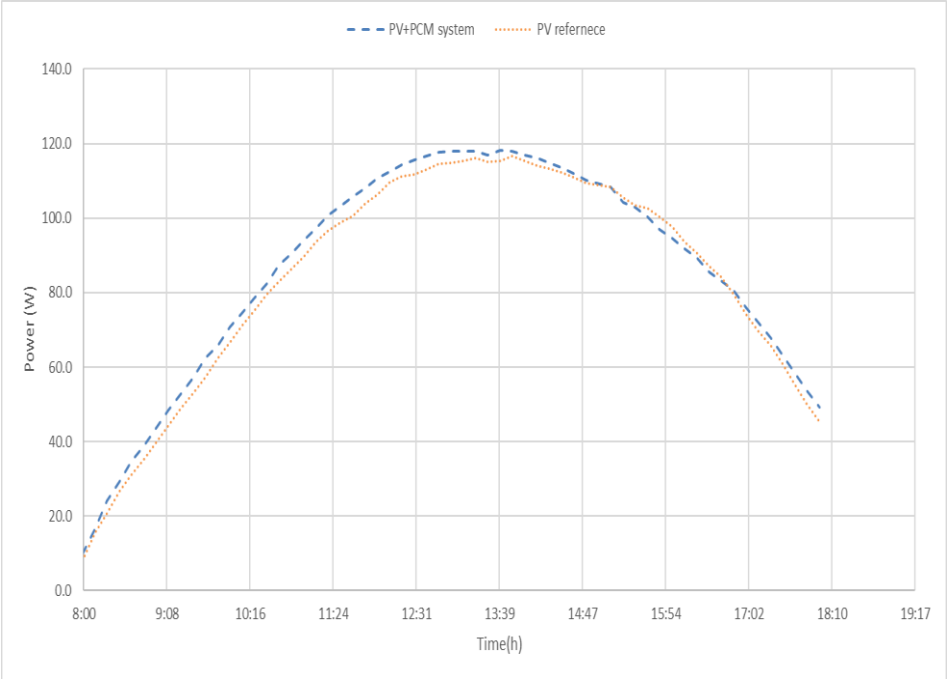
Διάγραμμα 6-18: Γραφική απεικόνιση των ηλεκτρικών παραμέτρων του φωτοβολταϊκού πλαισίου με PCM (σύστημα PV+PCM) και χωρίς PCM (φωτοβολταϊκό αναφοράς), βάσει των χαρακτηριστικών καμπυλών μεταβολής P-V και I-V στις 11:40 (11/5/2017).

	G_t	T_m	I_{sc}	V_{oc}	I_M	V_M	P_M	n_{ELEC}	FF
	W/m^2	^{o}C	A	V	A	V	W	%	
Σύστημα PV+PCM	843	40,3	3,07	53,92	2,63	40,25	105,86	8,94	63,89
Φωτοβολταϊκό αναφοράς		61,4	2,99	53,34	2,55	39,47	100,65	8,48	63,31

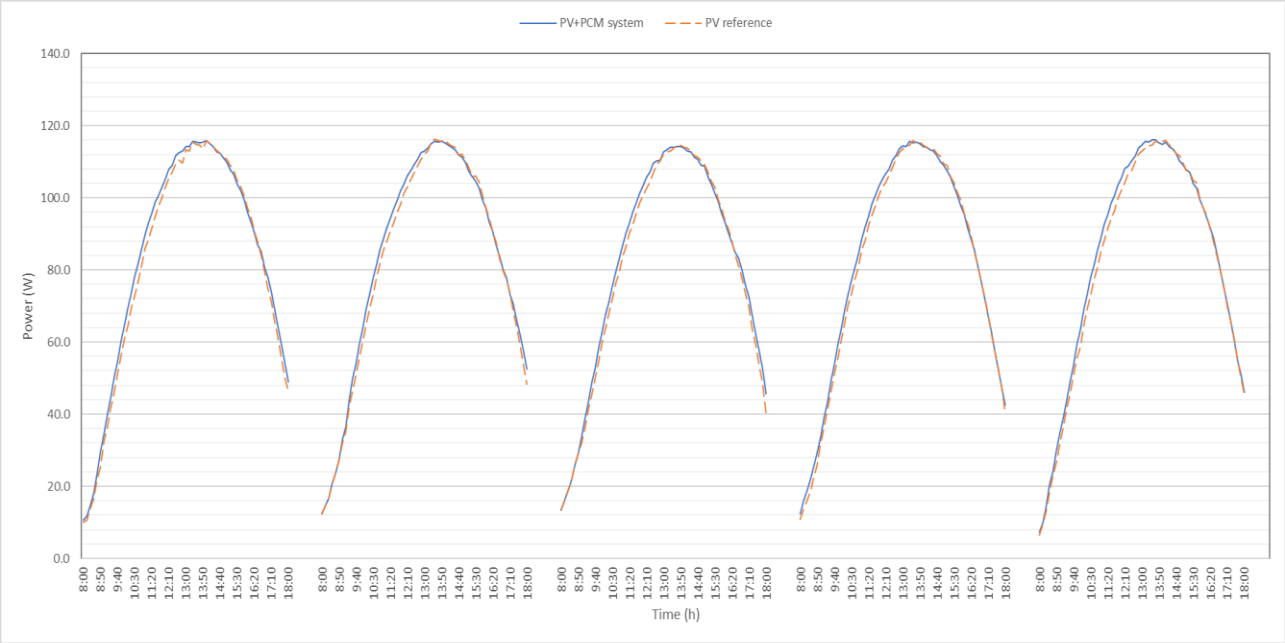
Πίνακας 6-4: Συγκριτικός πίνακας των ηλεκτρικών παραμέτρων του φωτοβολταϊκού πλαισίου με PCM (σύστημα PV+PCM) και χωρίς PCM (φωτοβολταϊκό αναφοράς), όπως σημειώθηκαν στις 11:40 (11/5/2017).

Η διακύμανση της ηλεκτρικής ισχύος που απέδωσαν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια της πειραματικής διάταξης ($P_{M,PV\ reference}$, $P_{M,PV+PCM}$) κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (11/5/2017) απεικονίζεται στο Διάγραμμα 6-19. Είναι φανερό ότι η ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού αναφοράς ($P_{M,PV\ reference}$) καταγράφονταν περιορισμένη σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του συστήματος PV+PCM ($P_{M,PV+PCM}$), κυρίως κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ 8:30 και 14:50. Επιπλέον, η ημερήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος PV+PCM ($E_{DC,d\ _PV+PCM}$) βρέθηκε ίση με 0,87 kWh/d, όντας ενισχυμένη κατά

0,08 kWh/d (αύξηση περίπου 10,1 %) σε σχέση με την ενέργεια που παρήγαγε το φωτοβολταϊκού πλαίσιο αναφοράς ($E_{DC,d_PV\ reference}$= 0,79 kWh/d). Τέλος, θα πρέπει να επισημανθεί ότι το σύστημα PV+PCM παρουσίαζε γενικά βελτιωμένη ενεργειακή απόκριση κυρίως κατά τις πρωινές ώρες λειτουργίας του (μεταξύ 8:00-13:00), ακόμη και σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών που συναντώνται, κυρίως, κατά τη θερινή περίοδο (Διάγραμμα 6-20).



Διάγραμμα 6-19: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ανοιξιάτικης ημέρας (11/5/2017).



Διάγραμμα 6-20: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας περιόδου πέντε (5) ημερών του καλοκαιρού (28/7/2016-1/8/2016).

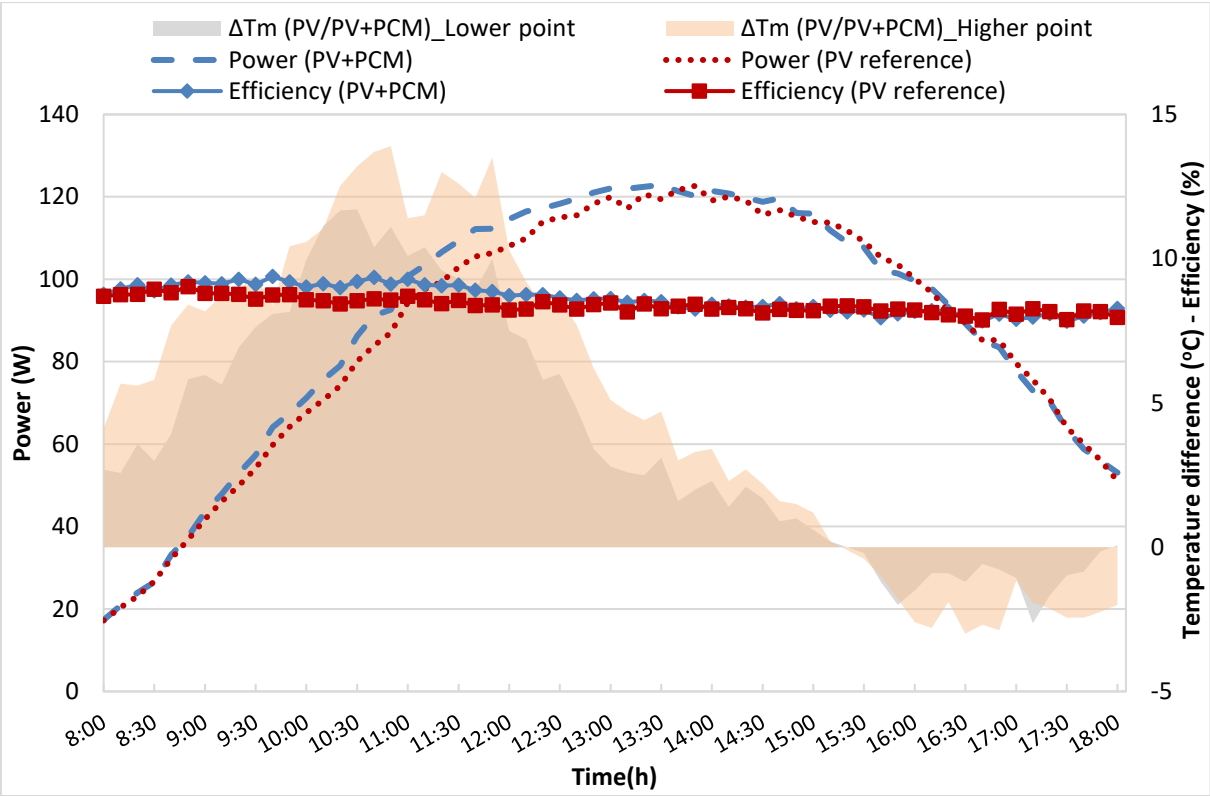
6.4.2 Εξάρτηση της ηλεκτρικής ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM από τη θερμοκρασία

Η τρέχουσα ενότητα εστιάζει στην ανάλυση του μηχανισμού και του βαθμού επίδρασης της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM στην αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύ και την απόδοση τους. Για το σκοπό αυτό, οι καταγεγραμμένες πειραματικές μετρήσεις των παραμέτρων που αφορούν την ενεργειακή και τη θερμική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης αξιοποιήθηκαν κατάλληλα ώστε να γίνουν οι απαιτούμενοι υπολογισμοί και να προκύψουν ακριβή αποτελέσματα. Στα διαγράμματα (6-21 – 6-32), η διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM για μια τυπική ημέρα από κάθε ελεγχόμενο μήνα, αναπαρίσταται γραφικά σε σχέση με το χρόνο.

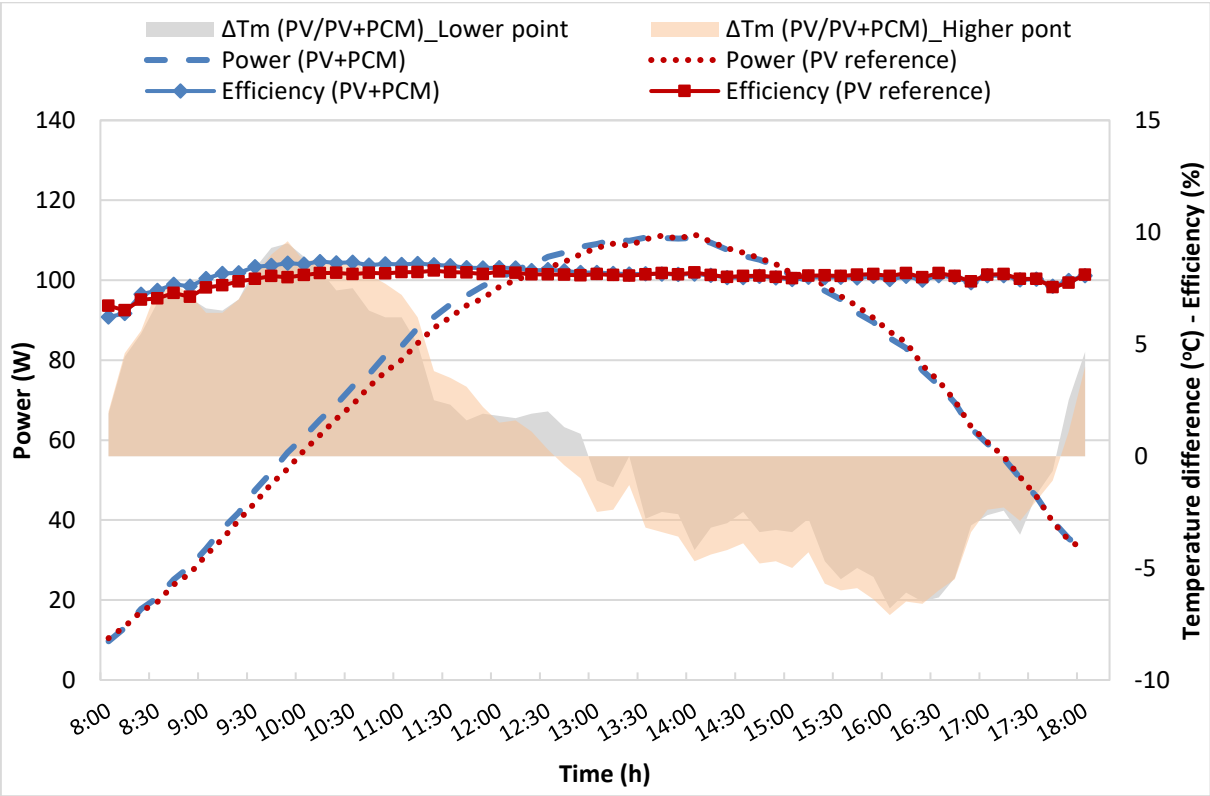
Σύμφωνα με τα ληφθέντα αποτελέσματα, η ηλεκτρική ισχύς ($P_{M,PV+PCM}$) που απέδωσε το σύστημα PV+PCM ήταν υψηλότερη σε σχέση με την ισχύ εξόδου από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς ($P_{M,PV\ reference}$) κατά το μεγαλύτερο μέρος μιας τυπικής θερινής ημέρας με ασθενή άνεμο, ως αποτέλεσμα της σημαντικής απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας τους που παρατηρήθηκε για το ίδιο χρονικό διάστημα (Διάγραμμα 6-21). Συγκεκριμένα, η αποδοθείσα ισχύς από το σύστημα PV+PCM ($P_{M,PV+PCM}$) αυξήθηκε σταθερά από 17,3 W στις 8:00 έως 122,9 W στις 13:30, ενώ στη συνέχεια μειώνεται μέχρι τα 53,0 W στις 18:00, ακολουθώντας τη μεταβολή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολία (G_t). Αντίστοιχα, η ηλεκτρική ισχύς του φωτοβολταϊκού αναφοράς ($P_{M,PV\ reference}$) κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 17,2 -122,7 W από τις 8:00 ως τις 13:50, ενώ η σχετική τάση διακύμανσης μεταξύ 14:00-18:00 παρατηρήθηκε όμοια με το σύστημα PV+PCM. Γενικά, η μέση ποσοστιαία μείωση της ισχύος του φωτοβολταϊκού αναφοράς ($P_{M,PV\ reference}$) μεταξύ των ωρών 8:30-13:00, ήταν περίπου 5,5% ως αποτέλεσμα των αυξημένων ενεργειακών απωλειών που προκύπτουν από τη λειτουργία του σε τιμές θερμοκρασίας υψηλότερες έναντι των σχετικών τιμών για το σύστημα PV+PCM κατά το ίδιο χρονικό διάστημα. Επί παραδείγματι, στις 11:00, όταν η απόκλιση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)}$) ήταν περίπου 11 ^{o}C, η αποδιδόμενη ισχύς από το σύστημα PV+PCM και το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς ήταν 100,7 W και 94,3 W, αντίστοιχα, με τη σχετική ποσοστιαία διαφοροποίηση λόγω της χρησιμοποίησης του PCM να σημειώνεται ίση με 6,8 %. Συνολικά, η ημερήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος από το σύστημα PV+PCM ($E_{DC,d\ _PV+PCM}$) εκτιμήθηκε ίση με 0,92 kWh/d, όντας ενισχυμένη κατά 3,4 % σε σχέση με την ενέργεια που παρήγαγε το φωτοβολταϊκού πλαίσιο αναφοράς ($E_{DC,d\ _PV\ reference}$= 0,89 kWh/d). Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι ο χρησιμοποιούμενος τύπος PCM συνέβαλε για την αύξηση της ισχύος που απέδιδε το σύστημα PV+PCM, κατά το χρονικό διάστημα που η απόκλιση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)}$) ήταν θετική. Πέραν αυτού, η απόδοση του συστήματος PV+PCM ($\eta_{ELEC,\ PV+PCM}$) βρέθηκε σημαντικά βελτιωμένη, εντός της περιοχής τιμών 8,5-9,4%, κατά το χρονικό διάστημα από 8:30 έως 13:00, όταν η απόδοση της περίπτωσης αναφοράς κυμαίνονταν από 8,2% έως 9,0%. Έπειτα,

οι τιμές της ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης παρατηρήθηκαν με ανάλογη διακύμανση (7,8-8,8%), με τις όποιες αποκλίσεις να συνδέονται με την παρατηρούμενη τάση μικρής διαφοροποίησης των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας τους. Ακόμη, η μέση και η μέγιστη τιμή που χαρακτηρίζουν την απόδοση του συστήματος PV+PCM και του φωτοβολταϊκού αναφοράς προσδιορίστηκαν ίσες με 8,6% και 9,4%, 8,4% και 9,0%, αντίστοιχα, υποδεικνύοντας τα επίπεδα βελτίωσης που επιτευχθήκαν με την αξιοποίηση του επιλεγμένου PCM. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι μια μεγαλύτερη ποσότητα ή η επιλογή PCM με υψηλότερο σημείο τήξης και ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας θα μπορούσε να καταφέρει ακόμη καλύτερα αποτελέσματα και χρονική συνέπεια με το διάστημα υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας.

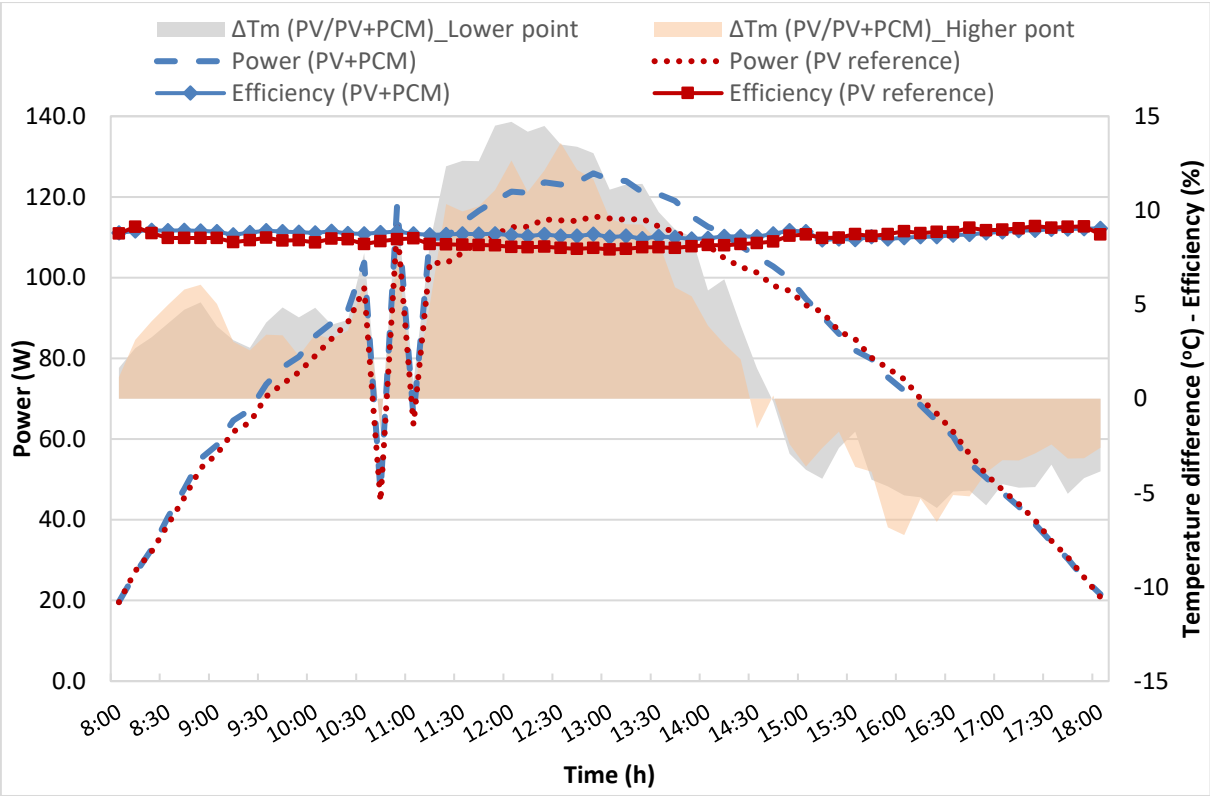
Όπως διακρίνεται από το Διάγραμμα 6-22, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο που έφερε κατάλληλο δοχείο αποθήκευσης πληρωμένο με PCM παρουσίαζε οριακά βελτιωμένη απόδοση και ελαφρώς αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς κατά τη διάρκεια μιας θερμής ημέρας του καλοκαιριού (2/8/2016). Οι ανωτέρω παρατηρήσεις συνδέονται άμεσα με τη θετική ενεργειακή απόκριση του συστήματος PV+PCM κυρίως τις πρωινές ώρες της ημέρας (8:00-12:00), όταν το εύρος διακύμανσης των τιμών της αποδοθείσας ηλεκτρικής ισχύος από το σύστημα PV+PCM και το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς ($P_{M,PV+PCM}$, $P_{M,PV\ reference}$) ήταν από 9,7-100,3 W και 10,5-98,3 W, αντίστοιχα. Αντίθετα, η ηλεκτρική ισχύς του συστήματος PV+PCM παρατηρούνταν ελαττωμένη κατά 1-2% συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές για την περίπτωση αναφοράς κατά το χρονικό διάστημα 13:10-17:30. Ενδεικτικά, στις 9:50, η αποδιδόμενη ισχύς του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM παρατηρήθηκε 52,8 W και 57,0 W, αντίστοιχα, όταν η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G_t), η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T\alpha$), η ταχύτητα ανέμου (v_w) και η απόκλιση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)}$) ήταν 471 W/m^2, 34,5 ^{o}C, 0,9 m/s και 9,5 ^{o}C, αντίστοιχα. Σε αντιπαραβολή, στις 16:00, η ισχύς που απέδωσε το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς και το σύστημα PV+PCM ήταν ίση με 87,1 W και 85,5 W, αντίστοιχα, ενώ οι αντίστοιχες τιμές που χαρακτήριζαν τις συνθήκες λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης (G_t, $T\alpha$, v_w, $\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)}$) ήταν 772 W/m^2, 34,1 ^{o}C, 3,1 m/s και -6,9 ^{o}C, αντίστοιχα. Συμπερασματικά, η μέση και η μέγιστη τιμή αύξησης της ηλεκτρικής ισχύος του φωτοβολταϊκού πλαισίου, η οποία επιτεύχθηκε μέσω της ένταξης του επιλεγμένου PCM, ήταν 1,9% και 7,8%, αντίστοιχα. Παράλληλα, τα αποτελέσματα για την απόδοση ενεργειακής μετατροπής των φωτοβολταϊκών της πειραματικής διάταξης (Διάγραμμα 6-22) υπέδειξαν οριακή βελτίωση της απόκρισης του συστήματος PV+PCM καθώς η σχετική διακύμανση τους παρατηρήθηκε εντός της περιοχής τιμών 6,2-8,7%, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για τη φωτοβολταϊκό πλαίσιο χωρίς PCM κυμάνθηκαν από 6,5% έως 8,3%. Έτσι, η μέση τιμή αύξησης της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου με PCM σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς ήταν 1,7%. Εν κατακλείδι, τα συνολικά ενεργειακά κέρδη του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια του ημερήσιου κύκλου λειτουργίας τους κρίνονται ισχνά, παρά τα θετικά αποτελέσματα που καταγράφηκαν κατά το 1° μισό της ημέρας (πριν από το μεσημέρι), υποδεικνύοντας την ανάγκη επανεξέτασής της επιλογής PCM με σημείο τήξης ($T_{PCM,\ melt}$) ίσο με 27 ^{o}C.



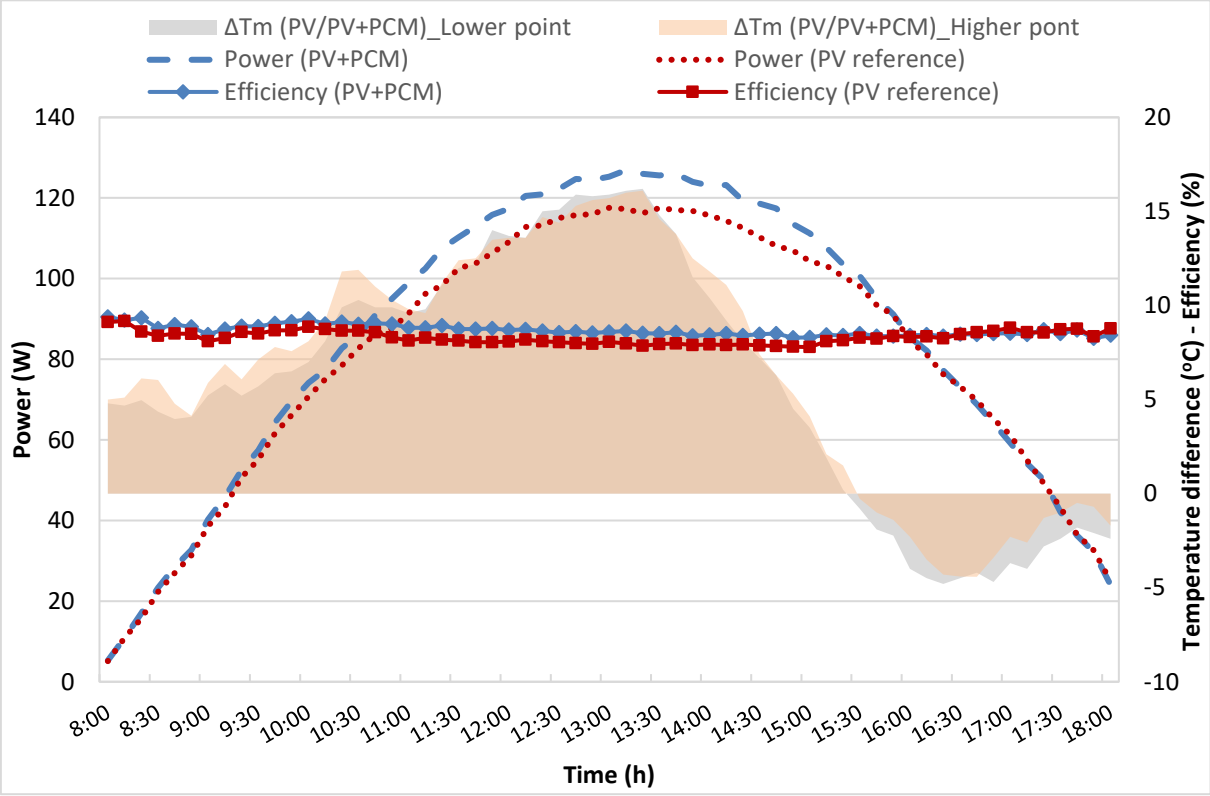
Διάγραμμα 6-21: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας (21/7/2016).



Διάγραμμα 6-22: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας (2/8/2016).



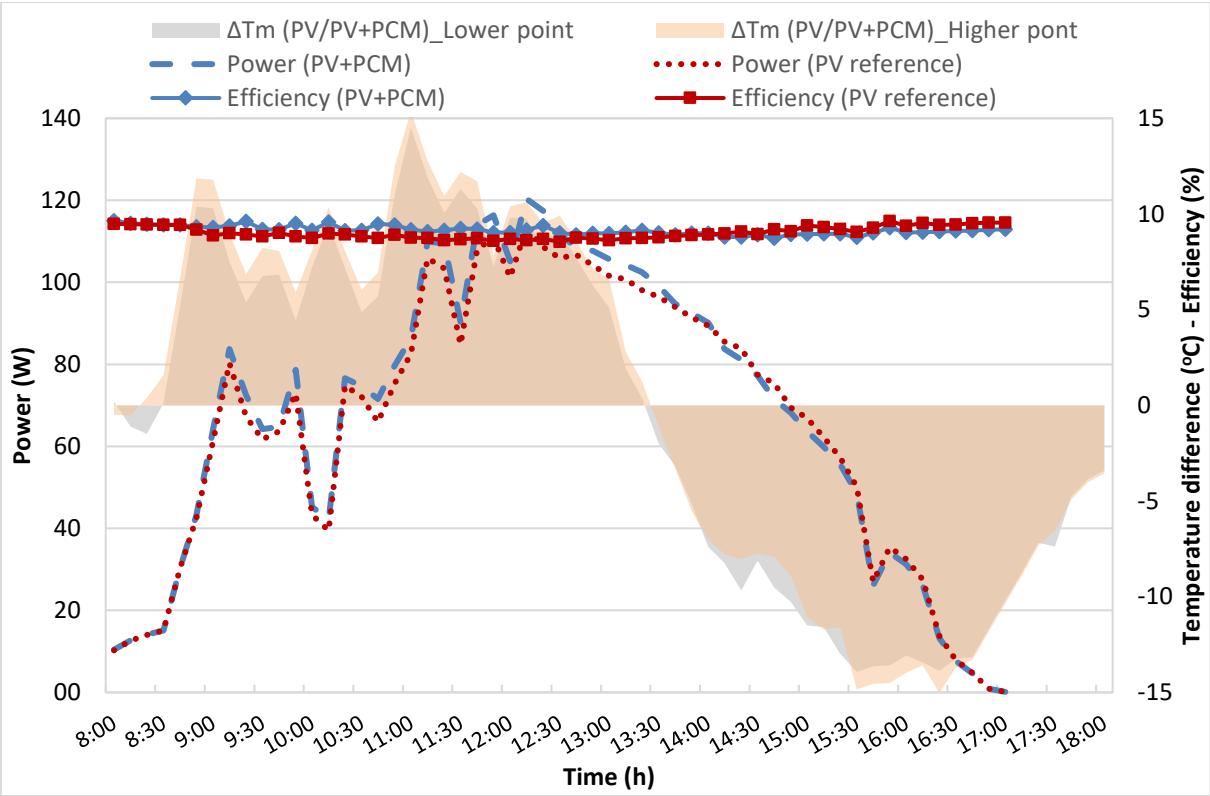
Διάγραμμα 6-23: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας φθινοπωρινής ημέρας (11/9/2016).



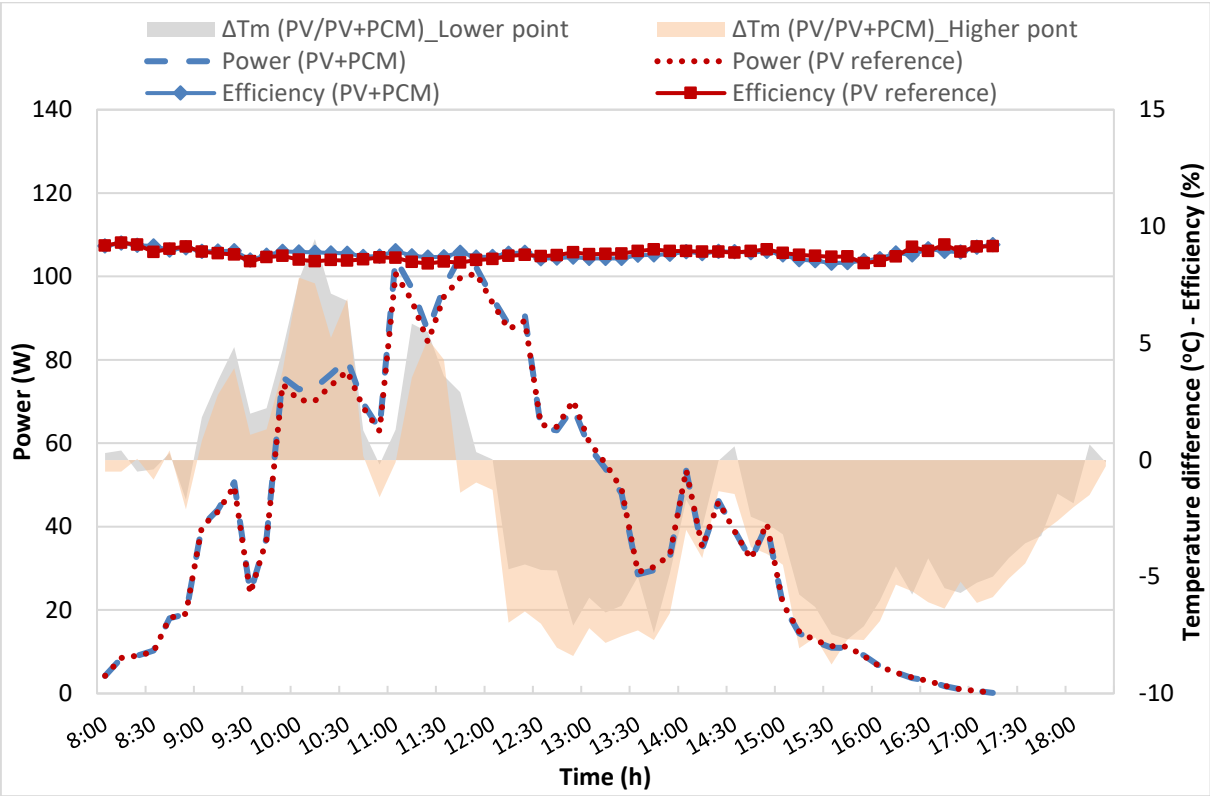
Διάγραμμα 6-24: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας φθινοπωρινής ημέρας (12/10/2016).

Η ημερήσια εξέλιξη των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την ενεργειακή συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM σε σχέση με την απόκλιση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας τους κατά τη διάρκεια μια τυπικής φθινοπωρινής ημέρας του Σεπτεμβρίου (11/9/2016) παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 6-23. Πιο αναλυτικά, η αποδοθείσα ηλεκτρική ισχύς από το σύστημα PV+PCM ($P_{M,PV+PCM}$) κυμάνθηκε από 19,6 W έως 125,9 W, ενώ το εύρος διακύμανσης των αντίστοιχων τιμών για την περίπτωση αναφοράς ήταν από 19,5 W έως 115,2 W. Επιπλέον, η ισχύς εξόδου (P_M) του συστήματος PV+PCM παρατηρούνταν αυξημένη περίπου κατά 6%, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές για το φωτοβολταϊκό αναφοράς, για το μεγαλύτερο μέρος της εξεταζόμενης ημέρας. Η σχετική αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος προέκυψε ως αποτέλεσμα της σημαντικής απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας τους που παρατηρήθηκε για το ίδιο χρονικό διάστημα. Κατά συνέπεια, η ημερήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου που επωφελήθηκε των ιδιοτήτων του PCM (E_{DC,d_PV+PCM}) προσδιορίστηκε ίση με 0,84 kWh/d, δηλαδή αυξημένη κατά 5% σε σχέση με την τιμή 0,8 kWh/d, η οποία προσδιορίστηκε για την περίπτωση του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($E_{DC,d_PV\ reference}$). Αναλύοντας περαιτέρω τα καταγεγραμμένα στοιχεία για την ενεργειακή συμπεριφορά της πειραματικής διάταξης, παρατηρήθηκε η ενίσχυση της απόδοσης του εξεταζόμενου τύπου φωτοβολταϊκού πλαισίου με την ένταξη του PCM, η οποία κυμάνθηκε από 0,48% έως 9,27%. Τέλος, η μέση ημερήσια τιμή της απόδοσης του συστήματος PV+PCM και της περίπτωσης αναφοράς ($n_{ELEC,\ PV+PCM}$, $n_{ELEC,\ PV\ reference}$) ήταν 8,7% και 8,4%, αντίστοιχα.

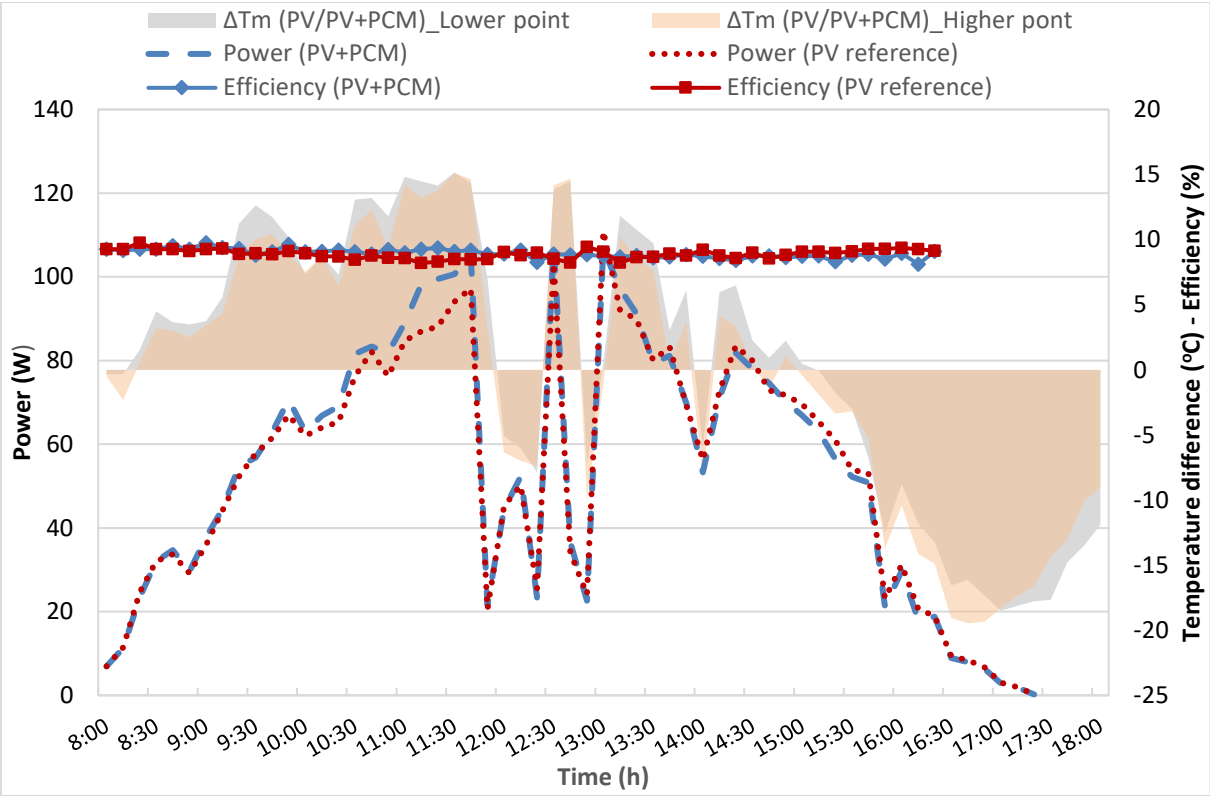
Η επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων που εκτελέστηκαν κατά τη διάρκεια μιας φθινοπωρινής ημέρας του Οκτωβρίου (12/10/2016) έδειξε βελτιωμένα αποτελέσματα για την ενεργειακή απόκριση του συστήματος PV+PCM συγκριτικά με την περίπτωση αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, η ισχύς εξόδου από το συμβατικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο ($P_{M,PV\ reference}$) εντοπίζονταν χαμηλότερη από την ηλεκτρική ισχύ του συστήματος PV+PCM ($P_{M,PV+PCM}$), αποδοθείσα μεταξύ των ωρών 8:00 και 15:20, εξαιτίας της σημαντικής διαφοροποίησης των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των εξεταζόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)}$) κατά το ίδιο χρονικό διάστημα (Διάγραμμα 6-24). Το εύρος διακύμανσης των τιμών της ισχύος που απέδωσαν το σύστημα PV+PCM και το φωτοβολταϊκό αναφοράς ($P_{M,PV+PCM}$, $P_{M,PV\ reference}$) ήταν 5,3-126,9 W και 5,1-117,6 W, αντίστοιχα. Ακόμη, η συνολική ημερήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου με και χωρίς PCM (E_{DC,d_PV+PCM}, $E_{DC,d_PV\ reference}$) ανήλθε σε 0,86 kWh/d και 0,81 kWh/d, αντίστοιχα, με τη σχετική αύξηση της τάξης του 6,2% να αποδίδεται στη χρησιμοποίηση της προτεινόμενης μεθόδου παθητικής ψύξης. Επίσης, η απόδοση του συστήματος PV+PCM ($n_{ELEC,\ PV+PCM}$) επισημάνθηκε βελτιωμένη, εντός της περιοχής τιμών 8,3-9,4%, ενώ το αντίστοιχο εύρος διακύμανσης των τιμών της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($n_{ELEC,\ PV\ reference}$) ήταν 7,8-9,2%. Συγκεντρωτικά, διαπιστώθηκε ότι η μέση και η μέγιστη τιμή απόκλισης της απόδοσης του συστήματος PV+PCM έναντι του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς βρέθηκαν ίσες με 4,6% και 9,3%, αντίστοιχα, παρά την εμφάνιση του φαινομένου "κόπωσης" του συστήματος PV+PCM κατά τις απογευματινές ώρες της ημέρας (15:00-18:00), όπως διακρίνεται στο Διάγραμμα 6-24.



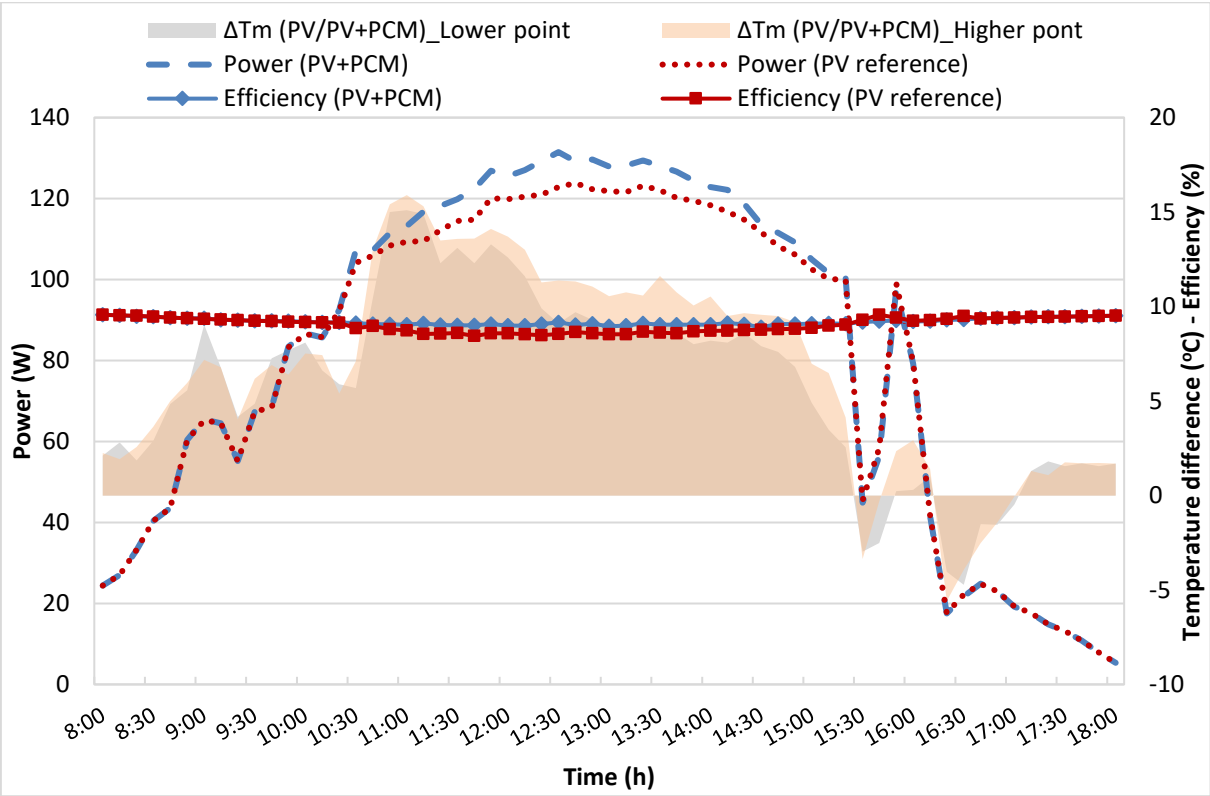
Διάγραμμα 6-25: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας φθινοπωρινής ημέρας (17/11/2016).



Διάγραμμα 6-26: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής ημέρας (19/12/2016).



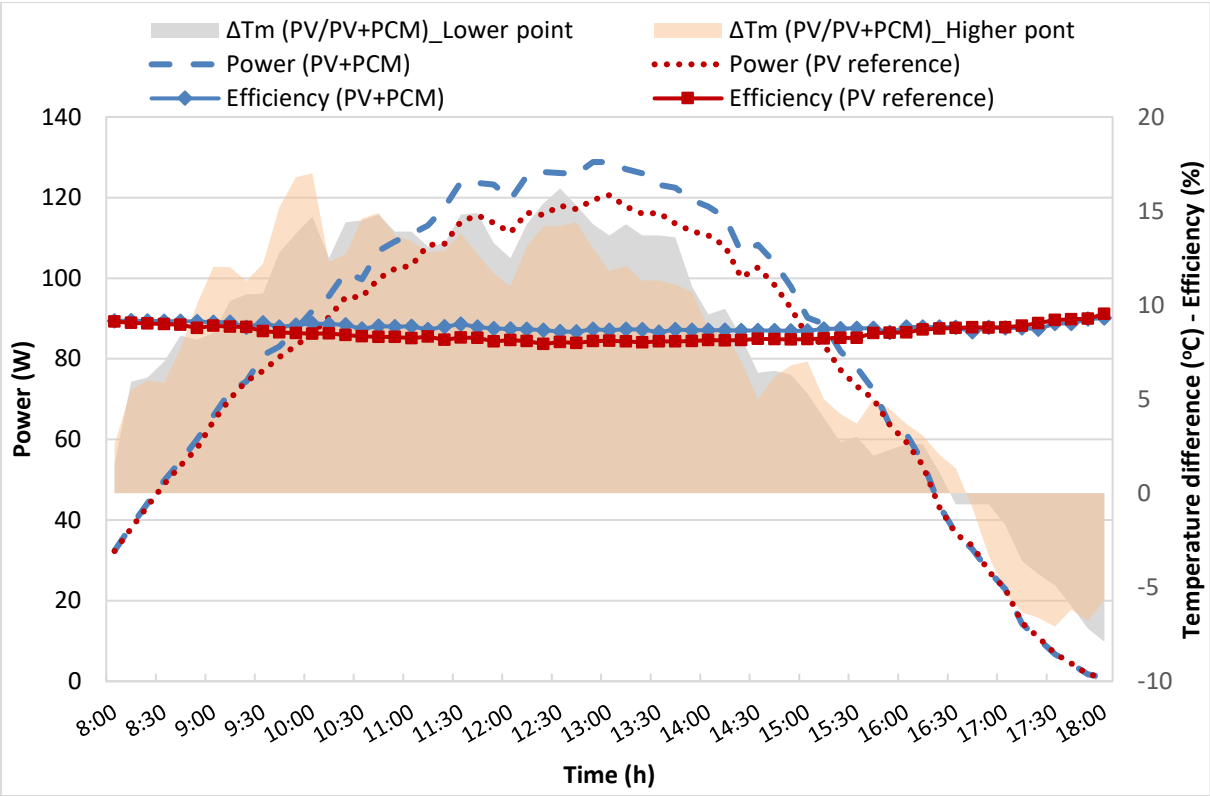
Διάγραμμα 6-27: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής ημέρας (17/1/2017).



