



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

*Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Δυναμική προσομοίωση συνδυασμένων συστημάτων αντλίας θερμότητας με φωτοβολταϊκά και εφαρμογή στην οικιακή θέρμανση»

Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας

Γκαμηλιάρη Π. Αγγελικής
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και
Μηχανικός Υπολογιστών

Επιβλέπων

Εμμανουήλ Κακαράς, Καθηγητής,
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Δυναμική προσομοίωση συνδυασμένων συστημάτων αντλίας θερμότητας με φωτοβολταϊκά και εφαρμογή στην οικιακή θέρμανση»

Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας

Γκαμηλιάρη Π. Αγγελικής
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και
Μηχανικός Υπολογιστών

Επιβλέπων

Εμμανουήλ Κακαράς, Καθηγητής,
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εκπονήθηκε το ακαδημαϊκό έτος 2018-2019 υπό την αιγίδα του τομέα Θερμότητας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου .

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Εμμανουήλ Κακαρά για την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο πρόσωπο μου ,δίνοντας μου την δυνατότητα ν ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα ,καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Ευστράτιο Βαρβαγιάννη ,χωρίς την βοήθεια του οποίου θα ήταν δύσκολο να φέρω εις πέρας αυτή την εργασία.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους για την υπομονή και την συμπαράσταση που έδειξαν όλη την περίοδο φοίτησης στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο .

Copyright Γκαμηλιάρη Π. Αγγελική , 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία συνίσταται στη χρήση δυναμικών μοντέλων για την προσομοίωση συνδυασμένων συστημάτων αντλίας θερμότητα με φωτοβολταϊκά πάνελ που παρέχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Θα προηγηθεί βιβλιογραφική ανασκόπηση αντίστοιχων συστημάτων, που αποσκοπεί στην διαμόρφωση της τελικής διάταξης του συστήματος αλλά και στα πιθανά σενάρια λειτουργίας του, τα οποία θα καθορίσουν και την αποδοτικότερη στρατηγική ελέγχου, ώστε να καλυφθούν οι ωριαίες ενεργειακές απαιτήσεις μία τυπικής κατοικίας στην Ελλάδα.

Κύριος στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων για τον βέλτιστο σχεδιασμό και έλεγχο αντίστοιχων εγκαταστάσεων με κριτήριο την αύξηση της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με τη χρήση Φ/Β πάνελ στον οικιακό τομέα και η αποδοτικότερη εκμετάλλευση υβριδικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Κατανάλωση ενέργειας, εξοικονόμηση ενέργειας, κτίριο σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης, αντλία θερμότητας, δοχείο αποθήκευσης θερμότητας (θερμοδοχείο), φωτοβολταϊκό κελί, φωτοβολταϊκή διάταξη, αλγόριθμος εύρεσης βέλτιστου σημείου λειτουργίας, Modelica, ισοζύγια ισχύος, συντελεστής απόδοσης αντλίας θερμότητας

ABSTRACT

The present thesis focuses on the use of dynamic models to simulate the combination of a heat pump systems and photovoltaic panels with the ability of electricity and heat storing. Extensive bibliographic review of systems related to the structure of the newly proposed system and its operating scenarios are reported. Also, the most efficient control strategies to meet the hourly energy requirements of a typical home in Greece are determined.

The main objective of this thesis is to export conclusions for the optimal design and control of similar installations aiming for a wider penetration of renewable energy sources in an average household using PV panels and the efficient exploitation of hybrid energy storage systems.

KEY WORDS

Energy consumption, energy saving, nearly Zero Emission Building (nZEB), Heat pump, water tank, photovoltaic cell, photovoltaic array, Maximum Power Point Tracking algorithm (MPPT), Modelica, energy balance, Coefficient of performance

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 ^ο	13
1.1 Εισαγωγή	13
1.2 Κτίρια σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης (nearly Zero Emission Buildings - nZEB)	13
1.3 Δομές κτιρίων σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης και εφαρμογή τους στην παρούσα μελέτη	15
Κεφάλαιο 2 ^ο – Περιγραφή διατάξεων	19
2.1 Εισαγωγή	19
2.1.1 Πρώτη τοπολογία	19
2.1.2 Δεύτερη τοπολογία	20
2.1.3 Τρίτη τοπολογία	21
2.2 Μηχανολογικά τμήματα διάταξης	22
2.2.1 Το κτίριο αναφοράς	22
2.2.2 Οι αντλίες ροής	24
2.2.3 Η αντλία θερμότητας	25
2.2.4 Τερματικό σώμα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας (Fan Coil Unit-FCA)	30
2.2.5 Θερμοδοχείο	30
2.3 Ηλεκτρολογικά τμήματα διάταξης	31
2.3.1 Φωτοβολταϊκά πάνελ	31
2.3.2 Οι διατάξεις ισχύος του ΦΒ	38
Κεφάλαιο 3 ^ο – Ανάπτυξη μοντέλων για τα επιμέρους υποσυστήματα	45
3.1 Η γλώσσα προγραμματισμού Modelica	45
3.2 Περιγραφή διατάξεων-εγκαταστάσεων	46
3.2.1 Μοντέλο κτηρίου (Τοίχου)	46
3.2.2 Θερμοστάτης	49
3.2.3 Αντλία Θερμότητας	50
3.2.4 Τερματικό σώμα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας (Fan Coil Unit)	54
3.2.5 Αντλία - Pump	57
3.2.6 Θερμοδοχείο	59
3.2.7 Φωτοβολταϊκά πάνελ (Μοντέλο SimplePlantSymmetric- PV Array)	69
3.2.8 Διάταξη μετασχηματισμού των φωτοβολταϊκών	75

3.2.9 Δεδομένα καιρού	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο –Προσομοίωση - Διατάξεις- Αποτελέσματα.....	77
4.1 Τοπολογία 1	77
4.2 Τοπολογία 2	81
4.2.1 8 ^η Εβδομάδα Χειμερινής περιόδου	85
4.2.2 14 ^η Εβδομάδα έτους –τελευταία εβδομάδα χειμερινής περιόδου.....	91
4.3 Τοπολογία 3	97
4.3.1 Τοπολογία 2 για τις ημέρες ενδιαφέροντος.....	98
4.3.2 Τοπολογία 3- Μέρα 53 ^η	102
4.3.3 Τοπολογία C- Μέρα 93 ^η	109
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο – Συμπεράσματα και προτάσεις	117
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	121

Κεφάλαιο 1^ο

1.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ,κυρίως στις αναπτυγμένες και αναπτυσσόμενες χώρες , μια ολοένα αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας , η οποία ,σε συνδυασμό με την πληθυσμιακή έκρηξη έχει οδηγήσει σε υπερκατανάλωση (εξάντληση) πόρων και άνοδο στις τιμές των περιβαλλοντικών ρύπων .

Ένα πολύ μεγάλο ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας καταναλώνεται από οικήματα (ενδεικτικά ,τα κτίρια ευθύνονται για το 40% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και το 36% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην Ευρώπη). Αποτελεί πλέον επιτακτική ανάγκη η κατασκευή και καθιέρωση ,σαν μοναδική επιλογή , κτηρίων σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης [1] .

1.2 Κτίρια σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης (nearly Zero Emission Buildings - nZEB)

Ευρωπαϊκή οδηγία για την ενεργειακή απόδοση κτιρίων - Buildings Performance Institute Europe (BPIE)[2]

Ο κτιριακός τομέας έχει αναγνωριστεί σαν ένας από τους σημαντικότερους για την επίτευξη του στόχου 20/20/20 της Ευρωπαϊκής Ένωσης (δηλαδή περιορισμό των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου στο 20% των τιμών του 1990 ,20% εξοικονόμηση ενέργειας μέχρι το 2020 και διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κατά 20% της συνολικής κατανάλωσης). Για τον σκοπό αυτό έχει ανασυσταθεί η ευρωπαϊκή οδηγία για την ενεργειακή απόδοση κτηρίων ,σύμφωνα με την οποία απαιτείται όλα τα δημόσια να είναι σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης μέχρι το 2018 και οι ιδιωτικές κατοικίες μέχρι το 2020 (οι καταλυτικές ημερομηνίες εφαρμογής της οδηγίας στην Ελλάδα ,έχουν προσαυξηθεί κατά έναν χρόνο συγκριτικά με τις ευρωπαϊκές ,δηλαδή όλα τα κτήρια του Ελληνικού δημοσίου οφείλουν να είναι σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης μέχρι το 2019 και οι ιδιωτικές κατοικίες μέχρι το 2021) .

Υπάρχουν αρκετές δυσκολίες διατύπωσης ενός μοναδικού ορισμού για τα κτήρια σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης ,σχετιζόμενες με τα όρια εκπομπών ρύπων ,το ισοζύγιο ενέργειας και αν θα πρέπει να γίνεται στιγμιαίος ή συγκεντρωτικός υπολογισμός του, την διείσδυση ΑΠΕ από παρακείμενες εγκαταστάσεις ή από μονάδα υφιστάμενη αποκλειστικά στο εκάστοτε κτήριο κ.α. .Προκειμένου όμως να μην υπάρξουν φαινόμενα αποκλεισμού τοπολογιών και να επιτραπεί σε μελλοντικό χρόνο η επέκταση του ορισμού στα ενεργειακά θετικά κτήρια ,θα πρέπει να είναι αρκετά ευέλικτος .Συνεπώς, σύμφωνα με την ευρωπαϊκή

οδηγία για την ενεργειακή απόδοση κτηρίων (και με βάση την μελέτη που εκπονήθηκε από τον οργανισμό ecofys [3]), τα ΚΣΜΕΚ είναι κτήρια, οι καταναλώσεις των οποίων τόσο για θέρμανση-ψύξη-ζεστό νερό χρήσης όσο και για τις λουιές συσκευές του οικήματος, δεν θα πρέπει να ξεπερνούν ένα συγκεκριμένο κατώφλι, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας θα πρέπει να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Το κάθε κράτος της Ευρωπαϊκής Ένωσης μπορεί να καθορίσει τις εθνικές απαιτήσεις της ενεργειακής ζήτησης εντός ενός συγκεκριμένου εύρους λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά του δικτύου του.