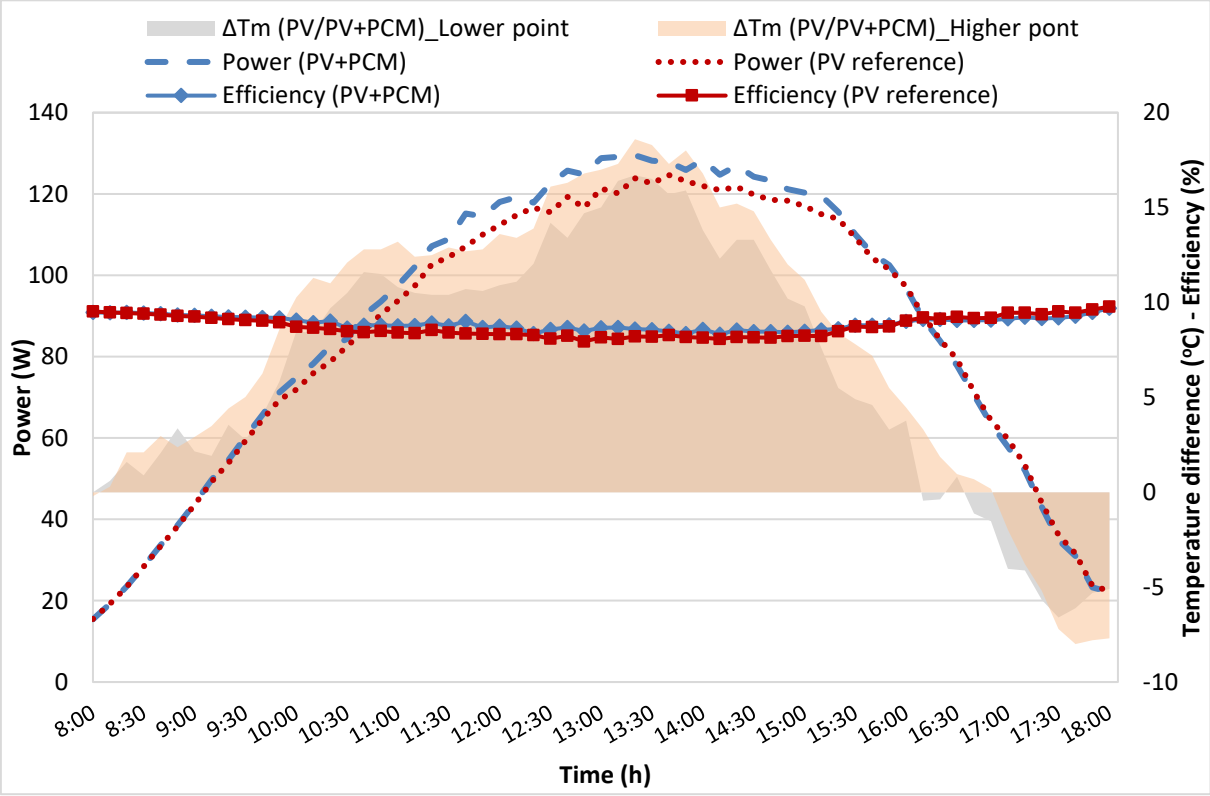
Διάγραμμα 6-28: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής ημέρας (21/2/2017).

Τα αποτελέσματα που σχετίζονται με την ενεργειακή απόκριση του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, συναρτήσει της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας τους, κατά τη διάρκεια των ψυχρότερων μηνών της περιόδου πειραματικής αξιολόγησης παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 6-25 - 6-28. Γενικά, τις αίθριες ημέρες της χειμερινής περιόδου, η ηλεκτρική ισχύς που αποδόθηκε από το σύστημα PV+PCM ($P_{M,PV+PCM}$) παρατηρούνταν ενισχυμένη, συγκριτικά με την ισχύ εξόδου από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς ($P_{M,PV\ reference}$), καθότι λειτουργούσε υπό ευνοϊκότερες συνθήκες (χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας) που διαμορφώθηκαν μέσω της ενσωμάτωσης του επιλεγμένου PCM. Ενδεικτικά, τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, οι οποίες έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια μιας αίθριας ημέρας του χειμώνα (21/2/2017), ανέδειξαν τη συμβολή του PCM για την αναβάθμιση της ενεργειακής συμπεριφοράς των φωτοβολταϊκών, όπως διακρίνεται από την αποδοθείσα ηλεκτρική ισχύ του συστήματος PV+PCM και του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($P_{M,PV+PCM}$, $P_{M,PV\ reference}$) με εύρος διακύμανσης τιμών από 5,3-131,5 W και 5,2-123,8 W, αντίστοιχα. Επιπλέον, είναι φανερό ότι η διαφοροποίηση της ισχύος (P_M) του συστήματος PV+PCM έναντι της περίπτωσης αναφοράς είναι ανάλογη της απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)}$). Συνολικά, η ενεργειακή παραγωγή συνεχούς ρεύματος από το σύστημα PV+PCM (E_{DC,d_PV+PCM}) έφτασε τις 0,83 kWh/d, όντας ενισχυμένη κατά 5,2% σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($E_{DC,d_PV\ reference}$). Επίσης, η απόδοση του συστήματος PV+PCM ($n_{ELEC,\ PV+PCM}$) καταγράφηκε βελτιωμένη, εντός της περιοχής τιμών 8,9-9,6%, ενώ το αντίστοιχο εύρος διακύμανσης της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($n_{ELEC,\ PV\ reference}$) ήταν 8,4-9,5% (Διάγραμμα 6-28). Εν κατακλείδι, η διεύρυνση της μέγιστης ισχύος, και κατ' επέκταση της απόδοσης, του ελεγχόμενου φωτοβολταϊκού τύπου ως αποτέλεσμα της ένταξης του PCM κυμάνθηκε από 0,2% έως 7,1%.

Από την άλλη, η ηλεκτρική ισχύς εξόδου από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια της πειραματικής διάταξης κατά τη διάρκεια μιας τυπικής χειμερινής ημέρας (19/12/2016) παρατηρήθηκε με όμοια διακύμανση, ως άμεσο αποτέλεσμα της περιορισμένης απόκλισης των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)}$) και της χαμηλής έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_t). Ειδικότερα, η αποδοθείσα ισχύς από το σύστημα PV+PCM και το φωτοβολταϊκό αναφοράς ($P_{M,PV+PCM}$, $P_{M,PV\ reference}$) προσδιορίστηκε εντός της περιοχής τιμών 0,1-104,7 W και 0,1-101,2 W, αντίστοιχα. Παράλληλα, η παραχθείσα ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο με και χωρίς PCM (E_{DC,d_PV+PCM}, $E_{DC,d_PV\ reference}$) βρέθηκε ίση με 0,39 kWh/d και 0,38 kWh/d, αντίστοιχα, με τη σχετική διαφοροποίηση (περίπου 2,6%) των σχετικών τιμών να κρίνεται ως οριακή, χωρίς να αιτιολογεί τη χρήση του PCM. Αντιστοίχως, η μέση ημερήσια τιμή απόδοσης του συστήματος PV+PCM και του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($n_{ELEC,\ PV+PCM}$, $n_{ELEC,\ PV\ reference}$) ήταν 8,8% και 8,7%, αντίστοιχα, χωρίς σημαντική διακύμανση μεταξύ των τιμών της. Λογικά, λοιπόν, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η επιλογή PCM με θερμοκρασία τήξης ($T_{PCM,melt}$) 27 ^oC δεν ήταν κατάλληλη προκειμένου να καταφέρει την ενίσχυση της ενεργειακής συμπεριφοράς του συστήματος PV+PCM σε συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών ($T\alpha$) και υψηλής μεταβλητότητας της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_t), οι οποίες παρατηρούνται ως επί το πλείστον τους χειμερινούς μήνες.



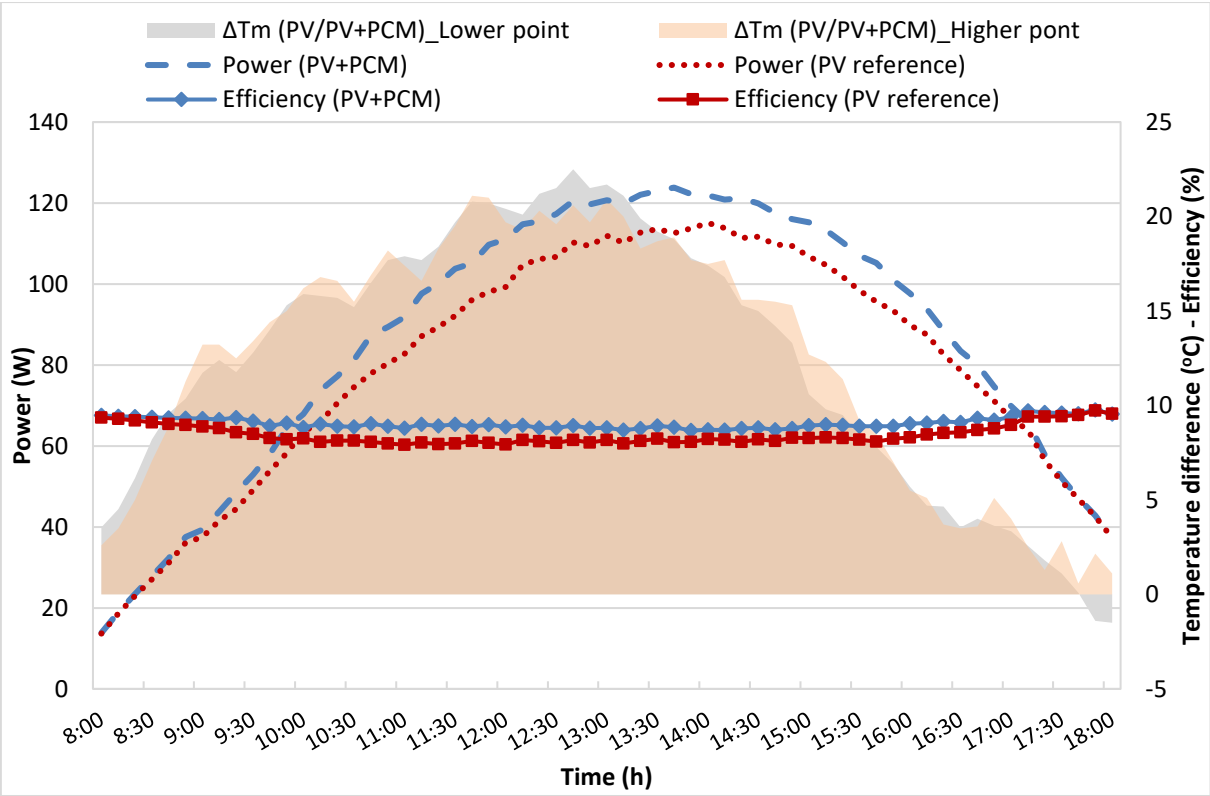
Διάγραμμα 6-29: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (23/3/2017).



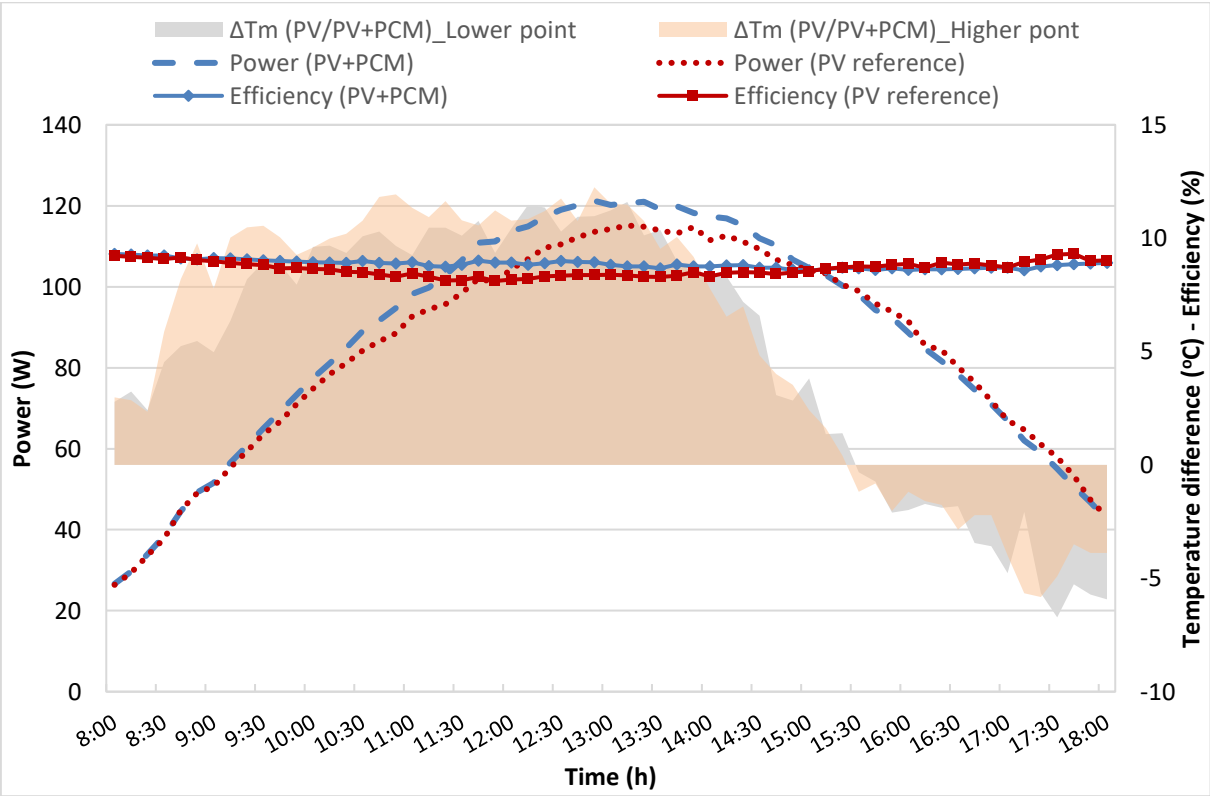
Διάγραμμα 6-30: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (27/4/2017).

Στο Διάγραμμα 6-29 παρατίθενται οι καμπύλες μεταβολής της ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, καθώς και της απόκλισης των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας τους, κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ανοιξιάτικης ημέρας (23/3/2017). Βάσει των αποτελεσμάτων, κατά το μεγαλύτερο μέρος της εξεταζόμενης ημέρας, η ηλεκτρική ισχύς ($P_{M,PV+PCM}$) που απέδωσε το σύστημα PV+PCM καταγράφονταν ευκρινώς υψηλότερη από την προερχόμενη εκ του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ισχύ ($P_{M,PV\ reference}$), κυρίως λόγω της καλύτερης θερμικής απόκρισης του το δεδομένο χρονικό διάστημα. Για την ακρίβεια, η αποδοθείσα ισχύς από το σύστημα PV+PCM ($P_{M,PV+PCM}$) αυξήθηκε από 32,4 W στις 8:00 έως τη μέγιστη τιμή της 128,8 W στις 12:50, ενώ στη συνέχεια μειώνεται μέχρι τα 1,7 W στις 18:00, ακολουθώντας την τάση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολία (G_t). Ομοίως, η ηλεκτρική ισχύς του φωτοβολταϊκού αναφοράς ($P_{M,PV\ reference}$) κυμάνθηκε εντός της περιοχής τιμών 32,3-119,4 W μεταξύ των ωρών 8:00-12:50 και έπειτα περιορίστηκε σταδιακά μέχρι το τέλος του ημερήσιου κύκλου πειραματικών μετρήσεων. Γενικά, η ποσοστιαία απόκλιση των τιμών της ηλεκτρικής ισχύος του φωτοβολταϊκού αναφοράς ($P_{M,}$) και το σύστημα PV+PCM ($\Delta P_{M,\ (PV+PCM/PV)}$) υπολογίστηκε από -3,4% έως 9,6%, με διακύμανση ανάλογη της απόκλισης των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)}$). Πέραν αυτού, η ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος που παρήγαγε το φωτοβολταϊκό πλαίσιο με PCM (E_{DC,d_PV+PCM}) προσδιορίστηκε ίση με 0,84 kWh/d, παρουσιάζοντας αύξηση κατά 6,3% σε σχέση με την τιμή 0,78 kWh/d, η οποία αφορούσε την παραχθείσα ενέργειας από το φωτοβολταϊκό αναφοράς. Επίσης, η απόδοση του συστήματος PV+PCM ($n_{ELEC,\ PV+PCM}$) εμφανίζονταν αναβαθμισμένη κατά το χρονικό διάστημα από 8:00 έως 16:20, με εύρος διακύμανσης από 8,5-9,2%, όταν η απόδοση ενεργειακής μετατροπής του φωτοβολταϊκού αναφοράς κυμαίνονταν από 7,9% έως 9,1%. Τέλος, μπορεί να επισημανθεί ότι το σύστημα PV+PCM είχε ικανή λειτουργική προσαρμογή στις επικρατούσες συνθήκες της εξεταζόμενης ημέρας, δεδομένης της σημαντικής επίδρασης του χρησιμοποιούμενου PCM για τη διατήρηση υψηλότερης, σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς, απόκριση.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που αναπαρίστανται γραφικά στο Διάγραμμα 6-30, η ενεργειακή συμπεριφορά του συστήματος PV+PCM, κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας της άνοιξης (27/4/2017), παρουσιάστηκε βελτιωμένη σε σύγκριση με την απόκριση της περίπτωσης αναφοράς. Πιο ειδικά, η διεύρυνση των ενεργειακών κερδών μέσω του συστήματος PV+PCM παρατηρήθηκε κυρίως μεταξύ των ωρών 8:20-15:50, όταν το εύρος διακύμανσης των τιμών της αποδοθείσας ηλεκτρικής ισχύος από το σύστημα PV+PCM και το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς ($P_{M,PV+PCM}$, $P_{M,PV\ reference}$) ήταν από 23,7-129,5 W και 22,9-124,6 W, αντίστοιχα. Εν αντιθέσει, κατά το χρονικό διάστημα 15:50-18:00, η ηλεκτρική ισχύς που αποδόθηκε από την περίπτωση αναφοράς καταγράφονταν μειωμένη κατά 0,3-3,4 W, σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές ισχύος του συστήματος PV+PCM. Επιπλέον, η μέση ημερήσια απόδοση του συστήματός PV+PCM ήταν 8,9%, με εύρος διακύμανσής εντός της περιοχής τιμών 8,3-9,5%, ενώ τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το φωτοβολταϊκό αναφοράς ήταν 8,6% και 7,9-9,5%. Από όλα τα παραπάνω, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η ένταξη του PCM στον εξεταζόμενο τύπο φωτοβολταϊκού πλαισίου διασφαλίζει αυξημένη ενεργειακή παραγωγή και απόδοση κατά τη διάρκεια μιας αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας, ενώ τα περιθώρια περαιτέρω βελτίωσης των ενεργειακών δεικτών, μέσω στοχευμένων παρεμβάσεων, αναγνωρίζονται σαφώς.



Διάγραμμα 6-31: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (11/5/2017).



Διάγραμμα 6-32: Διακύμανση της στιγμιαίας απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας (9/6/2017).

Η επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια μιας αίθριας ημέρας του Μαΐου (11/5/2017) ανέδειξε τη βέλτιστη προσαρμογή, και κατ' επέκταση την ενισχυμένη, σε σχέση με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς, ενεργειακή απόκριση του συστήματος PV+PCM. Αναλυτικότερα, η αποδοθείσα ηλεκτρική ισχύς από το σύστημα PV+PCM ($P_{M,PV+PCM}$) κυμάνθηκε από 13,8 W έως 123,9 W, ενώ το εύρος διακύμανσης των αντίστοιχων τιμών για την περίπτωση αναφοράς ήταν από 13,7 W έως 115,1 W. Η παρατηρούμενη διεύρυνση της ισχύος εξόδου (P_M) από το σύστημα PV+PCM κυμάνθηκε από 0,2% έως 11,8%, ως απόρροια της διαφοροποίησης των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας του σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)}$) κατά το ίδιο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα, στις 13:40, η αποδιδόμενη ισχύς του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($P_{M,PV\ reference}$) και του συστήματος PV+PCM ($P_{M,PV+PCM}$) ήταν 123,8 W και 112,6 W, αντίστοιχα, όταν η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G_t), η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T\alpha$), η ταχύτητα ανέμου (v_w) και η απόκλιση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)}$) ήταν 997 W/m^2, 23,5 ^{o}C, 1,8 m/s και 18,9 ^{o}C, αντίστοιχα. Επιπλέον, η ημερήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου, το οποίο απολάμβανε τη θετική επίδραση του PCM, προσδιορίστηκε ίση με 0,87 kWh/d, όντας υψηλότερη κατά 10,1% σε σχέση με την τιμή 0,79 kWh/d που υπολογίστηκε για την περίπτωση του φωτοβολταϊκού αναφοράς ($E_{DC,d_PV\ reference}$). Εκτός αυτού, η απόδοση του συστήματος PV+PCM ($n_{ELEC,\ PV+PCM}$) επισημάνθηκε αυξημένη (Διάγραμμα 6-31), εντός της περιοχής τιμών 8,7-9,8%, ενώ το αντίστοιχο εύρος διακύμανσης των τιμών της απόδοσης για την περίπτωση αναφοράς ($n_{ELEC,\ PV\ reference}$) ήταν 7,9-9,7%.

Η ημερήσια μεταβολή των δεικτών που χαρακτηρίζουν την ενεργειακή συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM, σε σχέση με την απόκλιση των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας τους, κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας του Ιουνίου (9/6/2017) απεικονίζεται στο Διάγραμμα 6-32. Σύμφωνα με τα καταγεγραμμένα στοιχεία, μεταξύ των ωρών 8:00 και 15:20, η ισχύς που απέδωσε το συμβατικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο ($P_{M,PV\ reference}$) παρατηρούνταν ελαττωμένη σε σχέση με την ισχύ εξόδου από το σύστημα PV+PCM ($P_{M,PV+PCM}$), ενώ συνδέεται με τη διακριτή διαφοροποίηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των εξεταζόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)}$) κατά το ίδιο χρονικό διάστημα. Το σχετικό εύρος διακύμανσης των τιμών της αποδοθείσας ισχύος από το σύστημα PV+PCM και το φωτοβολταϊκό αναφοράς ($P_{M,PV+PCM}$, $P_{M,PV\ reference}$) ήταν 26,6-121,2 W και 26,4-115,1 W, αντίστοιχα. Πέρα από αυτό, η ημερήσια παραγωγή ενέργειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου με και χωρίς PCM (E_{DC,d_PV+PCM}, $E_{DC,d_PV\ reference}$) ανήλθε σε 0,89 kWh/d και 0,83 kWh/d, αντίστοιχα, με την παρατηρούμενη αύξηση της τάξης του 7,2% να αποδίδεται στο φαινόμενο παθητικής ψύξης του φωτοβολταϊκού πλαισίου στο σύστημα PV+PCM για επαρκές χρονικό διάστημα. Επίσης, η απόδοση του συστήματος PV+PCM ($n_{ELEC,\ PV+PCM}$) κυμάνθηκε από 8,6 έως 9,3%, ενώ το αντίστοιχο εύρος διακύμανσης των τιμών της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($n_{ELEC,\ PV\ reference}$) ήταν 8,1-9,2%. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η μέση τιμή απόκλισης της απόδοσης του συστήματος PV+PCM έναντι της περίπτωσης αναφοράς σημειώθηκε ίση με 2,8%, όπως αναμένονταν λόγω της επίπτωσής από την "κόπωση" του συστήματος PV+PCM κατά τις απογευματινές ώρες της ημέρας (15:10-18:00).

6.5 Έλεγχος της απόδοσης και της ακρίβειας του μοντέλου ενεργειακού ισοζυγίου

Στην ενότητα που ακολουθεί, η μελέτη εστιάζεται στην επικύρωση του θεωρητικού μοντέλου ενεργειακού ισοζυγίου, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της μέγιστης θερμότητας που δύναται να μεταβιβαστεί από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο στο επιλεγμένο PCM, προκειμένου να αποθηκευτεί για εύλογο χρονικό διάστημα και αποτραπεί η αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του (T_m). Εκτός αυτού, τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα αξιοποιήθηκαν περαιτέρω για την επαλήθευση των επιλογών (π.χ. αποτελεσματική ποσότητα PCM) που καθόρισαν σε μεγάλο βαθμό το σχεδιασμό του συστήματος PV+PCM (1η σχεδιαστική προσέγγιση).

Αρχικά, τα αποτελέσματα προσομοίωσης της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς που προέκυψαν μέσω του θεωρητικού μοντέλου για τις δεδομένες συνθήκες ελέγχου συγκρίνονται με τις σχετικές τιμές που καταγράφηκαν στα σημεία με ένδειξη "Higher point" και "Lower point" από τη διεξαγωγή κατάλληλης πειραματικής διαδικασίας (Διάγραμμα 6-33 (a-c)). Εν συνεχεία, μια σειρά στατιστικών δεικτών (*MBE, MAE, RMSE*) υπολογίστηκαν προκειμένου να τεκμηριώσουν την απόδοση και την αξιοπιστία του θεωρητικού μοντέλου στις συνθήκες που επικράτησαν κατά τη διάρκεια τριών (3) χαρακτηριστικών ημερών της περιόδου επιτήρησης (Πίνακας 6-5). Έπειτα, η επαλήθευση της βασικής σχεδιαστικής εξίσωσης έλαβε χώρα, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τις τιμές που χαρακτηρίζουν τη θερμική συμπεριφορά του επιλεγμένου PCM.

Ειδικότερα, η διακύμανση της προς διαχείριση από το PCM θερμικής ισχύος, των πειραματικών και θεωρητικών τιμών για τη θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) που σημειώθηκαν για τις επικρατούσες συνθήκες κατά τη διάρκεια μιας αίθριας θερινής ημέρας με ασθενή άνεμο (2/8/2016) αναπαρίστανται γραφικά στο Διάγραμμα 6-33 (a). Σύμφωνα με τα ληφθέντα αποτελέσματα, οι τιμές που υπολογίστηκαν μέσω του θεωρητικού μοντέλου πρόβλεψης παρουσιάζουν τάση σύγκλισης με τις πειραματικές παρατηρήσεις, ενώ η μέση τιμή της διαφοροποίησης τους καταγράφηκε ίση με 0,7 ^oC και -2,1 ^oC, στα σημεία μέτρησης με ένδειξη και "Lower point" και "Higher point", αντίστοιχα. Επιπλέον, η υψηλή ακρίβεια του θεωρητικού μοντέλου επιβεβαιώθηκε, καθώς οι τιμές -3,8%/ 1,4%, 5,01%/ 4,16% και 5,96%/ 5,43% για το μέσο σφάλμα μεροληψίας (*MBE*), το μέσο απόλυτο σφάλμα (*MAE*) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (*RMSE*), όταν οι πειραματικές μετρήσεις στο σημείο με ένδειξη "Lower point"/"Higher point" τέθηκαν ως βάση της σύγκρισης, βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων (<10%). Πέραν αυτού, το προτεινόμενο μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου αξιοποιήθηκε κατάλληλα για τον προσδιορισμό της προς διαχείριση από το επιλεγμένο PCM απολαβής θερμότητας.

Ακολούθως, η βέλτιστη τιμή για το πάχος του στρώματος PCM (d_{PCM}) υπολογίστηκε από την εξίσωση σχεδιασμού (Εξ. 3.14) ίση με 4,8 cm, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισόδου τα θερμικά χαρακτηριστικά του επιλεγμένου PCM (Πίνακας 3-8), καθώς και τις τιμές 3,58 kWh/d, 32 ^oC και 50 ^oC για τη μέγιστη απολαβή θερμότητας προς μεταβίβαση στο PCM (E_c), την αρχική ($T_{m,i}$) και τη μέγιστη αποδεκτή τελική τιμή ($T_{m,f}$) της θερμοκρασίας λειτουργίας του εξεταζόμενου τύπου φωτοβολταϊκού πλαισίου, αντίστοιχα. Αναλύοντας περαιτέρω τα διαθέσιμα στοιχεία, παρατηρήθηκε η ανάγκη επαναπροσδιορισμού των

αρχικών σχεδιαστικών επιλογών για το σύστημα PV+PCM, προκειμένου να διασφαλιστεί η αποτελεσματική διαχείριση του ποσού της θερμότητας που προέρχεται από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Από όλα τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η αύξηση της αρχικά επιλεγμένης τιμής για το πάχος του στρώματος PCM (δηλ. d_{PCM} = 4cm), και κατ' επέκταση της διαθέσιμης ποσότητάς του, κατά 20%, θα συνέβαλε καθοριστικά στην εξάλειψη του φαινομένου πρόωρης τήξης του PCM που ανέκυψε στις συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών της εξεταζόμενης ημέρας και της βελτίωσης της θερμικής και ενεργειακής απόκρισης του συστήματος PV+PCM.

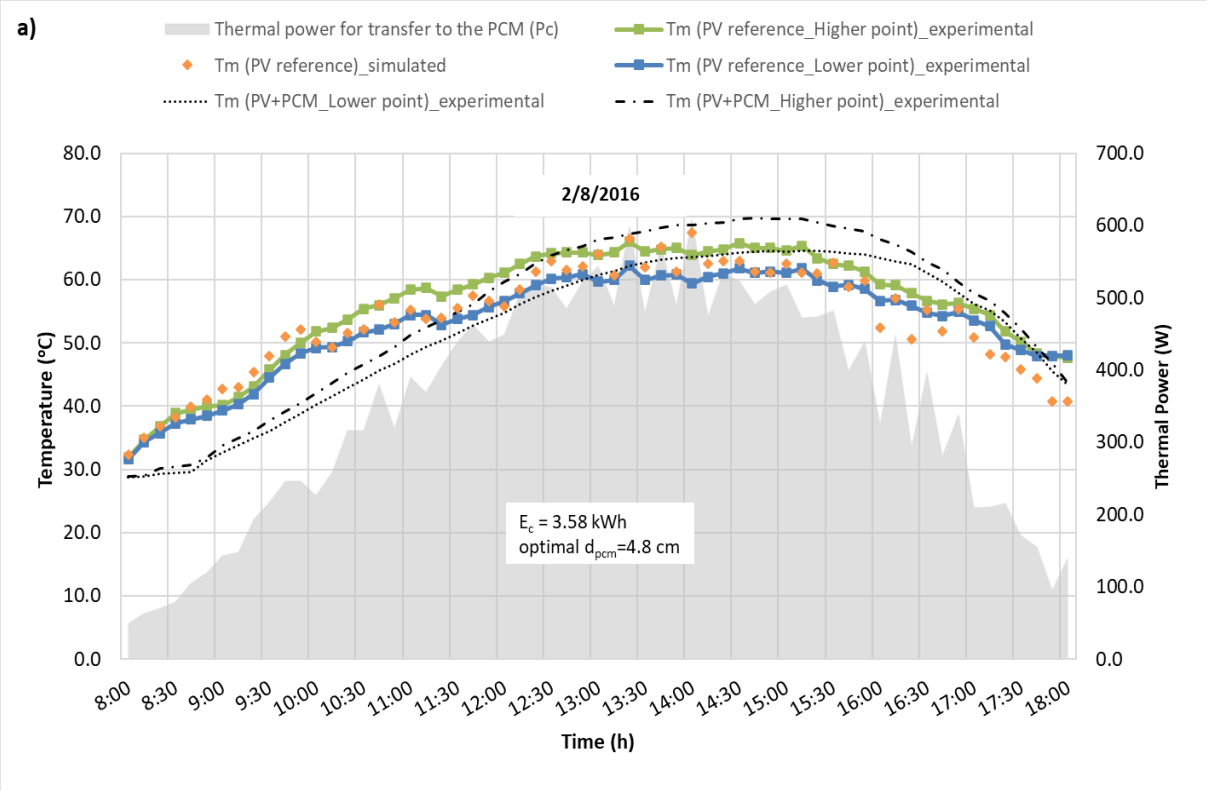
Κατά τη διάρκεια μιας αίθριας φθινοπωρινής ημέρας με σχεδόν μέτριο άνεμο (12/10/2016), το θεωρητικό μοντέλο παρείχε αξιόπιστα αποτελέσματα όσον αφορά στην εκτίμηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$), όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 6-33 (b). Επιπρόσθετα, το μέσο σφάλμα μεροληψίας (*MBE*), το μέσο απόλυτο σφάλμα (*MAE*) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (*RMSE*) των θεωρητικών αποτελεσμάτων ήταν 0,79%, 5,25% και 7,21%, λαμβάνοντας υπόψη ως βάση σύγκρισης τις πειραματικές τιμές της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) που μετρήθηκαν στο σημείο με ένδειξη "Lower point". Ακόμη, οι τιμές των δεικτών καλής προσαρμογής δείχνουν την τάση του θεωρητικού μοντέλου να αποδίδει ελαφρώς υπερεκτιμημένες προβλέψεις για την ελεγχόμενη παράμετρο, ενώ η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου στην ακρίβεια του μοντέλου αναγνωρίζεται ως περιορισμένη. Αντίστοιχα, τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου προσαρμογής ανέδειξαν τη σύγκλιση των θεωρητικών και των πειραματικών τιμών που προσδιορίστηκαν στο σημείο με ένδειξη "Higher point", καθώς οι σχετικοί δείκτες (*MBE*, *MAE*, *RMSE*) βρέθηκαν ίσοι με -1,93%, 5,58% και 7,06%, αντίστοιχα. Παράλληλα, τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης, τα οποία σχετίζονται με την εξέλιξη της προς διαχείριση θερμικής ισχύος (P_c) κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης ημέρας του Οκτωβρίου και απεικονίζονται στο Διάγραμμα 6-33 (b), χρησιμοποιήθηκαν σε συνδυασμό με τα διαθέσιμα στοιχεία για τις απαραίτητες μεταβλητές προκειμένου να προσδιοριστεί το κατάλληλο πάχος για το στρώμα PCM (d_{PCM}). Πιο συγκεκριμένα, αντικαθιστώντας στην Εξ. 3.14 τις τιμές 3,67 kWh/d, 21 ^oC, 50 ^oC, 27 ^oC, 2 kJ/kg·K, 880 kg/m^3, 1,4 m^2, 179 kJ/kg για την απολαβή θερμότητας προς μεταβίβαση στο PCM (E_c), την αρχική ($T_{m,i}$) και τη μέγιστη αποδεκτή τελική τιμή ($T_{m,f}$) της θερμοκρασίας λειτουργίας του εξεταζόμενου τύπου φωτοβολταϊκού πλαισίου, το σημείο τήξης του PCM ($T_{PCM,melt}$), την ειδική θερμοχωρητικότητα του PCM ($C_{p,PCM}$), την πυκνότητα του PCM (ρ_{PCM}), την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου (S), τη λανθάνουσα θερμότητα αποθήκευσης (λ), αντίστοιχα, υπολογίστηκε το αποτελεσματικό πάχος του στρώματος PCM (d_{PCM}) ίσο με 4,3 cm. Εν κατακλείδι, η ανωτέρω προσδιορισθείσα τιμή εντοπίζεται παραπλήσια της επιλεγμένης κατά τη διαδικασία σχεδιασμού του συστήματος PV+PCM, επαληθεύοντας ουσιαστικά την απόδοση της ανεπτυγμένης μεθοδολογίας, όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό και από τη διακύμανση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV\ +\ PCM)}$) στο Διάγραμμα 6-33 (b).

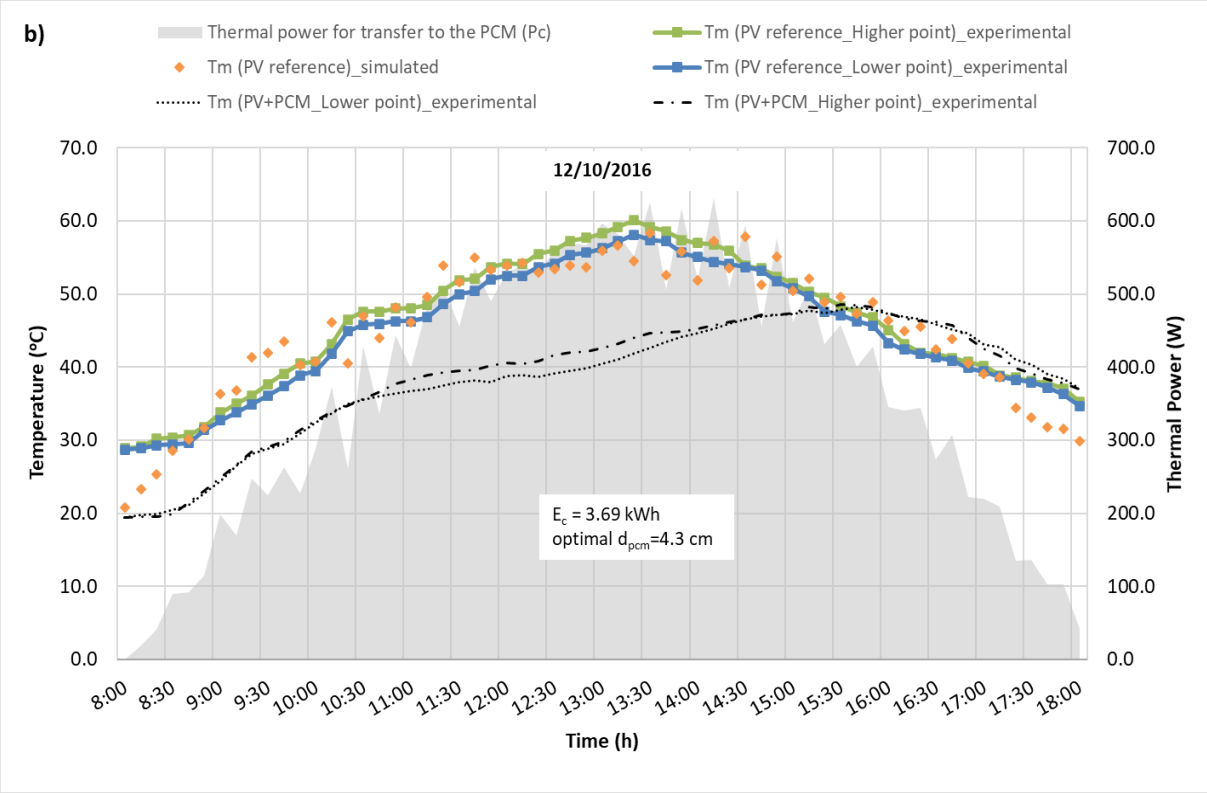
Σε συνθήκες αιθριότητας κατά τη διάρκεια μια ανοιξιάτικης ημέρας (11/5/2017), η ικανότητα του μοντέλου να εκτιμά την κατανομή της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference)}$) μειώνεται οριακά, χωρίς ωστόσο ο βαθμός ακρίβειας να βρεθεί εκτός των συγκεκριμένων περιορισμών για σφάλμα <10%. Η μέγιστη παρατηρούμενη διαφοροποίηση μεταξύ των θεωρητικών και των πειραματικών τιμών, που παρατηρήθηκαν

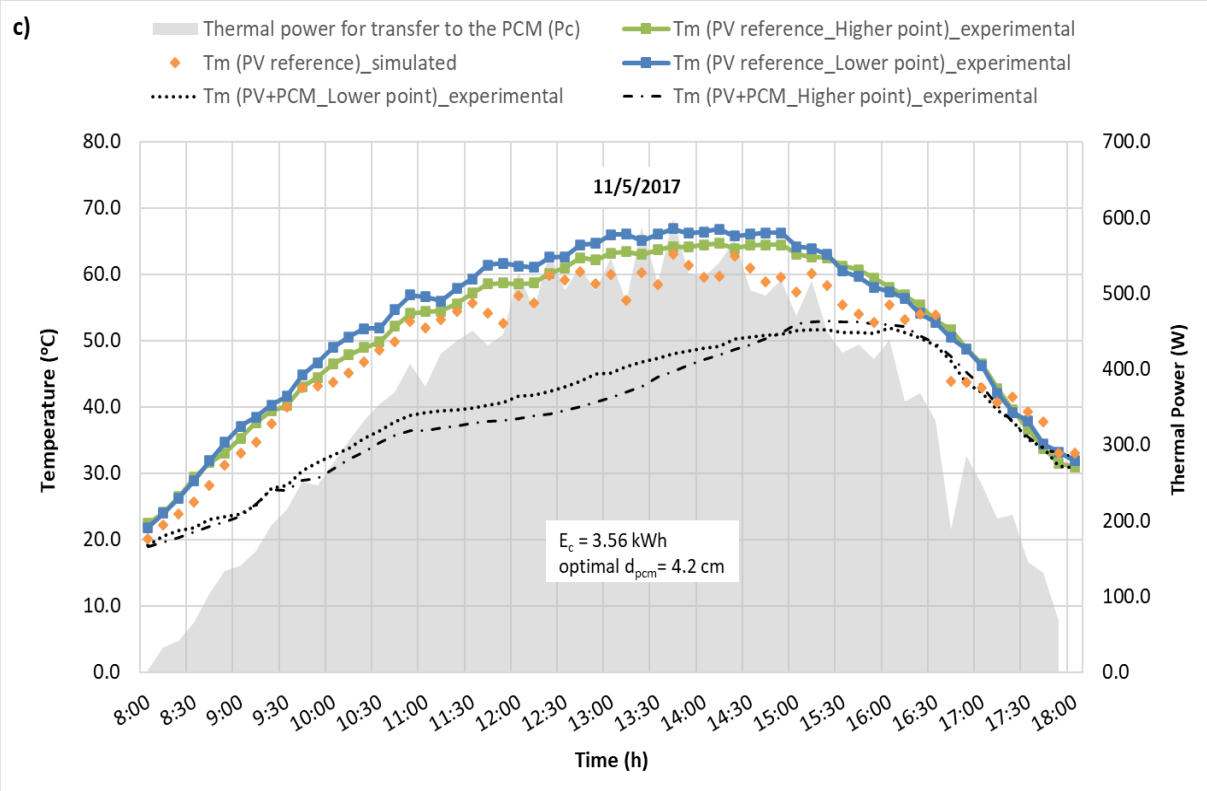
στα σημεία μέτρησης με ένδειξη και "Lower point" και "Higher point", ήταν 9,8 ^{o}C και -7,8 ^{o}C, αντίστοιχα. Ακόμη, το μέσο σφάλμα μεροληψίας (*MBE*), το μέσο απόλυτο σφάλμα (*MAE*) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (*RMSE*) των προβλεπόμενων τιμών εκτιμήθηκαν -7.37%, 7.95% και 8.85%, αντίστοιχα, όταν οι πειραματικές τιμές από το σημείο μέτρησης με ένδειξη "Lower point" αποτελούσαν τη βάση της σύγκρισης. Επιπλέον, τα στοιχεία για τη θερμική ισχύ (P_c), η οποία θα μπορούσε να αποθηκευτεί στο επιλεγμένο PCM σε ένα ιδανικά διαστασιολογημένο σύστημα PV+PCM για τις επικρατούσες συνθήκες κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης ημέρας, την αναμενόμενη θερμική απόκριση της φωτοβολταϊκής μονάδας σε ένα σύστημα PV+PCM ($T_{m,i}$, $T_{m,f}$) και τα θερμικά χαρακτηριστικά του PCM ($T_{PCM,melt}$, $C_{p,PCM}$, ρ_{PCM}) χρησιμοποιήθηκαν στην Εξ. 3.14 για την εκτίμηση του πάχους του στρώματος PCM (d_{PCM}). Η τιμή 4,2 cm που προσδιορίστηκε μέσω της επίλυσης της Εξ. 3.14 επιβεβαιώνει τη ορθότητα της προτεινόμενης μεθοδολογικής προσέγγισης, καθώς είναι ελαφρώς υψηλότερη από την επιλεχθείσα τιμή των 4,0 cm που προέκυψε κατά τη διαστασιολόγηση του συστήματος PV+PCM με ιστορικά δεδομένα για την περιοχή μελέτης. Το σχετικό συμπέρασμα ενισχύεται από την ημερήσια μεταβολή των καταγεγραμμένων πειραματικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM)}$). Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι το θεωρητικό μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου δύναται να αποδίδει με υψηλή ακρίβεια την ημερήσια εξέλιξη της θερμοκρασίας λειτουργίας ενός συμβατικού φωτοβολταϊκού πλαισίου θερμοκρασίας (Πίνακας 6-5), ιδίως κατά τη θερινή περίοδο, όταν σημειώθηκαν οι χαμηλότερες τιμές για του δείκτες καλής προσαρμογής *MBE* (%), *MAE* (%) και *RMSE* (%). Εκτός απ' αυτό, η ορθότητα της ανεπτυγμένης μεθοδολογικής προσέγγισης για τον προσδιορισμό της αποτελεσματική ποσότητας PCM αποδεικνύεται θέτοντας, ταυτόχρονα, τις βάσεις για τη βελτιστοποίηση του συστήματος PV+PCM.

Έλεγχος ακρίβειας προβλέψεων θεωρητικού μοντέλου	**Συγκριτική βάση**					
	$T_{m\,(PV\ reference)_Lower\ point}$			$T_{m\,(PV\ reference)_Higher\ point}$		
	MBE	***MAE***	***RMSE***	***MBE***	***MAE***	***RMSE***
Ημέρα		(%)			(%)	
2/8/2016	-3,80	5,01	5,96	1,40	4,16	5,43
12/10/2016	0,79	5,85	7,21	-1,93	5,58	7,06
11/5/2017	-7,37	7,95	8,85	-5,09	5,92	6,89

Πίνακας 6-5: Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου της ακρίβειας των εκτιμήσεων του θεωρητικού μοντέλου για τις ελεγχόμενες ημέρες.


a)
Thermal power for transfer to the PCM (Pc)
Tm (PV reference_Higher point)_experimental
Tm (PV reference)_simulated
Tm (PV reference_Lower point)_experimental
Tm (PV+PCM_Lower point)_experimental
Tm (PV+PCM_Higher point)_experimental
2/8/2016
E_c = 3.58 kWh
optimal d_{pcm}=4.8 cm
Temperature (°C)
Thermal Power (W)
Time (h)


b)
Thermal power for transfer to the PCM (Pc)
Tm (PV reference_Higher point)_experimental
Tm (PV reference)_simulated
Tm (PV reference_Lower point)_experimental
Tm (PV+PCM_Lower point)_experimental
Tm (PV+PCM_Higher point)_experimental
12/10/2016
E_c = 3.69 kWh
optimal d_{pcm}=4.3 cm
Temperature (°C)
Thermal Power (W)
Time (h)



Διάγραμμα 6-33: Διακύμανση των αποτελεσμάτων της θεωρητικής ανάλυσης και πειραματικών δεδομένων για το φωτοβολταϊκό αναφοράς και το σύστημα PV+PCM κατά τις επιλεγμένες ημέρες.

Κεφάλαιο 7 : ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ Β' ΦΑΣΗΣ

7.1 Αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς της ελεγχόμενης πειραματικής διάταξης

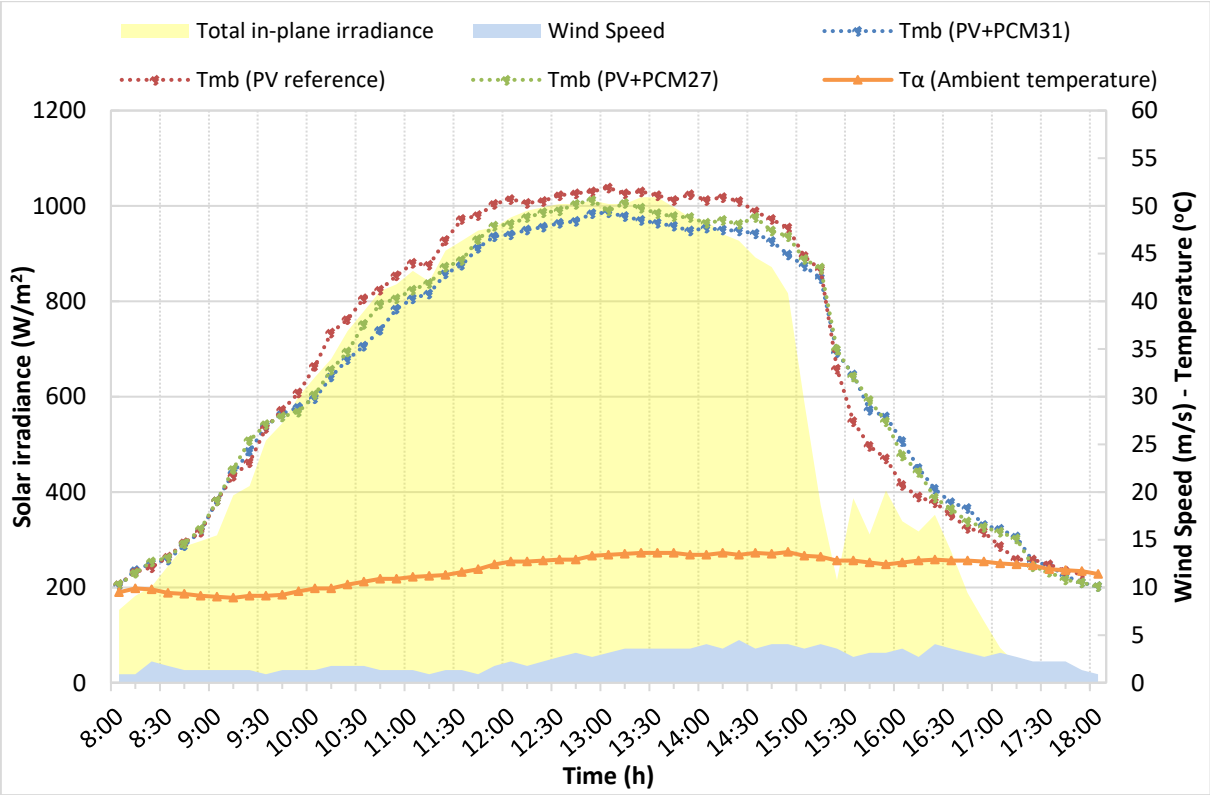
Στην ενότητα που ακολουθεί, η ανάλυση και η αξιολόγηση των πειραματικών δεδομένων για τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων με και χωρίς της ένταξη των επιλεγμένων τύπων PCM, λαμβάνει χώρα ώστε να ελεγχθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της εναλλακτικής προσέγγισης σχεδιασμού του συστήματος PV+PCM, η οποία αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Βασική προϋπόθεσή για την επίτευξη αυτού του στόχου ήταν η μελέτη των καμπυλών ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και των ανεπτυγμένων συστημάτων PV+PCM σε σχέση με την εξέλιξη των κύριων μετεωρολογικών παραμέτρων, οι οποίες προέκυψαν από την επεξεργασία των καταγεγραμμένων στοιχείων κατά τη διάρκεια της Β' φάσης πειραματικών μετρήσεων (12 Φεβρουαρίου 2019 - 12 Ιουλίου 2019). Εν προκειμένω, τα αποτελέσματα για τη θερμική απόκριση των ανεπτυγμένων συστημάτων PV+PCM έναντι της περίπτωσης αναφοράς, υπό τις δεδομένες συνθήκες επτά (7) χαρακτηριστικών ημερών, παρατίθενται ως αντιπροσωπευτικά για τη στοχευμένη ανάλυση του αντικτύπου της αξιοποίησης δυο (2) PCM με διαφορετικά χαρακτηριστικά στη λειτουργία του ελεγχόμενου τύπου φωτοβολταϊκών στοιχείων. Ειδικότερα, τα ακόλουθα γραφήματα (Διάγραμμα 7-1 – Διάγραμμα 7-7) απεικονίζουν τη μεταβολή της θερμοκρασίας λειτουργίας φωτοβολταϊκού αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$ / $T_{mf\ (PV\ reference)}$), του συστήματος PV+PCM27 ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$ / $T_{mf\ (PV+PCM27)}$) και του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$ / $T_{mf\ (PV+PCM31)}$), καθώς επίσης και τη διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_t), της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Ta) και της ταχύτητα ανέμου (v_w) κατά τη διάρκεια των επιλεγμένων αντιπροσωπευτικών ημερών: a) 22/2/2019, b) 14/3/2019, c) 10/4/2019, d) 3/5/2019, e) 13/5/2019, f) 20/6/2019 και g) 25/6/2019.

Ενδεικτικά, οι καμπύλες που περιγράφουν τη θερμική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών πλαισίων της ελεγχόμενης πειραματικής διάταξης, στις συνθήκες λειτουργίας που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια μιας αίθριας χειμερινής ημέρας με πολύ ασθενή άνεμο (22/2/2019), εμφανίζονται στο Διάγραμμα 7-1. Ειδικότερα, η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$) έφτασε τη μέγιστη τιμή των 51,9 ^oC στις 13:00, όταν η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G_t), η θερμοκρασία περιβάλλοντος (Ta) και η ταχύτητα ανέμου (v_w) ήταν 1006 W/m^2, 13,4 ^oC και 3,1 m/s, αντίστοιχα. Ταυτόχρονα, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM27 ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$) και του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$) βρέθηκε μειωμένη κατά 2,4 ^oC και 2,6 ^oC, αντίστοιχα. Στην αρχή του πειραματικού κύκλου της ημέρας, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM27 ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$) αυξήθηκε σταθερά από τους 10,2 ^oC στις 8:00 σε 40,8 ^oC στις 11:10 (σε περίπου 3,2 h), ενώ παράλληλα διατηρήθηκε κάτω από 50 ^oC μέχρι το τέλος της ημέρας. Η θετική επίδραση της ενσωμάτωσης του PCM27 ήταν εμφανής κυρίως κατά το χρονικό διάστημα από τις 9:40 έως τις 11:00, όταν η μέση απόκλιση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας της περίπτωσης αναφοράς και του συστήματος PV+PCM27 (ΔT_{mb}

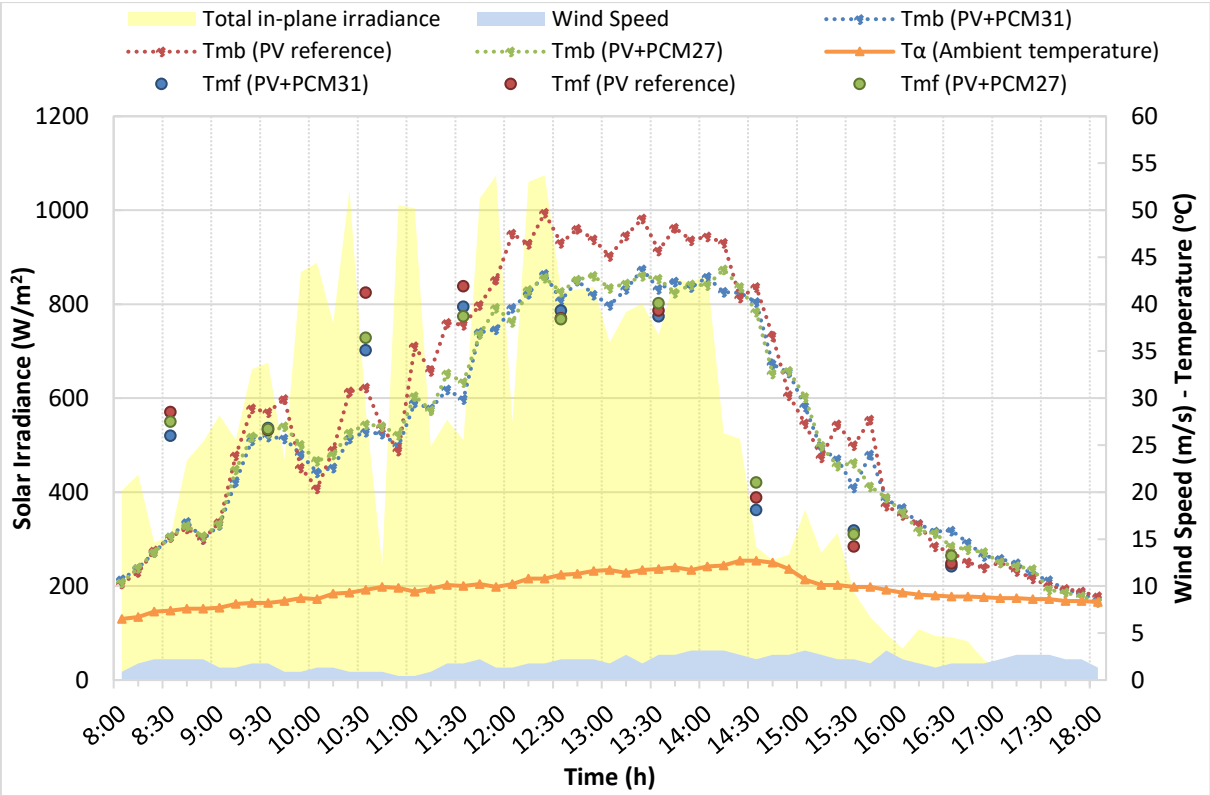
$_{(PV/PV+PCM27)}$) λήφθηκε ίση με 3,1 ^{o}C. Αντίστοιχα, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$) κυμάνθηκε από 10,2 ^{o}C στις 8:00 έως 40,3 ^{o}C στις 11:10, ενώ η μέγιστη διαφορά των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και του συστήματος PV+PCM31 ($\Delta T_{mb\ (PV/PV+PCM31)}$) καταγράφηκε ίση με 4,3 ^{o}C στις 11:30. Συγκρίνοντας τις τιμές της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς με τις σχετικές τιμές που προσδιορίστηκαν για το σύστημα PV+PCM27 και το σύστημα PV+PCM31 παρατηρείται ότι απόκλιση τους ήταν αρνητική από τις 15:20 έως τις 17:10, με εύρος διακύμανσης από -0,2 ^{o}C έως και -4,9 ^{o}C, υποδηλώνοντας μια βραδύτερη θερμική απόκριση των συστημάτων PV+PCM στις άμεσες μεταβολές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_t). Γενικά, η επίδραση των απότομων μεταβολών της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_t) στην ημερήσια εξέλιξη της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM27 ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$) και του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$) μπορεί να αναγνωριστεί σαφώς στα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας κατά τη διάρκεια ημερών με συνθήκες αραιής συννεφιάς (14/3/2019 και 13/5/2019). Όπως διακρίνεται στα Διαγράμματα 7-2 και 7-5, η χρήση των PCM είχε ως αποτέλεσμα την ομαλότερη και βραδέως εξελισσόμενη, σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς, μεταβολή της θερμοκρασίας λειτουργίας των συζευγμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$, $T_{mb\ (PV+PCM31)}$).

Κατά τη διάρκεια μιας αίθριας ανοιξιάτικης ημέρας με ασθενή άνεμο (10/4/2019), η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$), του συστήματος PV+PCM27 ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$) και του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$) εντοπίστηκαν εντός της περιοχής τιμών 13,7-44,1 °C, 13,3-39,2 °C και 13,4-39,1 °C, αντίστοιχα. Πιο αναλυτικά, η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$) αυξήθηκε με σταθερό ρυθμό κατά τις πρώτες πρωινές ώρες, από 13,7 ^{o}C στις 8:00 έως 30,9 ^{o}C στις 10:40, ενώ διατηρήθηκε μεταξύ των τιμών 32,1^{o}C και 44,1^{o}C για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 6 ωρών (μεταξύ 10:20 και 17:00). Η σχετική μέγιστη τιμή ($T_{mb\ (PV\ reference)_peak}$) των 44,1 ^{o}C παρατηρήθηκε στις 13:50, όντας περίπου 26 ^{o}C υψηλότερη από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T\alpha$) την ίδια χρονική στιγμή. Γενικά, οι καμπύλες διακύμανσης της θερμοκρασίας λειτουργίας των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$, $T_{mb\ (PV+PCM31)}$) ακολούθησαν την τάση μεταβολής της θερμοκρασίας λειτουργίας που καταγράφηκε για την περίπτωση αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$). Ωστόσο, τα δύο (2) φωτοβολταϊκά πλαίσια που έφεραν PCM παρατηρήθηκαν να λειτουργούν υπό χαμηλότερες θερμοκρασίες συγκριτικά με τις αντιστοιχίες τιμές που προσδιορίστηκαν για την περίπτωση αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$), κυρίως λόγω της συνεργιστικής δράσης των PCM και της ταχύτητας ανέμου (v_w). Το φαινόμενο αυτό παρουσιάστηκε μέχρι τις 17:00, οπότε οι τιμές της θερμοκρασίας στην οπίσθια επιφάνεια των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$, $T_{mb\ (PV+PCM31)}$) αρχίσαν να σημειώνονται υψηλότερες σε σύγκριση με τις σχετικές τιμές που αφορούσαν την περίπτωσης αναφοράς. Ακόμη, η μέγιστη απόκλιση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM27 ($\Delta T_{mb\ (PV/PV+PCM27)_peak}$) ήταν ίση με 6,4 ^{o}C, ενώ η σχετική μέγιστη διαφορά τους έναντι των αντίστοιχων τιμών θερμοκρασίας του συστήματος PV+PCM31 ($\Delta T_{mb\ (PV/PV+PCM31)_peak}$) προσδιορίστηκε ίση με 7,5 ^{o}C. Αντιπαραβάλλοντας τη θερμική συμπεριφορά των συστημάτων PV+PCM31 και PV+PCM27 με τη βοήθεια του διαγράμματος 7-3, υπογραμμίζεται ότι η ενσωμάτωση του PCM31 διασφάλιζε οριακά υψηλότερο βαθμό ψύξης σε σχέση το PCM27 για τον επιλεγμένο τύπο φωτοβολταϊκού πλαισίου μέχρι το τέλος του 1^{ου}

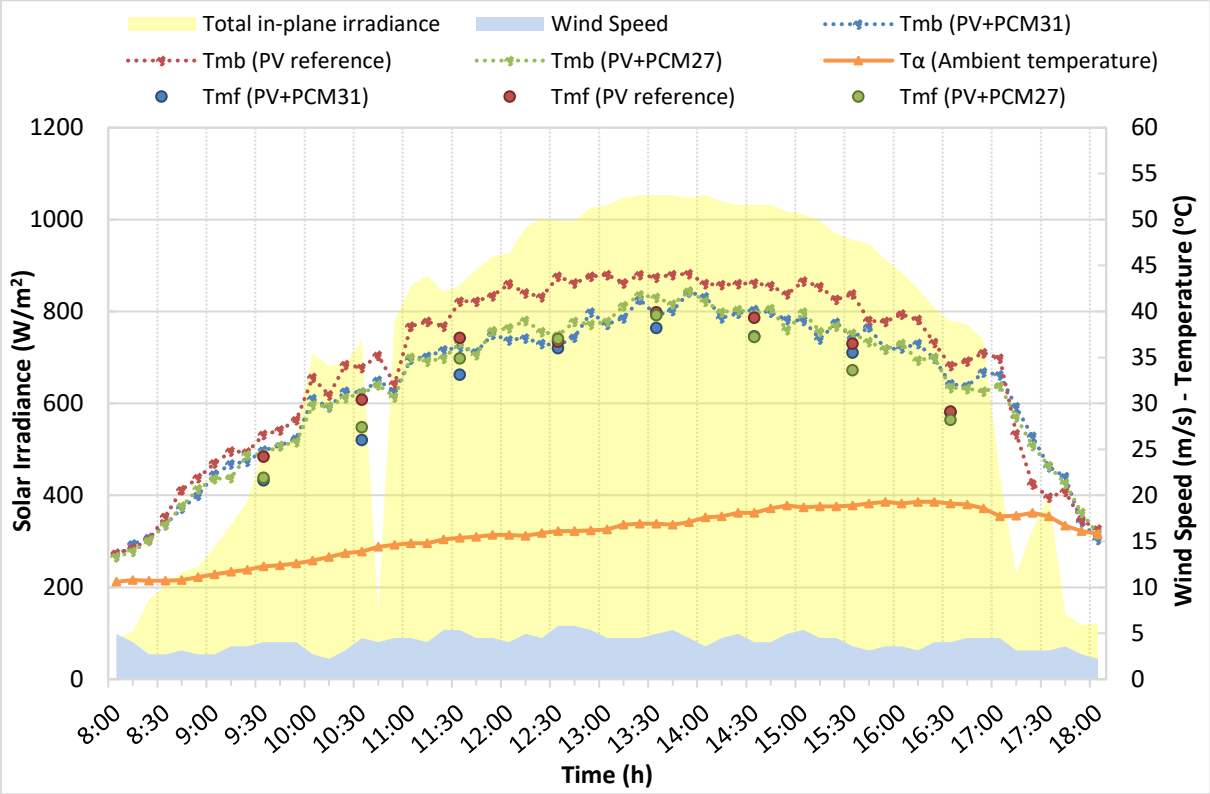
μισού της ελεγχόμενης ημέρας. Το γεγονός αυτό αποδίδεται κυρίως στις διαφορετικές θερμοφυσικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων PCM, όπως το θερμοκρασιακό εύρος τήξης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ποσότητα των επιλεγμένων PCM στα εξεταζόμενα συστήματα PV+PCM ήταν ίση με 0,26 kg, τα αποτελέσματα που αφορούν στη μέγιστη επιτευχθείσα απόκλιση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς έναντι των συστημάτων PV+PCM ($\Delta T_{mb\ (PV/PV+PCM27)_peak}$, $\Delta T_{mb\ (PV/PV+PCM31)_peak}$) δεν είναι διόλου αμελητέα. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει καθώς ο σχετικός συντελεστής που ορίζει την αποτελεσματικότητα της χρησιμοποιούμενης μάζας PCM υπολογίστηκε ίσος με 0,34 kg/m$^{2\cdot}$^{o}C, η οποία είναι σημαντικά χαμηλότερη από τις αναφερόμενες τιμές στη βιβλιογραφία [*Waqas et al.*, 2018].



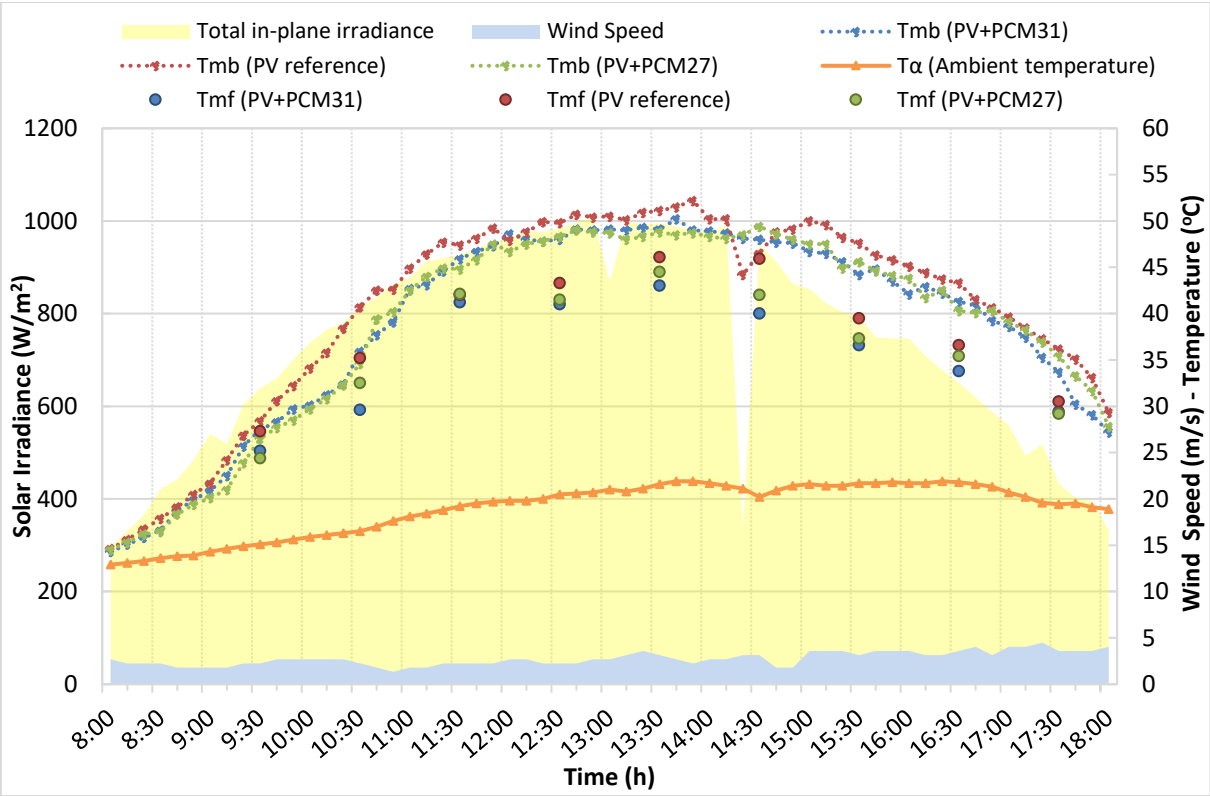
Διάγραμμα 7-1: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής ημέρας (22//2/2019).



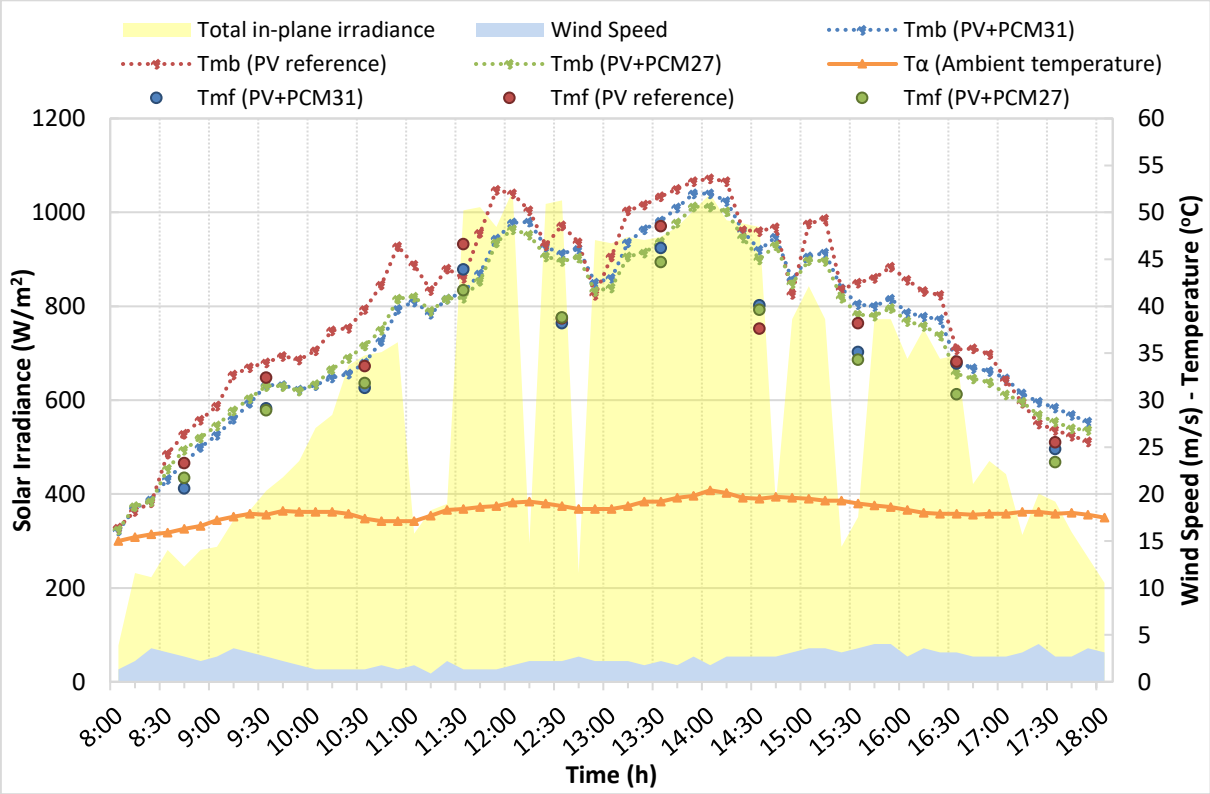
Διάγραμμα 7-2: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (14/3/2017).



Διάγραμμα 7-3: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (10/4/2017).

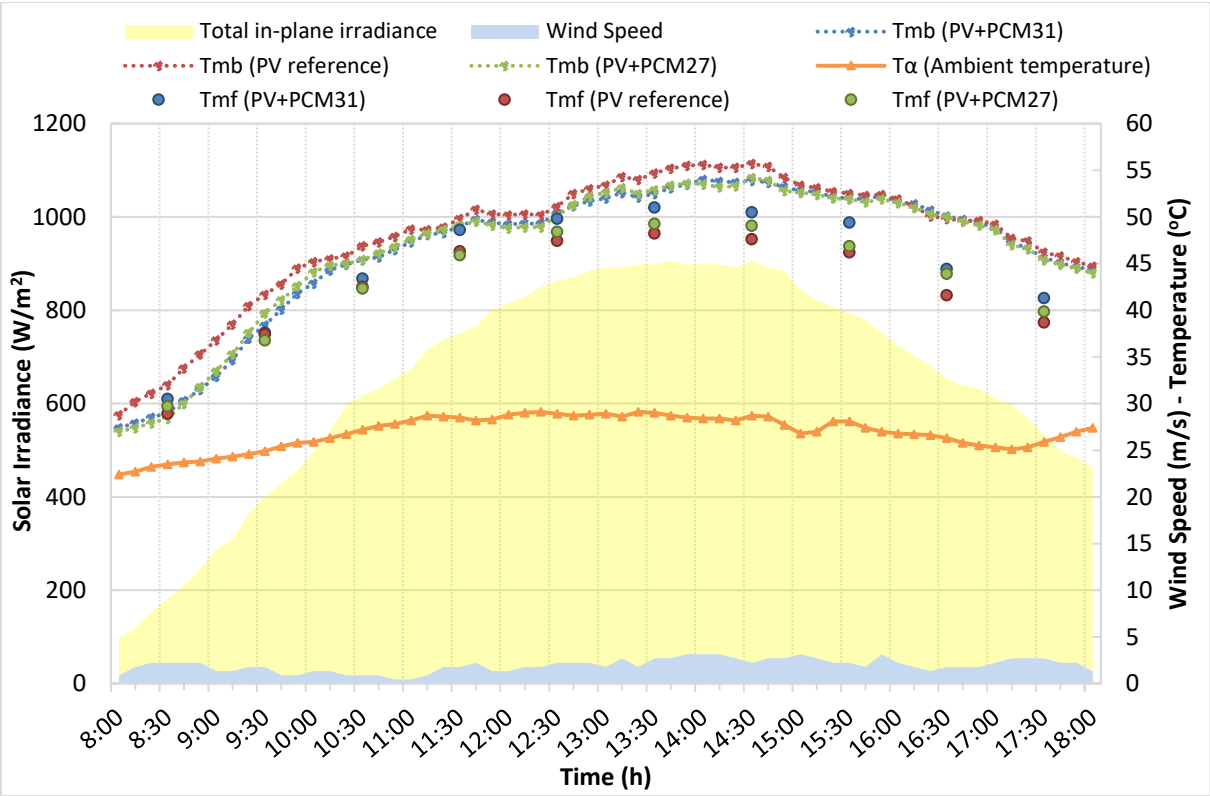


Διάγραμμα 7-4: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (3/5/2019)

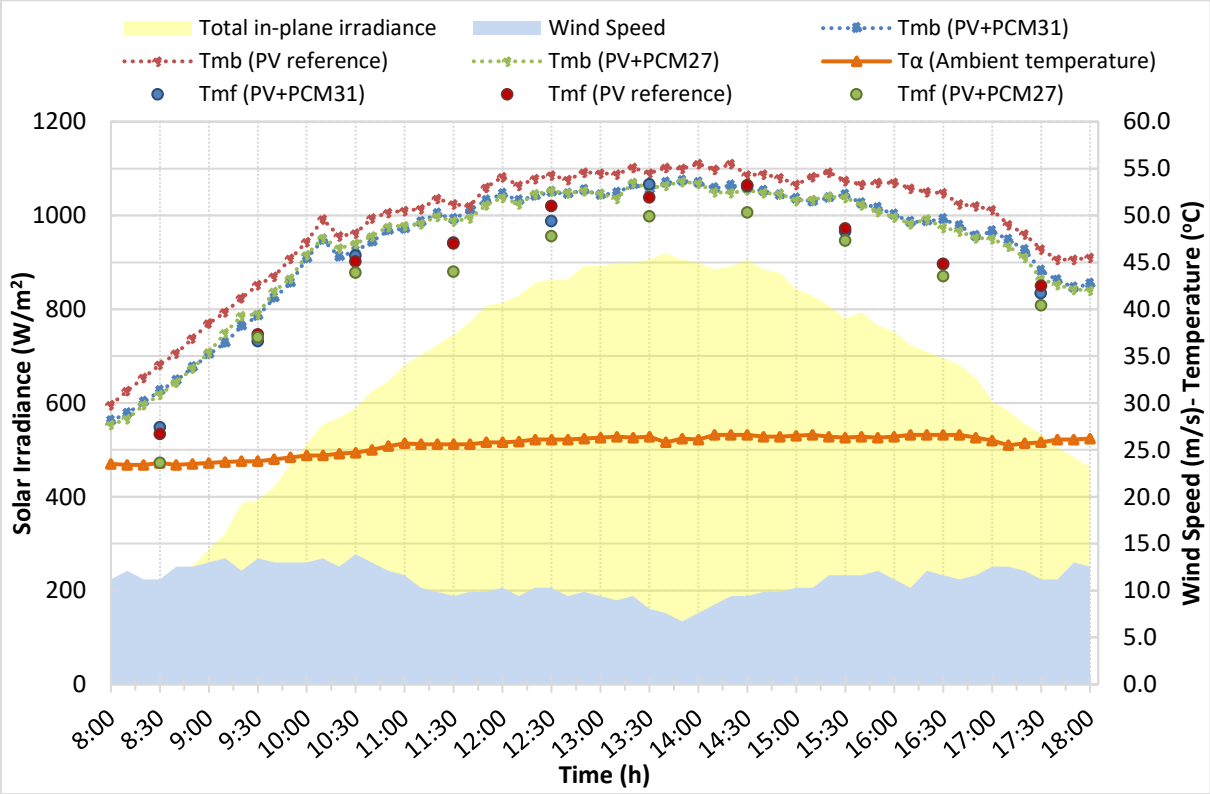


Διάγραμμα 7-5: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (13/5/2019).

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 7-6, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G_t) αυξήθηκε σταθερά από 98 W/m^2 στις 8:00 σε 906 W/m^2 στις 13:40, ενώ η ολική χρονική διάρκεια που διατηρήθηκε άνω των 750 W/m^2 ήταν περίπου 4,5 h. Στις 18:00, οπότε λήφθηκε η τελευταία πειραματική μέτρηση για την ελεγχόμενη ημέρα, η σχετική τιμή της καταγράφηκε ίση με 463 W/m^2. Επίσης, η ταχύτητα ανέμου (v_w) κυμάνθηκε από 0,4 m/s έως 3,1 m/s (μέση ημερήσια τιμή1,9 m/s), φανερώνοντας μια μέρα με πολύ ασθενή άνεμο. Η μέση ημερήσια τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος ($T\alpha$) ήταν 26,9 ^{o}C, με εύρος διακύμανσης από 22,4 ^{o}C έως 29,1 ^{o}C. Υπό τις ανωτέρω περιγραφόμενες καιρικές συνθήκες μιας αίθριας ημέρας του Ιουνίου 2019 (20/6/2019), το εύρος των παρατηρούμενων τιμών μέτρησης για τη θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$), του συστήματος PV+PCM27 ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$) και του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$) ήταν 28,8-55,7 °C, 27,0-54,2 ^{o}C και 27,4-54,1 ^{o}C, αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$) αυξήθηκε ομαλά κατά τις πρωινές ώρες της ελεγχόμενης ημέρας, από 28,8 ^{o}C στις 8:00 έως 50,8 ^{o}C στις 11:40, ενώ παρέμεινε πάνω από τους 50 ^{o}C για χρονικό διάστημα περίπου 5 h (μεταξύ 11:40 και 16:20). Η σχετική μέγιστη τιμή ($T_{mb\ (PV\ reference)_peak}$) των 55,7 ^{o}C καταγράφηκε στις 14:30, όταν η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G_t), η θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T\alpha$) και η ταχύτητα ανέμου (v_w) ήταν 906 W/m^2, 28,7 ^{o}C και 2,2 m/s, αντίστοιχα. Ακόμη, οι τιμές της θερμοκρασίας στην εμπρόσθια όψη της περίπτωσης αναφοράς ($T_{mf\ (PV\ reference)}$) παρουσιάστηκαν οριακά μειωμένες, ενώ η ημερήσια εξέλιξη τους παρατηρήθηκε σχεδόν ανάλογη της διακύμανσης των τιμών της θερμοκρασίας από την οπίσθια επιφάνεια του φωτοβολταϊκού αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$). Σε ό,τι αφορά τη θερμική συμπεριφορά των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31, η μεταβολή της θερμοκρασίας λειτουργίας των συνδεμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$, $T_{mb\ (PV+PCM31)}$) καταγράφηκε με τάση αντίστοιχη της σημειωθείσας θερμοκρασιακής διακύμανσης για την περίπτωση αναφοράς. Ωστόσο, και για τις δυο (2) περιπτώσεις συστημάτων PV+PCM, παρατηρήθηκε η διατήρηση χαμηλότερων τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς έως τις 16:00, όταν η σύγκλιση των σχετικών τιμών των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης (με διάρκεια 1,5 h) αρχικά αναγνωρίστηκε (Διάγραμμα 7-6). Συγκρίνοντας τα δεδομένα για την επίδραση των χρησιμοποιούμενων PCM, διακρίνεται ότι το PCM27 είχε σημαντικότερη συμβολή σε σχέση με το PCM31 για τη διατήρηση χαμηλότερης θερμοκρασίας στο ελεγχόμενο φωτοβολταϊκό τύπου, η οποία οφείλεται κυρίως στις ελαφρώς διαφοροποιημένες θερμοφυσικές ιδιότητες τους (δηλ. ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας). Ακόμη, η μέγιστη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας του ελεγχόμενου φωτοβολταϊκού τύπου που επιτεύχθηκε με τη ενσωμάτωσή PCM31 ($\Delta T_{mb\ (PV/PV+PCM31)_peak}$) ήταν 3,9 ^{o}C στις 9:00, σε σύγκριση με το αντίστοιχο αποτέλεσμα ($\Delta T_{mb\ (PV/PV+PCM27)_peak}$) των 3,8 ^{o}C που προέκυψε στις 8:40 λόγω της εφαρμογής του PCM27. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η εκμετάλλευση των ιδιοτήτων του PCM κατάφερε μια μέση ημερήσια μείωση της τάξης των 2 ^{o}C για τη θερμοκρασία λειτουργίας των συνδεμένων φωτοβολταϊκών. Συνεκτιμώντας τα αποτελέσματα από την ανάλυση της θερμικής απόκρισης των συστημάτων PV+PCM, καθώς και την ποσότητα των επιλεγμένων PCM (0,26 kg) στα εξεταζόμενα συστήματα PV+PCM, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η 2^η σχεδιαστική προσέγγιση επιτυγχάνει βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου PCM, με την τιμή 0,67 kg/m^2·^{o}C του δείκτη αποτελεσματικότητας να εντοπίζεται σημαντικά μικρότερη από τις αναφερόμενες τιμές στη διεθνή βιβλιογραφία.



Διάγραμμα 7-6: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας (20/6/2017).



Διάγραμμα 7-7: Διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας ανέμου κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας (25/6/2019).

Η ημερήσια εξέλιξη των παραμέτρων που επιδρούν στη λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας με ισχυρό άνεμο (25/6/2019) παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 7-7. Γενικά, κατά τη διάρκεια της ελεγχόμενης ημέρας, η μεταβολή της θερμοκρασίας λειτουργίας της περίπτωσης αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$) συμβάδιζε με την τάση διακύμανσης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολία (G_t) και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Ta), ενώ, επίσης, παρατηρείται η επίδραση της ταχύτητας ανέμου (v_w).

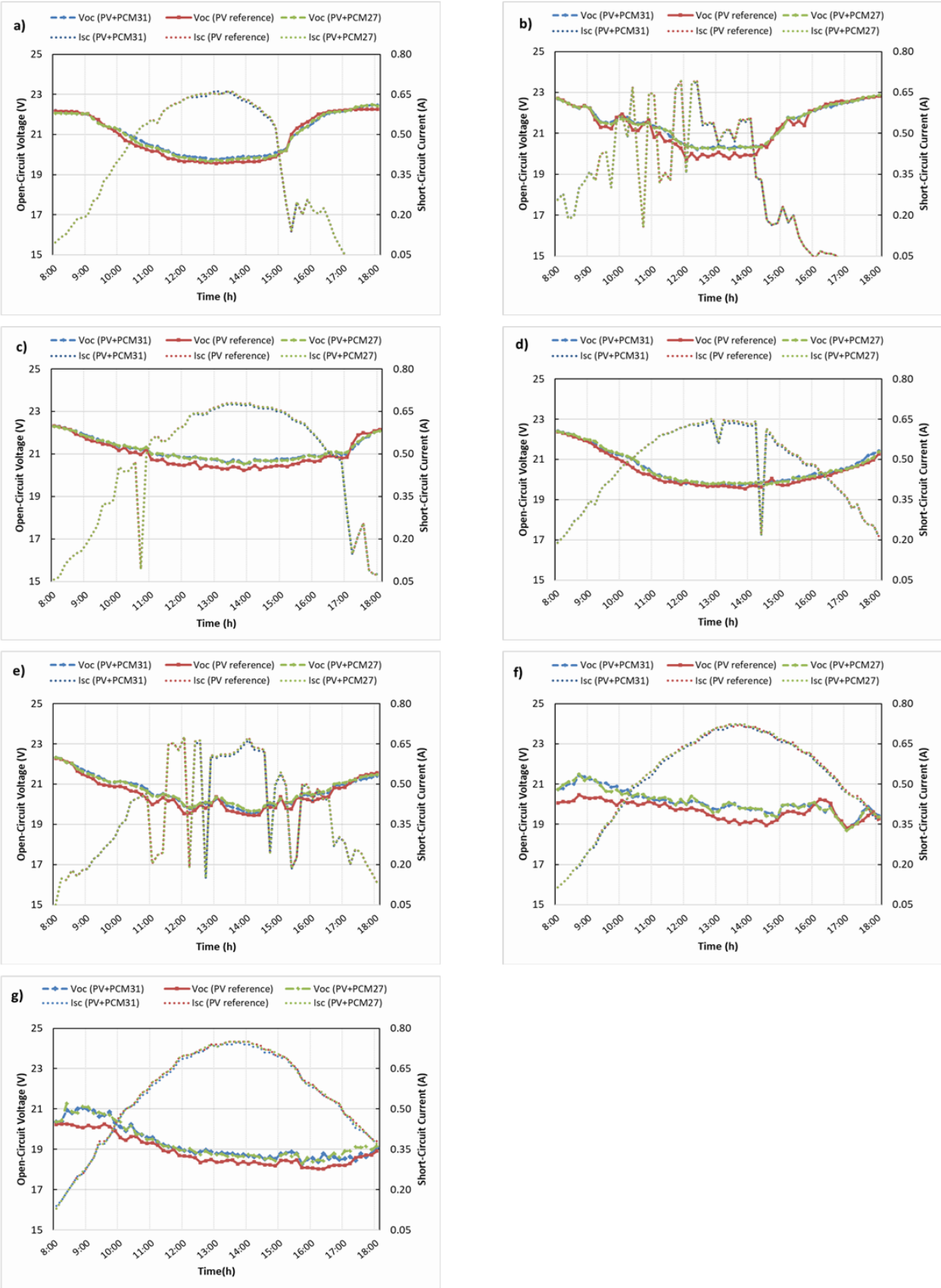
Συγκεκριμένα, η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$) προσδιορίστηκε από 29,8 ^oC στις 8:00 έως τη μέγιστη τιμή των 55,5 ^oC στις 14:00, η οποία ταυτόχρονα ήταν περίπου 30 ^oC υψηλότερη από την τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Ta). Από την άλλη, οι σχετικές τιμές για τα συστήματα PV+PCM27 ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$) και PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$) κυμάνθηκαν μεταξύ 27,7-53,6 ^oC και 28,1-53,7 ^oC, αντίστοιχα, όντας ελαφρώς μειωμένες λόγω της θετικής επίδρασης των ενσωματωμένων PCM. Στην αρχή της πειραματικής διαδικασίας, η θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM27 ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$) αυξήθηκε σταδιακά από 27,7 ^oC στις 8:00 σε 45,8 ^oC στις 10:00 (σε 2 h), ενώ το χρονικό διάστημα παραμονής κάτω από 50 ^oC ήταν περίπου 3,6 h (μεταξύ 8:00 και 11:40). Ομοίως, η λειτουργική θερμοκρασία του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$) προσδιορίστηκε από 28,1 ^oC στις 8:00 έως 45,4 ^oC στις 10:00, ενώ συνέχιζε να αυξάνει με ρυθμό 3,5 $^oC/h$ για περίπου 2 h. Ωστόσο, η επίδραση των επιλεγμένων PCM ελαχιστοποιήθηκε από τις 11:00 έως τις 14:00 (Διάγραμμα 7-7), όταν η μέση απόκλιση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{mb\ (PV/PV+PCM27)_avg}$, $\Delta T_{mb\ (PV/PV+PCM31)_avg}$) ήταν περίπου 1,7 ^oC. Η τάση αυτή εμφανίστηκε ταυτόχρονα με τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου από 11,6 m/s στις 11:00 σε 6,7 m/s στις 13:50, αποδεικνύοντας τη σημαντική επίδραση του στον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας με φυσική (ή ελεύθερης) συναγωγή από τα περιβλήματα αποθήκευσης των PCM στο περιβάλλον. Η μέγιστη επιτευχθείσα μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας του ελεγχόμενου φωτοβολταϊκού τύπου λόγω της συμπερίληψης του PCM31 ($\Delta T_{mb\ (PV/PV+PCM31)}$) ήταν 3,6 ^oC στις 16:10, ενώ το αντίστοιχο αποτέλεσμα ($\Delta T_{mb\ (PVPV+PCM27)}$) των 3,8 ^oC λόγω της χρησιμοποίησης του PCM27 παρατηρήθηκε στις 16:30. Τέλος, είναι φανερό ότι η ταχύτητα ανέμου (v_w), με εύρος διακύμανσης από 6,7 m/s έως 13,9 m/s, η θερμοκρασία περιβάλλοντος (Ta), η οποία κυμάνθηκε από 23,4 ^oC έως 26,6 ^oC, καθώς και η ενσωμάτωση των PCM, είχαν ως αποτέλεσμα τη βελτιωμένη θερμική απόκριση των συζευγμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων κατά τη διάρκεια του ημερήσιου κύκλου του πειράματος.

7.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της ελεγχόμενης πειραματικής διάταξης κατά τη Β' πειραματική φάση

Γενικά, η μεταβολή της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων επιδρά σημαντικά στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους (*V* και *I*), όπως ορίζεται από τους σχετικούς θερμικούς συντελεστές. Εν προκειμένω, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα οποία έφεραν τα επιλεγμένα PCM και ως εκ τούτου λειτουργούσαν υπό χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς, παρουσίαζαν λογική μεταβολή των σχετικών ηλεκτρικών παραμέτρων τους. Στο Διάγραμμα 7-8 (a-g) απεικονίζεται η διακύμανση των τιμών του ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{SC}) και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{OC}) του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31 προκειμένου αξιολογηθεί η εξάρτηση των ηλεκτρικών παραμέτρων των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων από τη θερμοκρασία λειτουργίας τους στις επικρατούσες συνθήκες κατά διάρκεια των επιλεγμένων ημερών.

Ενδεικτικά, η εξέλιξη των τιμών του ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{SC}) και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{OC}) των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικης ημέρας (14/3/2017), η οποία αναπαρίσταται γραφικά στο Διάγραμμα 7-8 (b), δείχνει ότι η ενσωμάτωση PCM είχε θετική επίδραση στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του επιλεγμένου φωτοβολταϊκού τύπου ανεξάρτητα από τη παρατηρούμενη μεταβλητότητα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_t). Συγκεκριμένα, το εύρος διακύμανσης των τιμών της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{OC}) του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ήταν 19,75-22,81 V, ενώ οι σχετικές τιμές εξόδου από το σύστημα PV+PCM27 ($V_{OC\ (PV+PCM27)}$) και το σύστημα PV+PCM31 ($V_{OC\ (PV+PCM31)}$) παρατηρήθηκαν οριακά υψηλότερες, με εύρος διακύμανσης 20,24-22,86 V και 20,22-22,85 V, αντίστοιχα. Επιπλέον, η μέση και η μέγιστη διαφοροποίηση των τιμών της τάσης ανοιχτού κυκλώματος του φωτοβολταϊκού πλαισίου με PCM27/PCM31 ($V_{OC\ (PV+PCM27)}/V_{OC\ (PV+PCM31)}$) έναντι των αντίστοιχων τιμών για την περίπτωση αναφοράς ($V_{OC\ (PV\ reference)}$) προσδιορίστηκαν ίσες με 0,15 V/0,16 V και 0,64 V/0,67 V, αντίστοιχα, καθώς το σύστημα PV+PCM παρατηρούνταν με χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας λειτουργίας και ομαλότερη απόκριση στις άμεσες μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας (G_t). Σε ότι αφορά την ημερήσια διακύμανση των τιμών του ρεύματος βραχυκύκλωσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31 ($I_{SC\ (PV\ reference)}$, $I_{SC\ (PV+PCM27)}$ και $I_{SC\ (PV+PCM31)}$), δεν παρατηρείται καμία αξιοσημείωτη μεταβολή, λόγω της διαφοροποίησης των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας τους δεδομένου ότι επηρεάζονταν κυρίως από τη μεγάλη διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας (G_t). Αντίστοιχα αποτελέσματα και όμοια τάση διακύμανσης επισημάνθηκαν για τις ηλεκτρικές παραμέτρους φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης υπό τις ασταθείς καιρικές συνθήκες μιας ανοιξιάτικης ημέρας (13/5/2019), όπως διακρίνεται στο Διάγραμμα 7-8 (e).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα στο Διάγραμμα 7-8 (c), το ρεύμα βραχυκύκλωσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($I_{SC\ (PV\ reference)}$) αυξήθηκε σταθερά από 0,06 A στις 8:00 σε 0,68 A στις 13:10, και στη συνέχεια μειώθηκε μέχρι τα 0,28 A στα 16:50, υπό την επίδραση της μεταβολής της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_t). Αναλογικά, οι καταγεγραμμένες τιμές για το ρεύμα βραχυκύκλωσης του συστήματος PV+PCM27 και του συστήματος PV+PCM31 ($I_{SC\ (PV+PCM27)}$, $I_{SC\ (PV+PCM31)}$) βρέθηκαν 0,06 A και 0,07 A στις 8:00,



Διάγραμμα 7-8: Διακύμανση του ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{SC}) και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{OC}) της περίπτωσης αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31 κατά τη διάρκεια των επιλεγμένων αντιπροσωπευτικών ημερών: a) 22/2/2019, b) 14/3/2019, c) 10/4/2019, d) 3/5/2019, e) 13/5/2019, f) 20/6/2019, g) 25/6/2019.

0,67 A και 0,66 A στις 13:10, 0,29 A και 0,28 A στις 18:00, αντίστοιχα. Από τα παραπάνω γίνεται φανερή μια οριακή απόκλιση των τιμών του ρεύματος βραχυκύκλωσης της περίπτωσης αναφοράς ($I_{SC\ (PV\ reference)}$) έναντι των αντίστοιχων τιμών εξόδου από τα συστήματα που υποστηρίζονται από PCM ($I_{SC\ (PV+PCM27)}$, $I_{SC\ (PV+PCM31)}$), η οποία συνδέεται άμεσα με τις υψηλότερες τιμές της θερμοκρασίας λειτουργίας της. Εν αντιθέσει, οι παρατηρούμενες τιμές για την τάση ανοιχτού κυκλώματος του συστήματος PV+PCM27 ($V_{OC\ (PV+PCM27)}$) και του συστήματος PV+PCM31 ($V_{OC\ (PV+PCM31)}$) ήταν σαφώς υψηλότερες συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($V_{OC\ (PV\ reference)}$) κατά τη διάρκεια του πειραματικού κύκλου, ενώ ο σχετικός μέσος όρος των τιμών εξόδου ανά ελεγχόμενο φωτοβολταϊκό πλαίσιο της πειραματικής διάταξης προσδιορίστηκε ίσος με 21,17 V, 21,18 V και 20,95 V, αντίστοιχα. Επιπλέον, η επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας λειτουργίας των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων στις τιμές τάσης ανοιχτού κυκλώματος που παρατηρήθηκαν στην έξοδο τους ($V_{OC\ (PV\ reference)}$, $V_{OC\ (PV+PCM27)}$ και $V_{OC\ (PV+PCM31)}$) αναγνωρίστηκε περιορισμένη στις περιπτώσεις των συστημάτων PV+PCM λόγω της υψηλότερης ικανότητας θερμικής ρύθμισης τους. Τέλος, η απόκλιση των σχετικών τιμών τάσης ανοιχτού κυκλώματος των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης είναι διακριτή, ιδιαιτέρως μεταξύ των ωρών 9:00-17:00, όταν η μέση διαφοροποίηση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας τους ($\Delta T_{mb\ (PV/PV+PCM27)_avg}$, $\Delta T_{mb\ (PV/PV+PCM31)_avg}$) ήταν περίπου 3,2 ^{o}C.