Ελληνική Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων

Υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής της ευρωπαϊκής οδηγίας σε εθνικό επίπεδο με βάση τις εθνικές, περιφερειακές ή τοπικές συνθήκες, περιλαμβανομένου και του αριθμητικού δείκτη της χρήσης πρωτογενούς ενέργειας σε κιλοβατώρες ανά τετραγωνικό μέτρο κατ' έτος ($\text{kWh/m}^2 \text{ a}$). Προφανώς, τα κτίρια φέρουν μεγάλο μερίδιο στην επίτευξη ενεργειακής εξοικονόμησης καθώς η συμβολή τους στην κατανάλωση της ενέργειας, αλλά και στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι πολύ σημαντική. Ο κτιριακός τομέας στην Ελλάδα ευθύνεται για το ένα τρίτο περίπου των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και για το 36% περίπου της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης.

Η Οδηγία 2010/31/ΕΕ [2] για την Ενεργειακή Απόδοση των κτιρίων, η οποία ενσωματώθηκε στην Εθνική Νομοθεσία με το Νόμο 4122/2013, περιλαμβάνει πληθώρα διατάξεων σχετικά με τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στον κτιριακό τομέα και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσής του. Ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία της Οδηγίας αποτελεί η αναφορά στα κτίρια σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης. Συγκεκριμένα, στο άρθρο 2 του ανωτέρω Νόμου δίνεται ο ορισμός του κτιρίου με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας, ως ένα κτίριο με πολύ υψηλή ενεργειακή απόδοση, στο οποίο η σχεδόν μηδενική ή πολύ χαμηλή ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του, πρέπει να καλύπτεται κατά πλειονότητα από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας που παράγεται επιτόπου ή πλησίον του κτιρίου [4].

Για την επίτευξη του προαναφερθέντος στόχου, συστάθηκε το 2010, ο Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης των Κτιρίων (ΚΕνΑΚ) προκειμένου να θεσμοθετηθεί ολοκληρωμένα ο ενεργειακός σχεδιασμός στον κτιριακό τομέα με σκοπό τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσής των κτιρίων, την εξοικονόμηση ενέργειας και την προστασία του περιβάλλοντος. Εντός του (πέραν του ορισμού των κτηρίων σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης), υπάρχουν οδηγίες για την μείωση απωλειών, όχι μόνο νέων, αλλά και υφιστάμενων οικημάτων.

1.3 Δομές κτιρίων σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης και εφαρμογή τους στην παρούσα μελέτη

Προκειμένου να αξιοποιηθούν τα οφέλη και να υπολογιστεί η εξοικονόμηση ισχύος και καυσίμων από την εφαρμογή τοπολογιών κτηρίων σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης, αρχικά θα πρέπει να αναλυθούν οι μέθοδοι κατασκευής του ή μετατροπής υπάρχοντος κτηρίου σε σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης.

Η μοντελοποίηση είναι ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να εκφραστεί η αναγκαιότητα καθιέρωσης αυτής της δομής και να γίνει σωστή εισχώρηση επί Ελληνικού εδάφους προβλέποντας πιθανά προβλήματα. Δομώντας την εκάστοτε τοπολογία και παράγοντας αποτελέσματα από την εφαρμογή της μπορούν να εξαχθούν οι πληροφορίες (όπως η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, οι εκπομπές ρύπων και η κατανάλωση φυσικών πόρων), που χρειάζονται ώστε να τηρούνται τα όρια για τον χαρακτηρισμό ενός κτηρίου σαν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης. Συνεπώς αποφεύγονται τα λάθη κατά την κατασκευή του, η αναστροφή των οποίων θα μπορούσε να είναι ακριβή και χρονοβόρα.

Υπάρχουν ποικίλες γλώσσες αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού και περιβάλλοντα στα οποία θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί η μοντελοποίηση της συγκριμένης εργασίας, όπως Matlab, Simulink, Java, επιλέχθηκε όμως, να γίνει με χρήση της γλώσσας Modelica λόγω της ευκολίας διασύνδεσης των επιμέρους τμημάτων κάθε τοπολογίας και την δυνατότητα δυναμικής (real time) προσομοίωσης. Ο δυναμικός προγραμματισμός αποτελεί μία υπολογιστική μέθοδο η οποία εφαρμόζεται σε προβλήματα που δεν είναι δυνατόν να λυθούν με "άπληστες μεθόδους" (βλ. Greedy algorithm) ή τη μέθοδο "διαίρει και βασίλευε". Θεμέλιο του δυναμικού προγραμματισμού αποτελεί η αρχή βελτιστοποίησης. Είναι μία μέθοδος που είναι εφαρμόσιμη όταν τα υποπροβλήματα που υπάρχουν δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Ένας αλγόριθμος που είναι προϊόν του δυναμικού προγραμματισμού, επιλύει μία φορά κάθε υποπρόβλημα και αποθηκεύει αυτή τη λύση σε έναν πίνακα, στον οποίον θα καταφεύγει κάθε φορά που συναντά το συγκεκριμένο πρόβλημα. Αποτελεί μία πολύ ισχυρή τεχνική για αλγοριθμική επίλυση προβλημάτων. Υπάρχουν δύο τύποι δυναμικού προγραμματισμού ως προς τον τρόπο που υπολογίζουν τις τιμές ενός προβλήματος. Ο "σύνθετος" και ο "αναλυτικός" δυναμικός προγραμματισμός.

Ο "σύνθετος δυναμικός προγραμματισμός" (bottom-up dynamic programming), υπολογίζει και αποθηκεύει όλες τις τιμές μίας συνάρτησης με τη σειρά, υπολογίζοντας από την μικρότερη τιμή του ορίσματος.

Ο "αναλυτικός δυναμικός προγραμματισμός" (top-down dynamic programming), αποθηκεύει αρχικά τις τιμές που υπολογίζει αποφεύγοντας έτσι τον υπολογισμό των ήδη αποθηκευμένων. Είναι προτιμότερος διότι για την λύση ενός προβλήματος παρέχει μηχανικό τρόπο σχηματισμού και ρυθμίζει αυτόματα τη σειρά υπολογισμού των υποπροβλημάτων του προβλήματος. Το πιο σημαντικό, είναι ότι αποφεύγει την επίλυση υποπροβλημάτων που δεν είναι απαραίτητα και για αυτό αποτελεί αποδοτικότερη μέθοδο.

Υπάρχουν ποικίλες μέθοδοι, με την εφαρμογή των οποίων θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ένα κτήριο ως σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης. Οι χαρακτηριστικότερες είναι :

- Η βελτίωση των δομικών χαρακτηριστικών του οικήματος όπως καλύτερη μόνωση, διπλά τζάμια, κουφώματα αλουμινίου κ.ά.
- Η εγκατάσταση συστημάτων σκίασης
- Η αντικατάσταση των συστημάτων ψύξης-θέρμανσης και ζεστών νερών χρήσης (ή η εξ' αρχής εγκατάσταση για νέες κατασκευές) με καινοτόμες τεχνολογίες όπως η επιδαπέδια θέρμανση ,η χρήση αντλιών θερμότητας
- Η εγκατάσταση συστοιχίας φωτοβολταϊκών για κάλυψη ποσοστού της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος
- Η υποβοηθούμε από ηλιακά συστήματα ψύξη- θέρμανση

Στην συγκεκριμένη εργασία εφαρμόζονται τροποποιήσεις εξοικονόμησης (καταναλισκόμενης από το δίκτυο) ενέργειας για θέρμανση εσωτερικού χώρου υφιστάμενου κτίριου της γεωγραφικής ζώνης Β (επί Ελληνικού εδάφους). Εξετάζονται τρεις διαφορετικές συνδεσμολογίες, και κάθε μια αποτελεί βελτίωση της προηγούμενης. Οι προς μελέτη συνδεσμολογίες είναι:

1. Τοπολογία 1

Συνίσταται από αντλία θερμότητας για πιο αποδοτική θέρμανση του εσωτερικού του κτιρίου η οποία τροφοδοτεί τερματικό σώμα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας εντός του χώρου.

2. Τοπολογία 2

Δομείται από την τοπολογία 1 στην οποία προστίθεται συστοιχία φωτοβολταϊκών πάνελ, με σκοπό την μείωση της καταναλισκόμενης, από το δίκτυο, ενέργειας για την λειτουργία του συμπιεστή της αντλίας θερμότητας

3. Τοπολογία 3

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι καταναλώσεις, δημιουργείται η τρίτη συνδεσμολογία, η οποία αποτελεί βελτίωση της προηγούμενης με προσθήκη δοχείου αποθήκευσης ζεστού νερού. Η αντλία θερμότητας αυξάνει, εντός επιλεγμένων ορίων, την θερμοκρασία του περιεχομένου του θερμοδοχείου και αυτό τροφοδοτεί το τερματικό σώμα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας του

χώρου (FCU). Έτσι μειώνεται η χρήση της, καθώς το θερμοδοχείο λειτουργεί σαν αποθήκη θερμού εργαζόμενου μέσου, εξασφαλίζοντας θερμότητα χωρίς επιπλέον κατανάλωση για μικρό χρονικό διάστημα. Επιδιώκεται η φόρτιση του δοχείου κατά τις περιόδους ηλιοφάνειας (χρήση ενέργειας από ΑΠΕ), ωστόσο σε περιπτώσεις λάθος διαστασιολόγησης ή σχεδιασμού η κατανάλωση ισχύος δικτύου δεν είναι αμελητέα .

Στην συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα τους με γνώμονα την εξοικονόμηση συμβατικής ενέργειας, την αξιοποίηση της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πάνελ και το ποσοστό την ηλιακής συνεισφοράς στις συνολικές καταναλώσεις. Η δομή της εργασίας διαμορφώνεται ως εξής:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στο ενεργειακό ζήτημα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι συνδεσμολογίες και τα υποσυστήματα που τις δομούν .Γίνεται επεξήγηση της τεχνολογίας στην οποία βασίστηκαν και των (φυσικών) κανόνων και εξισώσεων που τα διέπουν

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην γλώσσα προγραμματισμού Modelica και αναλύονται τα μοντέλα με τα οποία περιγράφονται όλα τα επιμέρους τμήματα των διατάξεων

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα των επιλεγμένων συνδεσμολογιών.

Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται σχόλια παρατηρήσεις και προτάσεις για μελλοντική εργασία .

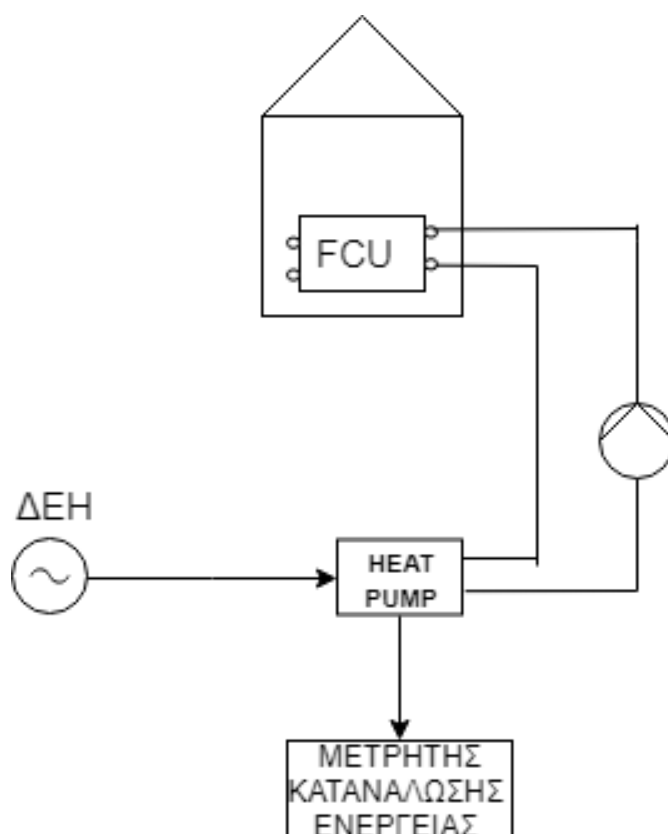
Κεφάλαιο 2^ο – Περιγραφή διατάξεων

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εκτενής αναφορά στην θεωρία και τις αρχές λειτουργίας των επιμέρους συστημάτων από τα οποία απαρτίζονται οι προς μελέτη τοπολογίες. Οι διατάξεις που παρουσιάζονται είναι τρεις, με κάθε μια να δημιουργείται από ενεργειακές βελτιώσεις/προσθήκες της προηγούμενης. Η πρώτη διάταξη δεν αποτελεί, επί της ουσίας μέθοδο εξοικονόμησης ενέργειας στην κτήρια σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης, αλλά χρησιμοποιείται σαν σημείο αναφοράς προκειμένου να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα των υπολοίπων διατάξεων .

2.1.1 Πρώτη τοπολογία

Η αρχική διάταξη είναι και η απλούστερη που θα μελετηθεί ,οπότε συνεπώς εμφανίζει και την μικρότερη εξοικονόμηση ενέργειας .

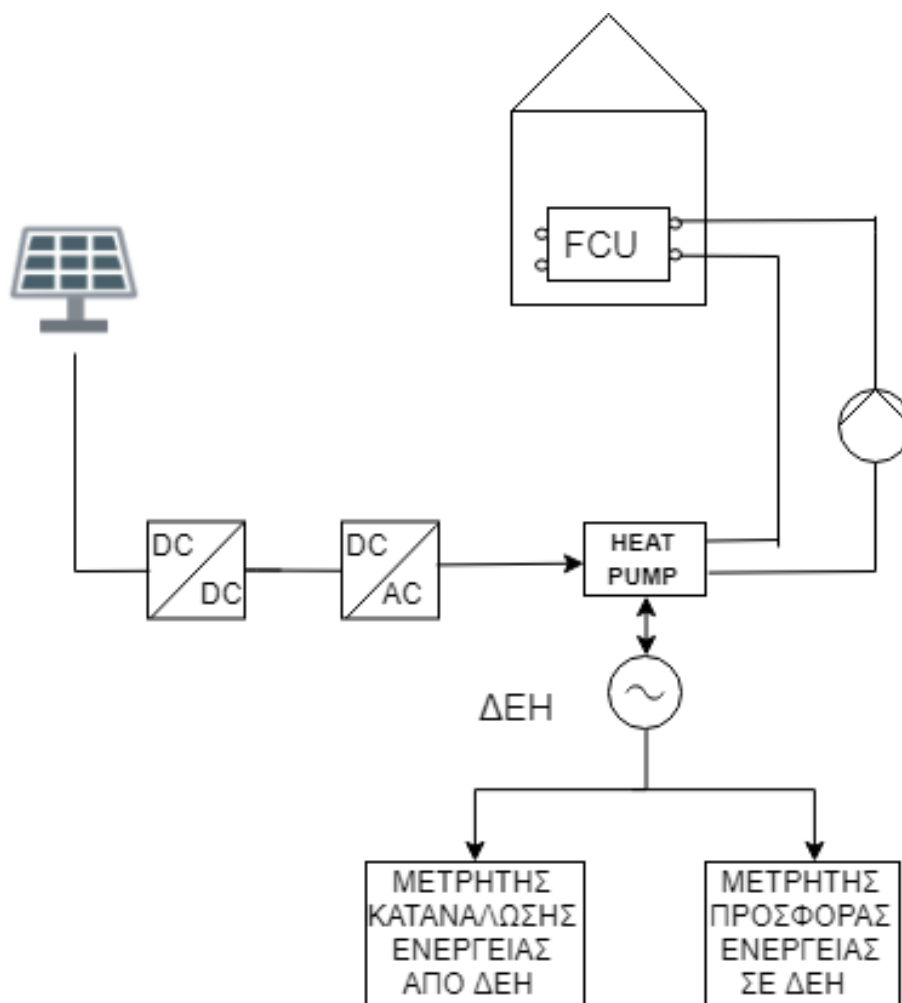


Εικόνα 2.1: Διάταξη πρώτης τοπολογίας

Αποτελείται από αντλία θερμότητας συνδεδεμένη με τερματικό σώμα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας (fan coil unit) προκειμένου να επιτευχθεί θέρμανση του κτηρίου αναφοράς .

2.1.2 Δεύτερη τοπολογία

Η δεύτερη διάταξη της εργασίας αποτελεί εξέλιξη της πρώτης στην οποία προστίθενται διάταξη φωτοβολταϊκών πάνελ και μετατροπέας τάσης από συνεχή (που παράγεται από τα ΦΒ) σε εναλλασσόμενη, προκειμένου να ρευματοδοτηθεί η αντλία θερμότητας .Η διαστασιολόγηση της διάταξης φωτοβολταϊκών, γίνεται με βάση την ισχύ του συμπιεστή της αντλίας θερμότητας και το ποσοστό κάλυψης των θερμικών αναγκών του κτηρίου (όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια). Προφανώς στις περιόδους αιχμής ,μειωμένης ηλιοφάνειας ή συνεχόμενης μακροχρόνιας χρήσης της αντλίας θερμότητας η ρευματοδότηση επιτυγχάνεται μέσω του οικιακού (χαμηλής τάσης, μονοφασικού)δικτύου.