Αναλύοντας περαιτέρω τα στοιχεία των ηλεκτρικών μετρήσεων που έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια μιας τυπικής θερινής ημέρας (Διάγραμμα 7-8 (f)), παρατηρήθηκε η μεταβολή της τιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης της περίπτωσης αναφοράς ($I_{SC\ (PV\ reference)}$) από 0,11 A στις 8:00 σε 0,72 A στις 13:40, η οποία μειώθηκε σε 0,37 A στις 18:00, ακολουθώντας τη διακύμανση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_t). Αντίστοιχα, οι τιμές που προσδιορίστηκαν στην έξοδο των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31 ($I_{SC\ (PV+PCM27)}$, $I_{SC\ (PV+PCM31)}$) ήταν 0,11 A και 0,10 A στις 8:00, 0,71 A και 0,72 A στις 13:40 και 0,34 A και 0,36 A στις 18:00. Σε γενικές γραμμές, το ρεύμα βραχυκύκλωσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($I_{SC\ (PV\ reference)}$) εμφανίζονταν με οριακά υψηλότερες τιμές, συγκριτικά με τις αντίστοιχες από τα συστήματα με PCM, λόγω της ανάλογης αύξησης της θερμοκρασίας λειτουργίας του. Πέραν αυτού, οι τιμές της τάσης ανοιχτού κυκλώματος του συστήματος PV+PCM27 ($V_{OC\ (PV+PCM27)}$) και του συστήματος PV+PCM31 ($V_{OC\ (PV+PCM31)}$) διατηρήθηκαν υψηλότερες από τις αντίστοιχες που καταγράφηκαν για την περίπτωση αναφοράς ($V_{OC\ (PV\ reference)}$) κατά τη διεξαγωγή του πειραματικής διαδικασίας, με τις αντίστοιχες τιμές αιχμής να προσδιορίζονται ίσες με 21,76 V, 21,64 V και 20,85 V, αντίστοιχα. Βάσει των καμπυλών διακύμανσης της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{OC}) παρατηρείται ότι οι σχετικές τιμές για τα ελεγχόμενα συστήματα PV+PCM μεταβάλλονταν λογικά με την εξέλιξη της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_t) έως τις 9:20, όταν η αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων προκαλεί αντιστρόφως ανάλογη μεταβολή στις τιμές της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{OC}). Το φαινόμενο αυτό είχε διάρκεια περίπου 6,5 h, ενώ η μέγιστη απόκλιση των τιμών της παραμέτρου V_{OC} των συστημάτων PV + PCM έναντι της περίπτωσης αναφοράς εντοπίστηκε σε δύο διακριτές περιόδους (μεταξύ 8:00-9:50 και 13:10-14:30).

Σε αντιστοιχία, τα δεδομένα για τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (δηλ. καμπύλες διακύμανσης του ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{SC}) και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{OC})) της

περίπτωσης αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31 που καταγράφηκαν στις 3 Μαΐου 2019, παρουσίασαν σχεδόν όμοια προσαρμογή στην ημερήσια εξέλιξη των μετεωρολογικών παραμέτρων (Διάγραμμα 7-8 (d)).
Εν αντιθέσει, οι επικρατούσες συνθήκες κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας (25/6/2019), οι οποίες χαρακτηρίζονταν από τις υψηλές τιμές της ταχύτητας ανέμου, είχαν αξιοσημείωτη επίδραση στις τιμές της τάσης ανοιχτού κυκλώματος του συστήματος PV+PCM27 ($V_{OC\ (PV+PCM27)}$) και του συστήματος PV+PCM31 ($V_{OC\ (PV+PCM31)}$), λαμβάνοντας υπόψη ότι η θερμοκρασία λειτουργίας της περίπτωσης αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$) εντοπίζονταν σε σταθερά υψηλότερα επίπεδα τιμών από τα συστήματα PV+PCM ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$, $T_{mb\ (PV+PCM31)}$). Πιο συγκεκριμένα, η σχετική απόκλιση των τιμών της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{OC}) των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ήταν διακριτή στη διάρκεια του πειραματικού κύκλου της ημέρας (Διάγραμμα 7-8 (g)), ακόμα και όταν περιορίστηκε λογικά, από τις 9:30 έως τις 18:00, λόγω της σχετικής αύξησης της θερμοκρασίας λειτουργίας τους. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η μέγιστη και η μέση τιμή του σχετικού δείκτη για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς $V_{OC\ (PV\ reference)}$), το σύστημα PV+ PCM27($V_{OC\ (PV+PCM27)}$) και το σύστημα PV + PCM31 ($V_{OC\ (PV+PCM31)}$) ήταν 20,2 V και 18,1 V, 21,4 V και 18,8 V, 21,3 V και 18,9 V, αντίστοιχα. Επιπλέον, σύμφωνα με τα ληφθέντα αποτελέσματα, οι τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων ($I_{SC\ (PV\ reference)}$, $I_{SC\ (PV+PCM27)}$, $I_{SC\ (PV+PCM31)}$) παρατηρούνταν με όμοια διακύμανση, ενώ δεν καταγράφηκε κάποια αξιόλογη διαφοροποίηση μεταξύ τους στη διάρκεια του διαστήματος διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων. Τέλος, οι καμπύλες μεταβολής των τιμών του ρεύματος βραχυκύκλωσης της περίπτωσης αναφοράς ($I_{SC\ (PV\ reference)}$) και των συστημάτων που ενισχύονταν μέσω της ενσωμάτωσης των επιλεγμένων PCM ($I_{SC\ (PV+PCM27)}$, $I_{SC\ (PV+PCM31)}$) ακολουθήσαν την εξέλιξη της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_t), χωρίς να αναγνωρίζεται ανάλογη επίδραση λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας λειτουργίας τους.

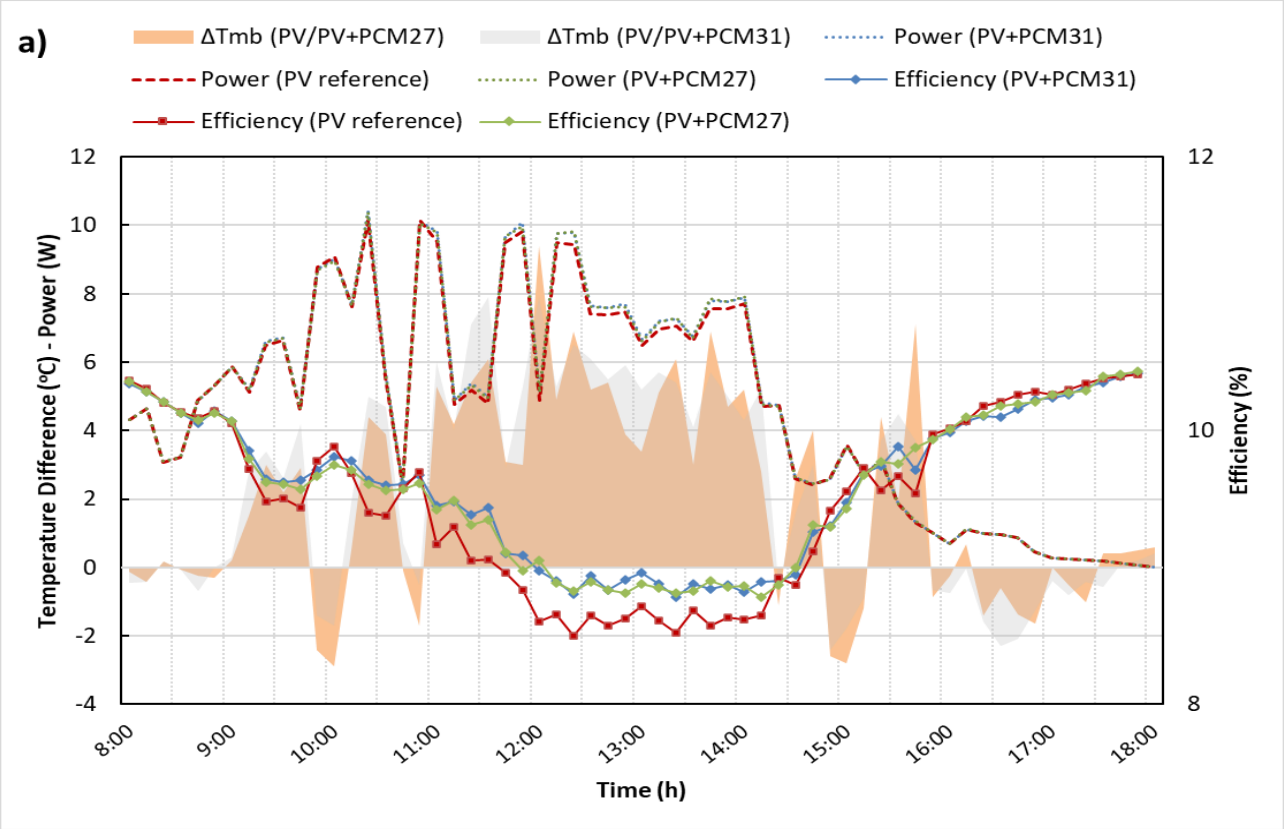
7.3 Έλεγχος της ηλεκτρικής ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM

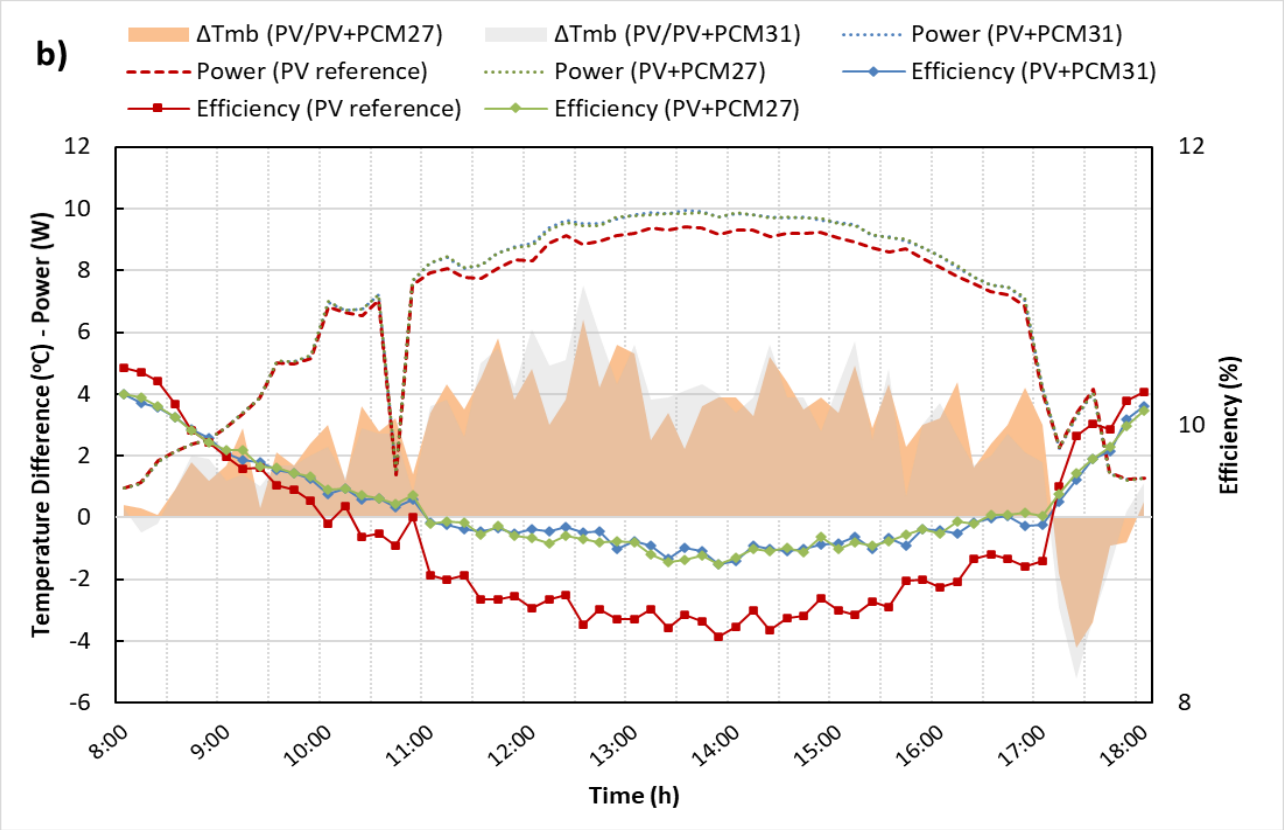
Στην παρούσα ενότητα, το επίπεδο και ο τρόπος ενίσχυσης της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του ελεγχόμενου φωτοβολταϊκού τύπου λόγω της ενσωμάτωσης των επιλεγμένων PCM αναλύονται και αξιολογούνται, χρησιμοποιώντας κατάλληλα τα δεδομένα που συλλέχθηκαν μέσω της διεξαχθείσας πειραματικής διαδικασίας. Ειδικότερα, οι καταγεγραμμένες μετρήσεις τάσης (V) και την έντασης του ρεύματος (I) του φωτοβολταϊκού πλαισίου αφοράς και των συστημάτων PV+PCM αξιοποιήθηκαν πλήρως για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ισχύος και της απόδοσης μετατροπής τους κατά της διάρκεια των επιλεγμένων ημερών. Στη συνέχεια, τα αντίστοιχα ενεργειακά κέρδη εκτιμήθηκαν από τις καμπύλες διακύμανσης της ισχύος που απέδωσαν φωτοβολταϊκά πλαίσια της πειραματικής διάταξης στη διάρκεια των επιλεγμένων αντιπροσωπευτικών ημερών.
Σύμφωνα με τα ληφθέντα αποτελέσματα, η ηλεκτρική ισχύς που απέδωσαν τα συστήματα PV+PCM27 ($P_{M,PV+PCM27}$) και PV+PCM31 ($P_{M,PV+PCM31}$) παρατηρούνταν σαφώς υψηλότερη από την ισχύ εξόδου από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς ($P_{M,PV\ reference}$) κατά το μεγαλύτερο μέρος μιας τυπικής θερινής ημέρας με χαμηλή ταχύτητα ανέμου (Διάγραμμα 7-9 (c)), ως αποτέλεσμα της απόκλισης των τιμών θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών

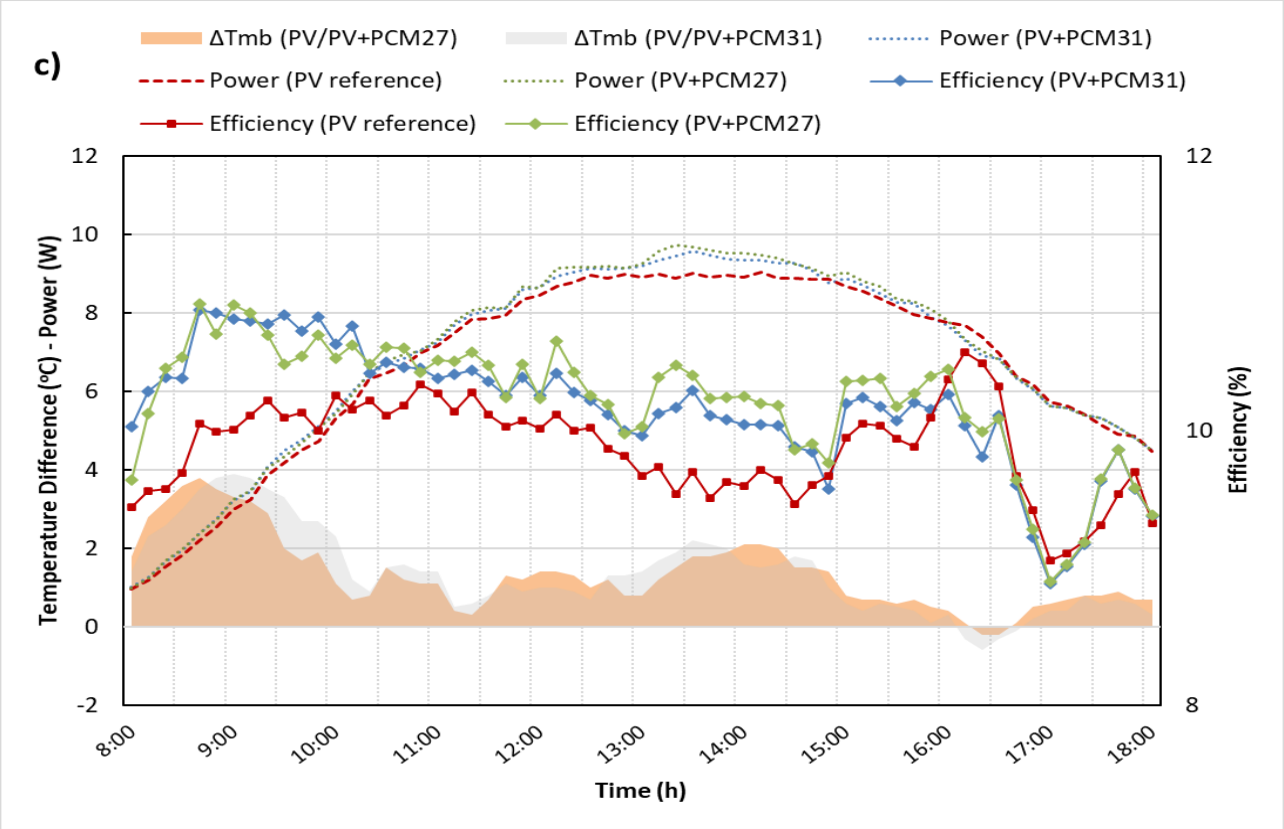
πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{mb\ (PV/PV+PCM27)}$, $\Delta T_{mb\ (PV/PV+PCM31)}$). Πιο αναλυτικά, οι τιμές της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος από τα συστήματα PV+PCM27 ($P_{M,PV+PCM27}$) και PV+PCM31 ($P_{M,PV+PCM31}$) ήταν 1,02 W και 0,98 W στις 8:00, αυξημένες σε σχέση με την τιμή εξόδου από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς ($P_{M,PV\ reference}$) κατά 6,2% και 2%, αντίστοιχα. Αργότερα μέσα στην ημέρα (στις 13:10), οι σχετικές τιμές παρατηρήθηκαν σε υψηλότερα επίπεδα (9,58 W, 9,34 W και 8,98 W, αντίστοιχα), ενώ μεταξύ των ωρών 14:00-18:00, εμφανίστηκαν με όμοια διακύμανση και σταδιακά μειούμενες. Για παράδειγμα, στις 14:50, η μέγιστη ισχύς που αποδόθηκε από την περίπτωση αναφοράς, το σύστημα PV+PCM27 και το σύστημα PV+PCM31 ήταν 8,85 W, 8,94 W και 8,76 W, αντίστοιχα. Συνολικά, η ημερήσια παραγωγή ενέργειας συνεχούς ρεύματος από το σύστημα PV+PCM27 ($E_{DC,d_PV+PCM27}$) και το σύστημα PV+PCM31 ($E_{DC,d_PV+PCM31}$) ανήλθε σε 69,82 Wh/d και 69,27 Wh/d, αντίστοιχα, ενώ το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς ($E_{DC,d_PV\ reference}$) παρήγαγε 67,59 Wh/d. Συνοπτικά, τα αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι τα επιλεγμένα PCM είχαν ικανοποιητική συμβολή στην αύξηση της ισχύος του ελεγχόμενου φωτοβολταϊκού τύπου, ενώ παράλληλα υπέδειξαν ότι η μερική ενίσχυση της ικανότητας αποθήκευσης θερμότητας μέσω της αύξησης της χρησιμοποιούμενης ποσότητας τους θα οδηγούσε σε περαιτέρω βελτίωση της ενεργειακής απόκρισης των συστημάτων PV+PCM.

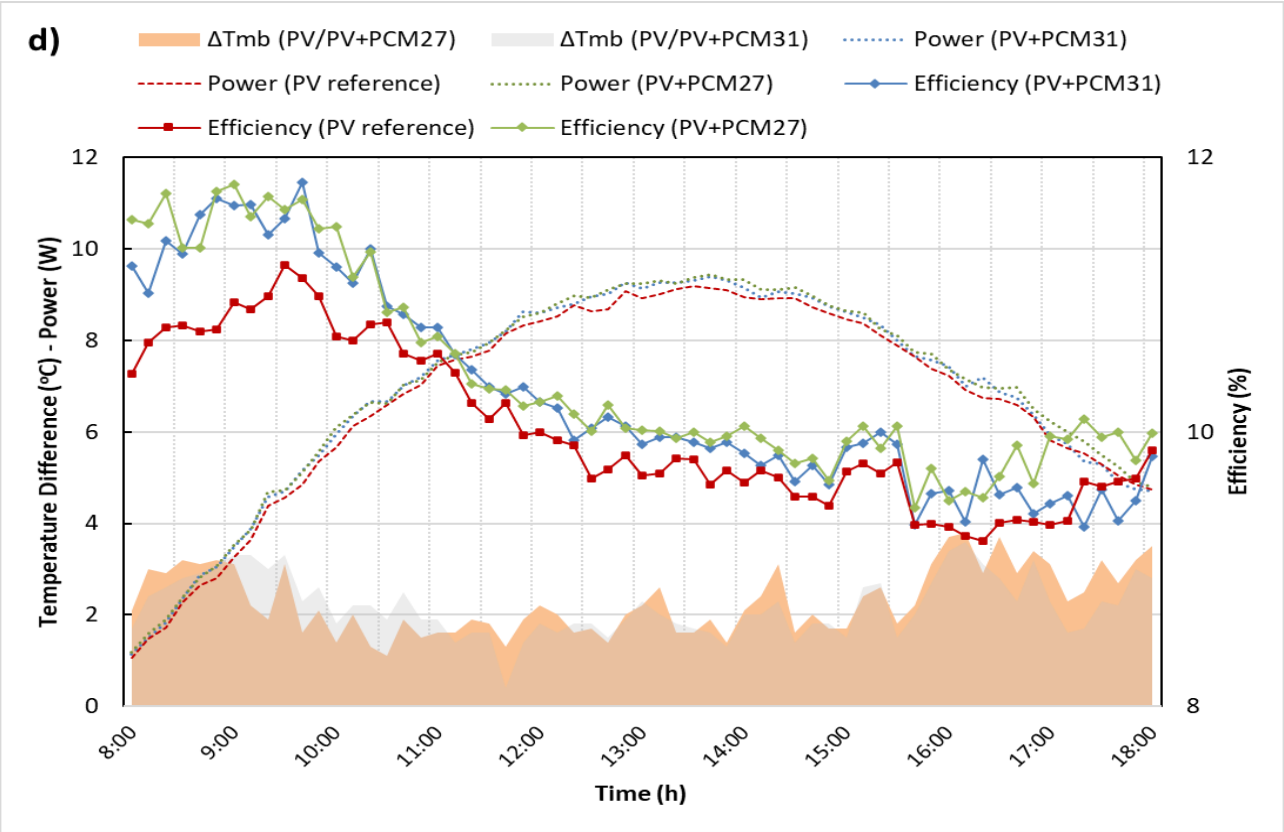
Περαιτέρω, η σημαντική βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων PV+PCM ($\eta_{ELEC,\ PV+PCM27}$, $\eta_{ELEC,\ PV+PCM31}$), με εύρος διακύμανσης από 5% έως 9%, αναγνωρίστηκε μεταξύ 8:00 και 9:50 (Διάγραμμα 7-9 (c)), ακολουθώντας την τάση διακύμανσης των τιμών της αποδοθείσας ηλεκτρικής ισχύος τους. Μετά από αυτό το χρονικό διάστημα, οι σχετικές τιμές του συντελεστή απόδοσης των ηλεγμένων φωτοβολταϊκών μονάδων μειώθηκαν λογικά, παρότι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια με PCM λειτουργούσαν υπό χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας σε σύγκριση με το φωτοβολταϊκό αναφοράς. Τέλος, η μέση και η μέγιστη τιμή της απόδοσης ($\eta_{ELEC,\ PV+PCM27}$ $\eta_{ELEC,\ PV+PCM31}$, $\eta_{ELEC,\ PV\ reference}$) προσδιορίστηκαν ίσες με 10,22% και 10,92%, 10,17% και 10,88%, 9,87% και 10,57% για το σύστημα PV+PCM27, το σύστημα PV+PCM31 και την περίπτωση αναφοράς, αντίστοιχα.

Βάσει των αποτελεσμάτων, που ανέκυψαν μέσω της διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας με αυξημένη ταχύτητα ανέμου (Διάγραμμα 7-9 (d)), τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που υποστηρίχθηκαν από τα σωληνωτής μορφής και πληρωμένα με PCM περιβλήματα παρατηρήθηκαν με ενισχυμένη απόδοση και αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση με την ενεργειακή απόκριση του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς. Ειδικότερα, το εύρος διακύμανσης των τιμών της αποδοθείσας ηλεκτρικής ισχύος από το σύστημα PV+PCM27 ($P_{M,PV+PCM27}$), το σύστημα PV+PCM31 ($P_{M,PV+PCM31}$) και το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς ($P_{M,PV\ reference}$) ήταν 1,17-9,44 W, 1,15-9,39 W και 1,06 W-9,18 W, αντίστοιχα. Ακόμη, η μέση ποσοστιαία αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος του ελεγχόμενου φωτοβολταϊκού τύπου, η οποία επιτεύχθηκε με την ένταξη του PCM27 και PCM31, ήταν περίπου 3,6% και 2,6%, αντίστοιχα. Γενικά, οι κατανομές της ισχύος στην έξοδο των ηλεγμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων παρατηρήθηκαν με τάση ανάλογη της μεταβολής της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_t), ενώ η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου (v_w) εντοπίστηκε ιδιαίτερα σημαντική. Ενδεικτικά, στις 12:50, η ηλεκτρική ισχύς που απέδωσαν το φωτοβολταϊκό αναφοράς ($P_{M,PV\ reference}$), το σύστημα PV+PCM27 ($P_{M,PV+PCM27}$) και το σύστημα PV+PCM31 ($P_{M,PV+PCM31}$) ήταν ίση με 9,07 W, 9,25 W και 9,26 W, αντίστοιχα,


a)
ΔTmb (PV/PV+PCM27)
ΔTmb (PV/PV+PCM31)
Power (PV+PCM31)
Power (PV reference)
Power (PV+PCM27)
Efficiency (PV+PCM31)
Efficiency (PV reference)
Efficiency (PV+PCM27)
Temperature Difference (ºC) - Power (W)
Efficiency (%)
Time (h)
8:00
9:00
10:00
11:00
12:00
13:00
14:00
15:00
16:00
17:00
18:00


b)
ΔTmb (PV/PV+PCM27)
ΔTmb (PV/PV+PCM31)
Power (PV+PCM31)
Power (PV reference)
Power (PV+PCM27)
Efficiency (PV+PCM31)
Efficiency (PV reference)
Efficiency (PV+PCM27)
Temperature Difference (ºC) - Power (W)
Efficiency (%)
Time (h)
8:00
9:00
10:00
11:00
12:00
13:00
14:00
15:00
16:00
17:00
18:00

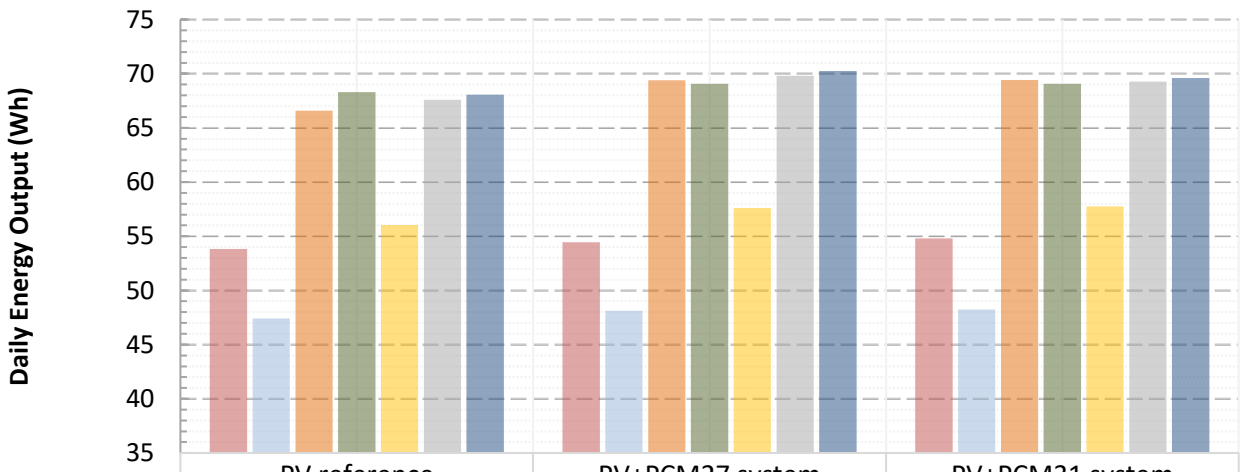




Διάγραμμα 7-9: Διακύμανση της απόκλισης των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας, της αποδιδόμενης ισχύος και της απόδοσης του φωτοβολταϊκού αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31 κατά τη διάρκεια επιλεγμένων ημερών της άνοιξης και του καλοκαιριού: a) 14/3/2019, b) 10/4/2019, c) 20/6/2019, d) 25/6/2019.

όταν η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G_t), η θερμοκρασία περιβάλλοντος (Ta) και η ταχύτητα ανέμου (v_w) ήταν 892 W/m^2, 26,2 ^{o}C και 9,8 m/s, αντίστοιχα. Εν αντιθέσει, στις 14:00, όταν η ταχύτητα ανέμου (v_w) μειώθηκε στα 7,6 m/s, με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G_t) και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (Ta) να εντοπίζονται χωρίς σημαντική μεταβολή, οι σχετικές τιμές ηλεκτρικής ισχύος ($P_{M,PV\ reference}$ $P_{M,PV+PCM27}$, $P_{M,PV+PCM31}$) εκτιμήθηκαν ίσες με 8,96 W, 9,17 W και 9,15 W, αντίστοιχα. Ως εκ τούτου, αναγνωρίζεται ότι η ταχύτητα του ανέμου (v_w) αποτελεί βασικό ρυθμιστικό παράγοντα για τη μεταφορά θερμότητας με φυσική (ή ελεύθερης) συναγωγή από τα δοχεία αποθήκευσης των PCM στο περιβάλλον, ενώ παράλληλα δρα συνεργατικά με τα ελεγχόμενα PCM για την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών των φωτοβολταϊκών πλαισίων εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας λειτουργίας τους. Αντίστοιχα, τα αποτελέσματα για την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης (Διάγραμμα 7-9 (d)) ανέδειξαν τη θετική επίδραση της ένταξης PCM, καθώς οι σχετικές τιμές για το σύστημα PV+PCM27 ($n_{ELEC,\ PV+PCM27}$), το σύστημα PV+PCM31 ($n_{ELEC,\ PV+PCM31}$) και το φωτοβολταϊκό πλαίσιο χωρίς PCM ($n_{ELEC,\ PV\ reference}$) παρατηρήθηκαν εντός των περιοχών 9,45-11,81%, 9,31-11,82% και 9,19-11,21%, αντίστοιχα. Έτσι, η μέση ημερήσια τιμή της υπεροχής των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31 έναντι της περίπτωσης αναφοράς προσδιορίστηκε ίση με 3,74% και 2,59%, αντίστοιχα. Γενικά, η παρατηρούμενη βελτίωση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων επικράτησε από τις 8:00 έως τις 10:10 και από τις 15:50 έως τις 17:10, λόγω της αθροιστικής επενέργειας επίδρασης των χρησιμοποιημένων PCM και της ταχύτητας του ανέμου (v_w). Όπως αποτυπώνεται στο Διάγραμμα 7-9 (b), τα συστήματα PV+PCM λειτουργούσαν με ενισχυμένη απόδοση και διευρυμένη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς, κατά τη διάρκεια μιας αίθριας ανοιξιάτικής ημέρας με ασθενή άνεμο (10/4/2019). Ακριβέστερα, η αποδοθείσα ισχύς από το σύστημα PV+PCM27 ($P_{M,PV+PCM27}$) κυμάνθηκε από 0,94 W έως 9,87 W, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για το σύστημα PV+PCM31 ($P_{M,PV+PCM31}$) και το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς ($P_{M,PV\ reference}$) ήταν από 0,94 W έως 9,93 W και από 0,96 W έως 9,41 W, αντίστοιχα. Επομένως, ο σχετικός βαθμός ενίσχυσης ως απόρροια της ενσωμάτωσης PCM27 και PCM31 εκτιμήθηκε ίσος με 4,19% και 4,24%, αντίστοιχα. Αναλύοντας περαιτέρω τα σχετικά δεδομένα, παρατηρείται ότι η ημερήσια εξέλιξη της ισχύος που αποδόθηκε από τα συστήματα PV+PCM27 ($P_{M,PV+PCM27}$) και PV+PCM31 ($P_{M,PV+PCM31}$) συνέπιπτε με τη διακύμανσης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_t), ενώ η επιρροή της ταχύτητας του ανέμου (v_w) καθίσταται διακριτή. Για παράδειγμα, στις 13:30, η ηλεκτρική ισχύς του συμβατικού φωτοβολταϊκού πλαισίου, του συστήματος PV+PCM27 και του συστήματος PV+PCM31 ήταν 9,41 W, 9,84 W και 9,93 W, αντίστοιχα, όταν συγχρόνως η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G_t), η θερμοκρασία περιβάλλοντος (Ta) και η ταχύτητα ανέμου (v_w) ήταν 1033 W/m^2, 16,9 ^{o}C και 1,4 m/s, αντίστοιχα. Ακόμη, η απόδοση του εξεταζόμενου φωτοβολταϊκού τύπου μέσω της συνδρομής του PCM27 καταγράφηκε αναβαθμισμένη, με εύρος διακύμανσης από 8,99% έως 10,21%, ενώ οι αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν λόγω της συνεισφοράς του PCM31 βρέθηκαν εντός της κλίμακας 9,01-10,22% (Διάγραμμα 7-9 (b)). Αντίθετα, η υστέρηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου χωρίς PCM αντικατοπτρίζεται στο αυξημένο εύρος διακύμανσης της απόδοσης μεταξύ των τιμών 8,47% και 10,18%. Συνεπώς, η σχετική βελτίωση της απόδοσης που αναγνωρίζεται στα συστήματα PV+PCM27 και PV+PCM31 έναντι της περίπτωσης αναφοράς ήταν της τάξεως του 4,14% και 4,19%, αντίστοιχα.

Στο Διάγραμμα 7-10 παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα για την ολική ημερήσια παραγωγή ενέργειας (συνεχούς ρεύματος-DC) του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς, του συστήματος PV+PCM27 και του συστήματος PV+PCM31 ($E_{DC,d_PV\ reference}$, $E_{DC,d_PV+PCM27}$, $E_{DC,d_PV+PCM31}$). Κατά τη διάρκεια των επιλεγμένων ημερών της θερινής περιόδου (20/6/2019 και 25/6/2019), η ενεργειακή παραγωγή του συστήματος PV+PCM27 ($E_{DC,d_PV+PCM27}$) ανήλθε σε 69,72 Wh/d και 70,45 Wh/d, αντίστοιχα, ενώ οι σχετικές τιμές για το σύστημα PV+PCM31 ($E_{DC,d_PV+PCM31}$) ήταν 69,27 Wh/d και 69,77 Wh/d. Σημειώνεται δε ότι οι σχετικές τιμές ήταν αυξημένες κατά 3,4% και 2,5% σε σύγκριση με τις τιμές της ενεργειακής απολαβής από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς (67,59 και 68,09 Wh/d). Από την άλλη πλευρά, το σύστημα PV+PCM31 παρουσιάζονταν με οριακά υψηλότερή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (δηλ. 54,79, 48,25, 69,42, 57,76 Wh/d) κυρίως τις ημέρες με έντονη παρουσία φαινομένων αστάθειας του καιρού (π.χ. 14/3/2019, 13/5/2019, κ.λπ.), καταδεικνύοντας ότι η ικανότητα θερμικής αποθήκευσης του επιλεγμένου PCM, πέραν της της περιοχής τήξης του, διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στη θερμική και της ενεργειακή απόκριση ενός συστήματος PV+PCM υπό διαφορετικές καιρικές συνθήκες λειτουργίας.



	PV reference	PV+PCM27 system	PV+PCM31 system
22/2/2019	53.84	54.45	54.79
14/3/2019	47.42	48.13	48.25
10/4/2019	66.60	69.39	69.42
3/5/2019	68.29	69.08	69.07
13/5/2019	56.05	57.60	57.76
20/6/2019	67.59	69.82	69.27
25/6/2019	68.07	70.24	69.60

Διάγραμμα 7-10: Συνολική παραγωγή ενέργειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31 κατά τη διάρκεια των επιλεγμένων αντιπροσωπευτικών ημερών: a) 22/2/2019, b) 14/3/2019, c) 10/4/2019, d) 3/5/2019, e) 13/5/2019, f) 20/6/2019, g) 25/6/2019.

7.4 Ανάπτυξη εμπειρικών μοντέλων πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων

Η περαιτέρω ανάλυση των πειραματικών δεδομένων, μέσω της εφαρμογής της κατάλληλης στατιστικής τεχνικής, οδήγησε στην ανάπτυξη έξι (6) εμπειρικών προσεγγίσεων για την εκτίμηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των εναλλακτικά διαμορφωμένων συστημάτων PV+PCM ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$, $T_{mb\ (PV+PCM31)}$) και του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$). Ειδικότερα, η επίδραση των κύριων καιρικών μεταβλητών (: προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία - G_t, θερμοκρασία περιβάλλοντος - Ta, ταχύτητα ανέμου - v_w) στη θερμική απόκριση των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης (θερμοκρασία λειτουργίας - T_{mb}) διερευνήθηκε εκτενέστερα με την εφαρμογή της μεθόδου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Για το σκοπό αυτό, ένα δείγμα πρωτογενών παρατηρήσεων, το οποίο ήταν ενδεικτικό των συνθηκών που επικράτησαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου, αξιοποιήθηκε για την υλοποίηση της σχετικής ανάλυσης, λαμβάνοντας υπόψη του περιορισμούς που τέθηκαν σε ότι αφορά τον δείκτη αιθριότητας (K_t≥0,5) και την ταχύτητα ανέμου (v_w<5 m/s, v_w≥5 m/s). Τέλος, η ακρίβεια και η αξιοπιστία των ανεπτυγμένων εμπειρικών μοντέλων προσδιορίστηκε μέσω του στατιστικού ελέγχου προσαρμογής των ληφθέντων αποτελεσμάτων.

7.4.1 Εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM31

Στο πλαίσιο εκπλήρωσης των στόχων που τέθηκαν στην ενότητα 7.4, η στατιστική επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων από την επιτήρηση του συστήματος PV+PCM31, υπό τους κατάλληλους περιορισμούς για τον δείκτη αιθριότητας και την ταχύτητα ανέμου (K_t≥0,5 και v_w<5 m/s), κατέληξε στην ανάπτυξη της ακόλουθης γραμμικής σχέσης:

- $$T_{mb\ (PV+PCM31)} = 4{,}414 + 0{,}025 \cdot G_t + 0{,}938 \cdot Ta - 0{,}079 \cdot v_w \qquad [7.1a]$$

Ακολούθως, τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης, έχοντας θεωρήσει ως ανεξάρτητες μεταβλητές την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G_t), τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (Ta) και την ταχύτητα του ανέμου (v_w) παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 7-1. Σύμφωνα με τις ληφθείσες τιμές 0,97 και 0,95 για το συντελεστή συσχέτισης (R) και το συντελεστή προσδιορισμού (R^2), αντίστοιχα, συνάγεται ότι προτεινόμενη γραμμική εξίσωση (7.1a) επιτυγχάνει την ικανοποιητική πρόβλεψη της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$), ενώ η τιμή 0,95 που εκτιμήθηκε για τον προσαρμοσμένο συντελεστή προσδιορισμού (R^2_{adj}) υποδεικνύει ότι το αναπτυγμένο εμπειρικό μοντέλο δύναται να επεκταθεί στο σύνολο του ελεγχόμενου πληθυσμού. Επιπλέον, τα στοιχεία της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) έδειξαν ότι το προτεινόμενο μοντέλο έχει καλή προσαρμογή, καθώς η σχετική τιμή του συντελεστή σημαντικότητας F είναι μικρότερη από την τιμή των 0,001. Εκτός αυτού, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η σχέση της εξαρτημένης και των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι στατιστικά σημαντική. Τέλος, η ερμηνεία του ανεπτυγμένου εμπειρικού μοντέλου αντανακλάται στις παρακάτω παρατηρήσεις:

- Η μεταβολή της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$) είναι ανάλογη της μεταβολής των τιμών της προσπίπτουσας ηλιακής

ακτινοβολίας (G_t) και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Ta), όπως υποδεικνύεται από τα θετικά πρόσημα των αντίστοιχων συντελεστών.

- Εν αντιθέσει, η αύξηση/μείωση της ταχύτητας ανέμου (v_w) επιφέρει μείωση/αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$), δεδομένου ότι αντίστοιχος συντελεστής παρατηρείται με αρνητικό πρόσημο.
- Στο πλαίσιο διενέργειας των απαιτούμενων t-tests, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G_t) και η θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Ta) αναγνωρίστηκαν ως στατιστικά σημαντικές ανεξάρτητες μεταβλητές, καθώς οι τιμές των σχετικών δεικτών σημαντικότητας (p-value) παρατηρήθηκαν <0,001. Ωστόσο, η υψηλή τιμή 0,0422 (>>0,001) του δείκτη σημαντικότητας (p-value) για τον συντελεστή της ταχύτητας ανέμου (v_w) στο μοντέλο, αποτέλεσε ένδειξη της περιορισμένης στατιστικής σημαντικότητας της.
- Η κατάταξη των ανεξάρτητων μεταβλητών λαμβάνοντας υπόψη το βαθμό συμβολής τους στην ερμηνευτική ικανότητα του ανεπτυγμένου εμπειρικού μοντέλου είναι: i. προσπίπτουσα ηλιακής ακτινοβολίας (G_t), ii. θερμοκρασία περιβάλλοντος (Ta), και, iii. ταχύτητα ανέμου (v_w).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από την αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς της ελεγχόμενης πειραματικής διάταξης κατά τη Β' φάση (Διάγραμμα 7-1 – Διάγραμμα 7-7), η ταχύτητα του ανέμου (v_w) είχε διακριτή επίδραση στη θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$). Ως εκ τούτου, η θεώρηση μιας εναλλακτικής διατύπωσης εμπειρικού μοντέλου, λαμβάνοντας υπόψη τις περιοριστικές συνθήκες (K_t≥0,5 και v_w≥5 m/s) αναφορικά με τον δείκτη αιθριότητας και την ταχύτητα ανέμου, συνέστησε έλλογη εξέλιξη προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα. Προς αυτή την κατεύθυνση, η ανάλυση χρονοσειρών για τη θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$), την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (G_t), τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (Ta) και την ταχύτητα του ανέμου (v_w), μέσω πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, οδήγησε στην παρακάτω γραμμική σχέση:

- $$T_{mb\ (PV+PCM31)} = 4{,}815 + 0{,}029 \cdot G_t + 0{,}685 \cdot Ta - 0{,}101 \cdot v_w \qquad [7.1b]$$

Γενικά, το εμπειρικό μοντέλο (7.1b) χαρακτηρίζεται από υψηλή ικανότητα πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$) και καλή προσαρμογή στα πρωτογενή δεδομένα, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης (Πίνακας 7-2). Ειδικότερα, ο συντελεστής συσχέτισης (R), ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) και ο προσαρμοσμένος συντελεστή προσδιορισμού (R^2_{adj}), ήταν 0,97, 0,94 και 0,94, αντίστοιχα, προσδιορίζοντας την υψηλή συσχέτισης μεταξύ των επιλεγμένων μεταβλητών (εξαρτημένη-ανεξάρτητες) της γραμμικής παλινδρόμησης. Επιπλέον, ο στατιστικός έλεγχος F για τη σημαντικότητα του μοντέλου εκτίμησης της εξαρτημένης μεταβλητής (δηλ. $T_{mb\ (PV+PCM31)}$) τεκμηριώνει την επιρροή των ανεξάρτητών μεταβλητών, καθώς η τιμή του συντελεστή σημαντικότητας F (p-τιμή) ήταν μικρότερη του 0,01% (<0,0001). Οι κύριες παρατηρήσεις για τις μεταβλητές του ανεπτυγμένου μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης συνοψίζονται ως εξής:

- Η αύξηση/μείωση των τιμών της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (G_t), της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Ta) της ταχύτητας ανέμου (v_w) συνεπάγεται την αύξηση/μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$), όπως φανερώνουν τα θετικά πρόσημα των αντίστοιχων συντελεστών στη σχέση 7.1b. Ωστόσο θα αποτελούσε σημαντική παράλειψη αν δεν υπογραμμιστεί η μη αναμενόμενη σχέση μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$) και της ανεξάρτητης μεταβλητής (v_w), καθώς η συνεργιστική δράση του PCM31 και της ταχύτητας ανέμου (v_w) είχε αναγνωριστεί σαφώς στις καμπύλες θερμική απόκρισης του συστήματος PV+PCM31 (Διαγράμματα 7-3 και 7-7). Ως εκ τούτου, ο μικρός αριθμός και η εποχικότητα των παρατηρήσεων φαίνεται να διαδραματίζει βασικό ρόλο για τη διαμόρφωση της εμπειρικής σχέσης.
- Σύμφωνα με τις τιμές που υπολογίστηκαν για τον δείκτη σημαντικότητας (p-value) μέσω των t-tests, οι συντελεστές των ανεξάρτητων μεταβλητών προσδιορίστηκαν στατιστικά σημαντικοί.
- Βάσει των σχετικών τιμών t (t-values), οι ανεξάρτητες μεταβλητές ταξινομούνται ως εξής: i. προσπίπτουσα ηλιακής ακτινοβολίας (G_t), ii. θερμοκρασία περιβάλλοντος (Ta), και, iii. ταχύτητα ανέμου (v_w).

7.4.2 Εμπειρικές σχέσεις εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM27 και του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς

Σε αντιστοιχία με τη στατιστική ανάλυση για τις ανεπτυγμένες προσεγγίσεις εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$) που παρουσιάζεται λεπτομερώς στην υποενότητα 7.5.1, η επεξεργασία των σχετικών πειραματικών μετρήσεων μέσω πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης πέτυχε παρεμφερή αποτελέσματα αναφορικά με την πρόβλεψη της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM27 ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$) και του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$). Ειδικότερα, οι γραμμικές σχέσεις που προέκυψαν σύμφωνα εκτίμησης αναφοράς είναι:

- $T_{mb\ (PV+PCM27)} = 3{,}205 + 1{,}037 \cdot Ta + 0{,}024 \cdot G_t - 0{,}087 \cdot v_w$, όταν $K_t \geq 0{,}5$ και $v_w < 5$m/s [7.2a]
- $T_{mb\ (PV+PCM27)} = 6{,}983 + 0{,}032 \cdot G_t + 0{,}564 \cdot Ta + 0{,}095 \cdot v_w$, όταν $K_t \geq 0{,}5$ και $v_w \geq 5$ m/s [7.2b]

- $T_{mb\ (PV\ reference)} = 8{,}214 + 0{,}029 \cdot G_t + 0{,}810 \cdot Ta - 0{,}091 \cdot v_w$,όταν $K_t \geq 0{,}5$ και $v_w < 5$m/s [7.3a]
- $T_{mb\ (PV\ reference)} = 8{,}347 + 0{,}032 \cdot G_t + 0{,}594 \cdot Ta + 0{,}088 \cdot v_w$,όταν $K_t \geq 0{,}5$ και $v_w \geq 5$ m/s [7.3b]

Συνοπτικά, οι παρατηρήσεις του στατιστικού ελέγχου για τα ανεπτυγμένα εμπειρικά μοντέλα προσδιορισμού της θερμοκρασίας λειτουργίας της περίπτωσης αναφοράς και του συστήματος PV+PCM27 παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 7-3 – Πίνακας 7-6).

$T_{mb\ (PV+PCM31)}$ model	Testing conditions
	K_t≥0,5 και v_w<5m/s
Regression Statistics	
Multiple R	0,97
R^2	0,95
R^2adjusted	0,95
Standard Error	2,56
Observations	429

ANOVA

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	3	49350	16450	2502	<0,0001
Residual	425	2794	7		
Total	428	52144			

	Coefficients	Standard Error	t-Stat	P- value	Lower 95%	Upper 95%
Constant	4,414	0,5414	8,154	<0,0001	3,350	5,479
G_t	0,025	0,0005	48,338	<0,0001	0,024	0,026
v_w	-0,079	0,0388	-2,038	0,0422	-0,155	-0,003
Τα	0,938	0,0208	45,071	<0,0001	0,898	0,979

Πίνακας 7-1: Έλεγχος προσαρμογής του εμπειρικού μοντέλου εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$) για τις συνθήκες K_T≥0,5 και v_w<5 m/s.