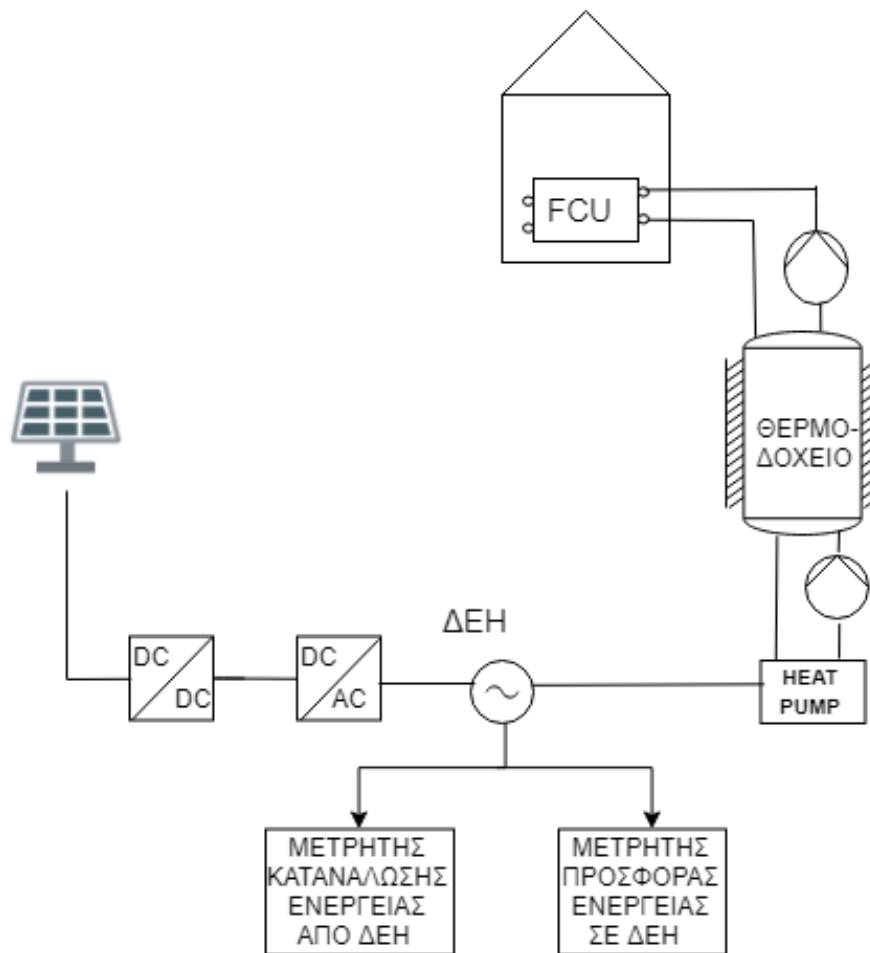


Εικόνα 2.2: Διάταξη δεύτερης τοπολογίας

2.1.3 Τρίτη τοπολογία

Η τελευταία διάταξη της παρούσας εργασίας, η οποία παρουσιάζει και την μεγαλύτερη εξοικονόμηση ισχύος, δημιουργείται όταν στην δεύτερη συνδεσμολογία προστίθεται κατάλληλα διαστασιολογημένο θερμοδοχείο, το οποίο λειτουργεί σαν «πυκνωτής θερμότητας» (αποθήκη θερμικής ενέργειας).

Επί της ουσίας πρόκειται για την δεξαμενή συγκέντρωσης του εργαζόμενου μέσου της διάταξης (νερό), η οποία ελαχιστοποιεί την χρήση της αντλίας θερμότητας (για θέρμανση του εσωτερικού του οικήματος), καθώς περιέχει νερό ικανής θερμοκρασίας για απόδοση θερμότητας στον χώρο. Η επιλογή μεγέθους του δοχείου, γίνεται με γνώμονα την κάλυψη διάφορων ποσοστών των θερμικών αναγκών του οικήματος (όπως θα αναλυθεί εκτενώς στην συνέχεια).



Εικόνα 2.3: Διάταξη τρίτης τοπολογίας

2.2 Μηχανολογικά τμήματα διάταξης

Για μεγαλύτερη ευχρηστία, γίνεται διαχωρισμός των τμημάτων των διατάξεων σε μηχανολογικά και ηλεκτρολογικά. Αρχικά θα γίνει αναφορά στα μηχανολογικά τμήματα που απαρτίζουν κάποια ή και όλες τις τοπολογίες.

Αυτά είναι :

- Το κτίριο αναφοράς
- Οι αντλίες
- Η αντλία θερμότητας
- Το τερματικό σώμα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας (Fan Coil Unit)
- Το θερμοδοχείο

2.2.1 Το κτίριο αναφοράς

Στην συγκεκριμένη εργασία, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προσομοιωτική μελέτη εξοικονόμησης ενέργειας, πρέπει πρώτα να οριστεί το κτήριο αναφοράς. Για την συλλογή δεδομένων (όσον αφορά το κτίριο αναφοράς) χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο webtools της ιστοσελίδας του Ευρωπαϊκού προγράμματος eriscopre (πρώην tabula) [5]. Το οίκημα που επιλέχθηκε βρίσκεται επί ελληνικού εδάφους, ανήκει στην κλιματική ζώνη Β, έχει επιφάνεια $135 m^2$ και είναι κατασκευής 2001-2010.

Σύμφωνα με τον κανονισμό Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2017 [6] θα πρέπει να τηρούνται οι ακόλουθοι παράμετροι.

Το ωράριο λειτουργίας ενός κτηρίου ή ενός τμήματός του, που αποτελεί ανεξάρτητη θερμική ζώνη, εξαρτάται από τα εξής χαρακτηριστικά:

- από τη χρήση του κτηρίου
- από τον ανθρώπινο παράγοντα, δηλαδή από τις ιδιαιτερότητες που προσδίδουν σε κάθε γενική χρήση κτηρίου οι επιλογές και οι συνήθειες των χρηστών του
- από τις τοπικές συνθήκες, κλιματικές, λειτουργικές (ωράρια λειτουργίας) κ.ά.

Για το συγκεκριμένο υπό μελέτη κτήριο:

Κατηγορία κτιρίου	Χρήση κτιρίου ή θερμικών ζωνών	Ώρες λειτουργίας	Ημέρες λειτουργίας/βδομάδα	Περίοδος λειτουργίας (μήνες)
Κατοικία	Κατοικία	18	7	12

Πίνακας 2.1 :Ωράριο λειτουργίας κτιρίου

Για την κλιματική ζώνη Β (στην οποία ανήκει το κτήριο μας) η περίοδος θέρμανσης είναι από την 1^η Νοεμβρίου έως τις 15 Απριλίου και η περίοδος ψύξης από τις 15 Μαΐου έως και τις 15 Σεπτεμβρίου Αυγούστου και κατά την διάρκεια τους θα πρέπει να ισχύουν οι εξής συνθήκες:

Χρήση κτιρίου ή θερμικών ζωνών	Απαιτήσεις για θερμοκρασία- σχετική υγρασία εσωτερικών χώρων			
	Θερμοκρασία (° C)		Σχετική υγρασία (%)	
	Χειμερινή περίοδος	Θερινή περίοδος	Χειμερινή περίοδος	Θερινή περίοδος
Κατοικία	20	26	35	45

Πίνακας 2.2 :Συνθήκες περιόδου ψύξης-θέρμανσης κτιρίου

Προκειμένου να εξασφαλιστούν οι συνθήκες υγιεινής στο εσωτερικό κάθε κτηρίου και κάθε ανεξάρτητου τμήματος κτηρίου απαιτείται η ανανέωση του αέρα, δηλαδή η αντικατάσταση μέρους του εσωτερικού αέρα από νωπό αέρα περιβάλλοντος. Οι απαιτήσεις νωπού αέρα καθορίζονται ανάλογα με:

- τη χρήση του κτηρίου,
- τον πληθυσμό των χρηστών και
- την παραγωγή ρύπων λόγω χρήσης του κτηρίου, που σε γενική προσέγγιση είναι αντίστοιχη της χρήσης του κτηρίου.

Στην περίπτωση μας :

Χρήση κτηρίου ή θερμικών ζωνών	Απαιτήσεις για παροχή νωπού αέρα		
	Άτομα/100m ² επιφάνειας δαπέδου (m ³ /άτομο)	Νωπός αέρας (m ³ /h/άτομο)	Νωπός αέρας (m ³ /h/ m ²)
Κατοικία	5	15	0,75

Πίνακας 2.3 :Απαιτήσεις αερισμού κτιρίου

Σύμφωνα με το υπολογιστικό εργαλείο EPISCOPE (TABULA) ο συντελεστής απωλειών θερμικής ισχύος λόγω αερισμού είναι 78 W/K .

Τέλος θα πρέπει γίνει έλεγχος ικανοποίησης των απαιτήσεων θερμομονωτικής επάρκειας και να υπολογιστεί ο συντελεστής θερμοπερατότητας του κτηρίου .

Το όριο μέγιστου επιτρεπόμενου μέσου συντελεστή θερμομονωτικής επάρκειας για την γεωγραφική ζώνη που βρίσκεται το οίκημα μας ,σύμφωνα την τελευταία έκδοση του τεύχους **T.O.T.E.E 20701-2/2017** είναι :

$$\text{➤ } \overline{U}_{max} = 0,98 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Τα δεδομένα του κτηρίου επιλογής με βάση το δομικά και κατασκευαστικά του υλικά συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα :

Είδος επιφάνειας	A(m ²)	U[W/(m ² *K)]	b(-)	Uεπιφ[W/(m ² *K)]
Δάπεδο1	45	1,90	1	85,5
Δάπεδο2	90	0,50	1	45
Οροφή	135	0,50	1	67,5
Εξ. τοίχος	137	0,70	1	95,9
Πόρτα/Παράθυρα	27	4,10	1	110,7
ΣΥΝΟΛΟ	434	-	-	404,6

Πίνακας 2.4 :Πίνακας συντελεστών θερμομονωτικής επάρκειας κτιρίου

Με βάση τον άνωθεν πίνακα:

$$\bar{U} = \frac{\sum_1^5 U_i * A_i}{\sum_1^5 A_i} = \frac{404,6}{434} \frac{W}{m^2 * K} = 0,9323 \frac{W}{m^2 * K}$$

2.2.2 Οι αντλίες ροής

Αντλία ροής είναι η διάταξη για την μετακίνηση υγρών και αερίων σε κατάσταση διαφορετικής δυναμικής στάθμης από την προηγούμενη (διαφορετικό ύψος από επιφάνεια αναφοράς ή και διαφορετική πίεση).