$T_{mb\ (PV+PCM31)}$ model	Testing conditions
	K_t≥0,5 και v_w≥5 m/s
Regression Statistics	
Multiple R	0,97
R^2	0,94
R^2adjusted	0,94
Standard Error	2,92
Observations	208

ANOVA

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	3	26218	8739	1028	<0,0001
Residual	204	1735	9		
Total	207	27953			

	Coefficients	Standard Error	t-Stat	P- value	Lower 95%	Upper 95%
Constant	4,815	1,186	4,058	<0,0001	2,476	7,154
G_t	0,029	0,001	34,611	<0,0001	0,027	0,030
v_w	0,101	0,025	4,098	<0,0001	0,053	0,150
Τα	0,685	0,027	25,066	<0,0001	0,631	0,739

Πίνακας 7-2: Έλεγχος προσαρμογής του εμπειρικού μοντέλου εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$) για τις συνθήκες K_T≥0,5 και v_w≥5 m/s.

$T_{mb\ (PV+PCM27)}$ model	Testing conditions
	K_t≥0,5 και v_w<5m/s

Regression Statistics	
Multiple R	0,97
R^2	0,95
R^2adjusted	0,95
Standard Error	2,65
Observations	428

ANOVA

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	3	52243	17414	2479	<0,0001
Residual	424	2978	7		
Total	427	55221			

	Coefficients	Standard Error	t-Stat	P- value	Lower 95%	Upper 95%
Constant	3,205	0,557	5,752	<0,0001	2,110	4,301
G_t	0,024	0,001	45,308	<0,0001	0,023	0,026
v_w	-0,087	0,039	-2,226	0,027	-0,164	-0,010
Tα	1,037	0,022	47,820	<0,0001	0,995	1,080

Πίνακας 7-3: Έλεγχος προσαρμογής του εμπειρικού μοντέλου εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM27 ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$) για τις συνθήκες K_T≥0,5 και v_w<5 m/s.

$T_{mb\ (PV+PCM27)}$ *model*	Testing conditions
	K_t≥0,5 και v_w≥5 m/s

Regression Statistics	
Multiple R	0,97
R^2	0,95
R^2adjusted	0,95
Standard Error	2,68
Observations	197

ANOVA

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	3	25741	8580	1195	<0,0001
Residual	193	1386	7		
Total	196	27127			

	Coefficients	Standard Error	t-Stat	P- value	Lower 95%	Upper 95%
Constant	6,983	1,132	6,167	<0,0001	4,750	9,217
G_t	0,032	0,001	40,098	<0,0001	0,030	0,033
v_w	0,095	0,023	4,048	<0,0001	0,049	0,141
Tα	0,564	0,025	22,137	<0,0001	0,513	0,614

Πίνακας 7-4: Έλεγχος προσαρμογής του εμπειρικού μοντέλου εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM31)}$) για τις συνθήκες K_T≥0,5 και v_w≥5 m/s.

$T_{mb\ (PV\ reference)}$ model	Testing conditions
	K_t≥0,5 και v_w<5m/s

Regression Statistics	
Multiple R	0,98
R^2	0,96
R^2adjusted	0,96
Standard Error	2,20
Observations	632

ANOVA

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	3	68744	22915	4742	<0,0001
Residual	628	3035	5		
Total	631	71779			

	Coefficients	Standard Error	t-Stat	P- value	Lower 95%	Upper 95%
Constant	8,214	0,386	21,255	<0,0001	7,455	8,972
G_t	0,029	0,000	85,241	<0,0001	0,028	0,029
v_w	-0,091	0,022	-4,123	<0,0001	-0,135	-0,048
Tα	0,810	0,013	64,536	<0,0001	0,785	0,834

Πίνακας 7-5: Έλεγχος προσαρμογής του εμπειρικού μοντέλου εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$) για τις συνθήκες K_T≥0,5 και v_w<5 m/s.

$T_{mb\ (PV\ reference)}$ model	Testing conditions
	K_t≥0,5 και v_w≥5 m/s

Regression Statistics	
Multiple R	0,98
R^2	0,96
R^2adjusted	0,96
Standard Error	2,49
Observations	192

ANOVA

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	3	26120	8707	1408	<0,0001
Residual	188	1162	6		
Total	191	27282			

	Coefficients	Standard Error	t-Stat	P- value	Lower 95%	Upper 95%
Constant	8,347	1,057	7,895	<0,0001	6,261	10,433
G_t	0,032	0,001	41,503	<0,0001	0,030	0,033
v_w	0,088	0,022	4,086	<0,0001	0,045	0,130
Tα	0,594	0,025	23,750	<0,0001	0,545	0,644

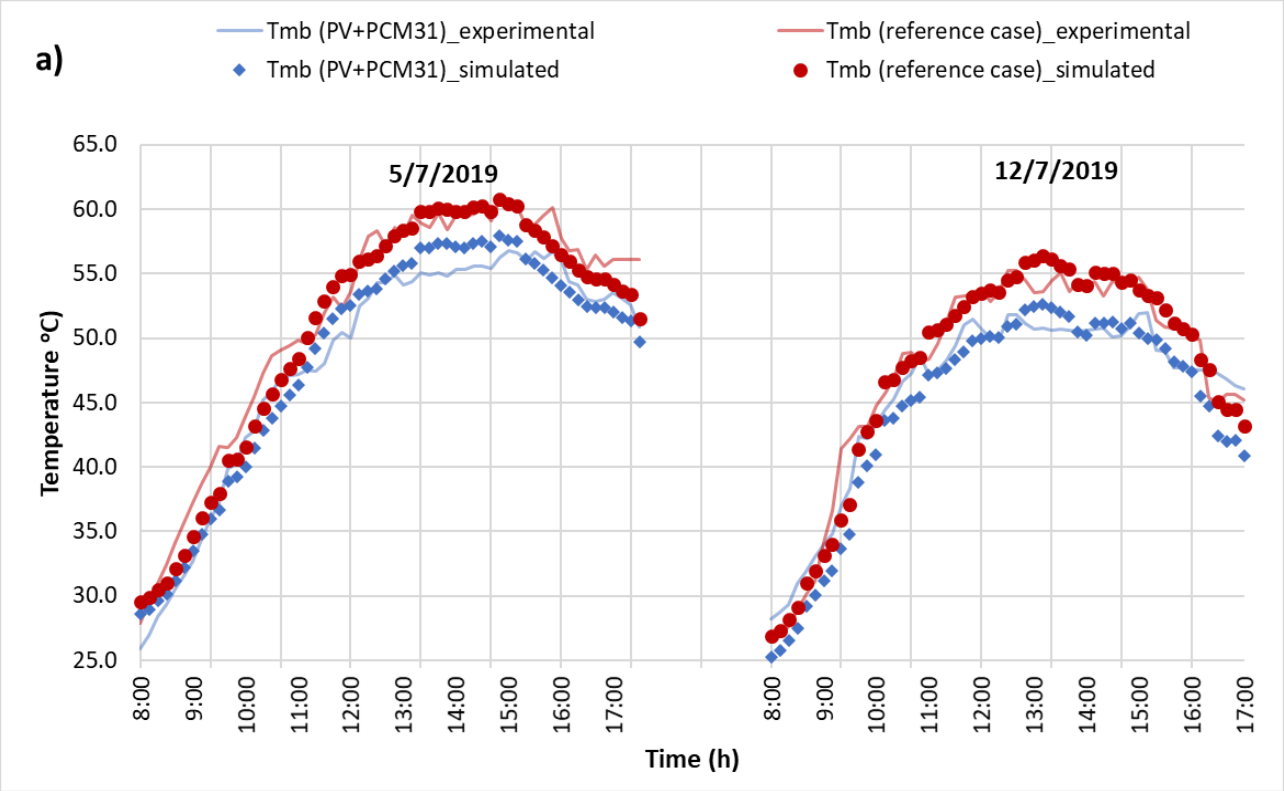
Πίνακας 7-6: Έλεγχος προσαρμογής του εμπειρικού μοντέλου εκτίμησης της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$) για τις συνθήκες K_T≥0,5 και v_w≥5 m/s.

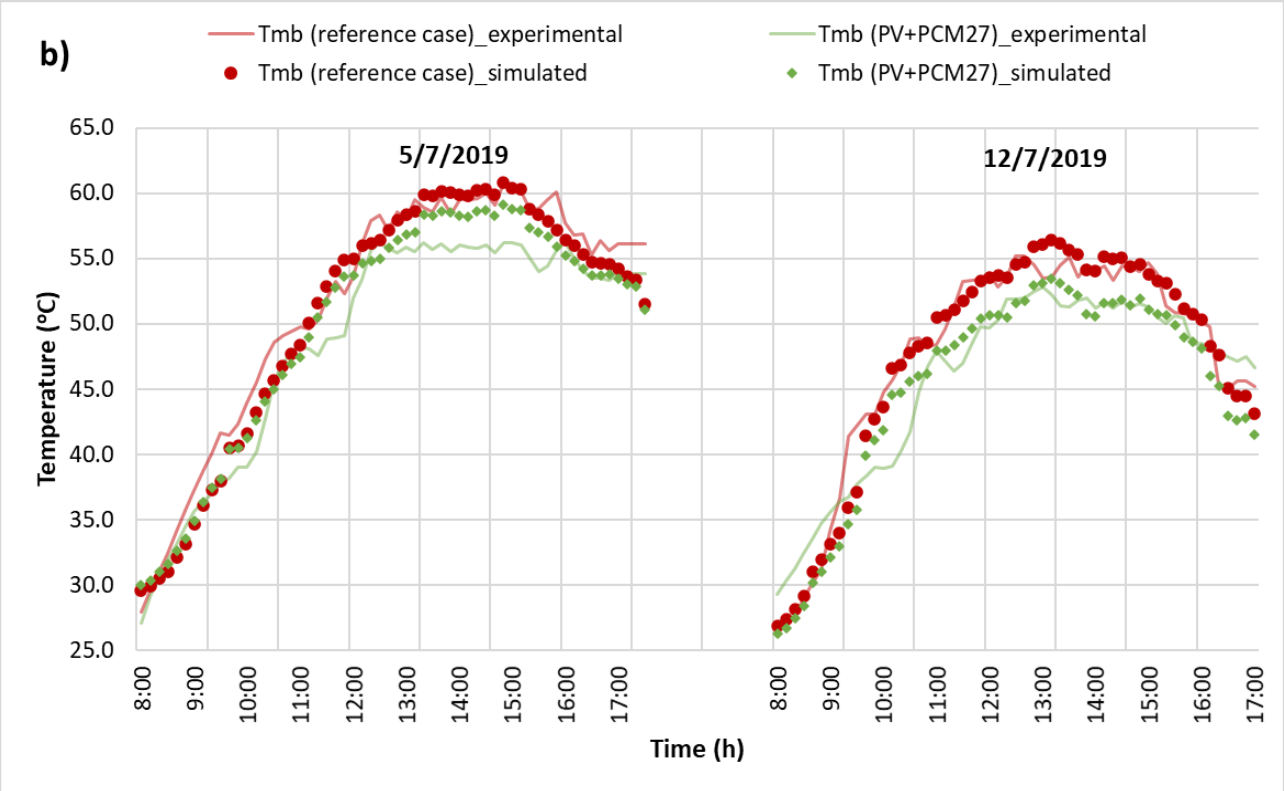
7.5 Επικύρωση των εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων

Στην τρέχουσα ενότητα, τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τον έλεγχο της απόδοσης των εμπειρικών σχέσεων, οι οποίες αναπτυχθήκαν για την εκτίμηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των συστημάτων PV+PCM (σύστημα PV+PCM27, σύστημα PV+PCM31) μέσω πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, παρουσιάζονται υπό μορφή γραφικών απεικονίσεων (Διάγραμμα 7-11 και Διάγραμμα 7-12). Ειδικότερα, τα διαθέσιμα δεδομένα που περιγράφουν τις συνθήκες λειτουργίας της πειραματικής διάταξης κατά τη διάρκεια τριών (3) αντιπροσωπευτικών ημερών στην περιοχή μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των καμπυλών ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας λειτουργίας των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων. Εν συνεχεία, τα ληφθέντα αποτελέσματα μέσω της προσομοίωσης αξιολογήθηκαν συγκριτικά με τις αντίστοιχες τιμές από τη διεξαχθείσα έρευνα σε πραγματικές συνθήκες πεδίου για την επικύρωση των προτεινόμενων εμπειρικών σχέσεων.

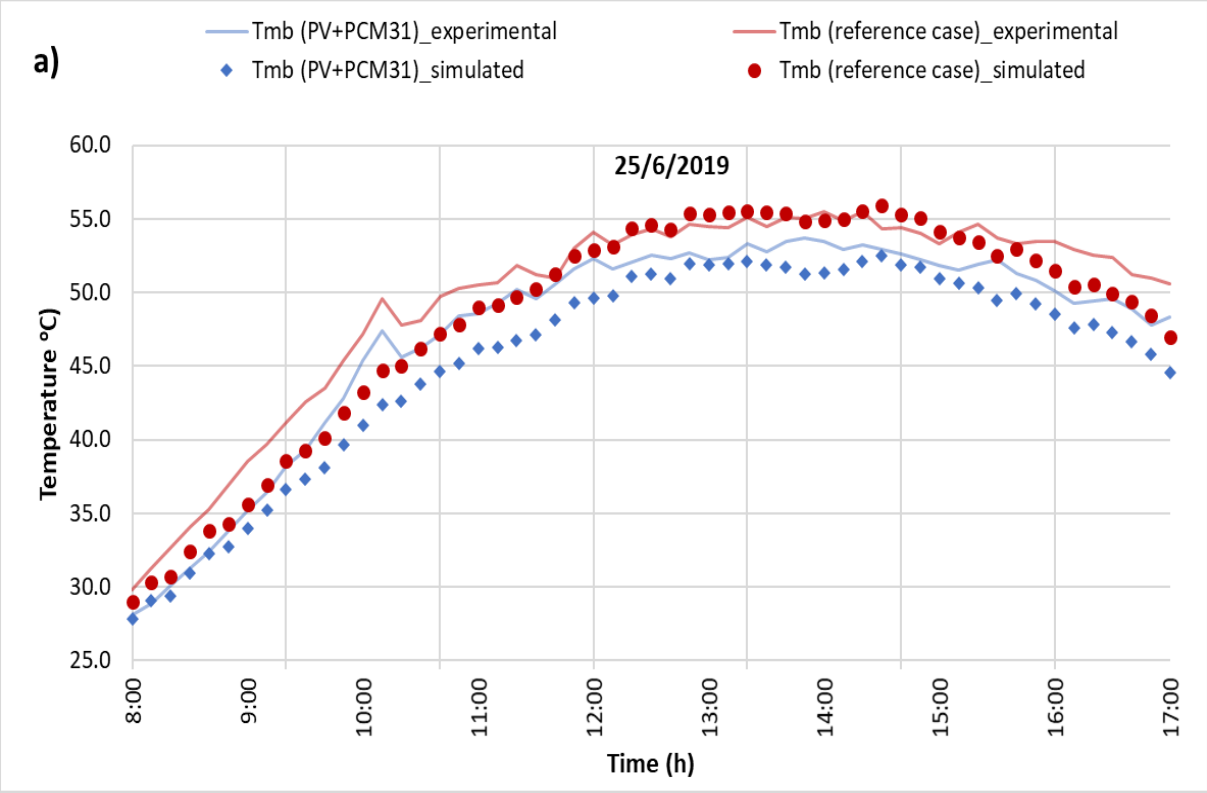
Σε συνθήκες αιθριότητας και χαμηλής έντασης ανέμων (v_w<5 m/s) κατά τη διάρκεια δύο (2) τυπικών θερινών ημερών (: a) 5/7/2019, b)12/7/2019), οι ανεπτυγμένες εμπειρικές σχέσεις δύνανται να παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά την πρόβλεψη της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$) και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$, $T_{mb\ (PV+PCM31)}$), όπως διακρίνεται στο Διάγραμμα 7-11 (a-b). Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές που προέκυψαν μέσω της εφαρμογής των προτεινόμενων εμπειρικών σχέσεων παρουσιάζουν τάση σύγκλισης προς τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης, με τις όποιες διαφοροποιήσεις τους να καταγράφονται κυρίως κατά τις πρωινές και τις απογευματινές ώρες, οπότε και λαμβάνουν χώρα οι άμεσες αλλαγές στην ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολία (G_t). Εν προκειμένω, η μέση παρατηρούμενη απόκλιση μεταξύ των θεωρητικών και των πειραματικών τιμών για την περίπτωση αναφοράς, το σύστημα PV+PCM27 και το σύστημα PV+PCM31 ($\Delta T_{mb\ (PV\ reference_exp./PV\ reference_sim.)_avg}$, $\Delta T_{mb\ (PV+PCM27_exp./PV+PCM27_sim.)_avg}$, $\Delta T_{mb\ (PV+PCM31_exp./PV+PCM31_\ sim.)_avg}$) ήταν 0,4 ºC, -0,3 ºC και 0,5 ºC, αντίστοιχα, ενώ οι σχετικές τιμές για τη μέγιστη διαφοροποίηση τους ($\Delta T_{mb\ (PV\ reference_exp./PV\ reference_sim.)_peak}$, $\Delta T_{mb\ (PV+PCM27_exp./PV+PCM27_sim.)_peak}$, $\Delta T_{mb\ (PV+PCM31_exp./PV+PCM31_\ sim.)_\ peak}$) υπολογίστηκαν ίσες με 5,5 ºC, 5,1 ºC και 5,2 ºC.

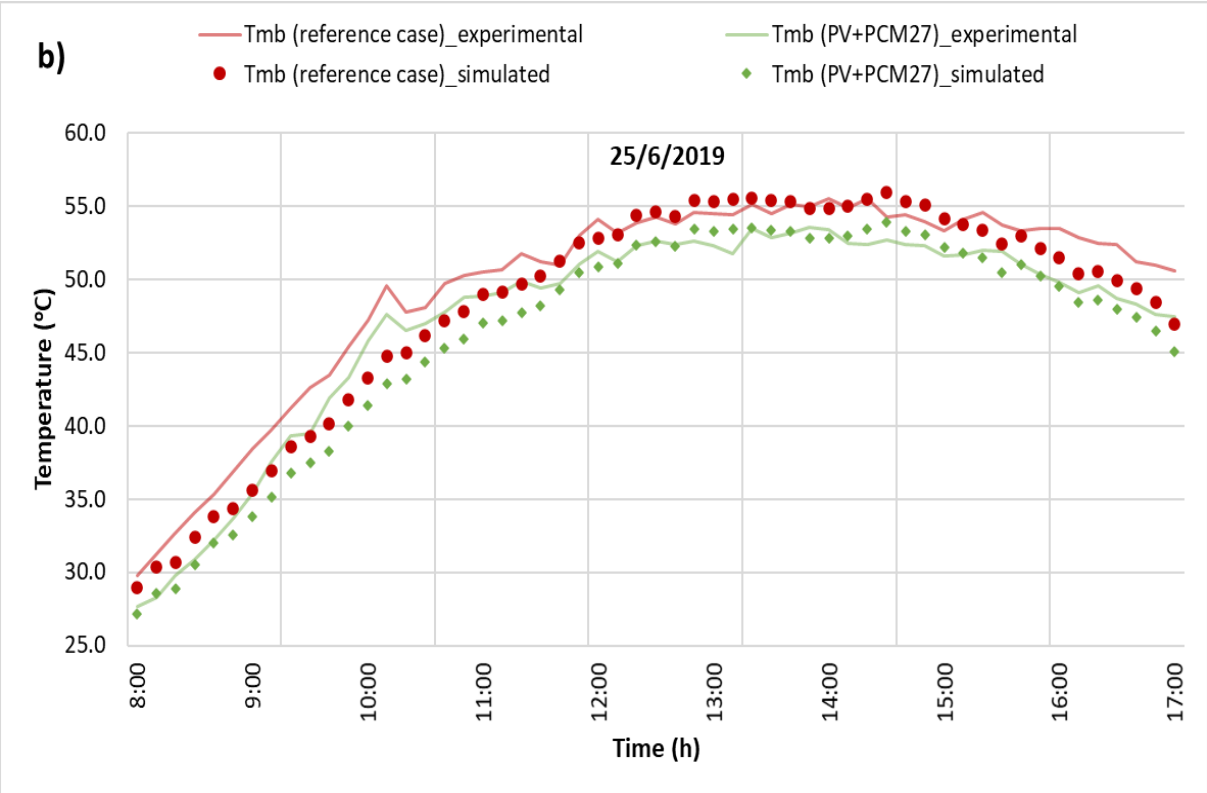
Στις ίδιες γραμμές, η προβλεπτική ικανότητα των προτεινόμενων εμπειρικών σχέσεων για την εκτίμηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$) και των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31 ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$, $T_{mb\ (PV+PCM31)}$) σε συνθήκες αιθριότητας και αυξημένων τιμών ταχύτητας ανέμου (v_w≥5 m/s) χαρακτηρίζεται υψηλή, δεδομένου ότι οι σχετικές θεωρητικές και οι πειραματικές τιμές της εμφανίζονται με όμοια ημερήσια διακύμανση (Διάγραμμα 7-12 (a-b)) και μέση απόκλιση ($\Delta T_{mb\ (PV\ reference_exp./PV\ reference_sim.)_avg}$, $\Delta T_{mb\ (PV+PCM27_exp./PV+PCM27_sim.)_avg}$, $\Delta T_{mb\ (PV+PCM31_exp./PV+PCM31_\ sim.)_avg}$) ίση με 3,8 ºC, 3,6 ºC και 4,3 ºC.





Διάγραμμα 7-11: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των συστημάτων PV+PCM ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$, $T_{mb\ (PV+PCM31)}$) και του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$) κατά τη διάρκεια δύο τυπικών θερινών ημερών (: a) 5/7/2019, b)12/7/2019) με χαμηλές τιμές ταχύτητας ανέμου (v_w<5 m/s).





Διάγραμμα 7-12: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των συστημάτων PV+PCM ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$, $T_{mb\ (PV+PCM31)}$) και του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$) κατά τη διάρκεια μιας θερινής ημέρας (: a) 25/6/2019) με αυξημένες τιμές ταχύτητας ανέμου (v_w≥5 m/s).

Κεφάλαιο 8 : ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 Αξιολόγηση της θερμικής και ενεργειακής συμπεριφοράς του συστήματος PV+PCM (1η Σχεδιαστική προσέγγιση) υπό τις πραγματικές συνθήκες πεδίου

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, ένα σύστημα PV+PCM σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και τέθηκε σε πιλοτική λειτουργία για τη διερεύνηση της σκοπιμότητας και των δυνατοτήτων εξέλιξης της εφαρμογής, λαμβάνοντας υπόψη τον αντίκτυπο της ενσωμάτωσης PCM στη θερμοκρασία λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου (T_m), και κατ' επέκταση στην ενεργειακή απόδοση του (n_{ELEC}). Για το σκοπό αυτό, ένας σημαντικός αριθμός δεδομένων συλλέχθηκε μέσω συστηματικής πειραματικής παρατήρησης κατά τη διάρκεια ενός (1) έτους (περίοδος Ιουλίου 2016 – Ιουνίου 2017), επεξεργάστηκε, αναλύθηκε και αξιολογήθηκε προκειμένου να εκτιμηθεί η ενεργειακή και θερμική απόκριση του συστήματος PV+PCM στις επικρατούσες συνθήκες του περιβάλλοντος στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου (Νότια Ελλάδα, Κρήτη). Μεταξύ των στοιχείων πρωτοτυπίας της εκπονηθείσας διδακτορικής διατριβής, η εκτεταμένη και εντατική πειραματική διαδικασία σε συνθήκες πεδίου για την πλήρη κατανόηση των βασικών λειτουργικών πτυχών ενός συστήματος PV+PCM (π.χ. εποχικότητα, αξιοπιστία, κ.α.) αναγνωρίζεται ως ιδιαίτερα σημαντική, δεδομένου ότι ο αριθμός των σχετικών μελετών που απαντάται στη διεθνή βιβλιογραφία είναι περιορισμένος. Επίσης, μια θεωρητική μέθοδος αναπτύχθηκε για το σχεδιασμό συστημάτων PV+PCM (τυπικής διαμόρφωσης), η οποία δύναται να αξιοποιηθεί από μελετητές, επενδυτές και εγκαταστάτες ως ένα απλοποιημένο και οικονομικά αποδοτικό (cost-efficient) εργαλείο άμεσης εκτίμησης της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης εφαρμογής σε υφιστάμενα ή/και μελλοντικά φωτοβολταϊκά συστήματα.

Στο σημείο αυτό, αξίζει να επισημανθεί ότι τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος PV+PCM επιλέχθηκαν με βασικό κριτήριο τη δημιουργία μιας πιλοτικής διάταξης, χωρίς ωστόσο να αγνοούνται τα περιθώρια βελτιστοποίησης του σε επίπεδο τεχνικών χαρακτηριστικών. Ως εκ τούτου, οι κύριες παρατηρήσεις από τον πειραματικό έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος PV+PCM σε συνθήκες πεδίου θα συμβάλλουν για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων και τη διαμόρφωση σημείων αναφοράς, τα οποία ακολούθως δύνανται να συντελέσουν για την αναγνώριση και αποτύπωση των δυνατοτήτων και προοπτικών ανάπτυξης μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεων του προτεινόμενου τύπου, στις χώρες της Μεσογείου και άλλες περιοχές με υψηλό ηλιακό δυναμικό, τα επόμενα χρόνια.

Σύμφωνα με τα στοιχεία για τη θερμική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης κατά τη διάρκεια της περιόδου επιτήρησης (Πίνακας 8-1), η ετήσια μέση ημερήσια τιμή της θερμοκρασίας λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{m\ (PV\ reference),y}$) και του συστήματος PV+PCM ($T_{m\ (PV+PCM),y}$) ήταν 38,1 ^oC και 32,6 ^oC, αντίστοιχα. Ακόμη, θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι μέγιστες παρατηρηθείσες τιμές 71,9 ^oC και 69,9 ^oC όσον αφορά στη θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου με και χωρίς PCM ($T_{m\ (PV+PCM)_peak}$ και $T_{m\ (PV\ reference)_peak}$) εντοπίστηκαν τον Αύγουστο και τον Ιούλιο, όταν οι σχετικές τιμές για τη μηνιαία μέση ημερήσια θερμοκρασία του περιβάλλοντος ($Ta_{,mo}$) εντοπίστηκαν ίσες με 29,1 ^oC και 29,8 ^oC, αντίστοιχα. Όπως ήταν αναμενόμενο, κατά τους

θερμότερους μήνες της περιόδου επιτήρησης, η θερμική απόκριση του συστήματος PV+PCM χαρακτηρίζεται από οριακή βελτίωση. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει αν ληφθεί υπόψη ότι οι τιμές της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($T_{m\ (PV+PCM)_avg}$ και $T_{m\ (PV\ reference)_avg}$) προσδιορίσθηκαν ίσες με 46,5 ^oC και 51,3 ^oC, αντίστοιχα, ενώ η σχετική μέση και μέγιστη απόκλιση τους ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_avg}$, $\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_peak}$) ήταν 4,9 ^oC και 12,8 ^oC (Πίνακας 8-2), υποδεικνύοντας την ανάγκη επανεξέτασης της επιλογής PCM με σημείο τήξης ($T_{PCM,\ melt}$) μικρότερο των 30 ^oC ώστε να αποφεύγεται η πρώιμη τήξη του PCM κατά τις πρώτες πρωινές ώρες των καλοκαιρινών ημερών. Αντίθετα, σε συνθήκες χαμηλών θερμοκρασιών και μειωμένου αριθμού ωρών ηλιοφάνειας που απαντώνται κυρίως τους χειμερινούς μήνες, η σκοπιμότητα της ενσωμάτωσης PCM χρήζει περαιτέρω διερεύνησης δεδομένου ότι η μέση τιμή της μεταβολής της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος PV+PCM έναντι του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_avg}$) ήταν μικρότερη από 2 ^oC.

Παράλληλα, η θερμική συμπεριφορά του συστήματος PV+PCM ήταν σαφώς αναβαθμισμένη κατά τους μήνες της άνοιξης και του φθινοπώρου, όταν οι τιμές των σχετικών δεικτών $\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_peak}$, $\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)_avg}$ προσδιορισθήκαν ίσες με 21,5 ^oC, 15,6 ^oC 10,2 ^oC και 6,4 ^oC, αντιστοίχως. Προφανώς, η αξιοποίηση του PCM συντελούσε για το μετριασμό του ρυθμού ανόδου της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου του συστήματος PV+PCM μέχρι τη στιγμή πλήρους υγροποίησης, υποδεικνύοντας την καλύτερη προσαρμογή του στις μεταβατικές συνθήκες μεταξύ άνοιξης και καλοκαιριού, όπως ήταν αναμενόμενο δεδομένου του εύρους θερμοκρασιών μετάβασης φάσης του επιλεγμένου PCM.

Επίσης, αξίζει να γίνει ειδική αναφορά στην εμφάνιση του φαινομένου "κόπωσης" του συστήματος PV+PCM κυρίως κατά το 2° μισό των θερινών και φθινοπωρινών ημερών της ελεγχόμενης περιόδου. Το παραπάνω φαινόμενο παρατηρείται καθώς το "εργαζόμενο" μέσο υπολειπόταν της δυνατότητας απορρόφησης του συνόλου της πλεονάζουσας θερμότητας από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ενώ λειτουργούσε ως αντίσταση που αποτρέπει την απόρριψη της θερμότητας του. Αυτή η συνθήκη υποδηλώνει την ανάγκη επανεξέτασης του σχεδιασμού του συστήματος PV+PCM, εστιάζοντας σε τρόπους για τη βελτίωση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία ανάμεσα στην οπίσθια πλευρά του περιβλήματος PCM και του περιβάλλοντος χώρου. Επίσης, η σχετική αύξηση της ποσότητας του χρησιμοποιούμενου PCM θα μπορούσε να συνεισφέρει για την αύξηση της θερμικής αδράνειας προκειμένου να αποτραπεί η "κόπωση" του συστήματος PV+PCM.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ενεργειακής ανάλυσης, η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος ($E_{DC,y}$) του συστήματος PV+PCM ανήλθε σε 215,1 kWh, όντας αυξημένη κατά 12,4 kWh (αύξηση περίπου 5,7%) σε σχέση με την ενέργεια (202,7 kWh) που παρήγαγε το φωτοβολταϊκού πλαίσιο αναφοράς. Πιο αναλυτικά, η ολική μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος ($E_{DC,m}$) του συστήματος PV+PCM κυμάνθηκε από 7,79 kWh τον Δεκέμβριο του 2016 έως 26,07 kWh τον Ιούλιο του 2016, ενώ διαπιστώθηκε αυξημένη σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς κατά 0,19 kWh (Δεκέμβριο 2016) και 1,27 kWh (Ιούλιο 2016), αντίστοιχα. Επιπροσθέτως, είναι χρήσιμο να τονιστεί ότι η ποσοστιαία αύξηση της ολικής μηνιαίας ενεργειακής παραγωγής του συστήματος PV+PCM έναντι του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($\Delta E_{DC,m\ (PV+PCM/PV)}$) προσδιορίστηκε από 3,0% (Δεκέμβριος 2016) έως 8,9% (Ιούνιος 2017). Πέραν αυτού, η βελτιωμένη ενεργειακή απόκριση του συστήματος PV+PCM αντικατοπτρίζεται επίσης στην αύξηση των τιμών της

απόδοσης του, η οποία ήταν της τάξεως του 0,18% (Ιανουάριος 2017) και 0,67% (Ιούνιος 2017), αντίστοιχα.

	Μήνας	1η περίοδος πειραματικής αξιολόγησης (Ιούλιος 2016 – Ιούνιος 2017)					
		$\overline{H}_t$	$\overline{K}_t$	*Τα*	v_w	$T_{m\ (PV\ reference)}$	$T_{m\ (PV+PCM)}$
		kWh/m²/d	-	ºC	m/s	ºC	
2016	*Ιούλιος*	7,37	0,64	29,8	2,6	51,7	48,2
	Αύγουστος	6,92	0,59	29,1	2,9	50,9	46,7
	Σεπτέμβριος	6,86	0,57	26,3	2,9	45,6	39,2
	Οκτώβριος	5,59	0,49	22,8	2,4	39,5	30,3
	Νοέμβριος	4,50	0,55	14,8	3,8	27,8	25,5
	Δεκέμβριος	2,97	0,40	9,4	4,2	20,9	21,7
2017	*Ιανουάριος*	2,36	0,30	11,0	2,3	19,4	18,1
	Φεβρουάριος	3,83	0,42	14,3	2,5	31,7	26,6
	Μάρτιος	4,70	0,45	15,2	2,9	37,2	30,4
	Απρίλιος	5,93	0,56	18,3	2,7	40,1	31,8
	Μάιος	6,06	0,57	22,7	2,9	45,3	35,2
	Ιούνιος	6,48	0,61	27,0	1,9	46,5	37,9
	Μέσος όρος	5,30	0,51	20,1	2,8	38,1	32,6

Πίνακας 8-1: Συνοπτικός πίνακας μέσων μηνιαίων τιμών για τις παραμέτρους ελέγχου: ημερήσια ενεργειακή απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο ($\overline{H}_t$), συντελεστής αιθριότητας ($\overline{K}_t$), θερμοκρασία περιβάλλοντος (*Τα*), ταχύτητα ανέμου (v_w), θερμοκρασία λειτουργίας των εξεταζόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων ($T_{m\ (PV\ reference)}$, $T_{m\ (PV+PCM)}$), κατα τη 1η περίοδο αξιολόγησης (Ιούλιος 2016 – Ιούνιος 2017).

1η περίοδος πειραματικής αξιολόγησης (Ιούλιος 2016 – Ιούνιος 2017)									
	Τα	$T_{m\ (PV+PCM)}$			$T_{m\ (PV\ reference)}$			$\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)}$	
	Avg.	Avg.	Min	Peak	Avg.	Min	Peak	Avg.	Peak
					ºC				
Καλοκαίρι 2016	29,5	46,5	25,8	67,5	51,3	20,1	69,2	4,9	12,8
Φθινόπωρο 2016	21,3	31,4	17,1	52,2	38,0	14,3	63,2	6,4	15,6
Χειμώνας 2016-2017	11,4	22,1	9,8	43,1	24,0	5,1	51,8	1,9	13,5
*Άνοιξη-Καλοκαίρι 2017**	20,8	32,9	16,8	52,5	43,1	9,8	67,3	10,2	21,5

**Για τη διασφάλιση της συνέπειας των αποτελεσμάτων που σχετίζονται με τη θερμική απόκριση του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM στις μεταβατικές συνθήκες μεταξύ άνοιξης και καλοκαιριού, θεωρήθηκε σκόπιμη η συμπερίληψη των πειραματικών τιμών που σημειώθηκαν για τον Ιούνιο του 2017.*

Πίνακας 8-2: Εποχική διακύμανση της θερμικής συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τις ώρες διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας, για την 1η περίοδο αξιολόγησης (Ιούλιος 2016 – Ιούνιος 2017).

Η παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια της πειραματικής διάταξης παρατηρήθηκε μειωμένη κατά τους χειμερινούς μήνες, καθώς ο αριθμός των ωρών πραγματικής ηλιοφάνειας ήταν σημαντικά μικρότερος σε σχέση με τα καταγεγραμμένα χρονικά διαστήματα αιθριότητας κατά του μήνες της άνοιξης, του καλοκαιριού και του φθινοπώρου. Αντίθετα, η παραχθείσα ενέργεια από το σύστημα PV+PCM και από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς εκτιμήθηκε σημαντικά υψηλότερη τους θερμότερους μήνες του καλοκαιριού (Ιούλιος 2016-Αύγουστος 2016), ενώ παράλληλα αποδεικνύεται η βελτιωμένη, σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς, επίδοση του συστήματος PV+PCM λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική αύξηση της μηνιαίας ενεργειακής παραγωγής του ($\Delta E_{DC,m\ (PV+PCM/PV)}$) από 5,1% έως 5,6 %. Ωστόσο, οι αντίστοιχες ποσοστιαίες τιμές 8,4% και 8,9%, οι οποίες χαρακτηρίζουν την βέλτιστη απόκριση του συστήματος PV+PCM κατά την περίοδο επιτήρησης, βρέθηκαν για τον Μάιο και τον Ιούνιο του 2017, υποδεικνύοντας την καλύτερη προσαρμογή του στις μεταβατικές συνθήκες μεταξύ άνοιξης και καλοκαιριού, όπως ήταν αναμενόμενο δεδομένου του εύρους θερμοκρασιών μετάβασης φάσης του επιλεγμένου PCM.

1η περίοδος πειραματικής αξιολόγησης (Ιούλιος 2016 – Ιούνιος 2017)							
		Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας		**Απόδοση ενεργειακής μετατροπής**		**Λόγος επίδοσης**	
	$\bar{H}_t$	$\bar{E}_{DC,d_PV+PCM}$	$\bar{E}_{DC,d_PV\ reference}$	$n_{ELEC,\ PV+PCM}$	$n_{ELEC,\ PV\ reference}$	$PR_{DC,\ PV+PCM}$	$PR_{DC,\ PV\ reference}$
	kWh/m²/d	kWh/kWp/d (kWh/d)	kWh/kWp/d (kWh/d)	%			
Καλοκαίρι 2016	7,15	6,00 *(0,78)*	5,92 *(0,77)*	8,1	7,7	83,9	82,8
Φθινόπωρο 2016	5,65	4,69 *(0,61)*	4,46 *(0,58)*	7,7	7,3	83,0	78,9
Χειμώνας 2016-2017	3,05	2,46 *(0,32)*	2,39 *(0,31)*	7,4	7,2	80,7	78,4
*Άνοιξη-Καλοκαίρι 2017**	5,79	5,00 *(0,65)*	4,61 *(0,60)*	8,0	7,4	86,4	79,6

**Για τη διασφάλιση της συνέπειας των αποτελεσμάτων που σχετίζονται με τη θερμική απόκριση του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM στις μεταβατικές συνθήκες μεταξύ άνοιξης και καλοκαιριού, θεωρήθηκε σκόπιμη η συμπερίληψη των πειραματικών τιμών που σημειώθηκαν για τον Ιούνιο του 2017.*

Πίνακας 8-3: Εποχική διακύμανση της ενεργειακής συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM κατά τις ώρες διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας, για την 1η περίοδο αξιολόγησης (Ιούλιος 2016 – Ιούνιος 2017).

Γενικά, ο ρυθμός υποβάθμισης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου εξαρτάται από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η υγρασία, η θερμοκρασία, η υπεριώδης ακτινοβολία (UV), κλπ. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η παρατεταμένη έκθεση ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών μπορεί να προκαλέσει τη θερμική καταπόνηση του [*Santhakoumari* και *Sagar*, 2019; *Ogbomo et al.*, 2018], συνάγεται το συμπέρασμα ότι η επιτευχθείσα μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας λόγω της ενσωμάτωσης του PCM συμβάλλει στη διατήρηση του ρυθμού υποβάθμισης σε ικανοποιητικά επίπεδα (≤1%/έτος). Υπό αυτό το πρίσμα, η πιθανότητα για την επέκταση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής του ενταγμένου φωτοβολταϊκού πλαισίου στο σύστημα PV+PCM, και κατ' επέκταση τη βελτίωση της βιωσιμότητας του, εκτιμάται ως υψηλή. Τα σχετικά συμπεράσματα ενισχύονται περαιτέρω από τα αποτελέσματα συναφών μελετών [*Santhakoumari* και *Sagar*, 2019; *Royo et al.*,2016; *Grabo et al.*,2019],

στις οποίες αναφέρεται ότι η αξιοποίηση των ιδιοτήτων των PCM για την ψύξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπορεί να αυξήσει κατά μια δεκαετία την αποτελεσματική, από την άποψη της ενεργειακής απόδοσης, διάρκεια ζωής της φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Αντιπαραβάλλοντας τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την παρούσα μελέτη, με τα δεδομένα αντίστοιχων ερευνών από τη διεθνή βιβλιογραφία (Πίνακας 8-4), η παρατηρηθείσα αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του ελεγχόμενου φωτοβολταϊκού τύπου ($E_{DC,y}$) κατά 5,7%, λόγω της θετικής επίδρασης από την αξιοποίηση PCM, σημειώνεται υψηλότερη σε σχέση με τις τιμές που αναφέρθηκαν για την Κίνα, την Κορέα, το Λίβανο, την Ιρλανδία και το Ιράν, ενώ διαπιστώνεται συγκρίσιμη με τα αποτελέσματα που προέκυψαν στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα και την Αίγυπτο. Ωστόσο, θα αποτελούσε παράλειψη να μην επισημανθεί ότι η ποσοστιαία τιμή (δηλ. 5,7%) που αντικατοπτρίζει τη βελτιωμένη ενεργειακή απόκριση του συστήματος PV+PCM ήταν ελαφρώς χαμηλότερη σε σχέση με τιμές που παρατίθενται για τη Σλοβενία, το Πακιστάν και την Ινδία. Σε αντιστοιχία, η συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων που χαρακτηρίζουν την ενεργειακή απόδοση της προτεινόμενης εφαρμογής υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες, επιβεβαίωσε τη σημασία και την εγκυρότητα των τιμών που προσδιορίστηκαν για το ανεπτυγμένο σύστημα PV+PCM (αύξηση σε ετήσια βάση κατά 5,9%).

Δεδομένου ότι τα αποτελέσματα της Α' φάσης διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων βασίζονται στην πιλοτική λειτουργία φωτοβολταϊκών πλαισίων τεχνολογίας λεπτών υμενίων διπλής επίστρωσης (a-Si/μc-Si), με τιμή θερμικού συντελεστή μέγιστης ισχύος (γ_{PM}) ίση με -0,24%/^{o}C, τα περιθώρια σημαντικής βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης σε άλλους τύπους φωτοβολταϊκών πλαισίων (π.χ. MC-Si, PC-Si) μέσω της ενσωμάτωσης κατάλληλού είδους και ποσότητας PCM αναγνωρίζονται ως αυξημένα. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει, αν ληφθεί υπόψη ότι η αποδιδόμενη ισχύς των φωτοβολταϊκών πλαισίων κρυσταλλικού πυριτίου μειώνεται από 5% έως 6,5% (>> 2,4%) για κάθε παρατηρούμενη αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας τους κατά 10 ^{o}C πάνω από τους 25 ^{o}C. Κατά συνέπεια, η ενίσχυση της απόδοσης και των ενεργειακών κερδών σε ετήσια βάση για ένα σύστημα PV+PCM, το οποίο περιλαμβάνει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο κρυσταλλικού πυριτίου, σε επίπεδα υψηλότερα από τις παρατηρούμενες μεταβολές του 5,9% και 5,7%, αντίστοιχα, θεωρείται λογική εξέλιξη. Προχωρώντας ένα βήμα παρακάτω την ανάλυση, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η βελτιστοποίηση της προτεινόμενης προσέγγισης θα παρέχει τη δυνατότητα ιδιαίτερα σημαντικής συμβολής σε επίπεδο διαχείρισης δικτύου, καθώς η διατήρηση αυξημένης, αλλά κυρίως σταθερής, παραγωγής ενέργειας των φωτοβολταϊκών μέσω της εφαρμογής παθητικής ψύξης, καθιστά ρεαλιστική την υποκατάσταση μέρους της ζήτηση ενέργειας από τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής.

Τέλος, μπορούμε να πούμε ότι το θεωρητικό μοντέλο ενεργειακού ισοζυγίου δύναται να αποδίδει με υψηλή ακρίβεια την ημερήσια εξέλιξη της θερμοκρασίας λειτουργίας ενός συμβατικού φωτοβολταϊκού πλαισίου θερμοκρασίας, ιδίως κατά τη θερινή περίοδο, όταν σημειώθηκαν οι χαμηλότερες τιμές για του δείκτες καλής προσαρμογής *MBE* (%), *MAE* (%) και *RMSE* (%). Εκτός απ' αυτό, η ορθότητα της ανεπτυγμένης μεθοδολογικής προσέγγισης για τον προσδιορισμό της αποτελεσματική ποσότητας PCM αποδεικνύεται θέτοντας, ταυτόχρονα, τις βάσεις για τη βελτιστοποίηση του συστήματος PV+PCM

Τοποθεσία	Τύπος φ/β	Ελεγχόμενο PCM	Συνθήκες ελέγχου	Διάρκεια πειραμάτων	T_m		Απόδοση συστήματος PV+PCM				Πηγή
					Avg	Peak	$\Delta T_{m(PV/PV+PCM)}$	Περίοδος χρονικής υστέρησης	Αύξηση απόδοσης μετατροπής	Αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	
Λιουμπλιάνα, Σλοβενία	MC-Si (250W)	RT28HC	Δοκιμές πεδίου & προσομοίωση	7 d & 1 y	54,6 ºC	75,5 ºC	12 ºC (peak: 35,6 ºC)	4-6h	2,8%	17,91 kWh (7,3%)	*Stropnik & Stritih*, 2016
Αλ-ιν, ΗΑΕ	PC-Si (40W)	RT42	Δοκιμές πεδίου	1 y	-	53 ºC	10,5 ºC		-	5,9 %	*Hasan et al.*, 2017
Χεφέι, Κίνα	MC-Si (50W)	Οργανικό PCM ($T_{PCM,melt}$:30-32 ºC)	Δοκιμές πεδίου	2 d	-	55 ºC	2,4-2,8 ºC (peak:6-9 ºC)	9h	2%	1,8-3%	*Waqas et al.*, 2019
Σονγκ-ντο, Ν. Κορέα	PC-Si (10,9 W)	Οργανικό PCM ($T_{PCM,melt}$: 25 ºC)	Δοκιμές πεδίου	30 d	-	36 ºC	(peak:5 ºC)		3,1% (peak)	1-1,5%	*Park et al.*, 2014
Αλ-Κιάρα, Λίβανος	PC-Si (30 W)	Οργανικό PCM ($T_{PCM,melt}$:36-60 ºC)	Δοκιμές πεδίου	2 d	-	62 ºC	2,7 ºC (peak:6,5 ºC)			3%	*Hachem et al.*, 2017
Γκίζα, Αίγυπτος	PC-Si (30 W)	RT55	Δοκιμές πεδίου	3 mo	55 ºC	75 ºC	8,1-10,6 ºC (peak:~11-17 ºC)	~4-6h	5,7-13,2%	4,15-5,7% (peak: 6,7-8,6%)	*Nada et al.*, 2018
Σαγκάη, Κίνα	MC-Si (100W)	Οργανικό PCM ($T_{PCM,melt}$:34,9-42 ºC)	Δοκιμές πεδίου	2 d	43,5 ºC	68,7 ºC	~10-20 ºC (peak:23 ºC)	-	-	5,18%	*Li et al.*, 2019
Βεχάρι, Πακιστάν	PC-Si (65 W)	Λιπαρό οξύ ($T_{PCM,melt}$:22,5 ºC)	Δοκιμές πεδίου	1 d	-	63 ºC	21 ºC	-	6,1-10,7%	7,7%	*Hasan et al.*, 2015
Δουβλίνο, Ιρλανδία		Ένυδρο άλας ($T_{PCM,melt}$:29.8 ºC)	Δοκιμές πεδίου	1 d	-	49 ºC	10 ºC	-	7-10 %	1,8%	
Κουάλα-Λουμπούρ, Μαλαισία	-	RT 35	Δοκιμές πεδίου	1 d	41ºC	53 ºC	10 ºC	6h	-	-	*Mahamudul et al.*, 2016
Κοβιλπάττι, Ινδία	PC-Si (24 W)	Εύτηκτο μείγμα ($T_{PCM,melt}$:30 ºC)	Δοκιμές πεδίου	1 y	-	65 ºC	12 ºC	-	6-11%	2,74 kWh (8%)	*Karthick et al.*, 2020
	PC-Si (70 W)	Άλας Glauber ($T_{PCM,melt}$:32 ºC)	Δοκιμές πεδίου	12 d	-	52 ºC	peak : 8 ºC	-	10%	8%	*Karthick et al..*, 2018
Τσενάι, Ινδία	PC-Si (5 W)	Οργανικό PCM ($T_{PCM,melt}$:29 ºC)	Δοκιμές πεδίου	2 d	-	59,2 ºC	10,35 ºC	-	2%	(peak:30%)	*Rajvikram et al.*, 2019
	MC-Si (175 W)	Ένυδρο άλας ($T_{PCM,melt}$:30 ºC)	Δοκιμές πεδίου	2 d	-	64,4 ºC, 77,1 ºC	(peak:~18, 23 ºC)	-	10,5,15,9%	6,2%,8,3%	*Singh et al.*, 2020
Μασχάντ, Ιράν	MC-Si (40 W)	Οργανικό PCM ($T_{PCM,melt}$:46-48 ºC)	Δοκιμές πεδίου	~ 1 mo	61,7 ºC		7 ºC		4%	4,22%	*Kazemian et al.*, 2018
Χανιά, Ελλάδα	**a-Si/μc-Si (130 W)**	**RT27**	**Outdoor**	**1 y**	**32,6 ºC**	**70,8 ºC**	**10,2 ºC (peak:26,1 ºC)**	**3-6 h**	**5,9%**	**12,43 kWh (5,7%)**	***Παρούσα μελέτη***

PC-Si: πολυκρυσταλλικού πυριτίου, MC-Si: μονοκρυσταλλικού πυριτίου, μc-Si: μικροκρυσταλλικού πυριτίου, a-Si: άμορφου πυριτίου, a-Si/μc-Si: μικρο-άμορφου πυριτίου

Πίνακας 8-4: Συγκριτικό πίνακας αξιολογησης των αποτελεσματαων της παρούσας μελέτης σε σχεση με τα στοιχεία μελετών που απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία.