Πιο συγκεκριμένα, είναι συσκευή που χρησιμοποιεί **Μηχανικό Έργο**, για να ανυψώσει, να μεταφέρει ή να συμπιέσει ρευστά και αποτελείται από δύο κατηγορίες ,τις φυγοκεντρικές και τις αντλίες θετικής εκτόπισης (στατικού τύπου).

- Με χρήση φυγοκεντρικής αντλίας, προσδίδεται κινητική ενέργεια στο ρευστό με φυγοκεντρικές δυνάμεις, ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις ή μηχανική ώθηση
- Με χρήση αντλίας θετικής εκτόπισης, προσδίδεται κινητική ενέργεια στο ρευστό με μηχανικά μέσα (πχ έμβολο) ή με ένα άλλο ρευστό (πχ πεπιεσμένο αέρα)

Στην συγκεκριμένη μελέτη οι αντλίες θεωρούνται ιδανικές, δηλαδή οι ενεργειακές απώλειες τους και η πτώση πίεσης ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο είναι μηδενικές .

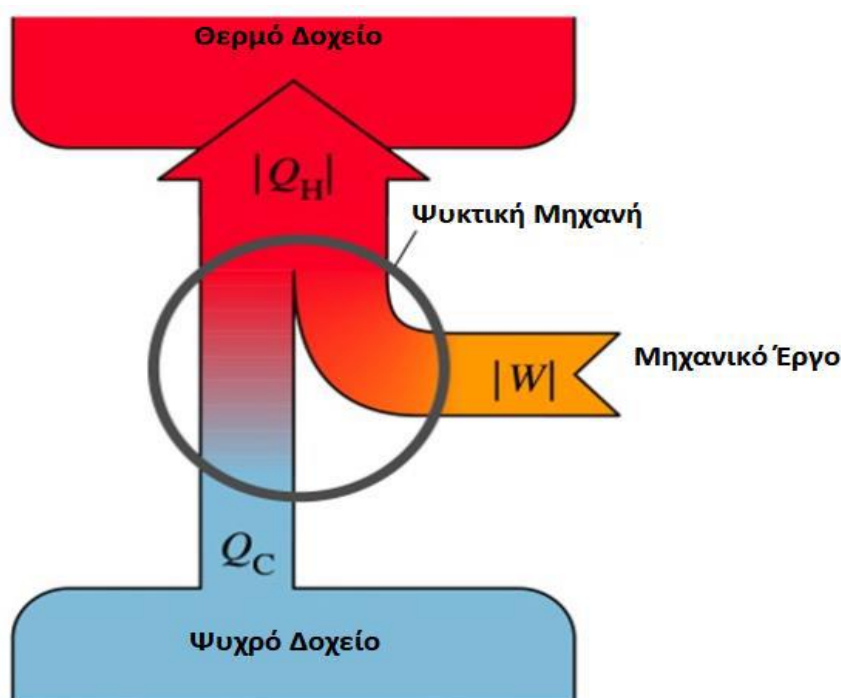


Εικόνα 2.4: Εικόνα ενδεικτικής αντλίας

2.2.3 Η αντλία θερμότητας

Οι αντλίες θερμότητας είναι μηχανολογικές διατάξεις που μας επιτρέπουν τόσο να μεταφέρουμε ενέργεια από έναν χώρο χαμηλής θερμοκρασίας, σε έναν χώρο υψηλότερης θερμοκρασίας, δηλαδή αντίστροφα από την κανονική φυσική ροή- σύμφωνα με τον 2^ο θερμοδυναμικό νόμο, όσο και να μεταφέρουμε θερμότητα ακολουθώντας την φυσική ροή ενέργειας . Συγκεκριμένα το καλοκαίρι αφαιρούν θερμότητα από έναν κλιματιζόμενο χώρο και την αποβάλλουν στο περιβάλλον, οπότε ψύχεται ο κλιματιζόμενος χώρος, ενώ το χειμώνα αφαιρούν θερμότητα από το περιβάλλον και την αποβάλλουν μέσα στον κλιματιζόμενο χώρο θερμαίνοντας τον.

Το «τίμημα» για την λειτουργία τους είναι η ,πολύ μικρή συγκριτικά με την παραγόμενη θερμική, κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας .



Εικόνα 2.5 Ροή ενέργειας σε αντλία θερμότητας

Τα βασικά τμήματα από τα οποία αποτελείται μια αντλία θερμότητας είναι:

- Ο μηχανικός συμπιεστής – compressor (εμβολοφόρος ή περιστροφικός ή φυγοκεντρικός)
- Ο συμπυκνωτής- condenser (εναλλάκτης θερμότητας αερόψυκτος ή υδρόψυκτος)
- Η διάταξη εκτόνωσης ή στραγγαλισμού (τριχοειδής σωλήνα ή βαλβίδα)
- Ο ατμοποιητής – evaporator (εναλλάκτης θερμότητας)

Μια αντλία θερμότητας εκτελεί πάντα ψυκτικό κύκλο και ποτέ θερμικό γιατί τέτοιος κύκλος δεν υφίσταται. Συχνά στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η αντλία θερμότητας “αντιστρέφει” τον κύκλο του ψυκτικού ρευστού και ανάλογα με την περίπτωση ακολουθεί ψυκτικό κύκλο το καλοκαίρι ή “θερμαντικό” το χειμώνα. Το μόνο που αντιστρέφεται είναι ο ρόλος του συμπυκνωτή με τον ρόλο του ατμοποιητή. Το καλοκαίρι ο ατμοποιητής είναι τοποθετημένος μέσα στον ψυχόμενο χώρο και τον ψύχει, αφού αντλεί θερμότητα από αυτόν, ενώ τον χειμώνα βρίσκεται στον εξωτερικό χώρο και επιτυγχάνει μεταφορά θερμότητας προς την οικία. Αντί λοιπόν να μεταφέρονται οι συσκευές του ατμοποιητή και του συμπυκνωτή από τον χώρο στο περιβάλλον, με τη χρήση τετράοδης βαλβίδας αντιστρέφεται η ροή του ψυκτικού μέσου διατηρώντας φυσικά τον ψυκτικό κύκλο, στον οποίο συνεχίζεται κανονικά η προσφορά μηχανικού έργου, για την συμπίεση των ατμών του ψυκτικού μέσου. Ακολουθεί η ανάλυση του ψυκτικού κύκλου :

Κύκλος για ψύξη χώρου

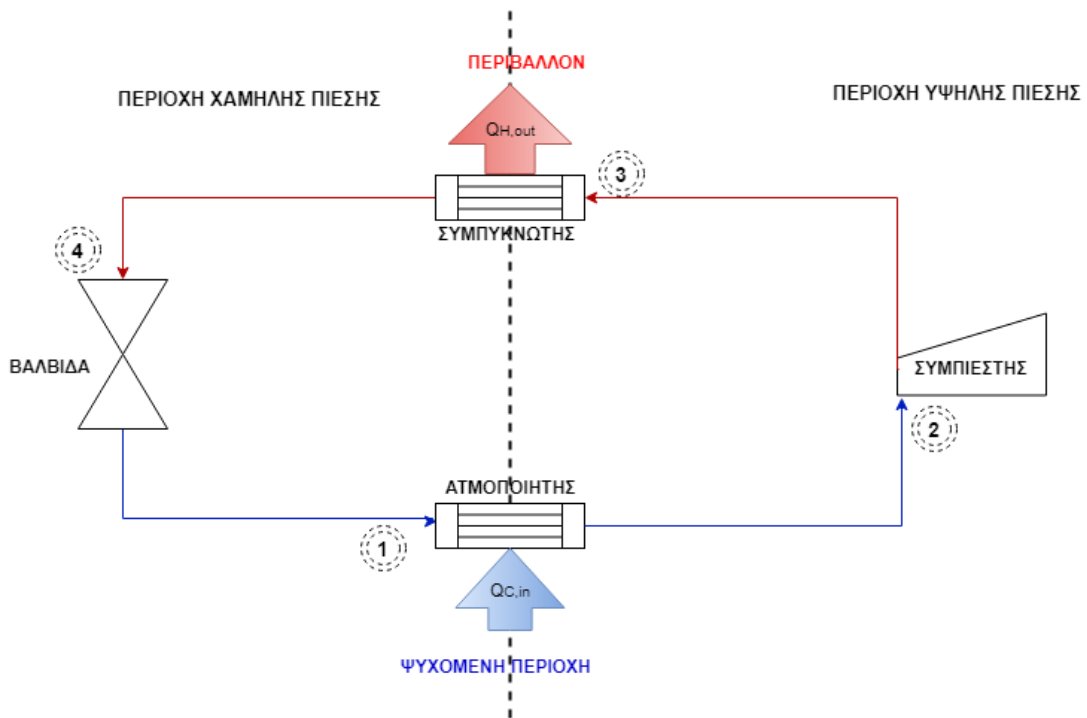
Η λειτουργία της αντλίας θερμότητας βασίζεται στον ψυκτικό κύκλο συμπίεσης ρευστού [7]. Η μελέτη του κύκλου για ψύξη εκτελείται ξεκινώντας από οποιοδήποτε σημείο του συστήματος (αρχίζοντας π.χ. από τη στιγμή που το ψυκτικό υγρό εισέρχεται στον ατμοποιητή).

Ένας τυπικός κύκλος λειτουργίας αποτελείται από τα εξής στάδια:

1. Στην θέση 1, το ψυκτικό ρευστό εισέρχεται στον ατμοποιητή . Πρόκειται για έναν εναλλάκτη θερμότητας στον οποίο το ψυκτικό μέσο απορροφά θερμότητα από το χώρο του ατμοποιητή (εσωτερικό κτηρίου), ατμοποιείται (σε θερμοκρασία χαμηλότερη από την θερμοκρασία βρασμού ατμοσφαιρικής πίεσης) και εξέρχεται από αυτόν σε κατάσταση ψυχρού κορεσμένου ατμού χαμηλής πίεσης . Ουσιαστικά, το ψυκτικό φαινόμενο λαμβάνει χώρα στον ατμοποιητή, όταν δηλαδή απομακρύνεται η θερμότητα από το χώρο μέσω του ψυκτικού και αποδίδεται στο περιβάλλον. Το ψυκτικό ρευστό εξέρχεται σε κατάσταση ξηρού κορεσμένου ατμού χαμηλής πίεσης .
2. Στην θέση 2, το ψυκτικό ρευστό αποκτά υψηλή πίεση και υψηλότερη θερμοκρασία καθώς συμπιέζεται στο συμπιεστή .Εξέρχεται σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού . Κατά τη συμπίεση του ατμού του ψυκτικού μέσου, προσδίδεται σε αυτό μηχανικό έργο. Ουσιαστικά η δαπάνη (οικονομική και ενεργειακή) για τη λειτουργία του συστήματος είναι το έργο που καταναλώνει ο συμπιεστής, συν τις απώλειες.
3. Στην θέση 3, το ψυκτικό, πλέον αέριο, εισέρχεται στον συμπυκνωτή, ο οποίος είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας. Εκεί ξεκινά η αποβολή θερμότητας από τον ατμό προς τον αέρα περιβάλλοντος . Ο ατμός

αποβάλλει θερμότητα, οπότε η θερμοκρασία του αρχικά μειώνεται, ενώ, όταν γίνει ίση με τη θερμοκρασία συμπύκνωσης για την πίεση που επικρατεί, αρχίζει η συμπύκνωσή του, μέχρι όλο το ψυκτικό μέσο να εξέλθει σε (κορεσμένη) υγρή κατάσταση .

4. Στην θέση 4, το εργαζόμενο μέσο περνά από τη διάταξη εκτονώσεως ή στραγγαλισμού, εκτονώνεται και εξέρχεται σε δι-φασική κατάσταση, χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας . Στην συνέχεια οδηγείται πάλι στον ατμοποιητή (θέση 1).



Εικόνα 2.6: σχεδιάγραμμα ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης

Κύκλος για θέρμανση χώρου

Περιλαμβάνει τα ίδια στάδια με τον κύκλο ψύξης μόνο που σε αυτή την περίπτωση το στοιχείο που εκτελούσε την ατμοποίηση, εδώ εκτελεί την συμπύκνωση και το αντίστροφο. Η μετατροπή του ψυκτικού κύκλου σε κύκλο θέρμανσης γίνεται με τη βοήθεια της τετράοδης βαλβίδας, που οδηγεί το ψυκτικό υγρό μετά την έξοδό του από τον συμπιεστή και την εκτονωτική διάταξη στους εναλλάκτες θερμότητας ψυκτικού μέσου, ανάλογα με την επιλογή των απαιτήσεων μέσω διακόπτη. Στην συγκεκριμένη εργασία η αντλία θερμότητας των τοπολογιών που αναλύονται εκτελεί κύκλο για θέρμανση χώρου .

Βαθμός απόδοσης

Η συμπεριφορά της αντλίας θερμότητας περιγράφεται από τον βαθμό απόδοσης της, (COP-coefficient of performance) [8], [9]. Στην ουσία πρόκειται για τον λόγο της

ενέργειας θέρμανσης ή ψύξης (ανάλογα την εφαρμογή), προς το μηχανικό έργο που καταβάλλεται.

$$COP = \frac{Q}{W}$$

Ο βαθμός απόδοσης είναι άμεσα εξαρτώμενος από την θερμοκρασία περιβάλλοντος και το θερμοκρασιακό παράθυρο των δύο εναλλακτών.

➤ Λειτουργία Ψύξης

$$COP_C = \frac{Q_C}{W} = \frac{Q_{evap}}{W}$$

Όπου:

- Q_C είναι η ειδική θερμότητα που απορρόφησε το μέσον από το περιβάλλον του (θερμότητα ατμοποιητή) και
- W το ειδικό έργο συμπίεσης που απαιτείται στον κύκλο.

➤ Λειτουργία Θέρμανσης

$$COP_H = \frac{Q_H}{W} = \frac{Q_{cond}}{W} = \frac{Q_C + W}{W} = \frac{Q_{evap} + W}{W}$$

Όπου:

- Q_H είναι η απορριπτόμενη θερμική ενεργεία στον συμπυκνωτή και άρα η ωφέλιμη θερμική ενεργεία
- W το ειδικό έργο συμπίεσης που απαιτείται στον κύκλο

Κατηγορίες αντλιών θερμότητας

Η αρχή λειτουργίας των αντλιών θερμότητας είναι ίδια. Ανάλογα όμως με την επιλογή της πηγής "άντλησης" ενέργειας και το μέσο απόδοσης της ενέργειας διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες [9]:

1. Αντλίες θερμότητας αέρος - νερού: εκμεταλλεύονται για την άντληση ενέργειας τον αέρα του περιβάλλοντος. Το θερμικό μέσο απόδοσης ενέργειας είναι συνήθως το νερό που μπορεί να κυκλοφορεί στο δίκτυο θέρμανσης (ενδοδαπέδια, σώματα ακτινοβολίας, fan coils) ή σε κάποιο εναλλάκτη από θερμοδοχείο με ενσωματωμένη αντλία θερμότητας (ζεστού νερού χρήσης). Είναι ιδανικές για κάθε είδους κατοικία και λειτουργούν τόσο σε υψηλές εξωτερικές θερμοκρασίες όσο και σε θερμοκρασίες μέχρι -20°C.
2. Αντλίες θερμότητας αέρος - αέρος: είναι οι πιο συνηθισμένες στις σύγχρονες εγκαταστάσεις, έχουν ως πηγή άντλησης ενέργειας αλλά και ως μέσο απόδοσης της ενέργειας τον αέρα. Στην πρώτη περίπτωση τον εξωτερικό αέρα και στην δεύτερη τον εσωτερικό ή και ένα μέρος εξωτερικού για ταυτόχρονο εξαερισμό του χώρου.

3. Αντλίες θερμότητας νερού – νερού (γεωθερμική αντλία): στην κατηγορία αυτή η πηγή άντλησης της ενέργειας προέρχεται από το έδαφος με οριζόντιους ή κάθετους εναλλάκτες οι οποίοι μεταφέρουν την θερμική ενέργεια του υπεδάφους στην αντλία. Το θερμικό μέσο απόδοσης της ενέργειας είναι και εδώ το νερό όπως και παραπάνω. Ανάλογα με την εφαρμογή επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος αντλίας θερμότητας (αέρος, νερού, εδάφους) έτσι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία και ταυτόχρονα η απόδοση θέρμανσης – ψύξης να είναι η υψηλότερη δυνατή με το χαμηλότερο δυνατό κόστος λειτουργίας.

Επίσης, ανάλογα με τη θέση των διαφόρων στοιχείων τους, οι αντλίες θερμότητας ταξινομούνται σε:

- Ενιαίες ή αυτόνομες (Compact) όπου όλοι οι μηχανισμοί βρίσκονται σε κοινό κέλυφος.
- Διαιρούμενες ή διμερούς τύπου (Split units). Ο ατμοποιητής (ή ο συμπυκνωτής) είναι ανεξάρτητος του υπολοίπου συστήματος.

Τέλος, ανάλογα με το είδος της κινητήριας μηχανής, οι αντλίες θερμότητας ταξινομούνται σε:

- Αντλίες με ηλεκτροκίνητους συμπιεστές.
- Αντλίες με συμπιεστές κινούμενους από μηχανές εσωτερικής καύσης (πετρέλαιο, ατμός, αέριο κλπ).
- Αντλίες με συμπιεστές απορρόφησης και προσρόφησης (θερμική ενέργεια χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας).

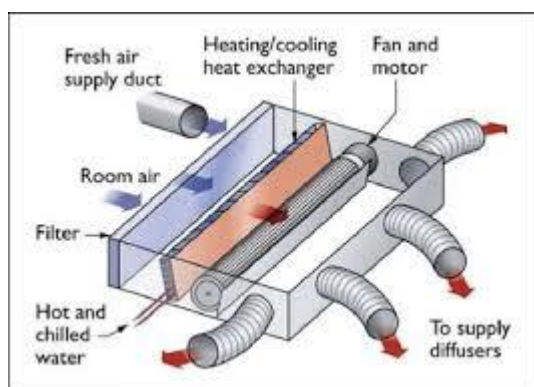


Εικόνα 2.7: Μονάδα αντλίας θερμότητας [10]

2.2.4 Τερματικό σώμα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας (Fan Coil Unit-FCA)

Η μονάδα του τερματικού σώματος εξαναγκασμένης κυκλοφορίας (fan coil unit) είναι το θερμαντικό-ψυκτικό στοιχείο του εσωτερικού χώρου. Η τεχνολογία λειτουργίας του είναι πολύ απλή. Στην ουσία αποτελείται από έναν εναλλάκτη θερμότητας και έναν ανεμιστήρα. Ο αέρας του χώρου έρχεται σε επαφή με το, διαφορετικής θερμοκρασίας, ψυκτικό ρευστό του εναλλάκτη και αναλόγως την επιλογή του χρήστη, ψύχεται ή θερμαίνεται. Έπειτα με την βοήθεια του ανεμιστήρα επανατοποθετείται στον χώρο[11].