8.2 Αξιολόγηση της θερμικής και ενεργειακής συμπεριφοράς του συστήματος PV+PCM (2η Σχεδιαστική προσέγγιση) υπό τις πραγματικές συνθήκες πεδίου

Στο πλαίσιο εκπλήρωσης των ειδικών στόχων της παρούσας διατριβής, η διαμόρφωση και η αξιολόγηση μιας εναλλακτικής πρότασης σχεδιασμού για τη διάταξη αποθήκευσης του PCM σε ένα σύστημα PV+PCM αποτέλεσαν κύρια βήματα για την απόκτηση τεκμηριωμένης γνώσης επί των δυνατοτήτων περαιτέρω εξέλιξης του. Πιο αναλυτικά, δύο (2) όμοια δοχεία σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν, με τη μορφή θερμικού συλλέκτη, για την ενσωμάτωση των επιλεγμένων PCM (κεριά παραφίνης RT27 και RT31) σε φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου, ώστε να συμβάλλουν για την ικανή διαχείριση της θερμοκρασίας λειτουργία τους. Βασικό κριτήριο για την υιοθέτηση της προαναφερθείσας προσέγγισης ήταν η "ενεργοποίηση" του μηχανισμού μεταφοράς θερμότητας με ελεύθερη συναγωγή από την οπίσθια πλευρά κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου στο περιβάλλον. Η ιδιαιτερότητα της προσέγγισης αυτής έγκειται στην προσπάθεια συνδυασμού των πλεονεκτημάτων (δηλ. ενισχυμένη μεταφορά θερμότητας με φυσική συναγωγή) και ενός θερμικού συλλέκτη (δηλ. απορρόφηση θερμότητας). Για τους σκοπούς της μελέτης, τα ανεπτυγμένα συστήματα PV+PCM μελετήθηκαν πειραματικά υπό τις κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου (Χανιά, Κρήτη) προκειμένου να αποτιμηθούν και να αξιολογηθούν συγκριτικά τα οφέλη των προτεινόμενων επιλογών. Για την αξιολόγηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης, η οποία αποτελούνταν από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αναφοράς και τα συστήματα PV+PCM27 και PV+PCM31, υπολογίστηκε ένα σύνολο σχετικών δεικτών χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που καταγράφηκαν μέσω πειραματικής διαδικασίας κατά τη διάρκεια της περιόδου Φεβρουαρίου - Ιουλίου 2019.

Τοποθεσία	*Συνθήκες ελέγχου*	$T_{m\ (PV\ reference)}$	$\Delta T_{m\ (PV/PV+PCM)}$	m_{spec}	$m_{_eff_peak}$	Πηγή
		peak				
		°C		kg/m²	kg/m²·°C	
Λιουμπλιάνα, Σλοβενία	Δοκιμές πεδίου & προσομοίωση	75,5	32	31,1	0,97	*Stropnik & Stritih*, 2016
Αλ-ιν, ΗΑΕ	Δοκιμές πεδίου	53	13	24	1,85	*Hasan et al.*, 2017
Σονγκ-ντο, Ν. Κορέα	Δοκιμές πεδίου	36	5	23	5,8	*Park et al.*, 2014
Αλ-Κιάρα, Λίβανος	Δοκιμές πεδίου	62,2	6	15	2,5	*Hachem et al.*, 2017
Βεχάρι, Πακιστάν	Δοκιμές πεδίου	63	21	48,5	2,3	*Hasan et al.*, 2015
Δουβλίνο, Ιρλανδία		49	10		4,9	
Τσενάι, Ινδία	Δοκιμές πεδίου	64,4 °C/77,1 °C	18 °C, 23 °C	45,4	2,52/1,97	*Singh et al.*, 2020
Γκίζα, Αίγυπτος	Δοκιμές πεδίου	75	17	120	7,06	*Nada et al.*, 2018
Χεφέι, Κίνα	Δοκιμές πεδίου	55	9	3,5	1,5	*Waqas et al.*, 2019
Χανιά, Ελλάδα	**Δοκιμές πεδίου**	**66,9**	**26,1**	**32,9**	**1,3**	**Παρούσα μελέτη**
		44,1	**6,4** (PCM 27) / **7,5** (PCM31)	**2,6**	**0,41/ 0,34**	

Πίνακας 8-5: Συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που σχετίζονται με την αποτελεσματικότητας της χρησιμοποιούμενης ποσότητας PCM, στο πλαίσιο της εφαρμογής των συστημάτων PV+PCM, και των στοιχείων από αντίστοιχες μελέτης σε διαιρετικές περιοχές.

Με βάση την ανάλυση των ληφθέντων αποτελεσμάτων, τα κύρια συμπεράσματα συνοψίζονται ως εξής:

- Η μέγιστη επιτευχθείσα απόκλιση των τιμών της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων της πειραματικής διάταξης ($\Delta T_{mb\ (PV/PV+PCM27)}$, $\Delta T_{mb\ (PV/PV+PCM31)}$) ήταν 6,4 °C και 7,5 °C (κατά τη διάρκεια μιας ανοιξιάτικής ημέρας), αντίστοιχα. Σε πρώτη ανάγνωση, οι ανωτέρω τιμές θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως ήσσονος σημασίας. Ωστόσο, μια τέτοια άποψη θα μπορούσε να κριθεί ως εσφαλμένη καθότι η τιμή του δείκτη αποτελεσματικότητας της χρησιμοποιούμενης ποσότητας PCM στο πλαίσιο της εφαρμογής, η οποία εκτιμήθηκε ίση με 0,34 kg/m$^{2\cdot o}$C και παρατηρείται σημαντικά μειωμένη σε σχέση με τις τιμές από 1,2 έως 2 kg/m$^{2\cdot o}$C που υπολογίστηκαν για τη 1^{η} τυπολογία συστήματος PV+PCM (1^{η} σχεδιαστική προσέγγιση), ή αναφέρονται σε μεγάλο αριθμό συναφών μελετών στη σχετική βιβλιογραφία (Πίνακας 8-5).

- Ο σχεδιασμός των διατάξεων παθητικής ψύξης σε μορφή θερμικού συλλέκτη συνετέλεσε στην ενίσχυση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας με ελεύθερη συναγωγή από την οπίσθια πλευρά κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου στο περιβάλλον, ειδικά κατά τα χρονικά διαστήματα όποτε καταγράφονταν υψηλότερες τιμές για την ταχύτητα ανέμου, όπως αποδεικνύεται από τις σχετικές καμπύλες ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας λειτουργίας των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31 σε αυτά τα χρονικά διαστήματα, ακόμη και μετά πλήρη τήξη των χρησιμοποιημένων PCM.

- Τα συστήματα PV+PCM27 και PV+PCM31 παρουσίασαν οριακά βελτιωμένη παραγωγή ενέργειας κατά 4,19% και 4,24%, αντίστοιχα, ενώ η αύξηση της απόδοσης μετατροπής της ηλιακής ισχύος σε ηλεκτρική ενέργεια (n_{ELEC}), λόγω της ενσωμάτωσης PCM, παρατηρήθηκε εντός του εύρους τιμών 2,86-4,19%. Η σχετικά περιορισμένη ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης των συστημάτων PV+PCM27 και PV+PCM31 σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς αποδίδεται στη χρησιμοποίηση μικρής ποσότητας PCM, υποδεικνύοντας παράλληλα την ανάγκη βελτιστοποίησης της ισορροπίας μεταξύ του κόστους, της αποτελεσματικότητας και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας αυτών των ηλιακών συστημάτων.

- Η περαιτέρω ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων για τις δεδομένες συνθήκες χαρακτηριστικών ημερών που αντιπροσωπεύουν τη συχνότερα απαντώμενη καιρική κατάσταση κατά τη διάρκεια ενός έτους (67% των ημερών του έτους εμφανίζουν $K_t \geq 0,5$), μέσω της εφαρμογής της κατάλληλης στατιστικής τεχνικής, οδήγησε στην ανάπτυξη έξι (6) εμπειρικών προσεγγίσεων για την εκτίμηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των εναλλακτικά διαμορφωμένων συστημάτων PV+PCM ($T_{mb\ (PV+PCM27)}$, $T_{mb\ (PV+PCM31)}$) και του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς ($T_{mb\ (PV\ reference)}$).

Συνθήκες	Εμπειρικές σχέσεις
K_t≥0,5 και v_w<5 m/s	▸ $T_{mb\,(PV+PCM31)} = 4{,}414 + 0{,}025 \cdot G_t + 0{,}938 \cdot Ta - 0{,}079 \cdot v_w$ ▸ $T_{mb\,(PV+PCM27)} = 3{,}205 + 1{,}037 \cdot Ta + 0{,}024 \cdot G_t - 0{,}087 \cdot v_w$ ▸ $T_{mb\,(PV\,reference)} = 8{,}214 + 0{,}029 \cdot G_t + 0{,}810 \cdot Ta - 0{,}091 \cdot v_w$
K_t≥0,5 και v_w≥5 m/s	▸ $T_{mb\,(PV+PCM31)} = 4{,}815 + 0{,}029 \cdot G_t + 0{,}685 \cdot Ta - 0{,}101 \cdot v_w$ ▸ $T_{mb\,(PV+PCM27)} = 6{,}983 + 0{,}032 \cdot G_t + 0{,}564 \cdot Ta + 0{,}095 \cdot v_w$ ▸ $T_{mb\,(PV\,reference)} = 8{,}347 + 0{,}032 \cdot G_t + 0{,}594 \cdot Ta + 0{,}088 \cdot v_w$

Πίνακας 8-6: Συνοπτική παρουσίαση των ανεπτυγμένων εμπειρικών σχέσεων πρόβλεψης της θερμοκρασίας λειτουργίας των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων.

8.3 Προτάσεις για την αξιοποίηση της διατριβής και μελλοντική έρευνα

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εξελίχθηκε με κύριο στόχο τη διερεύνηση, το σχεδιασμό και την ανάπτυξη ικανών διατάξεων διαχείρισης της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, μέσω των οποίων να διασφαλίζεται η διατήρηση υψηλής ενεργειακής και περιβαλλοντικής απόδοσης μέχρι την ολοκλήρωση του κύκλου ωφέλιμης ζωής τους. Η προτεινόμενη μέθοδος βασίστηκε στη χρήση εμπορικά διαθέσιμων τύπων PCM, τα οποία λειτούργησαν, ανά περίπτωση, ως το εργαζόμενο ρευστό μέσο για την απαγωγή της θερμότητας από την οπίσθια πλευρά των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών πλαισίων. Δεδομένης της υψηλής σημασίας των χαρακτηριστικών του επιλεγμένου PCM για την ενεργειακή, την περιβαλλοντική και την οικονομική απόδοση ενός συστήματος PV+PCM, η σύνθεση νέων υβριδικών PCM, τα οποία να φέρουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά, όπως υψηλή ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας, θερμοκρασιακό εύρος μετάβασης φάσης κατάλληλο για ηλιακές εφαρμογές, υψηλή τιμή θερμικής αγωγιμότητα, περιβαλλοντικά φιλικό (μη αναφλέξιμο, μη τοξικό, κ.λπ.) και χαμηλό κόστος, θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας. Υπό αυτό το πρίσμα, η υιοθέτηση διεργασιών παραγωγής των PCM με χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα δύναται να συμπληρώνει τους ερευνητικούς στόχους του αντικειμένου της προτεινόμενης μελέτης.

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, μια εκτενής και εντατική πειραματική διαδικασία έλαβε χώρα για τη συλλογή σημαντικού αριθμού δεδομένων, τα οποία απέδειξαν την πραγματική θερμική και ενεργειακή συμπεριφορά τυπικών φωτοβολταϊκών πλαισίων, με και χωρίς την ενσωμάτωση PCM, υπό τις πραγματικές κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, μετά την ανάλυση των σχετικών δεδομένων από την Α' φάση διεξαγωγής πειραμάτων, κατά τους θερμότερους μήνες της περιόδου επιτήρησης, η θερμική, και κατ' επέκταση, η ενεργειακή συμπεριφορά του συστήματος PV+PCM, χαρακτηρίστηκαν από οριακή βελτίωση, λόγω του φαινομένου πρόωρης τήξης του επιλεγμένων PCM σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. Ως εκ τούτου, ο επαναληπτικός έλεγχος της λειτουργίας του προτεινόμενου συστήματος έπειτα από την ενσωμάτωση PCM με σημείο τήξης ($T_{PCM,melt}$) ≥ 35 ^{o}C, κρίνεται ως σκόπιμη, στο πλαίσιο μιας ευρύτερης διαδικασίας βελτιστοποίησης του προτεινόμενου συστήματος. Επιπλέον, προκειμένου να αποτιμηθούν τα συνολικά οφέλη από

την ενσωμάτωση των PCM σε φωτοβολταϊκά συστήματα, τα διαθέσιμα πειραματικά στοιχεία δύναται να αξιοποιηθούν για την οικονομική αξιολόγηση των συστημάτων PV+PCM και τη διατύπωση προτάσεων βελτίωσης της σχέσης μεταξύ του κόστους κατασκευής και της αποτελεσματικότητας τους. Ακόμη, σημαντικό εύρημα της παρούσας διατριβής, θεωρείται η αποτελεσματικότητα του εναλλακτικού, ως προς τη μορφή της διάταξης παθητικής ψύξης, συστήματος PV+PCM, το οποίο είχε κατασκευαστεί ως πρωτότυπο μικρής κλίμακας. Η εξέλιξη του σχετικού πρωτοτύπου σε σύστημα PV+PCM τυπικού μεγέθους και η αξιολόγησή της λειτουργίας του για εύλογο χρονικό διάστημα σε συνθήκες πεδίου, θα μπορούσε να παρέχει ικανές απαντήσεις για τη συνεργιστική δράση του ανέμου και του ενταγμένου PCM στη διαχείριση της θερμοκρασίας λειτουργίας του συζευγμένου φωτοβολταϊκού πλαισίου. Ενώ, η σχετική πρόταση μελέτης θα μπορούσε να επεκταθεί κατάλληλα έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη οι κύριες πτυχές της περιβαλλοντικής και οικονομικής βιωσιμότητας του.

Τέλος, η σύνδεση της προτεινόμενης γενικής μεθοδολογίας για τον σχεδιασμό συστημάτων PV+PCM με κατάλληλες βάσεις κλιματικών δεδομένων, καθώς επίσης και με μοντέλα μηχανικής μάθησης, τα οποία δύναται να προέλθουν μέσω της περαιτέρω ανάλυσης των χρονοσειρών με πραγματικά πειραματικά δεδομένα, θα μπορούσε να οδηγήσει στη δημιουργία πρακτικού υπολογιστικού εργαλείου για τη διερεύνηση της σκοπιμότητα της εφαρμογής PV+PCM σε διαφορετικές περιοχές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ali HM. Recent advancements in PV cooling and efficiency enhancement integrating phase change materials based systems–A comprehensive review. Sol Energy 2020;197:163-98. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.075
2. Alonso García MC, Balenzategui JL. Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based on Nominal Operation Cell Temperature calculations. Renew Energy 2004;29:1997–2010. https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.03.010.
3. Armstrong S, Hurley WG. A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions. Appl Therm Eng 2010;30(11-12):1488-95. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.03.012
4. Ayompe LM, Duffy A, McCormack SJ, Conlon M. Validated real-time energy models for small-scale grid-connected PV-systems. Energy 2010;35:4086–91. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.06.021.
5. Atkin P, Farid MM. Improving the efficiency of photovoltaic cells using PCM infused graphite and aluminium fins. Sol Energy 2015;114:217–28. https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.01.037.
6. Barroso JS, Barth N, Correia JP, Ahzi S, Khaleel MA. A computational analysis of coupled thermal and electrical behavior of PV panels. Sol Energy Mat Sol Cells 2016;148:73-86. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.09.004
7. Biwole PH, Eclache P, Kuznik F. Phase-change materials to improve solar panel's performance. Energy Build 2013;62:59-67. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.059
8. Brano VL, Ciulla G, Piacentino A, Cardona F. Finite difference thermal model of a latent heat storage system coupled with a photovoltaic device: Description and experimental validation. Renew Energy 2014;68:181-93. https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.043
9. Browne MC, Norton B, McCormack SJ. Heat retention of a photovoltaic/thermal collector with PCM. Sol Energy 2016;133:533-48. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.024
10. Cantarero MM. Of renewable energy, energy democracy, and sustainable development: A roadmap to accelerate the energy transition in developing countries. Energy Research & Social Science. 2020;70:101716. https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101716
11. Chandel SS, Agarwal T. Review of cooling techniques using phase change materials for enhancing efficiency of photovoltaic power systems. Renew and Sustain Energy Rev 2017;73:1342-51. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.001
12. Chander S, Purohit A, Sharma A, Arvind, Nehra SP, Dhaka MS. A study on photovoltaic parameters of mono-crystalline silicon solar cell with cell temperature. Energy Reports 2015;1:104–9. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2015.03.004.
13. Kamuyu WCL, Lim JR, Won CS, Ahn HK. Prediction model of photovoltaic module temperature for power performance of floating PVs. Energies 2018;11. https://doi.org/10.3390/en11020447.
14. Chemisana D, Lamnatou C. Photovoltaic-green roofs: An experimental evaluation of system performance. Appl Energy 2014;119:246-56. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.027

15. Chenni R, Makhlouf M, Kerbache T, Bouzid A. A detailed modeling method for photovoltaic cells. Energy 2007;32:1724–30. https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.12.006.

16. Duffie JA, Beckman WA. Solar engineering of thermal processes. New York: Wiley; 1991.

17. Dwivedi P, Sudhakar K, Soni A, Solomin E, Kirpichnikova I. Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art. Case Stud Therm Eng 2020;21:100674. https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100674.

18. Eicker U., «Solar Technologies for Buildings», John Wiley & Sons, Chichester, 2003

19. Elsheniti MB, Hemedah MA, Sorour MM, El-Maghlany WM. Novel enhanced conduction model for predicting performance of a PV panel cooled by PCM. Energy Convers Manag 2020 1;205:112456 https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112456

20. EUROBSERV'ER, Photovoltaic barometer, April 2020

21. Gielen D, Boshell F, Saygin D, Bazilian MD, Wagner N, Gorini R. The role of renewable energy in the global energy transformation. Energy Strateg Rev 2019;24:38–50. https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006. .

22. Golden JS, Carlson J, Kaloush KE, Phelan P. A comparative study of the thermal and radiative impacts of photovoltaic canopies on pavement surface temperatures. Solar Energy 2007;81(7):872-83. https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.11.007

23. Good EJ, Ghent DJ, Bulgin CE, Remedios JJ. A spatiotemporal analysis of the relationship between near-surface air temperature and satellite land surface temperatures using 17 years of data from the ATSR series. J Geo Research: Atmospheres. 2017;122(17):9185-210. https://doi.org/10.1002/2017JD026880

24. Grabo M, Weber D, Paul A, Klaus T, Bermpohl W, Krauter S, Kenig EY. Numerical Investigation of the Temperature Distribution in PCM-integrated Solar Modules, Chem Eng Trans.2019;76:895-900. https://doi.org/10.3303/CET1976150

25. Groulx D, Biwole PH, Bhouri M. International Journal of Thermal Sciences Phase change heat transfer in a rectangular enclosure as a function of inclination and fin placement. Int J Therm Sci 2020;151:106260. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106260

26. Hachem F, Abdulhay B, Ramadan M, El Hage H, El Rab MG, Khaled M. Improving the performance of photovoltaic cells using pure and combined phase change materials–Experiments and transient energy balance. Renew Energy. 2017;107:567-75. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.032

27. Hansen CW, Stein JS, Riley D. Effect of time scale on analysis of PV system performance. SANDIA Report, 2012.

28. Hasan A, Alnoman H, Rashid Y. Impact of integrated photovoltaic-phase change material system on building energy efficiency in hot climate. Energy Build 2016;130:495-505. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.059

29. Hasan A, McCormack SJ, Huang MJ, Norton B. Energy and cost saving of a photovoltaic-phase change materials (PV-PCM) system through temperature regulation and performance enhancement of photovoltaics. Energies 2014;7(3):1318-31. https://doi.org/10.3390/en7031318

30. Hasan A, McCormack SJ, Huang MJ, Norton B. Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics. Sol Energy. 2010;84(9):1601-12. https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.06.010

31. Hasan A, McCormack SJ, Huang MJ, Sarwar J, Norton B. Increased photovoltaic performance through temperature regulation by phase change materials: Materials comparison in different climates. Sol Energy 2015;115:264-76. https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.02.003

32. Hasan A, Sarwar J, Alnoman H, Abdelbaqi S. Yearly energy performance of a photovoltaic-phase change material (PV-PCM) system in hot climate. Sol Energy. 2017;146:417-29. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.070

33. Hasapis D, Savvakis N, Tsoutsos T, Kalaitzakis K, Psychis S, Nikolaidis NP. Design of large scale prosuming in Universities: the solar energy vision of the TUC campus. Energy Build 2017;141:39-55. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.074

34. Hendricks JH, Van Sark WG. Annual performance enhancement of building integrated photovoltaic modules by applying phase change materials. Prog Photovolt Res Appl 2013;21(4):620-30. https://doi.org/10.1002/pip.1240

35. Jun Huang M. The effect of using two PCMs on the thermal regulation performance of BIPV systems. Sol Energy Mater Sol Cells 2011;95:957–63. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.11.032.

36. Huang MJ, Eames PC, Norton B. Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics. Sol Energy 2006;80(9):1121-30. https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.10.006

37. Huang MJ, Eames PC, Norton B. Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials. Int J Heat Mass Transf 2004;47(12-13):2715-33. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.11.015

38. International Energy Agency (IEA), Snapshot of Global PV Markets 2020, Report IEA-PVPS T1-37:2020, https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/04/IEA_PVPS_Snapshot_2020.pdf [accessed 22 June 2020]

39. International Renewable Energy Agency (IRENA), World Energy Transitions Outlook: 1.5° C Pathway, March 2021. (ISBN 978-92-9260-334-2)

40. International Renewable Energy Agency (IRENA), Turning to Renewables: Climate-Safe Energy Solutions, November 2017.(ISBN: 978-92-9260-051-8)

41. Jakhrani AQ, Othman AK, Rigitand ARH, Samo SR. Comparison of solar photovoltaic module temperature models. World Appl Sci J 2011;14:1–8.

42. Japs E, Sonnenrein G, Krauter S, Vrabec J. Experimental study of phase change materials for photovoltaic modules: Energy performance and economic yield for the EPEX spot market. Sol Energy 2016;140:51-9. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.10.048

43. Jones AD, Underwood CP. A thermal model for photovoltaic systems. Sol Energy 2001;70(4):349-59. https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00149-3

44. Kalogirou, S. A., 2009. Solar energy engineering: processes and systems. Elsevier/Academic Press.

45. Kamkari B, Groulx D. Experimental investigation of melting behaviour of phase change material in finned rectangular enclosures under different inclination angles. Exp Therm Fluid Sci 2018;97:94–108. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.04.007.

46. Kamkird P, Ketjoy N, Rakwichian W, Sukchai S. Investigation on Temperature Coefficients of Three Types Photovoltaic Module Technologies under Thailand Operating Condition. Procedia Eng 2012;32:376–83. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1282.

47. Kant K, Shukla A, Sharma A, Biwole PH. Heat transfer studies of photovoltaic panel coupled with phase change material. Sol Energy. 2016;140:151-61. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.006

48. Karthick A, Kalidasa Murugavel K, Ramanan P. Performance enhancement of a building-integrated photovoltaic module using phase change material. Energy 2018;142:803-12. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.090

49. Karthick A, Murugavel KK, Ghosh A, Sudhakar K, Ramanan P. Investigation of a binary eutectic mixture of phase change material for building integrated photovoltaic (BIPV) system. Sol Energy Mat Sol Cel. 2020;207:110360. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110360

50. Karthick A, Murugavel KK, Ramanan P. Performance enhancement of a building-integrated photovoltaic module using phase change material. Energy. 2018;142:803-12. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.090

51. Karthikeyan V, Sirisamphanwong C, Sukchai S, Sahoo SK, Wongwuttanasatian T. Reducing PV module temperature with radiation based PV module incorporating composite phase change material. J Energy Stor 2020;29:101346. https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101346

52. Kazemian A, Hosseinzadeh M, Sardarabadi M, Passandideh-Fard M. Experimental study of using both ethylene glycol and phase change material as coolant in photovoltaic thermal systems (PVT) from energy, exergy and entropy generation viewpoints. Energy 2018;162:210-23. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.069

53. Kemfert C, Breyer C, Oei PY (Eds), 100% Renewable Energy Transition: Pathways and Implementation, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2020, Special issue, ISBN 978-3-03928-035-3

54. Khanna S, Reddy KS, Mallick TK. Climatic behaviour of solar photovoltaic integrated with phase change material. Energy Convers Manag 2018;166:590-601. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.056

55. Khanna S, Reddy KS, Mallick TK. Effect of climate on electrical performance of finned phase change material integrated solar photovoltaic. Sol Energy. 2018;174:593-605. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.023

56. Khanna S, Reddy KS, Mallick TK. Optimization of finned solar photovoltaic phase change material (finned pv pcm) system. Int J Therm Sci 2018;130:313-22. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.04.033

57. Khanna S, Reddy KS, Mallick TK. Optimization of solar photovoltaic system integrated with phase change material. Sol. Energy 2018;163:591-9. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.002

58. Khanna S, Reddy KS, Mallick TK. Performance analysis of tilted photovoltaic system integrated with phase change material under varying operating conditions. Energy 2017;133:887-99. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.150

59. Kitsara G, Papaioannou G, Retalis A, Paronis D, Kerkides P. Estimation of air temperature and reference evapotranspiration using MODIS land surface temperature over Greece. Int J Rem Sens 2018;39(3):924-48. https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1395965

60. Klein SA. Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces. 1976;19:325–9.

61. Klugmann-Radziemska E, Wcisło-Kucharek P. Photovoltaic module temperature stabilization with the use of phase change materials. Sol Energy. 2017;150:538-45. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.016

62. Koehl M, Heck M, Wiesmeier S, Wirth J. Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering. Sol Energy Mater Sol Cells 2011;95:1638–46. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.01.020.

63. Kravvaritis ED, Antonopoulos KA, Tzivanidis C. Experimental determination of the effective thermal capacity function and other thermal properties for various phase change materials using the thermal delay method. Appl Energy 2011;88(12):4459-69. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.032

64. Lagouvardos K, Kotroni V, Bezes A, Koletsis I, Kopania T, Lykoudis S, Mazarakis N, Papagiannaki K, Vougioukas S. The automatic weather stations NOANN network of the National Observatory of Athens: operation and database. Geoscie Data J. 2017;4(1):4-16. https://doi.org/10.1002/gdj3.44

65. Li Z, Ma T, Zhao J, Song A, Cheng Y. Experimental study and performance analysis on solar photovoltaic panel integrated with phase change material. Energy 2019;178:471-86. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.166

66. Lobera DT, Valkealahti S. Dynamic thermal model of solar PV systems under varying climatic conditions. Sol Energy 2013;93:183-94. https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.03.028

67. Ma T, Yang H, Zhang Y, Lu L, Wang X. Using phase change materials in photovoltaic systems for thermal regulation and electrical efficiency improvement: a review and outlook. Renew Sustain Energy Rev 2015;43:1273-84. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.003

68. Ma T, Zhao J, Li Z. Mathematical modelling and sensitivity analysis of solar photovoltaic panel integrated with phase change material. Appl Energy 2018;228:1147-58. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.145

69. Mahamudul H, Rahman M, Metselaar HS, Mekhilef S, Shezan SA, Sohel R, Karim A, Bin S, Badiuzaman WN. Temperature regulation of photovoltaic module using phase change material: a numerical analysis and experimental investigation. Int J Photoenergy 2016; 2016:1e8, 5917028. https://doi.org/10.1155/2016/5917028

70. Makki A, Omer S, Sabir H. Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance. Renew Sustain Energy Rev 2015;41:658-84. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.069

71. Makrides G., Zinsser B., Norton M., Georghiou G., «Third Generation Photovoltaics: Performance of photovoltaics under actual operating conditions», edited by Dr. Vasilis Fthenakis, InTech, March 2012

72. Malik AQ, Damit SJBH. Outdoor testing of single crystal silicon solar cells. Renew Energy 2003;28:1433–45. https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00255-0.

73. Malvi CS, Dixon-Hardy DW, Crook R. Energy balance model of combined photovoltaic solar-thermal system incorporating phase change material. Sol Energy 2011;85(7):1440-6. https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.03.027

74. Matweb, ASTM A525 Galvanized Steel, http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=abbf07b7f93a4c358a0ddd194f5c18be[accessed 20 May 2020]

75. Meral ME, Dincer F. A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems. Renew Sustain Energy Rev 2011;15:2176–84. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.010.

76. Meillaud F, Boccard M, Bugnon G, Despeisse M, Hänni S, Haug FJ, et al. Recent advances and remaining challenges in thin-film silicon photovoltaic technology. Mater Today 2015;18:378–84. https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.03.002.

77. Mondol JD, Yohanis Y, Smyth M, Norton B. Long term performance analysis of a grid connected photovoltaic system in Northern Ireland. Energy Convers Manag 2006;47:2925–47. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.03.026.

78. Nada SA, El-Nagar DH, Hussein HM. Improving the thermal regulation and efficiency enhancement of PCM-Integrated PV modules using nano particles. Energy Convers Manag 2018;166:735-43. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.035

79. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Champion module efficiencies, 2020. https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/champion-module-efficiencies.20191104.pdf

80. Nižetić S, Papadopoulos AM, Giama E. Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part I: Passive cooling techniques. Energy Convers Manag 2017;149:334-54. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.022

81. Nižetić S, Giama E, Papadopoulos AM. Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part II: Active cooling techniques. Energy Convers Manag 2018;155:301–23. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.071.

82. Notton G, Cristofari C, Mattei M, Poggi P. Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences. Appl Therm Eng 2005;25(17-18):2854-77. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.02.008

83. NREL. Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart | Photovoltaic Research | NREL. Natl Renew Energy Lab 2020..

84. Ogbomo OO, Amalu EH, Ekere NN, Olagbegi PO. Effect of operating temperature on degradation of solder joints in crystalline silicon photovoltaic modules for improved reliability in hot climates. Sol Energy. 2018;170:682-93. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.007

85. Park J, Kim T, Leigh SB. Application of a phase-change material to improve the electrical performance of vertical-building-added photovoltaics considering the annual weather conditions. Sol Energy. 2014;105:561-74. https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.04.020

86. Preet S, Bhushan B, Mahajan T. Experimental investigation of water based photovoltaic/thermal (PV/T) system with and without phase change material (PCM). Sol Energy 2017;155:1104-20. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.07.040

87. PVGIS, Country and regional maps, https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index.html# [accessed 20 May 2020]

88. Radziemska E., 2003. The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells, Renew Energy 2003;28(1):1-12

89. Rajvikram M, Leoponraj S, Ramkumar S, Akshaya H, Dheeraj A. Experimental investigation on the abasement of operating temperature in solar photovoltaic panel using PCM and aluminium. Sol Energy 2019;188:327-38. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.067

90. Royo P, Ferreira VJ, López-Sabirón AM, Ferreira G. Hybrid diagnosis to characterise the energy and environmental enhancement of photovoltaic modules using smart materials. Energy 2016;101:174-89. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.101

91. Rubitherm, RT27 Organic PCM, technical specification datasheet, 2015

92. Rubitherm, RT31 Organic PCM, technical specification datasheet, 2015

93. Quesada B, Sánchez C, Cañada J, Royo R, Payá J. Experimental results and simulation with TRNSYS of a 7.2kWp grid-connected photovoltaic system. Appl Energy 2011;88:1772–83. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.011.

94. Santhakumari M, Sagar N. A review of the environmental factors degrading the performance of silicon wafer-based photovoltaic modules: Failure detection methods and essential mitigation techniques. Renew and Sustain Energy Rev 2019;110:83-100. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.024

95. Savvakis N, Tsoutsos T. Performance assessment of a thin film photovoltaic system under actual Mediterranean climate conditions in the island of Crete. Energy 2015;90:1435-55. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.098

96. Savvakis N, Tsoutsos T. Theoretical design and experimental evaluation of a PV+PCM system in the mediterranean climate. Energy 2021;220:119690. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119690.

97. Savvakis N, Dialyna E, Tsoutsos T. Investigation of the operational performance and efficiency of an alternative PV+PCM concept. Sol Energy 2020;211:1283–300. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.053.

98. Scherba A, Sailor DJ, Rosenstiel TN, Wamser CC. Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment. Building and Environment. 2011 Dec 1;46(12):2542-51. https://doi.org/10.1002/2017JD026880

99. Schiro F, Benato A, Stoppato A, Destro N. Improving photovoltaics efficiency by water cooling: Modelling and experimental approach. Energy 2017;137:798-810. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.164

100. Sharp Solar, Thin film module NA130L5 (glass/glass), technical specification datasheet, 2014

101. Shastry DM, Arunachala UC. Thermal management of photovoltaic module with metal matrix embedded PCM. Journal of Energy Storage. 2020 Apr 1;28:101312. https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101312

102. Singh P, Mudgal V, Khanna S, Mallick TK, Reddy KS. Experimental investigation of solar photovoltaic panel integrated with phase change material with multiple conductivity-enhancing-containers. Energy. 2020 Jun 6:118047. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118047

103. Smith CJ, Forster PM, Crook R. Global analysis of photovoltaic energy output enhanced by phase change material cooling. Appl Energy. 2014 Aug 1;126:21-8. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.083

104. SolarPower Europe, Global market outlook for solar power 2020-2024, Techical Report 2020, https://www.solarpowereurope.org/global-market-outlook-2020-2024/ [accessed 22 June 2020]

105. Stritih U. Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM. Renew Energy 2016;97:671-9. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.011

106. Su D, Jia Y, Alva G, Liu L, Fang G. Comparative analyses on dynamic performances of photovoltaic–thermal solar collectors integrated with phase change materials. Energy Convers Manag 2017;131:79-89. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.002

107. Swinbank WC. Long-wave radiation from clear skies. Quart J Roy Meteo Soc. 1963;89(381):339-48. https://doi.org/10.1002/qj.49708938105

108. Tao M, Zhenpeng L, Jiaxin Z. Photovoltaic panel integrated with phase change materials (PV-PCM): technology overview and materials selection. Renew Sustain Energy Rev 2019;116:109406. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109406

109. Tamizhmani G, Ji L, Tang Y, Petacci L, Osterwald C. Photovoltaic Module Thermal/Wind Performance : Long-Term Monitoring and Model Development For Energy Rating. NCPV Sol Progr Rev Meet 2003:936–9.

110. The Engineering toolbox, https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html [accessed 20 May 2020]

111. Thevenard D, Haddad K. Ground reflectivity in the context of building energy simulation. Energy Build 2006;38:972–80. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.11.007

112. Trinuruk P, Sorapipatana C, Chenvidhya D. Estimating operating cell temperature of BIPV modules in Thailand. Renew Energy 2009;34:2515–23. https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.02.027.

113. Tripathy SC, Saxena AK. Performance evaluation of 20 kWp photovoltaic system, Energy Convers Manag 1993;34:619–26.

114. U.S. Energy Information Administration (EIA), "International Energy Outlook 2019", September 2019, https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo2019.pdf .

115. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). World Population Prospects 2019: Data Booklet (ST/ESA/SER.A/424).

116. Waqas A, Ji J, Bahadar A, Xu L, Zeshan, Modjinou M. Thermal management of conventional photovoltaic module using phase change materials—An experimental investigation. Energy Explor Exploit 2019;37(5):1516-40. https://doi.org/10.1177/0144598718795697

117. Waqas A, Ji J, Xu L, Ali M, Alvi J. Thermal and electrical management of photovoltaic panels using phase change materials–A review. Renew Sustain Energy Rev 2018;92:254-71. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.091

118. Wiseman J. The great energy transition of the 21st century: The 2050 Zero-Carbon World Oration. Energy Res Soc Sci 2018;35:227–32. https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.011.

119. Wongwuttanasatian T, Sarikarin T, Suksri A. Performance enhancement of a photovoltaic module by passive cooling using phase change material in a finned container heat sink. Sol Energy 2020;195: 47-3. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.053

120. World Bank. 2021. Global Economic Prospects, June 2021. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-1665-9

121. Ye Z, Nobre A, Reindl T, Luther J, Reise C. On PV module temperatures in tropical regions. Sol Energy 2013;88:80–7. https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.11.001.

122. Zhao J, Ma T, Li Z, Song A. Year-round performance analysis of a photovoltaic panel coupled with phase change material. Appl Energy. 2019;245:51-64. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112657

123. Κέντρο Πολιτισμού Ίδρυμα Σταυρός Νιάρχος (ΚΠΙΣΝ), Έκθεση Βιωσιμότητας, 2017

124. Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 20701-3/2010, «Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών», Αθήνα, Ιούλιος 2010.

125. Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ), «Κλιματικά δεδομένα ανά Πόλη», http://www.hnms.gr/emy/el/climatology/climatology_city?perifereia=Crete&poli=Chania_Souda [accessed 20 May 2020]

126. Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ), «Κλίμακα Beaufort», http://www.hnms.gr/emy/el/climatology/climatology_city?perifereia=Crete&poli=Chania_Souda [accessed 20 May 2020]

Βιβλία

1. Τσούτσος Θεοχάρης & Κανάκης Ιωάννης, «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας: Τεχνολογίες & Περιβάλλον», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2013.
2. Φραγκιαδάκης Ιωάννης, «Φωτοβολταϊκά Συστήματα», Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη, 2008.
3. Cengel Yunus & Boles Michael, «Θερμοδυναμική για Μηχανικούς», Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη, 2003.
4. Pitts Donald & Sissom Leighton,«Μεταφορά Θερμότητας», Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη, 2001.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ PV+PCM

Α.1 Εισαγωγή

Σε γενικές γραμμές, οι τεχνολογίες αξιοποίησης της ηλιακής ενέργεια δύναται να παρέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα για τη μερική αντιμετώπιση της αυξανόμενης ζήτησης ενέργειας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από τη χρήση ορυκτών καυσίμων για την ενεργειακή παραγωγή. Ανάμεσα στις διαφορετικές διαθέσιμες εφαρμογές, τα φωτοβολταϊκά συστήματα θεωρούνται σήμερα μια ώριμη και περιβαλλοντικά βιώσιμη τεχνολογία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [*Hasapis et al.*, 2017; *Savvakis* και *Tsoutsos*, 2015], η οποία μπορεί να μειώσει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG), καθώς επίσης και άλλους ατμοσφαιρικούς ρύπους όπως τα οξείδια του αζώτου (NOx), το διοξείδιο του θείου (SO_2) και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) υποκαθιστώντας την ενέργεια που παράγεται μέσω των συμβατικών μεθόδων [*Athanailidis et al.*, 2018].

Προκειμένου να ενισχυθεί περαιτέρω η θέση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας στο ενεργειακό μείγμα του μέλλοντος, απαιτείται η διεξαγωγή στοχευμένης έρευνας σχετικά με τον έλεγχο των παραγόντων που επηρεάζουν την ενεργειακή συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων και, κατ' επέκταση, την περιβαλλοντική απόδοση τους [*Ajayan et al.*, 2020; *Awasthi et al.*, 2020; *Fthenakis and Kim*, 2011; *Jean et al.*, 2015; *Santhakumari* και *Sagar*, 2019]. Μεταξύ αυτών, η θερμοκρασία λειτουργίας έχει αναγνωριστεί ως ιδιαίτερα κρίσιμος παράγοντας, καθιστώντας σκόπιμη την ανάπτυξη ικανών τεχνικών διαχείρισης με στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, τη διάρκειας ζωής και του οικολογικού αποτυπώματός των φωτοβολταϊκών συστημάτων [*Chandrasekar et al.*, 2015; *Siecker et al.*, 2017]. Στην βιβλιογραφία απαντάται ένας αυξανόμενος αριθμός μελετών, οι οποίες εστιάζονται στην ανάπτυξη εναλλακτικών διατάξεων τύπου PV+PCM, τεκμηριώνοντας τη θετική επενέργεια της ενσωμάτωσης PCM για τον περιορισμό της θερμοκρασίας λειτουργίας του συζευγμένου φωτοβολταϊκού πλαισίου και την ενίσχυση (έως 20%) της αποδιδόμενης ισχύς του [*Ali*, 2020]. Μολονότι η αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο δεδομένων χαρακτηριστικών συνεπάγεται δυνητικά την περαιτέρω βελτίωση του οικολογικού αποτυπώματος του, είναι απαραίτητη η συστηματική μελέτη του κύκλου ζωής του συστήματος PV+PCM για τον σαφή προσδιορισμό των περιβαλλοντικών οφελών από τη λειτουργία του. Ειδικότερα, η ολιστική αξιολόγηση του κύκλου ζωής (LCA) ενός συστήματος PV+PCM, μέσω της οποίας υλοποιείται η αποτίμηση των περιβαλλοντικών κερδών κατά τη διάρκεια της περιόδου λειτουργίας του, σε σχέση με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προέκυψαν κατά την κατασκευή των επιμέρους στοιχείων του, την εγκατάσταση του, τη λειτουργία του, την αποσυναρμολόγηση και την τελική διάθεση των διαφόρων εξαρτημάτων του, αναμένεται να παράσχει ικανές απαντήσεις για την περιβαλλοντική βιωσιμότητα του [*Nižetić et al.*, 2017].

Υπό το πρίσμα της οικολογικής διάστασης των συστημάτων τύπου PV+PCM, οι *Royo et al.* προχώρησαν στη μελέτη της βιωσιμότητας ενός συστήματος BIPV+PCM, εφαρμόζοντας κατάλληλα τη μέθοδο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ). Πιο συγκεκριμένα, οι ερευνητές, αφού διαμόρφωσαν τις σχετικές υποθέσεις εργασίας βασιζόμενοι στη θεώρηση ότι η ωφέλιμη διάρκεια ζωής ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου δύναται να επεκταθεί έως 48 έτη λόγω της

θετικής επίδρασης του χρησιμοποιούμενου PCM προς τη διατήρηση χαμηλότερων τιμών (έως 5 ^{o}C) θερμοκρασίας λειτουργίας, πραγματοποίησαν περιβαλλοντική ανάλυση του ελεγχόμενου συστήματος κάνοντας χρήση του λογισμικού SimaPro. Λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία της ανάλυσης, το περιβαλλοντικά οφέλη του συστήματος BIPV+PCM αναγνωρίστηκαν ως σημαντικά, καθώς η λειτουργία του διασφαλίζει μείωση της χρήσης υλικών και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 62 kg ισοδύναμου CO_2 ανά 1 m^2 εγκατεστημένης φωτοβολταϊκής επιφάνειας.

Αντίστοιχα, στο πλαίσιο μια ευρύτερης συγκριτικής αξιολόγησης των παθητικών μεθόδων ψύξης για φωτοβολταϊκά συστήματα, οι *Nižetić et al.* μελέτησαν την περιβαλλοντικής απόδοση ενός συστήματος PV+PCM με ονομαστική ισχύ 30 kWp. Τα αποτελέσματα της σχετικής ανάλυσης κύκλου ζωής (AKZ) υπέδειξαν ότι το σύστημα PV+PCM, λόγω των επιπροσθέτων στοιχείων του, αναμένεται να εμφανίσει αυξημένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σχέση με την περίπτωση ενός συμβατικού φωτοβολταϊκού συστήματος με όμοια χαρακτηριστικά κατά τη φάση κατασκευής και εγκατάστασης.

Παρότι τα τελευταία χρόνια ένας μεγάλος αριθμός ερευνητών έχει εστιάσει στις τεχνικές πτυχές των συστημάτων PV+PCM, η περιβαλλοντική διάσταση τους δεν έχει αναλυθεί επαρκώς προκειμένου να τεθούν οι βάσεις για την περαιτέρω εξέλιξη σε μια ώριμη τεχνολογία αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό, στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκε προκαταρκτική αξιολόγηση της περιβαλλοντικής απόδοσης ενός συστήματος PV+PCM που κατασκευάστηκε και λειτούργησε για ένα (1) έτος υπό τις πραγματικές κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου στη νότια Ελλάδα (Κρήτη). Συγκεκριμένα, η ρεαλιστική ανάλυση του κύκλου ζωής (LCA) του εξεταζόμενου συστήματος PV+PCM υλοποιήθηκε αξιοποιώντας τα πραγματικά δεδομένα όσον αφορά τις απαιτούμενες διεργασίες και ροές υλικών για την κατασκευή και την εγκατάσταση του. Ακόμη, τα πειραματικά αποτελέσματα από την αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού πλαισίου αναφοράς και του συστήματος PV+PCM χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των καθαρών περιβαλλοντικών κερδών από την υποκατάσταση μέρους της ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από το βασισμένο σε ορυκτά καύσιμα ενεργειακό σύστημα της Ελλάδας. Συνολικά, η υλοποιηθείσα ανάλυση του κύκλου ζωής (LCA) για το σύστημα PV+PCM δύναται να παράσχει σημαντικές πληροφορίες σε σχέση με τις προοπτικές που ανακύπτουν μέσω της ενσωμάτωσης διατάξεων ψύξης σε φωτοβολταϊκά συστήματα, καθώς και την απαιτούμενη διορατικότητα στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων στον τομέα της ενέργειας. Η παραπάνω άποψη ενισχύεται περαιτέρω από τη δεδομένη ευαισθησία των φωτοβολταϊκών κυττάρων στις αυξημένες θερμοκρασίες και τον αναμενόμενο υψηλό αντίκτυπό της υπερθέρμανσης του πλανήτη στην ενεργειακή απόκριση των φωτοβολταϊκών συστημάτων [*Peters* και *Buonassisi*, 2019].

A.2 Μεθοδολογική προσέγγιση για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής απόδοσης του συστήματος PV+PCM

Στο πλαίσιο εκπλήρωσης των ειδικών στόχων της παρούσας διατριβής, η μεθοδολογία της ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA) χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό και την αξιολόγηση των κυρίων περιβαλλοντικών επιπτώσεων του υπό μελέτη συστήματος PV+PCM. Σε γενικές γραμμές, η ανάλυση κύκλου ζωής (LCA) αποτελεί ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο

λήψης αποφάσεων μέσω της εκτίμησης του οικολογικού αποτυπώματος ενός προϊόντος ή ενός συστήματος κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του [*Ioannou-Ttofa et al.*, 2017]. Σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040:2006 και ISO 14044:2006, τα κύρια στάδια μιας μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA) αποτελούν:

i. *Ο καθορισμός του στόχου και πεδίου εφαρμογής της ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA)***,** στο πλαίσιο των οποίων λαμβάνει χωρά η θεώρηση των κεντρικών και των ειδικών στόχων της, των ορίων και της λειτουργικής μονάδας (FU) του εξεταζόμενου συστήματος, κ.α.

ii. *Η απογραφή του κύκλου ζωής του εξεταζόμενου συστήματος (LCI)*, μέσω της οποίας καταγράφεται το σύνολο των ενταγμένων εισροών/εκροών πόρων (π.χ. ενέργεια, υλικά, διεργασίες, εκπομπές ρύπων, κ.α.) στη διάρκεια του κύκλου ζωής του.

iii. *Η εκτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής (LCIA),* όπου τα συλλεχθέντα στοιχεία κατά την αναλυτική απογραφή δεδομένων συσχετίζονται με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τις επιμέρους φάσεις του κύκλου ζωής του εξεταζόμενου συστήματος.

iv. *Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων*, όπου τα αποτελέσματα των προηγούμενων σταδίων συνοψίζονται και αναλύονται κατάλληλα προκειμένου να προκύψουν τα αντίστοιχα συμπεράσματα, συστάσεις και αποφάσεις, βάσει του σκοπού και του πλαισίου εφαρμογής της μελέτης.

[Leip και *Uwizeye, 2019]*

Α.2.1 Στόχος και πεδίο εφαρμογής

Ο βασικός στόχος υλοποίησης της παρούσας προκαταρκτικής ανάλυσης κύκλου ζωής του (LCA) είναι διττός: i. προσδιορισμός του περιβαλλοντικού αποτυπώματος ενός τυπικού συστήματος PV+PCM, το οποίο κατασκευάστηκε και λειτούργησε πιλοτικά για χρονική περίοδο ενός (1) έτους στην περιοχή της Κρήτης και ii. η αποτίμηση των πιθανών περιβαλλοντικών κερδών λόγω της βελτιωμένης ενεργειακής παραγωγής του. Για το σκοπό αυτό, η αναλυτική απογραφή των πραγματικών δεδομένων (LCI) του υπό μελέτη συστήματος PV+PCM έλαβε χώρα προκειμένου να επιτευχθεί η ρεαλιστική προσέγγιση του οικολογικού αποτυπώματος του, δεδομένης της υψηλής προστιθέμενης αξίας των σχετικών αποτελεσμάτων προς την κατεύθυνση της ολοκληρωμένης αξιολόγησης του. Επιπλέον, η εφαρμογή της ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA) δύναται να συμβάλλει για τη διαμόρφωση κατάλληλων σημείων αναφοράς σχετικά με την περιβαλλοντική απόδοση των συστημάτων τύπου PV+PCM, και γενικότερα της υιοθέτησης μεθόδων ψύξης για φωτοβολταϊκά συστήματα, στις χώρες της Μεσογείου και σε περιοχές με όμοιες ή/και θερμότερες κλιματικές συνθήκες. Τέλος, η παρούσα μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA) απευθύνεται σε ερευνητές, παράγοντες του τομέα της ενέργειας (υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, μηχανικούς, κ.α.) και το ευρύτερο κοινό, καθότι τα τελευταία χρόνια, τα φωτοβολταϊκά συστήματα αναγνωρίζονται ως μια τεχνολογία ΑΠΕ που μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην προσπάθεια απανθρακοποίησης του ενεργειακού συστήματος και αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής.

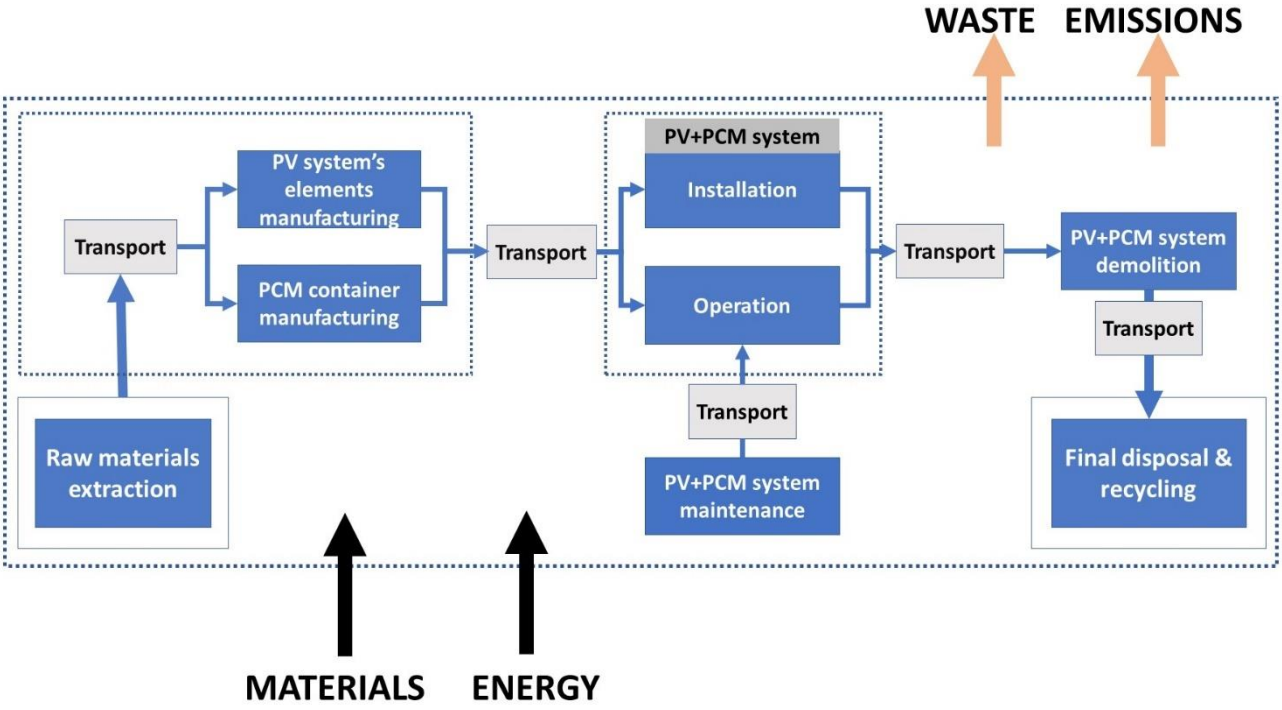
Α.2.2 Λειτουργική μονάδα (Functional Unit)

Ο προσδιορισμός της λειτουργικής μονάδας (FU) ενός συστήματος συνιστά αναπόσπαστο τμήμα της ανάλυσης του κύκλου ζωής του (LCA), ούτως ώστε το σύνολο των σχετικών ροών (δεδομένα LCI εισόδου και εξόδου) να κανονικοποιούνται και να εκφράζονται ως προς μια κοινή βάση αναφοράς [*Ioannou-Ttofa et al.*, 2017]. Εν προκειμένω, ως λειτουργική μονάδα ορίζεται η παραγωγή μιας (1) kWh ηλεκτρικής ενέργειας από τα ελεγχόμενα φωτοβολταϊκά πλαίσια, η οποία αποδίδεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη φάση λειτουργίας του. Παράλληλα, η ορισθείσα λειτουργική μονάδα (FU) διαμορφώνει ένα κατάλληλο πλαίσιο αξιολόγησης της περιβαλλοντικής απόδοσης του συστήματος PV+PCM, καθιστώντας εφικτή τη σύγκρισή με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν για την περίπτωση αναφοράς (δηλαδή του φωτοβολταϊκού πλαισίου όμοιου τύπου, χωρίς τη συμπερίληψη ειδικής διάταξης ψύξης) ή/και παρατίθενται σε σχετικές ερευνητικές μελέτες LCA για τυπικά φωτοβολταϊκά συστήματα. Κατά συνέπεια, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του προτεινόμενου συστήματος, και τα οφέλη λόγω της ενίσχυσης της ενεργειακής παραγωγής μέσω της ενσωμάτωσης του επιλεγμένου PCM αναγνωρίζονται σαφώς και ποσοτικοποιούνται. Τέλος, θα αποτελούσε παράλειψη να μην αναφερθεί ότι η υλοποιηθείσα ανάλυση υιοθέτησε την προσέγγιση cradle-to-grave (από την παραγωγή πρώτων υλών έως το στάδιο της απόρριψης τους), αντί της προσέγγισης cradle-to-gate (από το παραγωγή πρώτων υλών μέχρι την κατασκευή του συστήματος), και ως εκ τούτου ο αντίκτυπος από την υποκατάσταση μέρους της ηλεκτρικής ενέργειας, που παράγεται από το βασισμένο σε ορυκτά καύσιμα ενεργειακό σύστημα της Ελλάδας, συμπεριλήφθηκε στην ανάλυση.

Α.2.3 Όρια συστήματος

Σε αντιστοιχία με την περίπτωση επιλογής της λειτουργικής μονάδας, η αναγνώριση των ορίων του συστήματος θεωρείται κύριο βήμα για την εφαρμογή μίας ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA). Η υψηλή σημασία του τεκμηριώνεται από το γεγονός ότι τα όρια του συστήματος περιγράφουν το σύνολο των ροών που αφορούν το ελεγχόμενο σύστημα/προϊόν και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στο πλαίσιο της σχετικής ανάλυσης, ενώ παράλληλα αποσαφηνίζονται οι ροές που δεν περιβάλλονται από τα όρια του συστήματος/προϊόντος (εξωτερικές ροές). Σε αυτήν την εργασία, οι κύριες ροές, οι οποίες σχετίζονται με την κατασκευή, τη λειτουργία, καθώς και τη φάση αποικοδόμησης του συστήματος PV+PCM, συνιστούν τα όρια του συστήματος για την επίτευξη του στόχου της ανάλυσης (Εικόνα Α-1). Συγκεκριμένα, τα όρια του συστήματος εκτείνονται έτσι ώστε να περιλαμβάνουν τη δημιουργία του επιλεγμένου τύπου φωτοβολταϊκού πλαισίου, καθώς επίσης και τη μεταφορά του (με πλοίο και φορτηγό) από τη χώρα παραγωγής (Ιταλία) στη θέση εγκατάστασης (Χανιά, Κρήτη). Ακόμη, το επιλεγμένο PCM, ο αντιστροφέας DC/AC (Inverter) και τα επιμέρους στοιχεία της καλωδίωσης τίθενται εντός των ορίων του συστήματος, μαζί με τη μεταφορά τους από τη χώρα προέλευσης (Γερμανία) στην περιοχή εγκατάστασης (Χανιά, Κρήτη). Πέραν αυτών, ο χάλυβας και οι διεργασίες συγκόλλησης για τη δημιουργία του δοχείου αποθήκευσης του χρησιμοποιούμενου PCM θεωρήθηκαν εσωτερικές ροές, ενώ η μεταφορά του από την βιοτεχνία κατασκευής, με έδρα την πόλη του Ηρακλείου (Κρήτη, Ελλάδα), στη θέση εγκατάστασης αναγνωρίστηκε ως τοπική. Επίσης, θα αποτελούσε παράλειψη αν δεν συμπεριλαμβάνονταν στα όρια του συστήματος, η θερμοαγώγιμη πάστα, η οποία μεταφέρθηκε από την Κίνα στην Ελλάδα (Χανιά, Κρήτη) και χρησιμοποιήθηκε μεταξύ της

επαφής του φωτοβολταϊκού πλαισίου και της εμπρόσθιας επιφάνειας του δοχείου PCM. Τέλος, η εγκατάσταση, η συντήρηση και η αποικοδόμηση του συστήματος PV+PCM λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάλυση, καθώς οι απαιτήσεις για τη θεμελίωση του επί του εδάφους, τη χρήση γης, τη μεταφορά προσωπικού για λόγους τακτικής συντήρησης του (από και προς τη θέση εγκατάστασης), τον καθαρισμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων, την αποσυναρμολόγηση του, μετά το τέλος του αναμενόμενου λειτουργικού κύκλου ζωής του, την ανακύκλωση μέρους των υλικών του (π.χ. μέταλλα, καλωδιώσεις, επιφάνειες γυαλιού του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου) και την υγειονομική ταφή των αδρανών αποβλήτων βρίσκονται εντός των ορίων του συστήματος.



Εικόνα Α-1: Όρια του συστήματος

Α.2.4 Απογραφή κύκλου ζωής

Η σύνταξη του καταλόγου απογραφής του κύκλου ζωής (LCI) ενός συστήματος αποτελεί εντατική και βαρύνουσας σημασίας διαδικασία για κάθε ανάλυση κύκλου ζωής (LCA) [*Haque*, 2020], δεδομένου ότι το βάθος και το εύρος της, καθώς επίσης, η ακρίβεια και η αναπαραγωγιμότητα των αποτελεσμάτων της, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των δεδομένων LCI. Εν προκειμένω, τα στοιχεία, τα οποία υποδεικνύουν το σύνολο των εισροών/εκροών πόρων (π.χ. ενέργεια, υλικά, διεργασίες, εκπομπές ρύπων, κ.α.) για ένα πρωτότυπο σύστημα PV+PCM κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του, συλλέχθηκαν για την ανάλυση της περιβαλλοντικής απόδοσης του, και παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα Α.1. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα απογραφής (LCI) που σχετίζονται με την παραγωγή φωτοβολταϊκών κυττάρων τύπου a-Si και εμπεριέχονται στη βάση δεδομένων Ecoinvent χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη LCA του συστήματος PV+PCM, έπειτα από τη λογική προσαρμογή του ούτως ώστε να καταστούν αντιπροσωπευτικά για τον εξεταζόμενο τύπο φωτοβολταϊκού πλαισίου (Sharp NA-E130L5). Ακόμα, ελήφθησαν υπόψη η καταναλωθείσα ηλεκτρική ενέργεια, η οποία προήλθε από το ενεργειακό δίκτυο της χώρας παραγωγής του (Ιταλία), όπως επίσης το σύνολο της θερμότητας και νερού που απαιτήθηκαν από το ευρωπαϊκό δίκτυο για την παραγωγή του υπό μελέτη φωτοβολταϊκού πλαισίου. Επιπλέον, η συσκευασία του εξεταζόμενου φωτοβολταϊκού πλαισίου με σκληρό χαρτόνι και η μεταφορά του στη θέση εγκατάστασης (Χανιά, Ελλάδα), η οποία περιλαμβάνει τη μετακίνηση του σε απόσταση 700 km με πλοίο και 500 km με φορτηγό, συνυπολογίστηκαν κατά την ανάλυση του κύκλου ζωής του συστήματος PV+PCM.

Αντίστοιχα, τα δεδομένα για τις διεργασίες σύνθεσης της παραφίνης στη Γερμανία, τα οποία περιλαμβάνονται στη βάση Ecoinvent, υιοθετήθηκαν προκειμένου να επιτευχθεί η προσέγγιση της διαδικασίας παραγωγής του χρησιμοποιούμενου PCM. Ειδικότερα, για το σκοπό της ανάλυσης, θεωρήθηκε ότι η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώθηκε για τα διαφορετικά στάδια παραγωγής του προέρχεται αποκλειστικά από το ενεργειακό δίκτυο της Γερμανίας, ενώ τα απαιτούμενα ποσά θερμότητας και νερού προήλθαν μέσω του ευρωπαϊκού δικτύου. Επίσης, το σενάριο βάσης για τη μεταφορά της ποσότητας PCM που ενσωματώθηκε τελικά στο εξεταζόμενο σύστημα PV+PCM αναφέρεται στη μετακίνηση της από τη μονάδα παραγωγής σε απόσταση 1800 km με φορτηγό και 300 km με πλοίο. Ακόμη, λαμβάνεται υπόψη η αντικατάσταση του χρησιμοποιούμενου PCM ανά 12,5 έτη υπό τη συνθήκη ότι το σύστημα PV+PCM θα λειτουργεί για 250 d/y, λόγω του πεπερασμένου αριθμού των κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης του (~3000 κύκλοι). Παράλληλα, η μεταφορά σημαντικών μερών (δηλ. αντιστροφέας τάσης - 2,5 kW, καλωδίωση, εξαρτήματα σύνδεσης, κ.α.) για τη λειτουργία του συστήματος PV+PCM και αντίστοιχης προέλευσης, θεωρήθηκε με όμοια χαρακτηριστικά μετακίνησης. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να επισημανθεί ότι η χρησιμοποίηση ενός αντιστροφέα ονομαστικής ηλεκτρικής ισχύος 2,5 kW δύναται να καλύψει την εγκατάσταση δεκαοκτώ (18) φωτοβολταϊκών πλαισίων του εξεταζόμενου τύπου. Ως εκ τούτου, η υπόθεση ότι το 1/18 του συνόλου των αναγκαίων πόρων για την κατασκευή και μεταφορά του αντιστροφέα τάσης - 2,5 kW λαμβάνεται υπόψη για τη μελέτη του κύκλου ζωής του συστήματος PV+PCM. Συν τοις άλλοις, η απογραφή των στοιχείων για τις βάσεις στήριξης του προτεινόμενου συστήματος βασίστηκε στα δεδομένα LCI της Ecoinvent που αντιστοιχούν στην έδραση του επί ανοικτού γηπέδου (open ground), όπως αναθεωρήθηκαν

ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι απαιτήσεις για ενισχυμένη αντοχή λόγω της πρόσθετης ειδικής διάταξης ψύξης (δηλ. του πληρωμένο με PCM δοχείου).

Συμπληρωματικά, τα αντίστοιχα δεδομένα από τη βάση Ecoinvent που σχετίζονται με την κατασκευή και τη μεταφορά του δοχείου αποθήκευσης του PCM, όπως η παραγωγή του γαλβανισμένου εν θερμώ χάλυβα στην Ελλάδα, οι διεργασίες συγκόλλησης που εφαρμόστηκαν σε τοπική βιοτεχνία και η μετακίνηση του σε απόσταση 140 km προς τη θέση τελικής εγκατάστασης, εντάσσονται εντός του σχετικού καταλόγου απογραφής του κύκλου ζωής (LCI) του υπό μελέτη συστήματος PV+PCM. Επίσης, η παραγωγή της θερμοαγώγιμης πάστας, που εφαρμόστηκε ως λεπτό στρώμα βελτίωσης της επαφής μεταξύ του φωτοβολταϊκού πλαισίου και του περιβλήματος του PCM, θεωρήθηκε μέσω των κατάλληλων δεδομένων από την βάση Ecoinvent, ενώ για τη μεταφορά της από τη χώρα προέλευσης (Κίνα) στη θέση εγκατάστασης (Χανιά, Ελλάδα) ελήφθησαν υπόψη η μετακίνηση σε απόσταση 7200 km με υπερωκεάνιο πλοίο, η μετακίνηση σε απόσταση 300 km με επιβατικό πλοίο και η μετακίνηση σε απόσταση 50 km με φορτηγό.

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι ο προγραμματισμός για τη συντήρηση του συστήματος PV+PCM περιλαμβάνει την επίσκεψη στην τοποθεσία εγκατάστασης δύο (2) φορές το χρόνο για την εκτέλεση εργασιών εντοπισμού και επίλυσης προβλημάτων, καθώς επίσης και καθαρισμού των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Συνεπώς, η μεταφορά του τεχνικού προσωπικού για απόσταση 60 km (30 km ανά επίσκεψη) με ελαφρύ φορτηγό ανοιχτού τύπου, καθώς και η χρησιμοποίηση ποσότητας νερού ίσης με 6 l για τον καθαρισμό ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου, αποτέλεσαν σημαντικά δεδομένα κατά την απογραφική ανάλυση του κύκλου ζωής του συστήματος PV+PCM.

Τέλος, τα δεδομένα απογραφής (LCI) που συνδέονται με την αποικοδόμηση του εξεταζόμενου συστήματος, εστιάζοντας στη μεταφορά, στην ανακύκλωση και στην υγειονομική ταφή των κύριων τμημάτων του, συνέβαλαν για την ρεαλιστική προσέγγιση του οικολογικού αποτυπώματός του μέσω της υλοποιηθείσας ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA). Ειδικότερα, η βασική υπόθεση εργασίας το 70% των υλικών του συστήματος PV+PCM ανακυκλώνονται, ενώ το 30% εξ αυτών καταλήγει σε χώρους υγειονομικής ταφής,

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα δεδομένα LCI του Ecoinvent για ανακύκλωση μετάλλων και γυαλιού δεν περιλαμβάνουν σημαντικές εισόδους, όπως η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό, τα σχετικά δεδομένα απογραφής (LCI) για το γυαλί [*Landi et al.*, 2019] και το μέταλλο [*Cumbul Altay et al.*, 2011] αξιοποιήθηκαν από τη βιβλιογραφία, εστιάζοντας στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία υποτίθεται ότι προέρχεται από τα ορυκτά καύσιμα. εξαρτημένο ελληνικό ενεργειακό μείγμα.

Component	Type/material	Input	Lifespan (yr)
Land use change	Transformation, from grassland/pasture/meadow	2.5 m^2	-
	Transformation to industrial area	2.5 m^2	-
	Transformation, to traffic area, road network	0.5 m^2	-
Land use	Occupation (industrial area)	2.5 x 25 m^2a	25
	Occupation (road network)	0.5 x 25 m^2a	25
PV panel			25
	Laminate panel	1 unit	25
	Steel	0.5 kg	25
	Steel welding	6 m	-
	Aluminium	0.5 kg	25
	Aluminium welding	6 m	-
	Transparent Conductive Oxide (TCO)	0,075 kg	
	glass	22.4 kg	
PV module	PV panel	1 unit	25
	PV Laminate	1 unit	25
	Paper (cardboard)	5 kg	
	Ship transport	500 km x 27 kg	-
	Lorry transport	700 km x 27 kg	-
	Truck (local transport – including dismantling)	50km x 27 kg	-
	Steel recycling	0.7 x 0.5kg	-
	Aluminium recycling	0.7 x 0.5kg	-
	Glass recycling	0.7 x 22.4kg	
	Paper recycling	0.7 x 5kg	
	Landfilling	12.12 kg	-
Cabling		1.86 kg (1.16 kg copper and 0.7 kg PE)	25
	Lorry transport	1800 km x 1.86 kg	-
	Ship transport	300 km x 1.86 kg	-
	Truck transport (including dismantling)	50 km x 1.86 kg	-
		0.7 x 1.86 kg	-
		0.7 x 1.16 kg	-
		0.7 x 0.6 kg	
		0.3 x 1.16	-
		0.6*0.3	-
	Disposal	0.3 x 1.86 kg	-
Inverter		1/18 unit	9
PCM	Paraffin	12,5	12,5
	Ship	300 km * 46.2 kg	-
	Lorry	1800 km x 46.2 kg	-
	Truck (including dismantling)	50 km x 46.2 kg	-
	Landfilling	46.2 kg	-
Thermal grease	Thermal paste	1.8 kg	25
	Transoceanic Ship	7200 km x 1.8 kg	-
	Ship	300 x 1.8 km	-
	Truck (including dismantling)	50 km x 1.8 kg	-
	Disposal	1.8 kg	-
PCM container	Main body	64.7 kg	25
	Mounting system (open ground)	10.5 kg	25
	Other metal parts and fittings	0.8 kg	25
	Steel welding	12 m	-
	Truck (including dismantling)	50 km x kg	-
			-
PV+PCM system			25
Maintenance**	Water	6 L	1/2
	Personnel transportation	30 km/410 panels	1/2

* Adapted from Photovoltaic laminate, a-Si {US}| production | APOS, U (Electricity and water input from Italy and the rest data from Europe of RoW).
** Two times per year for a solar farm comprising 410 panels.

Πίνακας Α-1: Τα δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής του υπό μελέτη συστήματος PV+PCM

Α.2.5 Εκτίμηση επιπτώσεων του κύκλου ζωής

Στη φάση εκτίμησης επιπτώσεων του κύκλου ζωής (LCIA), τα συλλεχθέντα δεδομένα κατά τη σύνταξη του καταλόγου απογραφής του κύκλου ζωής (LCI) ενός συστήματος "μεταφράζονται" και συσχετίζονται με συγκεκριμένες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων και επιβαρύνσεων. Η σχετική διαδικασία συμβάλλει σημαντικά στον εντοπισμό των κομβικών σημείων όσον αφορά την περιβαλλοντική βιωσιμότητα του υπό μελέτη συστήματος, και στην αναγνώριση τρόπων αντιμετώπισης τους για τη βελτίωση της συνολικής περιβαλλοντικής απόδοσης. Η εκτίμησης επιπτώσεων του κύκλου ζωής (LCIA) περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα [*Nieuwlaar*, 2004]: i. επιλογή των κατηγοριών επιπτώσεων που θεωρούνται σχετικές με το εξεταζόμενο σύστημα, ii. ταξινόμηση των στοιχειωδών ροών, οι οποίες εντάσσονται στα όρια του συστήματος, στις επιλεγμένες κατηγορίες επιπτώσεων, iii. εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ανά κατηγορίας με χρήση συντελεστών μετατροπής (χαρακτηρισμός), iv. κανονικοποίηση των προσδιορισμένων επιπτώσεων σε σχέση με τη χωρική και τη χρονική τιμή αναφοράς, v. κατάταξη των χαρακτηρισμένων ή κανονικοποιημένων τιμών σε μία ή περισσότερες ομάδες (ομαδοποίηση) και vi. πολλαπλασιασμός των ομαλοποιημένων αποτελεσμάτων με συντελεστές στάθμισης για την εκτίμηση της σημασίας κάθε εξεταζόμενης κατηγορίας επιπτώσεων σε σύγκριση με τις άλλες, ενώ τα σταθμισμένα αποτελέσματα μπορούν να οδηγήσουν στον υπολογισμό ενός αθροιστικού δείκτη επιπτώσεων.

Σε γενικές γραμμές, τα τρία (3) αρχικά βήματα της εκτίμησης επιπτώσεων του κύκλου ζωής (LCIA) είναι υποχρεωτικά, ενώ τα υπόλοιπα δύναται να παραλειφθούν ανά περίπτωση. Για την επίτευξη της συσχέτισης των δεδομένων απογραφής του κύκλου ζωής (LCI), δηλαδή των στοιχείων που αναφέρονται σε πρώτες ύλες και εκπομπές, με τις επιλεγμένες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, πρέπει να πραγματοποιηθεί η κατάλληλη ομαδοποίηση, κανονικόποίηση ή/και στάθμιση, ανάλογα με τον στόχο και το πεδίο εφαρμογής της ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA). Βάσει της συναφούς βιβλιογραφίας, οι συμβατές μεθοδολογικές προσεγγίσεις για την εκτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής (LCIA) μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο γενικές κατηγορίες: με βάση τους πόρους και εστιάζοντας στη χρήση/ανάλωση των πόρων από τη φύση (είσοδοι) (π.χ. Αθροιστική Ζήτησης Ενέργειας-CED)) ή με βάση τις εκπομπές, εστιάζοντας σε μία (π.χ. USEtox) ή πολλαπλές (π.χ. ReCiPe) εκπομπές (εξόδους) στη φύση [*Wu* και *Su*, 2020].

Δεδομένου του σκοπού και του πεδίου εφαρμογής της παρούσας μελέτης κύκλου ζωής (LCA), στο πλαίσιο εκτίμησης επιπτώσεων του κύκλου ζωής (LCIA), επιλέγεται η εφαρμογή της μεθοδολογίας αξιολόγησης βάσει εκπομπών (ReCiPe 2016), η οποία δυνητικά καλύπτει ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών κατηγοριών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Πιο συγκεκριμένα, η μεθοδολογία αξιολόγησης ReCiPe 2016 αποτελεί μια ισορροπημένη μεθοδολογική προσέγγιση, η οποία μπορεί να εκφράσει τις εκπομπές αέριων και την επιβάρυνση του περιβάλλοντος λόγω χρήσης φυσικών πόρων σε συγκεκριμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, χρησιμοποιώντας παράγοντες χαρακτηρισμού τόσο σε μέσο (εστιάζοντας σε μεμονωμένα περιβαλλοντικά προβλήματα που αναμένεται να εμφανιστούν νωρίτερα στην αλυσίδα αιτίας-αποτελέσματος) όσο και σε τελικό σημείο (εστιάζοντας στις βλάβες που ανακύπτουν σε κυρίους τομείς: ανθρώπινη υγεία, ποιότητα οικοσυστήματος και έλλειψη πόρων) [*Huijbregts et al.*, 2017]. Σε επίπεδο μέσου σημείου, η μεθοδολογίας ReCiPe 2016 περιλαμβάνει δεκαοκτώ (18) δείκτες (Πίνακας Α-2), ενώ σε επίπεδο τελικού σημείου, οι

ακόλουθες κατηγορίες αποτελούν το επίκεντρο της αξιολόγησης: η βλάβη στην ανθρώπινη υγεία (προσαρμοσμένη σε έτη ζωής έπειτα από την εμφάνιση σοβαρής ασθένειας ή/και αναπηρίας), η βλάβη στην ποιότητα του οικοσυστήματος (προσαρμοσμένη σε έτη έπειτα από την απώλεια - εξαφάνιση τοπικών ειδών της βιοποικιλότητας) και η έλλειψη πόρων (προσαρμοσμένη σε μελλοντικό επιπρόσθετο κόστος που ανακύπτει για την εξόρυξη ορυκτών πόρων) [*Huijbregts et al.*, 2016].

Impact category	Unit	Abbreviation
Global warming	kg CO_2 eq	GW
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	SOD
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	IR
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	OFhh
Fine particulate matter formation	kg $PM_{2.5}$ eq	FPMF
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	OFte
Terrestrial acidification	kg SO_2 eq	TA
Freshwater eutrophication	kg P eq	FE
Marine eutrophication	kg N eq	ME
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	TET
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	FET
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	MET
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	HCT
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	HNCT
Land use	m^2a crop eq	LU
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	MRS
Fossil resource scarcity	kg oil eq	FRS
Water consumption	m^3	WC

Πίνακας Α-2: Κατηγορίες επιπτώσεων μέσου σημείου της μεθοδολογίας αξιολόγησης ReCiPe 2016 [*Huijbregts et al.*, 2016, 2017].

Α.3 Αποτελέσματα για την περιβαλλοντικής απόδοσης του συστήματος PV+PCM

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης κύκλου ζωής (LCA), τα αποτελέσματα εκφράστηκαν τόσο σε επίπεδο μέσου, όσο και σε επίπεδο τελικού σημείου, ώστε να καταστούν πλήρως κατανοητές οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της προτεινόμενης ηλιακής εφαρμογής. Ειδικότερα, ο προσδιορισμός και η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του συστήματος PV+PCM έναντι του σχετικού αντίκτυπου που αναγνωρίζεται για την περίπτωση αναφοράς, όταν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο λειτουργεί χωρίς την ενσωμάτωση διάταξης παθητικής ψύξης, υλοποιήθηκε για την κάλυψη του στόχου της ανάλυσης. Ακόμη, τα αναμενόμενα περιβαλλοντικά κέρδη (πιστώσεις) λόγω της υποκατάσταση της παραγόμενης ενέργειας από το ενεργειακό σύστημα της Ελλάδας (με υψηλή εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα), ως αποτέλεσμα της αυξημένης παραγωγής ενέργειας του συστήματος PV+PCM, ελήφθησαν υπόψη ως βάση για τη συγκριτική αξιολόγηση. Σε γενικές γραμμές κατά τη φάση λειτουργίας, η αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω της αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας, λόγω της ενσωμάτωσης του PCM σε ένα φωτοβολταϊκό, οδηγεί σαφώς σε μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις έναντι της ενεργειακής παραγωγής που προέρχεται

μέσω της χρήσης ορυκτών καυσίμων [*Cellura et al.*, 2008]. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι η αξιόπιστης σύγκρισης των αποτελεσμάτων διασφαλίζεται δεδομένου η ωφέλιμη διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων, τόσο στην περίπτωση με τη συμπερίληψη PCM, όσο και στην περίπτωση χωρίς ενσωμάτωση διάταξης ψύξης, ορίστηκε ίση με 25 έτη, μολονότι σημαντικός αριθμός ερευνητών υιοθετεί τη άποψη ότι η ενσωμάτωση διατάξεων ψύξης σε φωτοβολταϊκά πλαίσια επιτυγχάνει τη διατήρηση του ρυθμού γήρανσης τους σε χαμηλά επίπεδα (≤ 1%/έτος), και κατ' επέκταση, την αύξηση της χρονική περιόδου αποδοτικής λειτουργίας τούς πέραν των 25 ετών [*Klemm et al.*, 2017].

A.3.1 ReCiPe σε επίπεδο μέσου σημείου

Στη παρούσα ενότητα, παρατίθενται τα αποτελέσματα της μελέτης κύκλου ζωής (LCA), βάσει της μεθοδολογίας αξιολόγησης ReCiPe 2016, σε επίπεδο μέσου σημείου και ανά ορισθείσα λειτουργική μονάδα-FU (παραγωγή 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας). Ειδικότερα, η κατανομή των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που προήλθαν από το σύστημα PV+PCM (PV panel with cooling) και τη φωτοβολταϊκή διάταξη τυπικής διαμόρφωσης (PV panel without cooling) στις 18 κατηγορίες του ReCiPe 2016, σε αντιπαραβολή με τον επικείμενο αντίκτυπο στις αντίστοιχες κατηγορίες λόγω της υποκατάστασης ηλεκτρικής ενέργειας, παρουσιάζεται γραφικά στο Διάγραμμα Α-3. Γενικά, το σημαντικότερο μέρος εκ των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, οι οποίες αποδίδονται στην κατασκευή των φωτοβολταϊκών πλαισίων, σχετίζονται με τις διαδικασίες υψηλής έντασης ενέργειας που απαιτούνται για την παραγωγή τους και την αυξημένη χρήση ορυκτών και μετάλλων (π.χ. πυρίτιο, κάδμιο και χαλκός) [*Tawalbeh et al.*, 2021]. Κατά συνέπεια, η κάλυψη των αναγκών για την παραγωγή των φωτοβολταϊκών επιστρώσεων (PV laminates) προϋποθέτει την εφαρμογή διαδικασιών εξόρυξης, επιδρώντας στις κατηγορίες που σχετίζονται με την εξάντληση των αβιοτικών πόρων [*Stamford* και *Azapagic*, 2018]. Εκτός αυτού, η κατασκευή ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου συνεπάγεται τη χρησιμοποίηση σημαντικών ποσοτήτων μετάλλων για τις καλωδιώσεις (π.χ. εξόρυξη και επεξεργασία χαλκού για παραγωγή καλωδίων), τις ενώσεις των φωτοβολταϊκών στοιχείων και τα κυτία διασύνδεσης [*Arvesen et al.*, 2014], με τις αντίστοιχες εκπομπές από την επεξεργασία αυτών των ορυκτών (π.χ. υπολείμματα και εκπομπές από την καύση ορυκτών καυσίμων) και από την απόρριψη τους στον περιβάλλον να συνδέονται με τις κατηγορίες επιβαρύνσεων της οικοτοξικότητας και της τοξικότητας για τον άνθρωπο [*Stamford* και *Azapagic*, 2018; *Lunardi et al.*, 2018].

Όπως ήταν αναμενόμενο, το σύστημα PV+PCM έχει υψηλότερη συμμετοχή στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς, και ιδιαίτερα στις κατηγορίες μέσου σημείου GW, OFhh, OFte, TA, FRS και WC, όπως διακρίνεται στο Διάγραμμα Α-3 και τον Πίνακας Α-3. Η ανωτέρω παρατήρηση σχετίζεται πρωτίστως με την ενσωμάτωση του PCM (παραφίνη) και, δευτερευόντως, με τη χρησιμοποίηση ανοξείδωτου χάλυβα ως βασικό υλικό κατασκευής της ειδικής διάταξης ψύξης που επιτρέπει τη σύζευξη του PCM με το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Γενικά, η παραφίνη αποτελεί κερί πετρελαϊκής βάσης και παράγεται μέσω κατάλληλης αποστακτικής διαδικασίας αργού πετρελαίου [*Freund*, 1982]. Επιπλέον, η διαδικασία παραγωγής της χαρακτηρίζεται από υψηλή ένταση ενέργειας, δεδομένου ότι η σύνθεση 1 kg παραφίνης απαιτεί την κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή θερμότητας ίσης με 4,779 MJ (Ecoinvent LCI). Ως εκ τούτου, σημαντικό μέρος

των παρατηρούμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων αποδίδεται στην εξόρυξη, την επεξεργασία και τη χρήση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή παραφίνης, όπως υποδεικνύεται μέσω των τιμών που αναφέρονται στους σχετικούς δείκτες επιπτώσεων GW, FRS και WC.

Το δεύτερο σημείο κομβικής σημασίας για την περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος PV+PCM, συνδέεται με τη χρησιμοποίηση ανοξείδωτου χάλυβα για την κατασκευή της ειδικής διάταξης ψύξης, με τις σχετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις να εντοπίζονται κατά τη διαδικασία παραγωγής του. Μεταξύ των βιομηχανικών δραστηριοτήτων, η παραγωγή προϊόντων χάλυβα χαρακτηρίζεται από υψηλή κατανάλωση ενέργειας [*Olmez et al.*, 2016], καθώς περιλαμβάνει πολλαπλά στάδια μέχρι τη δημιουργία τελικών προϊόντων, ενώ ταυτόχρονα παράγονται αυξημένες εκπομπές λόγω της φύσης των σχετικών διεργασιών (π.χ. σκόνη από δραστηριότητες εξόρυξης, καύση ορυκτών καυσίμων για ηλεκτρική ενέργεια). Ενδεικτικά, τα κύρια στάδια που προκαλούν υψηλή κατανάλωση ενέργειας είναι: η εξόρυξη σιδηρομεταλλεύματος, ο θρυμματισμός του με χρήση εκρηκτικών και μηχανημάτων, η θερμική επεξεργασία σε υψικαμίνους, ο εξευγενισμός, κ.α. [*Norgate et al.*, 2007]. Επιπρόσθετα, το σύστημα PV+PCM εμφανίζονταν με σημαντική συμμετοχή στην κατηγορία επιβάρυνσης που αναφέρεται στη σπανιότητα των ορυκτών πόρων (FRS), κυρίως λόγω των απαιτήσεων σε ανοξείδωτο χάλυβα, και σε μικρότερο βαθμό στη χρήση του PCM.

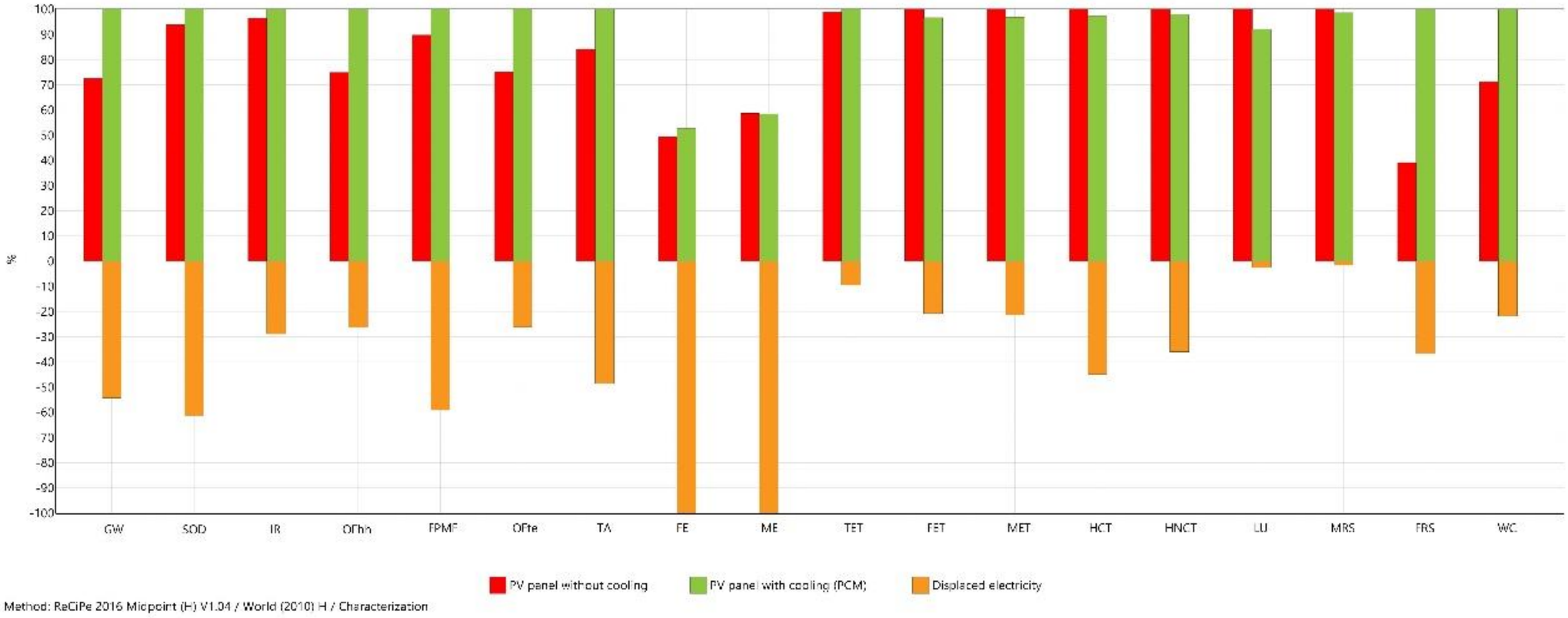
Ωστόσο, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος PV+PCM αναμένεται αυξημένη σε σχέση με την ενέργεια που θα προέλθει από ένα συμβατικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Συνεπώς, οι απαιτήσεις όσον αφορά την ονομαστική ισχύ του συστήματος PV+PCM, και κατ' επέκταση τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος, για να επιτευχθεί ένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα (εν προκειμένω, η παραγωγή 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία αποδίδεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη φάση λειτουργίας) αναγνωρίζονται σαφώς μικρότερες σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς. Η παραπάνω διάσταση της ανάλυσης αντανακλάται στη χαμηλότερη συμμετοχή στις κατηγορίες επιβάρυνσης που σχετίζονται με την οικοτοξικότητα (FET και MET) και την τοξικότητα (HCT και HNHT) για τις κατηγορίες επιπτώσεων μέσου σημείου, σε συνδυασμό με τη μειωμένη συμμέτοχή στις κατηγορίες επιβάρυνσης μαζί με LU και MRS (Διάγραμμα Α-3 και Πίνακας Α-3).

Τέλος, όπως προκύπτει από το Διάγραμμα Α-3 και τον Πίνακας Α-3, τα αναμενόμενα περιβαλλοντικά κέρδη (πιστώσεις) λόγω της υποκατάστασης της παραγόμενης ενέργειας από το ενεργειακό σύστημα της Ελλάδας (με υψηλή εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα), μπορούν να συμβάλλουν για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του συστήματος PV+PCM σχεδόν σε όλες τις κατηγορίες επιβάρυνσης μέσου σημείου, και ιδιαίτερα στις κατηγορίες GW, SOD, FPMF, TA, FE, ME, HCT, HCNT και FRS. Υπό αυτή την έννοια, η σημαντικότητα των υφιστάμενών συνθηκών για την ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα αναγνωρίζεται, δεδομένου ότι το ελληνικό ενεργειακό μείγμα βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στα ορυκτά καύσιμα, δηλαδή ~ 31% λιγνίτης, ~ 23% φυσικό αέριο, ~ 10% υδροηλεκτρικά, ~ 9% αιολικά, ~ 8% πετρέλαιο, άλλα και σε εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας, σύμφωνα με το Ecoinvent 3.6, [*Foteinis et al.*, 2021]. Παράλληλα, η κατάσταση του ενεργειακού μείγματος σε παγκόσμιο επίπεδο αποτυπώνεται ως εξής: 3,06% πετρέλαιο, 23,32 φυσικό αέριο, 36,38% άνθρακας, 10,35% πυρηνικά, 15,63% υδροηλεκτρικά, 10,39% ΑΠΕ και 0,87% άλλα (αντλούμενα υδροηλεκτρικά και μη ανανεώσιμα απόβλητα) [*BP*, 2020]. Συμπερασματικά, τα αναμενόμενα περιβαλλοντικά κέρδη (πιστώσεις) από τη λειτουργία του συστήματος PV+PCM

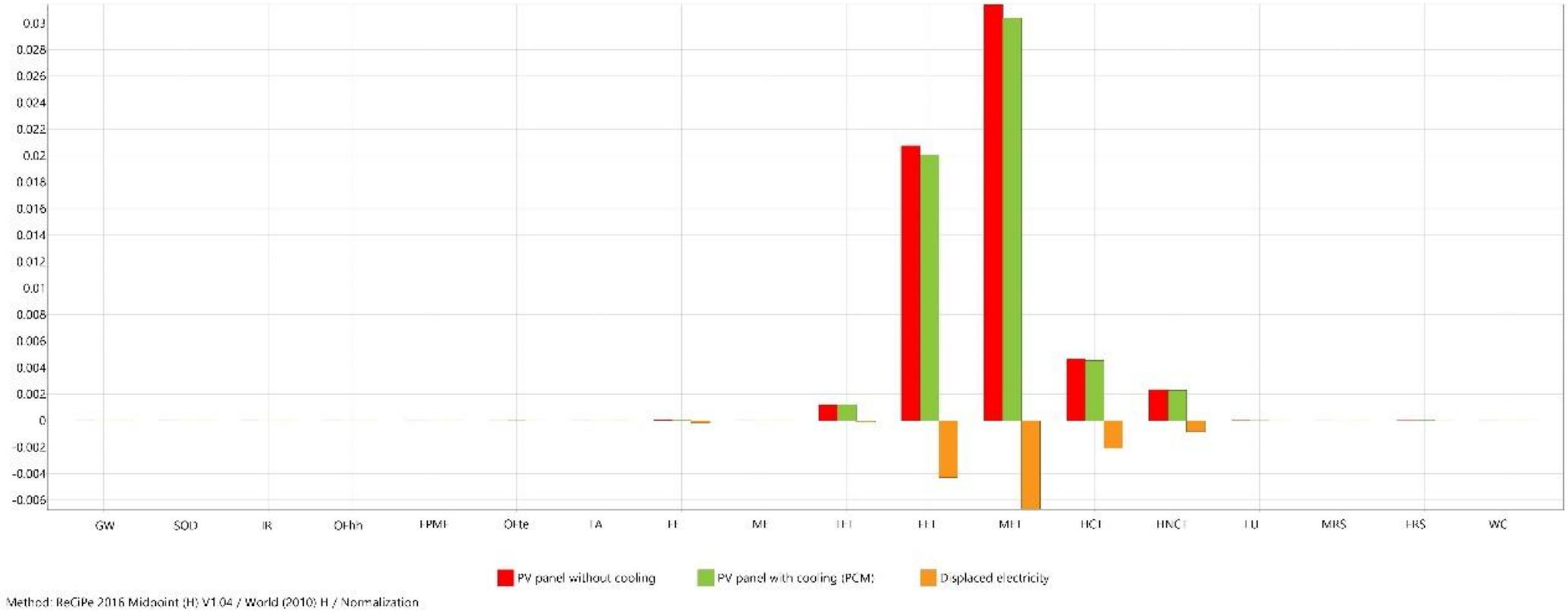
σχετίζονται με την αντίστοιχη αποφυγή της έκλυσης εκπομπών για την εξόρυξη, επεξεργασία και τη χρήση ορυκτών καυσίμων, οι οποίες με υψηλό μερίδιο συμμετοχής στις κατηγορίες επιπτώσεων μέσου σημείου του ευτροφισμού και της οξίνισης [*Foteinis et al.*, 2021].

Impact category	PV panel without cooling	PV panel with cooling (PCM)	Displaced electricity	Unit
GW	6,66E-02	9,19E-02	-4,98E-02	kg CO_2 eq
SOD	3,19E-08	3,40E-08	-2,08E-08	kg CFC11 eq
IR	4,98E-03	5,17E-03	-1,49E-03	kBq Co-60 eq
OFhh	1,78E-04	2,38E-04	-6,25E-05	kg NOx eq
FPMF	1,65E-04	1,84E-04	-1,09E-04	kg $PM_{2,5}$ eq
OFte	1,82E-04	2,43E-04	-6,34E-05	kg NOx eq
TA	4,01E-04	4,77E-04	-2,31E-04	kg SO_2 eq
FE	5,44E-05	5,80E-05	-1,10E-04	kg P eq
ME	3,96E-06	3,94E-06	-6,74E-06	kg N eq
TET	1,24E+00	1,25E+00	-1,20E-01	kg 1,4-DCB
FET	2,55E-02	2,46E-02	-5,27E-03	kg 1,4-DCB
MET	3,24E-02	3,14E-02	-6,90E-03	kg 1,4-DCB
HCT	1,29E-02	1,26E-02	-5,82E-03	kg 1,4-DCB
HNCT	3,48E-01	3,41E-01	-1,25E-01	kg 1,4-DCB
LU	9,97E-02	9,17E-02	-2,55E-03	m^2a crop eq
MRS	3,05E-03	3,01E-03	-5,12E-05	kg Cu eq
FRS	1,72E-02	4,38E-02	-1,61E-02	kg oil eq
WC	1,05E-03	1,47E-03	-3,20E-04	m^3

Πίνακας Α-3: Σύνοψη των επιπτώσεων μέσου σημείου που προήλθαν από το σύστημα PV+PCM και τη φωτοβολταϊκής διάταξης τυπικής διαμόρφωσης για την παραγωγή 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας, σε αντιπαραβολή με τον επικείμενο αντίκτυπο στις αντίστοιχες κατηγορίες λόγω της υποκατάστασης ηλεκτρικής ενέργειας από το ελληνικό ενεργειακό μείγμα.