Η διάταξη που επιτρέπει τον έλεγχο του fan coil είναι ο θερμοστάτης, συσκευή επιλογής ψύξης ή θέρμανσης, η οποία ταυτόχρονα ρυθμίζει το θερμοκρασιακό παράθυρο λειτουργίας.



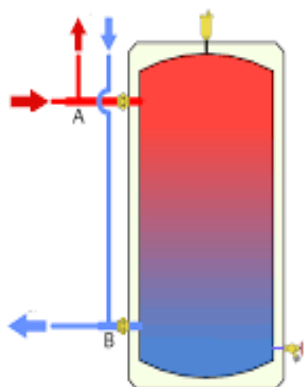
Εικόνα 2.8 Τομή fan coil πολλαπλών θυρών (αριστερά) και εικόνες εσωτερικής και εξωτερικής μονάδας (δεξιά)

2.2.5 Θερμοδοχείο

Η θερμότητα είναι από τις πιο δύσκολα αποθηκεύσιμες μορφές ενέργειας, καθώς, σύμφωνα με τον δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο, ρέει από το θερμότερο στο ψυχρότερο σώμα, αβίαστα στην φύση. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι τα σώματα διαφορετικής θερμοκρασίας να έρθουν σε ισορροπία, η ταχύτητα της διαδικασίας όμως, μπορεί να επηρεαστεί από τα υλικά κατασκευής των επαπτόμενων επιφανειών. Στην ιδανική περίπτωση όπου η μεταφορά ενέργειας γίνεται τόσο μικρή ώστε να προσεγγίσει μηδενικές τιμές, ο χρόνος ολοκλήρωσης της διαδικασίας τείνει στο άπειρο. Υλικά που παρουσιάζουν τέτοια συμπεριφορά, ονομάζονται θερμομονωτικά.

Μια από τις αποτελεσματικότερες λύσεις για την αντιμετώπιση της «διαρροής» θερμικής ενέργειας είναι το θερμοδοχείο, διάταξη που λειτουργεί σαν "πυκνωτής" για μηχανολογικές εγκαταστάσεις. Πρόκειται για δεξαμενή συλλογής θερμού ψυκτικού, η οποία είναι επενδυμένη με θερμομονωτικό υλικό, ώστε η θερμοκρασία

του να ελαττώνεται με όσο το δυνατόν βραδύτερους ρυθμούς .Συχνά στο εσωτερικό του υπάρχει αντίστασή προκειμένου να επιτευχθεί περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας ψυκτικού όταν είναι απαραίτητο . Το θερμό ψυκτικό διοχετεύεται μέσω μονωμένων σωληνώσεων σε θερμαντικά σώματα για την διατήρηση των συνθηκών εσωτερικού χώρου στα επιθυμητά επίπεδα (καλοριφέρ, επιδαπέδια θέρμανση , fan coil ,κ.ά.), ενώ μπορεί να καταναλωθεί και σε περιπτώσεις που απαιτείται ζεστό νερό χρήσης . Προφανώς, αυτή η δεξαμενή αποθήκευσης θερμού ψυκτικού έχει σαν αποτέλεσμα την μειωμένη κατανάλωση ενέργειας για την θέρμανση του (ηλεκτρική ενέργεια , ηλιακή ενέργεια, καύσιμο) .



Εικόνα 2.9 Τομή θερμοδοχείου, όπου φαίνεται η διαστρώματωση εργαζομένου μέσου (αριστερά) και εξωτερική όψη του (δεξιά) [12]

2.3 Ηλεκτρολογικά τμήματα διάταξης

Ηλεκτρολογικό τμήμα καλείται εκείνο που σχετίζεται με τη παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας .Στην συγκεκριμένη εργασία αποτελείται από την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών, δηλαδή τα φωτοβολταϊκά πάνελ και τις διατάξεις ισχύος για τον μετασχηματισμό της τάσης σε αξιοποιήσιμο από το δίκτυο επίπεδο, και το δίκτυο ρευματοδότησης για την τροφοδοσία της αντλίας θερμότητας . Όλα τα στοιχεία αναλύονται εκτενώς στην συνέχεια .

2.3.1 Φωτοβολταϊκά πάνελ

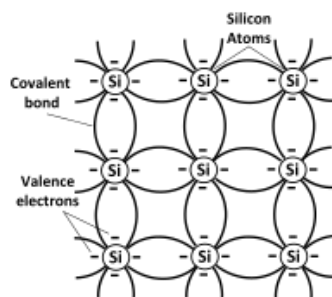
Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών αποτελεί έναν από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους κλάδους στον τομέα παραγωγής ενέργειας καθώς είναι η επικρατέστερη εναλλακτική μέθοδος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό να υποκαταστήσει εν μέρει τα ορυκτά καύσιμα .

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο [13], το φαινόμενο δηλαδή κατά το οποίο η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική με τη χρήση ηλιακών κυψελών (solar cells), παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το 1839 από το φυσικό Edmond Becquerel κατά τη διάρκεια πειραμάτων του με μια ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια. Το επόμενο σημαντικό βήμα έγινε το 1876 όταν οι Adams και Day παρατήρησαν ότι μια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος παραγόταν από το σελήνιο (Se) όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στο φως, ενώ το πρώτο ηλιακό στοιχείο πυριτίου κατασκευάστηκε στα εργαστήρια της Bell από τους Charmin, Fuller και Pearson το 1954. Η απόδοσή του ήταν μόλις 6%, ενώ σύντομα έφτασε το 10%. Η πρώτη μεγάλη ώθηση, ωστόσο, της τεχνολογίας των ΦΒ διατάξεων, σημειώθηκε την δεκαετία του 1960, όταν κατέστη επιτακτική η ανάγκη ηλεκτροδότησης δορυφόρων χωρίς εξάρτηση από το ηλεκτρικό δίκτυο και μεγάλες-ογκώδεις συστοιχίες συσσωρευτών. Από τότε, μέχρι σήμερα η εξέλιξη της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών έγινε με αλματώδεις ρυθμούς. Πλέον τα φωτοβολταϊκά αναγνωρίζονται ως μέσο για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής αυτών που δεν έχουν την ευχέρεια να συνδεθούν στο ηλεκτρικό δίκτυο. Επίσης, αποτελούν μέσο σημαντικής μείωσης των βλαβερών επιπτώσεων που αποφέρουν στο περιβάλλον οι συμβατικές πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις ανεπτυγμένες βιομηχανικές χώρες.

Με το όρο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, περιγράφεται η πόλωση των ηλεκτρικών φορτίων που εμφανίζονται σε συγκεκριμένα υλικά όταν εκτεθούν σε φωτεινή ακτινοβολία. Τα υλικά αυτά ονομάζονται ημιαγωγοί, έχουν ειδική αντίσταση με τιμές ανάμεσα σε αυτές των μονωτών (μεγάλη) και των αγωγών (μικρή) και εμφανίζουν ραγδαία μείωση της ειδικής τους αντίστασης με την αύξηση της θερμοκρασίας τους ή με την προσθήκη προσμίξεων (ατόμων που προσθέτουν ή αφαιρούν ηλεκτρόνια από την κρυσταλλική δομή του ημιαγωγού). Η ειδοποιός διαφορά των ημιαγωγών από τα αγώγιμα υλικά έγκειται στην δυνατότητα προσωρινής κίνησης των ηλεκτρονίων του κρυσταλλικού τους πλέγματος με την προσφορά ενέργειας (μπορούν να προσομοιωθούν με τα άτομα των ιδανικών αερίων).

- ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ [14]

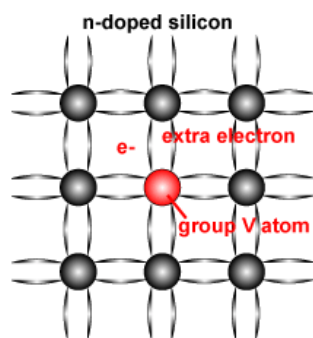
Ο πιο χαρακτηριστικός ημιαγωγός που χρησιμοποιείται κατά κόρον στην παραγωγή φωτοβολταϊκών κελίων, είναι το πυρίτιο (και με χρήση των ιδιοτήτων του, μπορεί να γίνει κατανοητή η τεχνολογία των ημιαγωγών). Προκειμένου να αποτελέσει ιδανικό στοιχείο για χρήση σε ηλεκτρονικές εφαρμογές, θα πρέπει να είναι πολύ μεγάλης καθαρότητας και το κρυσταλλικό του πλέγμα να μην έχει αταξίες δομής.