Διάγραμμα Α-3: Κατανομή των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που προήλθαν από το σύστημα PV+PCM (PV panel with cooling) και τη φωτοβολταϊκής διάταξης τυπικής διαμόρφωσης (PV panel without cooling) στις 18 κατηγορίες του ReCiPe 2016, σε αντιπαραβολή με τον επικείμενο αντίκτυπο στις αντίστοιχες κατηγορίες λόγω της υποκατάστασης ηλεκτρικής ενέργειας



Διάγραμμα Α-4: Κατανομή των κανονικοποιημένων περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που προήλθαν από το σύστημα PV+PCM (PV panel with cooling) και τη φωτοβολταϊκής διάταξης τυπικής διαμόρφωσης (PV panel without cooling) στις 18 κατηγορίες του ReCiPe 2016, σε αντιπαραβολή με τον επικείμενο αντίκτυπο στις αντίστοιχες κατηγορίες λόγω της υποκατάστασης ηλεκτρικής ενέργειας.

Ακολούθως, η κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων της μελέτης κύκλου ζωής (LCA), τα οποία περιγράφουν τις επιπτώσεις μέσου σημείου (Πίνακας Α-3), έλαβε χώρα βάσει των παγκόσμιων συντελεστών κανονικοποίησης της ReCiPe 2016 (έτος αναφοράς 2010), έτσι ώστε να επιτευχθεί η βαθύτερη κατανόηση τους. Συμφώνα με τα ληφθέντα αποτελέσματα έπειτα από την εφαρμογή της κανονικοποίησης (Διάγραμμα Α-4), οι κατηγορίες επιπτώσεων μέσου σημείου που εμφανίζονται με μεγαλύτερη συμμετοχή των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών διατάξεων (σύστημα PV+PCM και συμβατικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο) ήταν η οικοτοξικότητα στους υδάτινους αποδέκτες, η καρκινογόνος και η μη καρκινογόνος τοξικότητα για τον άνθρωπο, καθώς επίσης και η οικοτοξικότητα του εδάφους. Εν αντιθέσει, η συμμετοχή των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών διατάξεων στις λοιπές κατηγορίες επιπτώσεων μέσου σημείου αναγνωρίζεται από πολύ χαμηλής έως αμελητέα.

Σε γενικές γραμμές, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια δεν παράγουν θόρυβο ή εκπομπές ρύπων κατά την περίοδο της λειτουργίας τους. Εντούτοις, η κατασκευή τους απαιτεί αξιόλογη κατανάλωση πρώτων υλών και ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η εγκατάσταση τους δύναται να επιφέρει σημαντικό αντίκτυπο στη χρήση γης [*Tsoutsos et al.*, 2005]. Ειδικότερα, η παραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων περιλαμβάνει κατεργασίες υψηλής έντασης ενέργειας, ενώ οι αυξημένες ποσότητες ορυκτών και μετάλλων (π.χ. πυρίτιο, κάδμιο και χαλκός) συνδέονται άμεσα με την εμφάνιση επιπτώσεων λόγω της εξόρυξης, της επεξεργασίας και περιορισμού της διαθεσιμότητας τους [*Tawalbeh et al.*, 2021]. Για τους παραπάνω λόγους, οι κανονικοποιημένες τιμές που εκφράζουν την υψηλή συμμετοχή των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών διατάξεων στις κατηγορίες επιπτώσεων οικοτοξικότητας δύναται να εντοπιστούν λόγω των βαρέων μετάλλων (π.χ. αρσενικό, κάδμιο, χρώμιο, μόλυβδος, υδράργυρος και νικέλιο) που εκπέμπονται στο περιβάλλον κατά τις διεργασίες παραγωγής των φωτοβολταϊκών επιστρώσεων (PV laminates) [*Tawalbeh et al.*, 2021]. Σε ό,τι αφορά τις κατηγορίες τοξικότητας για τον άνθρωπο, οι σχετικές κανονικοποιημένες τιμές σχετίζονται με τις εκπομπές από την αλυσίδα παραγωγής μεταλλικών προϊόντων [*Stamford* και *Azapagic*, 2018]. Πέραν αυτών, η κατασκευή και η διάθεση, μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους, των εξαρτημάτων που απαιτούνται για τη διαμόρφωση κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος (π.χ. αντιστροφέας τάσης, καλωδίωση, βάσεις στήριξης κ.λπ.) θεωρήθηκαν υπεύθυνες για την έκλυση τοξικών και καρκινογόνων ουσιών και ρύπων στον αέρα, το νερό και το έδαφος, αυξάνοντας περαιτέρω τη συμμετοχή των ελεγχόμενων φωτοβολταϊκών διατάξεων στις κατηγορίες επιπτώσεων οικοτοξικότητας [*Lunardi et al.*, 2018].

Συμπερασματικά, η συμμετοχή της ειδικής διάταξης ψύξης στις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις του συστήματος PV+PCM αναγνωρίστηκε περιορισμένη σε σχέση με τη συμμετοχή του φωτοβολταϊκού πλαισίου, ενώ ταυτόχρονα, η αυξημένη ενεργειακή παραγωγή εξαιτίας της χρήσης του PCM οδηγεί σε ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων όσον αφορά το μέγεθος του συστήματος PV+PCM βελτιώνοντας, κατ' αυτό τον τρόπο, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του. Για να γίνει πιο σαφές, η μείωση των απαιτήσεων εγκατεστημένης ισχύος του συστήματος PV+PCM σε σύγκριση με μια τυπική φωτοβολταϊκής διάταξη, ώστε να παραχθεί και 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας που αποδίδεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη φάση λειτουργίας, συμβάλλει σημαντικά για την εξοικονόμηση πόρων μέσω της μείωσης των απαιτήσεων που αφορούν τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος PV+PCM. Ως εκ τούτου, η συμμετοχή του συστήματος PV+PCM στις κατηγορίες επιπτώσεων μέσου σημείου που σχετίζονται σε υψηλότερο βαθμό με την παραγωγή φωτοβολταϊκών πλαισίων

(π.χ. MET, FET, HCT, HNCT και HT) είναι σαφώς περιορισμένη σε σχέση με την τυπική φωτοβολταϊκής διάταξη, ακόμη και στην περίπτωση που δεν λαμβάνονται υπόψη τα περιβαλλοντικά οφέλη από την υποκατάσταση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του ενεργειακού συστήματος της Ελλάδας, το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλή εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα (Διάγραμμα Α-4). Σημειώνεται δε, ότι η συμπερίληψη του περιβαλλοντικού αντικτύπου λόγω της υποκατάστασης της συμβατικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, τότε οι κανονικοποιημένες τιμές για τη συμμετοχή του συστήματος PV+PCM στις κατηγορίες επιπτώσεων MET, FET, HCT, HNCT και HT μειώνονται περαιτέρω, υποδεικνύοντας τις θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την ενεργειακής μετάβαση προς ένα παραγωγικό σύστημα με αυξημένο μερίδιο των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας.

Α.3.2 ReCiPe σε επίπεδο τελικού σημείου

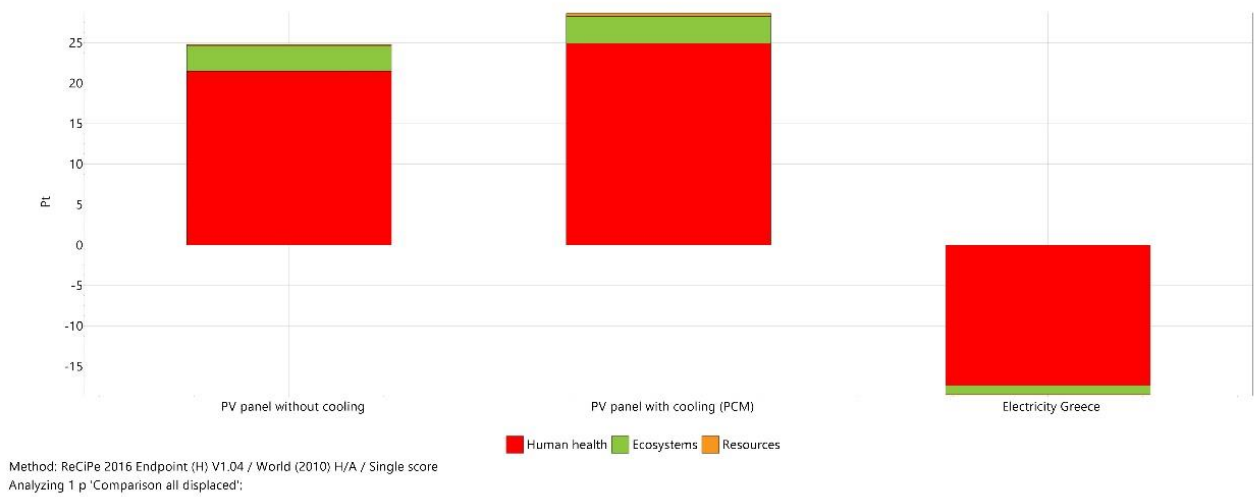
Στην παρούσα ενότητα, η συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων που εκφράζουν τον αντίκτυπο του συστήματος PV+PCM και της συμβατικής φωτοβολταϊκής διάταξης στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής, βασισμένη στην απλοποιημένη μέθοδο αξιολόγησης όπου η επιβάρυνση ταξινομείται σε τρείς (3) κατηγορίες βλαβών (σε επίπεδο τελικού σημείου) του ReCiPe, δηλαδή την βλάβη στην ανθρώπινη υγεία, την ποιότητα του οικοσυστήματος και τη σπανιότητα των πόρων. Όπως διακρίνεται στο Διάγραμμα Α-5, η ενσωμάτωση της διάταξης ψύξης (με χρήση PCM) δεν συνεπάγεται αξιόλογη μείωση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας του φωτοβολταϊκού πλαισίου, καθώς το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συστήματος PV+PCM εκτιμήθηκε υψηλότερο κατά 11,7% από το αποτύπωμα του τυπικού φωτοβολταϊκού πλαισίου. Σαφώς, η σχετική αύξηση ανακύπτει λόγω της διάταξης ψύξης με PCM (συνεισφορά 18,2% στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συστήματος PV+PCM) και αποδίδεται, πρωτίστως, στη χρησιμοποίηση της παραφίνης (10,4%), και δευτερευόντως, στην εφαρμογή της κατασκευασμένης από ανοξείδωτο χάλυβα ειδικής διάταξη αποθήκευσης του PCM (6,4% συνεισφορά στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα PV+PCM). Ακόμη, οι μεταφορές που θεωρήθηκαν κατά την απογραφή του κύκλου ζωής για το σύστημα PV+PCM και το συμβατικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο είχαν ιδιαιτέρως μικρή συμμετοχή (≤0,5%) στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα τους, με τη σχετική παρατήρηση να συμβαδίζει με τη βιβλιογραφία [*Tsoutsos et al.*, 2005], ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι οι εκπομπές που προέρχονται κατά τη μεταφορά των φωτοβολταϊκών πλαισίων στη θέση εγκατάστασης αναγνωρίζονται αμελητέες συγκριτικά με τις εκπομπές που προκύπτουν κατά την παραγωγή φωτοβολταϊκών μονάδων [*Tawalbeh et al.*, 2021]. Επιπλέον, μεταξύ των τριών κατηγοριών βλαβών που θέτουν τη βάση της αξιολόγησης τελικού σημείου, η επιβάρυνση στην ανθρώπινη υγεία, εντός της οποίας συγκαταλέγονται η εμφάνιση νοσημάτων του αναπνευστικού συστήματος, σοβαρών ασθενειών και υποσιτισμού, εντοπίζεται ως κύρια τόσο στην περίπτωση του συστήματος PV+PCM όσο και στην περίπτωση του τυπικού φωτοβολταϊκού πλαισίου [*Huijbregts et al.*, 2016], με τις εκτιμώμενες τιμές να υποδεικνύουν το αθροιστικό αποτέλεσμα των κύριων κατηγοριών περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων μέσου σημείου για την τοξικότητα για τον άνθρωπο (καρκινογόνες και μη καρκινογόνες). Επίσης, η καλωδίωση και, σε μικρότερο βαθμό, ο αντιστροφέας τάσης παρουσιάζουν συμμετοχή σε αυτήν την κατηγορία βλάβης εξαιτίας των επιμέρους

εξαρτημάτων χαλκού που διαθέτουν καθότι οι εκπομπές (βαρέων) μετάλλων και άλλων τοξικών ρύπων (κυρίως λόγω διαρροών από τα απορριφθέντα υπολείμματα ορυχείων χαλκού, κ.α.) που προέκυψαν κατά την εξόρυξη και επεξεργασία συνδέονται με την εμφάνιση τοξικότητας στους ανθρώπους [*Arvesen et al.*, 2014]. Ας σημειωθεί ακόμη ότι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συστήματος PV+PCM, αυξημένο κατά 11,7% σε σχέση με το τυπικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο, εκφράζεται κυρίως ως επιβάρυνση στην κατηγορία βλαβών για την ανθρώπινη υγεία, με την παραφίνη (PCM) και τον ανοξείδωτο χάλυβα (ειδική διάταξη αποθήκευσης PCM) να κατέχουν σημαντική συμμετοχή ως προς αυτό το αποτέλεσμα. Εν αντιθέσει, η διαδικασία συγκόλλησης των μεταλλικών τμημάτων και η μεταφοράς τους μέχρι την τελική θέση εγκατάστασης χαρακτηρίζεται από αμελητέα συνεισφορά στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα του προτεινόμενου συστήματος.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η εξόρυξη σιδηρομεταλλεύματος και η παραγωγή προϊόντων χάλυβα, η οποία περιλαμβάνει κατεργασίες υψηλής έντασης ενέργειας και προϋποθέτει την αυξημένη κατανάλωση ορυκτών καυσίμων, σχετίζονται άμεσα και έμμεσα με την έκλυση τοξικών ρύπων και την εξάντληση ορυκτών πόρων επιφέροντας την ανάλογη επιβάρυνση στις κατηγορίες επιπτώσεων τοξικότητας. Πέραν αυτών, οι σχετικές απαιτήσεις της διαδικασίας για την παραγωγή της παραφίνης, η οποία εξαρτάται από την κατανάλωση ορυκτών ενεργειακών πόρων σε διαφορετικά επίπεδα, δυνητικά προκαλεί σημαντικές βλάβες στην κατηγορία για την ποιότητα του οικοσυστήματος εκφράζοντας τις σχετικές επιβαρύνσεις στα υδάτινα και χερσαία οικοσυστήματα ως αυξημένες τιμές συμμετοχής στις κατηγορίες για την οικοτοξικότητα. Ωστόσο, το συνολικό αποτύπωμα του συστήματος PV+PCM στο περιβάλλον παρουσιάζει σημαντική μείωση (περίπου 46,6%) λόγω του περιορισμού εκπομπής ρύπων που ανακύπτει μέσω της υποκατάστασης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το ενεργειακό σύστημα της Ελλάδας (με υψηλή εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα). Εκτός αυτού, η υιοθέτησή της ορθής βάσης συγκριτικής αξιολόγησης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, που συνεπάγεται η παραγωγή 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα PV+PCM και την τυπική φωτοβολταϊκή διάταξη, προϋποθέτει την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος της συμβατικής διαμόρφωσης και, κατ' επέκταση των αντίστοιχών μερών της, κατά 9,37%. Επομένως, οι σχετικές εισροές και εκροές για την κατασκευή και την αποικοδόμηση της συμβατικής φωτοβολταϊκής διάταξης θεωρήθηκαν ελαφρώς υψηλότερες, ενώ ελήφθησαν υπόψη οι σχετικά αυξημένες απαιτήσεις για χρήση γης καθώς επίσης η αλλαγή χρήσης γης. Τελικά, το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του εξεταζόμενου συστήματος PV+PCM για την παραγωγή 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία υποκαθιστά αντίστοιχο ποσό ενέργειας από το συμβατικό ενεργειακό σύστημα, αποτιμήθηκε κατά 40,4% χαμηλότερο σε σχέση με το ανάλογο αποτύπωμα της φωτοβολταϊκής διάταξης.

Συνολικά, η ενσωμάτωση της ειδικής διάταξης ψύξης με χρήση PCM επισημάνθηκε ως επωφελής για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των φωτοβολταϊκών πλαισίων όσον αφορά τη χρήση γης, δεδομένου ότι αποφεύγεται η εκτεταμένη αλλαγή της στο πλαίσιο της αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Επιπλέον, η υποκατάσταση της χρήσης ορυκτών καυσίμων μέσω της αποδοτικής αξιοποίησης της ηλιακής ενεργείας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να καταφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη τόσο σε εθνικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Ειδικότερα, όπως παρατηρήθηκε στο Διάγραμμα Α-5, το πρόσθετο περιβαλλοντικό αποτύπωμα που προκύπτει λόγω της ειδικής διάταξης ψύξης με χρήση PCM αντισταθμίζεται κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος PV+PCM, ενώ η σχετική

εφαρμογή αναμένεται να συμβάλλει για την επίτευξη περιβαλλοντικών κερδών λόγω του περιορισμού της χρήσης ορυκτών ενεργειακών πόρων. Συμπερασματικά, η αντιστάθμιση του επιπρόσθετου περιβαλλοντικού αποτυπώματος, το οποίο ανακύπτει για το σύστημα PV+PCM λόγω της ένθετης διάταξης ψύξης, απαιτεί περίπου πέντε (5) έτη έπειτα από την αρχική εγκατάσταση του, ενώ τα αναμενόμενα περιβαλλοντικά κέρδη για το υπόλοιπο της ωφέλιμης διάρκειας ζωής του (20 έτη) καταγράφονται αυξημένα σε σχέση με την τυπική φωτοβολταϊκή διάταξη. Υπό αυτή την έννοια, η ενσωμάτωση PCM σε φωτοβολταϊκά πλαίσια ως μέσο ψύξης, η οποία δύναται να συμβάλλει σε διαφορετικά επίπεδα για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, μπορεί να αναγνωριστεί ως μια περιβαλλοντικά βιώσιμη οδός για την αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Κοντά σ' αυτή τη διαπίστωση, αξίζει να επισημανθεί ότι οι εφαρμογές ψύξης για φωτοβολταϊκά συστήματα συνιστούν ένα βιώσιμο τρόπο αντιμετώπισης των επιπτώσεων της υπερθέρμανσης του πλανήτη, λόγω της κλιματικής αλλαγής, στην παραγωγή ηλιακής ενέργειας, μέσω της μετριασμού των ακραίων διακυμάνσεων της θερμοκρασίας λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Διάγραμμα Α-5: Σχηματική απεικόνιση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του συστήματος PV+PCM, του συμβατικού φωτοβολταϊκού πλαισίου και της υποκατάστασης της παραγωγής ηλεκτρισμού.

Α.4 Συμπεράσματα

Η περιβαλλοντική απόδοση ενός ολοκληρωμένου συστήματος PV+PCM χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA) διερευνήθηκε επισταμένως. Για το σκοπό αυτό, συλλέχθηκαν τα κατάλληλα δεδομένα για τη διαμόρφωση του καταλόγου απογραφής κύκλου ζωής (LCI) αναφορικά με ένα σύστημα PV+PCM, το οποίο κατασκευάστηκε και λειτουργεί στην Κρήτη, υπό τις κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου. Σύμφωνα με τα ληφθέντα αποτελέσματα, το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συστήματος PV+PCM εκτιμήθηκε υψηλότερο κατά 11,7% έναντι του αποτυπώματος ενός τυπικού φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η ενσωμάτωση του συστήματος ψύξης PCM σχετίζεται με ένα αρχικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, καθώς αυξάνει το συνολικό αποτύπωμα της φωτοβολταϊκής μονάδας κατά περίπου 11,7%. Ωστόσο, η ψύξη βελτιώνει σημαντικά την παραγωγή

ηλεκτρικής ενέργειας και δύναται να επιτύχει μειωμένες τιμές στις κατηγορίες επιπτώσεων μέσου σημείου που επηρεάζονται περισσότερο από την τεχνολογία φωτοβολταϊκών, δηλαδή, κατηγορίες οικοτοξικότητας και τοξικότητας. το συνολικό αποτύπωμα του συστήματος PV+PCM στο περιβάλλον παρουσιάζει σημαντική μείωση (περίπου 46,6%) λόγω του περιορισμού εκπομπής ρύπων που ανακύπτει μέσω της υποκατάστασης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το ενεργειακό σύστημα της Ελλάδας (με υψηλή εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα). Επομένως, αποδεικνύεται ότι τα περιβαλλοντικά κέρδη λόγω της αυξημένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δύναται να αντισταθμίσουν το αρχικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα για την ενσωμάτωση της διάταξης ψύξης (με χρήση PCM) σε περίπου πέντε (5) έτη, οδηγώντας συνολικά σε σημαντικά οφέλη έως το τέλος της ωφέλιμης διάρκειας ζωής του συστήματος PV+PCM.

A.5 Βιβλιογραφία

1. Ajayan J, Nirmal D, Mohankumar P, Saravanan M, Jagadesh M, Arivazhagan L. A review of photovoltaic performance of organic/inorganic solar cells for future renewable and sustainable energy technologies. Superlattices Microstruct 2020;143:106549. https://doi.org/10.1016/j.spmi.2020.106549.

2. Ali HM. Recent advancements in PV cooling and efficiency enhancement integrating phase change materials based systems – A comprehensive review. Sol Energy 2020;197:163–98. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.075.

3. Arvesen A, Nes RN, Huertas-Hernando D, Hertwich EG. Life cycle assessment of an offshore grid interconnecting wind farms and customers across the North Sea. Int J Life Cycle Assess 2014;19:826–37. https://doi.org/10.1007/s11367-014-0709-2.

4. Awasthi A, Shukla AK, Murali Manohar SR, Dondariya C, Shukla KN, Porwal D, et al. Review on sun tracking technology in solar PV system. Energy Reports 2020;6:392–405. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.02.004.

5. BP. Statistical Review of World Energy globally consistent data on world energy markets . 2020:66.

6. Cellura M, Ciulla G, Lo Brano V, Marvuglia A, Orioli A. A photovoltaic panel coupled with a Phase Changing Material heat storage system in hot climates. PLEA 2008 - Towar Zero Energy Build 25th PLEA Int Conf Passiv Low Energy Archit Conf Proc 2008:22–7.

7. Chaibi Y, El Rhafiki T, R. Simón-Allué, I. Guedea, Luaces SC, Gajate OC, et al. Air-based hybrid Photovoltaic/Thermal systems: A review. J Clean Prod 2021;295:126211. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126211.

8. Chandrasekar M, Rajkumar S, Valavan D. A review on the thermal regulation techniques for non integrated flat PV modules mounted on building top. Energy Build 2015;86:692–7. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.071.

9. Cumbul Altay M, Sivri N, Onat B, Ahin Ü, Zoraa M, Fatih Altay H. Recycle of metals for end-of-life vehicles (ELVs) and relation to Kyoto protocol. Renew Sustain Energy Rev 2011;15:2447–51. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.017.

10. Foteinis S, Hatzisymeon M, Borthwick AGL, Chatzisymeon E. Environmental impacts of conventional versus organic eggplant cultivation systems: Influence of electricity mix, yield, over-fertilization, and transportation. Environ - MDPI 2021;8. https://doi.org/10.3390/environments8030023.

11. Freund, M., 1982. II. Manufacture of Paraffin Waxes and Ceresins from Petroleum. pp. 141–239. https://doi.org/10.1016/S0376-7361(08)70147-X

12. Fthenakis VM, Kim HC. Photovoltaics: Life-cycle analyses. Sol Energy 2011;85:1609–28. https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.002.

13. Haque, N., 2020. The Life Cycle Assessment of Various Energy Technologies, in: Future

Energy. Elsevier, pp. 633–647. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00029-3

14. Hasapis D, Savvakis N, Tsoutsos T, Kalaitzakis K, Psychis S, Nikolaidis NP. Design of large scale prosuming in Universities: The solar energy vision of the TUC campus. Energy Build 2017;141:39–55. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.074.

15. Huijbregts M, Steinmann ZJN, Elshout PMFM, Stam G, Verones F, Vieira MDM, et al. ReCiPe 2016. Natl Inst Public Heal Environ 2016:194.

16. Huijbregts MAJ, Steinmann ZJN, Elshout PMF, Stam G, Verones F, Vieira M, et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Int J Life Cycle Assess 2017;22:138–47. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y.

17. Ilias A V., Meletios RG, Yiannis KA, Nikolaos B. Integration & assessment of recycling into c-Si photovoltaic module's life cycle. Int J Sustain Eng 2018;11:186–95. https://doi.org/10.1080/19397038.2018.1428833.

18. Ioannou-Ttofa L, Foteinis S, Chatzisymeon E, Michael-Kordatou I, Fatta-Kassinos D. Life cycle assessment of solar-driven oxidation as a polishing step of secondary-treated urban effluents. J Chem Technol Biotechnol 2017;92:1315–27. https://doi.org/10.1002/jctb.5126.

19. Jean J, Brown PR, Jaffe RL, Buonassisi T, Bulović V. Pathways for solar photovoltaics. Energy Environ Sci 2015;8:1200–19. https://doi.org/10.1039/c4ee04073b.

20. Kandeal AW, Thakur AK, Elkadeem MR, Elmorshedy MF, Ullah Z, Sathyamurthy R, et al. Photovoltaics performance improvement using different cooling methodologies: A state-of-art review. J Clean Prod 2020;273:122772. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122772.

21. Kant K, Shukla A, Sharma A, Biwole PH. Heat transfer studies of photovoltaic panel coupled with phase change material. Sol Energy 2016;140:151–61. https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.006.

22. Karthick A, Murugavel KK, Ramanan P. Performance enhancement of a building-integrated photovoltaic module using phase change material. Energy 2018;142:803–12. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.090.

23. Klemm T, Hassabou A, Abdallah A, Andersen O. Thermal energy storage with phase change materials to increase the efficiency of solar photovoltaic modules. Energy Procedia 2017;135:193–202. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.502.

24. Landi D, Germani M, Marconi M. Analyzing the environmental sustainability of glass bottles reuse in an Italian wine consortium. Procedia CIRP 2019;80:399–404. https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.054.

25. Lunardi MM, Alvarez-Gaitan JP, Bilbao JI, Corkish R. Comparative life cycle assessment of end-of-life silicon solar photovoltaic modules. Appl Sci 2018;8. https://doi.org/10.3390/app8081396.

26. Leip A, Uwizeye A. Nitrogen Footprints. Encycl Ecol 2019:370–82. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10753-5.

27. Mavromatakis F, Kavoussanaki E, Vignola F, Franghiadakis Y. Measuring and estimating the temperature of photovoltaic modules. Sol Energy 2014;110:656–66. https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.10.009.

28. Nazir H, Batool M, Bolivar Osorio FJ, Isaza-Ruiz M, Xu X, Vignarooban K, et al. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. Int J Heat Mass Transf 2019;129:491–523. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.126.

29. Nieuwlaar E. Life Cycle Assessment and Energy Systems. Ref Modul Earth Syst Environ Sci 2013;3:647–54. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.01334-8.

30. Nižetić S, Papadopoulos AM, Giama E. Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part I: Passive cooling techniques. Energy Convers Manag 2017;149:334–54. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.022.

31. Norgate TE, Jahanshahi S, Rankin WJ. Assessing the environmental impact of metal production processes. J Clean Prod 2007;15:838–48. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.06.018.

32. NREL. Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart | Photovoltaic Research | NREL. Natl Renew Energy Lab 2020..

33. Olmez GM, Dilek FB, Karanfil T, Yetis U. The environmental impacts of iron and steel industry: A life cycle assessment study. J Clean Prod 2016;130:195–201. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.139.

34. Papadaki D, Foteinis S, Binas V, Assimakopoulos MN, Tsoutsos T, Kiriakidis G. A life cycle assessment of PCM and VIP in warm Mediterranean climates and their introduction as a strategy to promote energy savings and mitigate carbon emissions. AIMS Mater Sci 2019;6:944–59. https://doi.org/10.3934/matersci.2019.6.944.

35. Pause B. Phase change materials and their application in coatings and laminates for textiles. Smart Text Coatings Laminates 2019:175–87. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102428-7.00008-0.

36. Peters IM, Buonassisi T. The impact of global warming on silicon PV energy yield in 2100. ArXiv 2019:3179–81.

37. Power FS. AI in Emerging Markets 2020:140–67. https://doi.org/10.4018/978-1-7998-4607-9.ch006.

38. Royo P, Ferreira VJ, López-Sabirón AM, Ferreira G. Hybrid diagnosis to characterise the energy and environmental enhancement of photovoltaic modules using smart materials. Energy 2016;101:174–89. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.101.

39. Santhakumari M, Sagar N. A review of the environmental factors degrading the performance of silicon wafer-based photovoltaic modules: Failure detection methods and essential mitigation techniques. Renew Sustain Energy Rev 2019;110:83–100. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.024.

40. Savvakis N, Dialyna E, Tsoutsos T. Investigation of the operational performance and efficiency of an alternative PV + PCM concept. Sol Energy 2020;211:1283–300. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.053.

41. Savvakis N, Tsoutsos T. Performance assessment of a thin film photovoltaic system under actual Mediterranean climate conditions in the island of Crete. Energy 2015;90:1435–55. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.098.

42. Savvakis N, Tsoutsos T. Theoretical design and experimental evaluation of a PV+PCM system in the mediterranean climate. Energy 2021;220:119690. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119690.

43. Siecker J, Kusakana K, Numbi BP. A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. Renew Sustain Energy Rev 2017;79:192–203. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.053.

44. Stamford L, Azapagic A. Environmental Impacts of Photovoltaics: The Effects of Technological Improvements and Transfer of Manufacturing from Europe to China. Energy Technol 2018;6:1148–60. https://doi.org/10.1002/ente.201800037.

45. Tao M, Zhenpeng L, Jiaxin Z. Photovoltaic panel integrated with phase change materials (PV-PCM): technology overview and materials selection. Renew Sustain Energy Rev 2019;116. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109406.

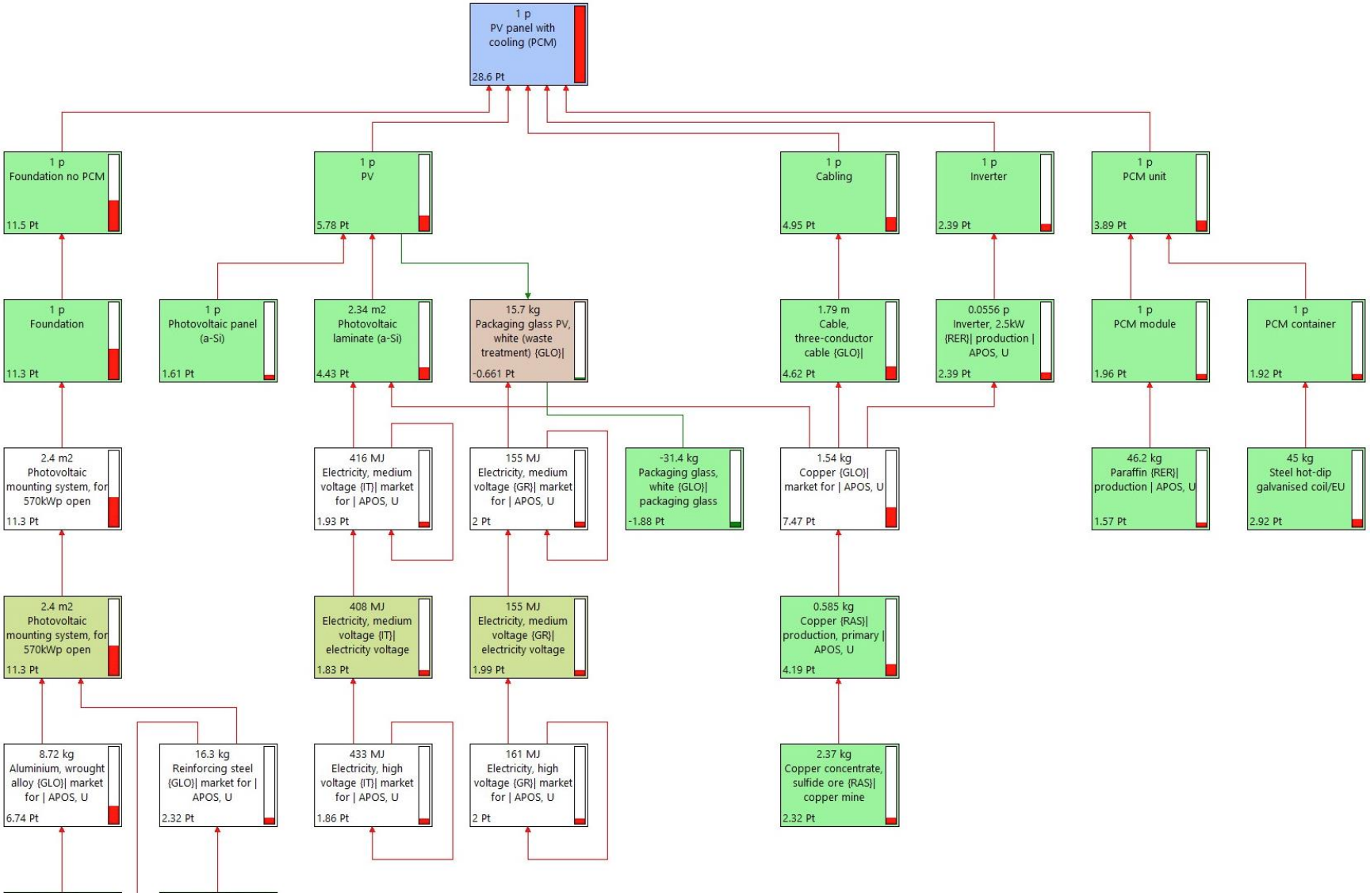
46. Tawalbeh M, Al-Othman A, Kafiah F, Abdelsalam E, Almomani F, Alkasrawi M. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. Sci Total Environ 2021;759. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528.

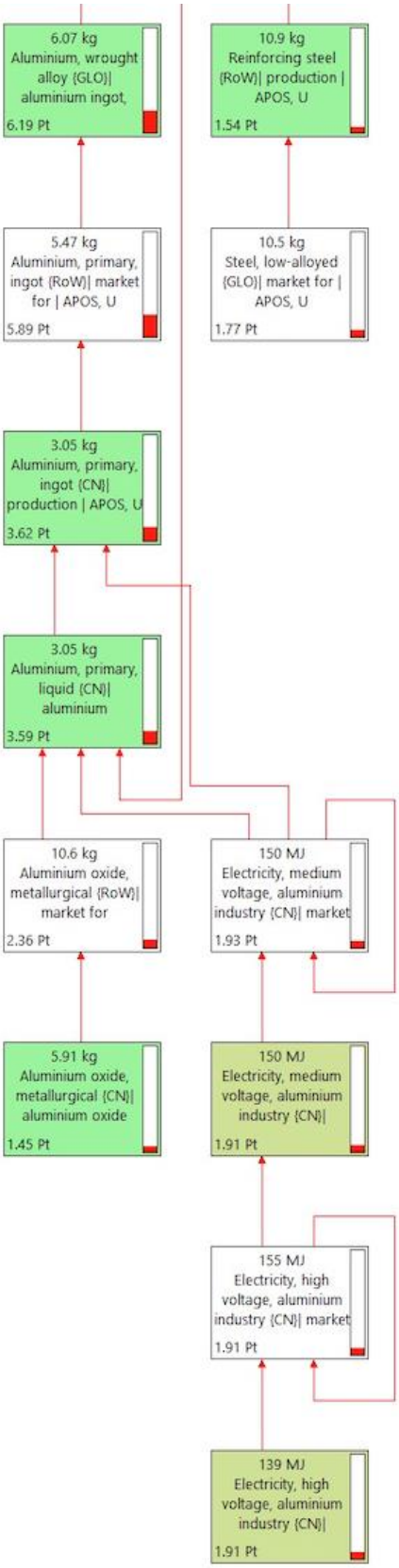
47. Tsoutsos T, Frantzeskaki N, Gekas V. Environmental impacts from the solar energy technologies. Energy Policy 2005;33:289–96. https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00241-6.

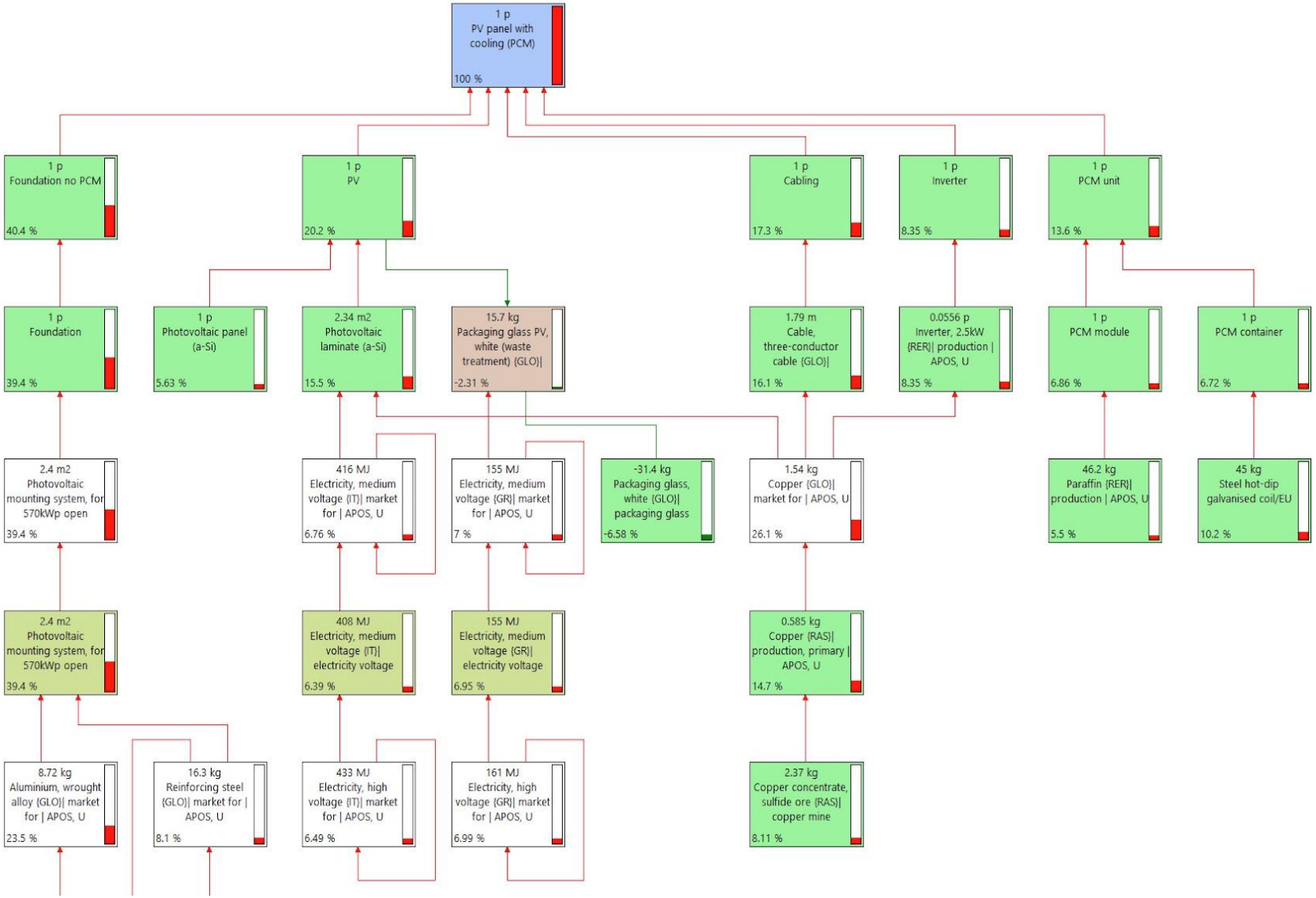
48. Waqas A, Ji J, Xu L, Ali M, Zeashan, Alvi J. Thermal and electrical management of photovoltaic panels using phase change materials - A review. Renew Sustain Energy Rev 2018;92:254–71. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.091.

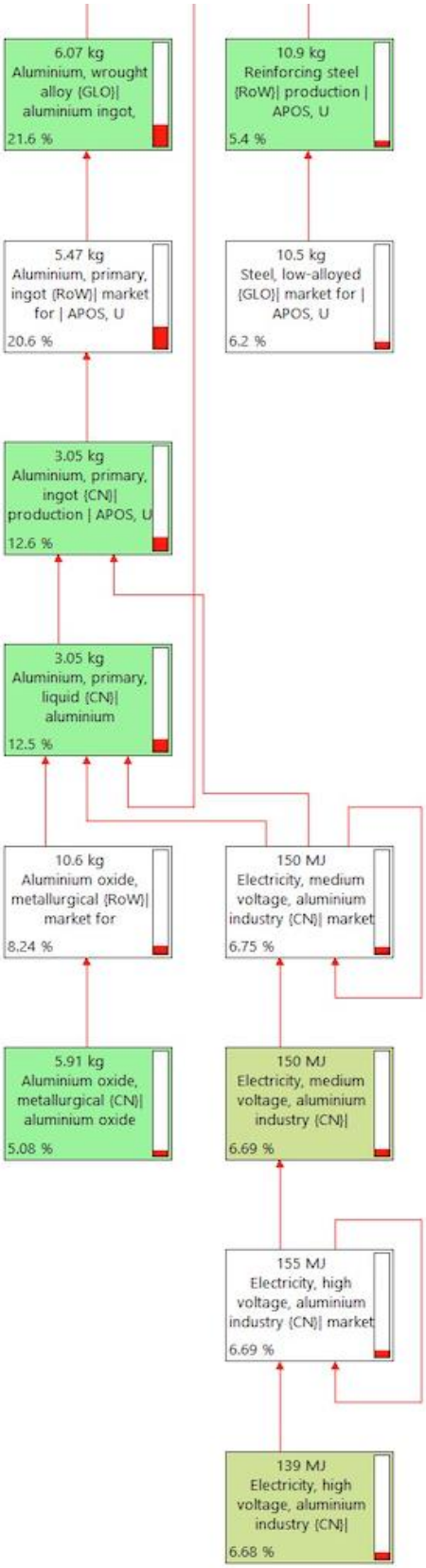
49. Wu, Y., Su, D., 2020. Review of Life Cycle Impact Assessment (LCIA) Methods and Inventory Databases, in: Sustainable Product Development. Springer International Publishing, Cham, pp. 39–55. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39149-2_3

A.6 Συμπληρωματικά στοιχεία




6.07 kg
Aluminium, wrought alloy {GLO}| aluminium ingot,
6.19 Pt
10.9 kg
Reinforcing steel {RoW}| production | APOS, U
1.54 Pt
5.47 kg
Aluminium, primary, ingot {RoW}| market for | APOS, U
5.89 Pt
10.5 kg
Steel, low-alloyed {GLO}| market for | APOS, U
1.77 Pt
3.05 kg
Aluminium, primary, ingot {CN}| production | APOS, U
3.62 Pt
3.05 kg
Aluminium, primary, liquid {CN}| aluminium
3.59 Pt
10.6 kg
Aluminium oxide, metallurgical {RoW}| market for
2.36 Pt
150 MJ
Electricity, medium voltage, aluminium industry {CN}| market
1.93 Pt
5.91 kg
Aluminium oxide, metallurgical {CN}| aluminium oxide
1.45 Pt
150 MJ
Electricity, medium voltage, aluminium industry {CN}|
1.91 Pt
155 MJ
Electricity, high voltage, aluminium industry {CN}| market
1.91 Pt
139 MJ
Electricity, high voltage, aluminium industry {CN}|
1.91 Pt


1 p
PV panel with cooling (PCM)
100 %
1 p
Foundation no PCM
40.4 %
1 p
PV
20.2 %
1 p
Cabling
17.3 %
1 p
Inverter
8.35 %
1 p
PCM unit
13.6 %
1 p
Foundation
39.4 %
1 p
Photovoltaic panel (a-Si)
5.63 %
2.34 m2
Photovoltaic laminate (a-Si)
15.5 %
15.7 kg
Packaging glass PV, white (waste treatment) {GLO}|
-2.31 %
1.79 m
Cable, three-conductor cable {GLO}|
16.1 %
0.0556 p
Inverter, 2.5kW {RER}| production | APOS, U
8.35 %
1 p
PCM module
6.86 %
1 p
PCM container
6.72 %
2.4 m2
Photovoltaic mounting system, for 570kWp open
39.4 %
416 MJ
Electricity, medium voltage {IT}| market for | APOS, U
6.76 %
155 MJ
Electricity, medium voltage {GR}| market for | APOS, U
7 %
-31.4 kg
Packaging glass, white {GLO}| packaging glass
-6.58 %
1.54 kg
Copper {GLO}| market for | APOS, U
26.1 %
46.2 kg
Paraffin {RER}| production | APOS, U
5.5 %
45 kg
Steel hot-dip galvanised coil/EU
10.2 %
2.4 m2
Photovoltaic mounting system, for 570kWp open
39.4 %
408 MJ
Electricity, medium voltage {IT}| electricity voltage
6.39 %
155 MJ
Electricity, medium voltage {GR}| electricity voltage
6.95 %
0.585 kg
Copper {RAS}| production, primary | APOS, U
14.7 %
8.72 kg
Aluminium, wrought alloy {GLO}| market for | APOS, U
23.5 %
16.3 kg
Reinforcing steel {GLO}| market for | APOS, U
8.1 %
433 MJ
Electricity, high voltage {IT}| market for | APOS, U
6.49 %
161 MJ
Electricity, high voltage {GR}| market for | APOS, U
6.99 %
2.37 kg
Copper concentrate, sulfide ore {RAS}| copper mine
8.11 %


6.07 kg
Aluminium, wrought alloy {GLO}| aluminium ingot,
21.6 %
10.9 kg
Reinforcing steel {RoW}| production | APOS, U
5.4 %
5.47 kg
Aluminium, primary, ingot {RoW}| market for | APOS, U
20.6 %
10.5 kg
Steel, low-alloyed {GLO}| market for | APOS, U
6.2 %
3.05 kg
Aluminium, primary, ingot {CN}| production | APOS, U
12.6 %
3.05 kg
Aluminium, primary, liquid {CN}| aluminium
12.5 %
10.6 kg
Aluminium oxide, metallurgical {RoW}| market for
8.24 %
150 MJ
Electricity, medium voltage, aluminium industry {CN}| market
6.75 %
5.91 kg
Aluminium oxide, metallurgical {CN}| aluminium oxide
5.08 %
150 MJ
Electricity, medium voltage, aluminium industry {CN}|
6.69 %
155 MJ
Electricity, high voltage, aluminium industry {CN}| market
6.69 %
139 MJ
Electricity, high voltage, aluminium industry {CN}|
6.68 %

Έτος Λειτουργίας	Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (DC) ανά μονάδα		Επιφάνεια	Απόδοση μετατροπέα	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (AC) ανά μονάδα	
		ΦΒ αναφοράς	**Σύστημα PV+PCM**			**ΦΒ αναφοράς**	**Σύστημα PV+PCM**
	(kWh/m^2/d)	(kWh)	(kWh)	(m^2)		(kWh)	(kWh)
1	1900	**202,67**	**215,1**	1,4	0,95	**193**	**204**
2	1900	201,45	214,02	1,4	0,95	191	203
3	1900	200,25	212,95	1,4	0,95	190	202
4	1900	199,04	211,89	1,4	0,95	189	201
5	1900	197,85	210,83	1,4	0,95	188	200
6	1900	196,66	209,78	1,4	0,95	187	199
7	1900	195,48	208,73	1,4	0,95	186	198
8	1900	194,31	207,68	1,4	0,95	185	197
9	1900	193,14	206,65	1,4	0,95	183	196
10	1900	191,98	205,61	1,4	0,95	182	195
11	1900	190,06	204,58	1,4	0,95	181	194
12	1900	188,16	203,56	1,4	0,95	179	193
13	1900	186,28	202,54	1,4	0,95	177	192
14	1900	184,42	201,53	1,4	0,95	175	191
15	1900	182,58	200,52	1,4	0,95	173	190
16	1900	180,75	199,52	1,4	0,95	172	190
17	1900	178,94	198,52	1,4	0,95	170	189
18	1900	177,15	197,53	1,4	0,95	168	188
19	1900	175,38	196,54	1,4	0,95	167	187
20	1900	173,63	195,56	1,4	0,95	165	186
21	1900	171,89	194,58	1,4	0,95	163	185
22	1900	170,17	193,61	1,4	0,95	162	184
23	1900	168,47	192,64	1,4	0,95	160	183
24	1900	166,79	191,68	1,4	0,95	158	182
25	1900	165,12	190,72	1,4	0,95	157	181
Σύνολο		**4632,65**	**5066,89**			**4401**	**4814**