Εικόνα 2.10 :Ατομική δομή ημιαγωγού

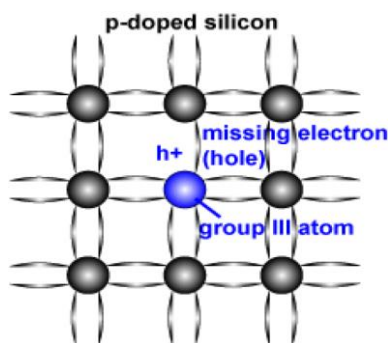
Τα άτομα πυριτίου (όπως και όλα τα στοιχεία της 14^{ης} ομάδας του περιοδικού πίνακα) σχηματίζουν μια σταθερή τετραεδρική κρυσταλλική δομή. Κάθε άτομο γειτνιάζει με 8 ηλεκτρόνια και δημιουργεί 4 ομοιοπολικούς δεσμούς (τετρασθενές στοιχείο). Τα ηλεκτρόνια των δεσμών αυτών είναι ασθενώς συγκρατημένα και απελευθερώνονται εύκολα με απορρόφηση ενέργειας, κινούμενα άτακτα στον κρύσταλλο (αρνητικό φορτίο). Το ελάχιστο απαιτούμενο ποσό ενέργειας για την απελευθέρωση ενός ηλεκτρονίου ονομάζεται ενεργειακό διάκενο (συνεπώς όταν η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου σε ηλεκτρόνιο του ημιαγωγίμου υλικού είναι ίση η μεγαλύτερη του ενεργειακού διακενου, το ηλεκτρόνιο μπορεί να απελευθερωθεί από την θέση του στο κρυσταλλικό πλέγμα) .Τα κενά που δημιουργούνται κατά την απομάκρυνση των ηλεκτρονίων από τις αρχικές τους θέσεις, αποκαλούνται "οπές", έχουν θετικό φορτίο και ισούνται σε πλήθος με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια σε συνθήκες ηρεμίας (όπου προφανώς το υλικό εμφανίζει συνολικά ουδέτερο φορτίο). Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι οπές του ημιαγωγίμου υλικού ονομάζονται φορείς .

Όταν στον κρύσταλλο προστεθούν προσμίξεις πεντασθενών στοιχείων (νόθευση πυριτίου), όπως το As, δημιουργούνται ασθενώς συγκρατημένα ηλεκτρόνια, τα οποία ελευθερώνονται εύκολα χωρίς να αφήνουν πίσω τους οπές. Ένα τέτοιο υλικό καλείται ημιαγωγός προσμίξεως τύπου n και περιέχει πληθώρα ελεύθερων ηλεκτρονίων (παρουσιάζει αρνητικό φορτίο).



Εικόνα 2.11 :Ατομική δομή νοθευμένου με πεντασθενές στοιχείο ημιαγωγίμου υλικού (παρουσιάζει αρνητικό φορτίο)

Η αντίστοιχη πρόσμιξη του κρυστάλλου με τρισθενή στοιχεία, όπως το Β, δημιουργεί πληθώρα οπών στον κρύσταλλο και οδηγεί σε ημιαγωγό τύπου p (παρουσιάζει θετικό φορτίο).



Εικόνα 2.12 :Ατομική δομή νοθευμένου με τρισθενές στοιχείο ημιαγωγίμου υλικού (παρουσιάζει θετικό φορτίο)

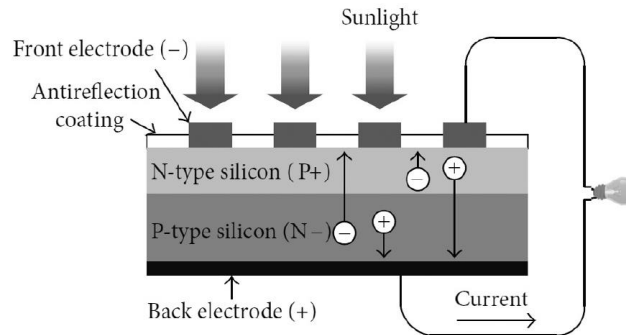
Στο υλικό που έχει προκύψει από την πρόσμιξη (είτε p είτε n) οι ελεύθεροι φορείς που μόλις περιγράφηκαν δεν έχουν κάποια καθορισμένη κατεύθυνση στην κίνηση τους. Η εφαρμογή, όμως ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στον κρύσταλλο μπορεί να τους πολώσει δημιουργώντας στα άκρα τους διαφορά δυναμικού .

- Επαφή τύπου p-n

Η βάση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ΦΒ είναι η δημιουργία των φορέων του ημιαγωγίμου υλικού . Η εκμετάλλευση της, όμως, καθίσταται δυνατή από την επαφή τύπου p-n , η οποία σχηματίζεται όταν υλικό τύπου n έρθει πολύ κοντά με υλικό τύπου p . Στην ένωση αυτή, τα πλεονάζοντα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού τύπου n διαχέονται προς την περιοχή του ημιαγωγού τύπου p και αντίστροφα . Δημιουργείται με αυτό τον τρόπο μια περιοχή στην οποία υπάρχουν λίγοι φορείς αγωγιμότητας, γνωστή ως ζώνη αραίωσης (ή απογύμνωσης). Τα θετικά φορτισμένα ιόντα ωστόσο παραμένουν στην περιοχή n και τα αρνητικά στην p. Έτσι παράγεται ένα εσωτερικό ηλεκτροστατικό πεδίο, το οποίο αντιτίθεται στην κίνηση των φορέων αγωγιμότητας, με αποτέλεσμα η παραπάνω διάχυση να μη συνεχίζεται επ' άπειρον (ηλεκτροστατικό πεδίο λόγω majority carriers).

Εάν ο ημιαγωγός p-n (ΦΒ στοιχείο) εκτεθεί σε ηλιακή ακτινοβολία, τα ηλεκτρόνια είναι δυνατόν να απορροφήσουν φωτόνια με επαρκή ποσότητα ενέργειας (μεγαλύτερη του ενεργειακού διάκενου), με αποτέλεσμα τη διάσπαση των χημικών δεσμών και την απελευθέρωση ηλεκτρονίων στην περιοχή n. Παρόμοια συμπεριφορά εκδηλώνουν οι οπές στο τμήμα p του ημιαγωγίμου υλικού. Η εν λόγω διαδικασία, σαν σύνολο, καλείται, όπως έχει αναφερθεί, ΦΒ φαινόμενο. Η διάχυση φορέων αγωγιμότητας στις ηλεκτρικές επαφές δημιουργεί μια διαφορά δυναμικού στο στοιχείο, η οποία, με την εφαρμογή εξωτερικής πηγής τάσης, προκαλεί τη ροή ρεύματος (παραγωγή ρεύματος λόγω minority carriers). Εντούτοις, ορισμένος αριθμός ηλεκτρονίων επανασυνδέονται με οπές προτού φτάσουν στις επαφές. Το

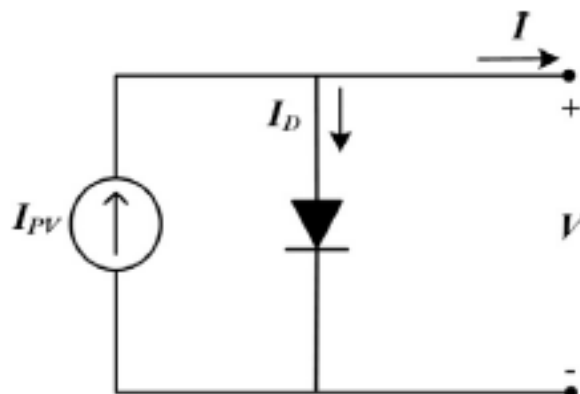
λεγόμενο μήκος διάχυσης αναφέρεται στο μέσο μήκος που διανύει ένα ηλεκτρόνιο μέχρι να επανασυνδεθεί με μία οπή. Το μήκος αυτό εξαρτάται από τη συγκέντρωση των προσμίξεων στον κρύσταλλο και προκειμένου εύλογος αριθμός φορέων αγωγιμότητας να φτάνει απερίσπαστος στις ηλεκτρικές επαφές του στοιχείου, το μήκος αυτό θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο .



Εικόνα 2.13 : Διαστρωμάτωση επαφής τύπου p-n

Από την περιγραφή του άνωθεν φαινομένου, γίνεται εμφανές ότι, η επαφή τύπου p-n είναι, επί της ουσίας, μια δίοδος η οποία επιτρέπει την αγωγή ρεύματος όταν ακτινοβολία προσπίπτει στον ημιαγωγό . Το ρεύμα που δημιουργείται καλείται ρεύμα ΦΒ – I_{PV} (photocurrent) και το πλάτος του εξαρτάται από την ροή ακτινοβολίας και την ικανότητα απορρόφησης του ημιαγωγίμου υλικού.

Το ιδανικό ηλεκτρικό ισοδύναμο μοντέλο φωτοβολταϊκής κυψέλης (μικρότερη μονάδα ΦΒ διάταξης), απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα και αποτελείται από μια πηγή ρεύματος (ρεύμα ΦΒ), συνδεδεμένη παράλληλα με μια δίοδο (επαφή τύπου p-n) . Στα άκρα του εμφανίζεται το αξιοποιήσιμο ρεύμα (και τάση) της διάταξης . Κατά την απουσία φωτός η κυψέλη συμπεριφέρεται σαν μια μόνο δίοδο τύπου p-n .



Εικόνα 2.14 : Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικού ηλεκτρικού μοντέλου φωτοβολταϊκής κυψέλης

Προφανώς (με χρήση των εξισώσεων Shockley):

$$I_D = I_0 \left[e^{\frac{q*V}{k*T}} - 1 \right]$$

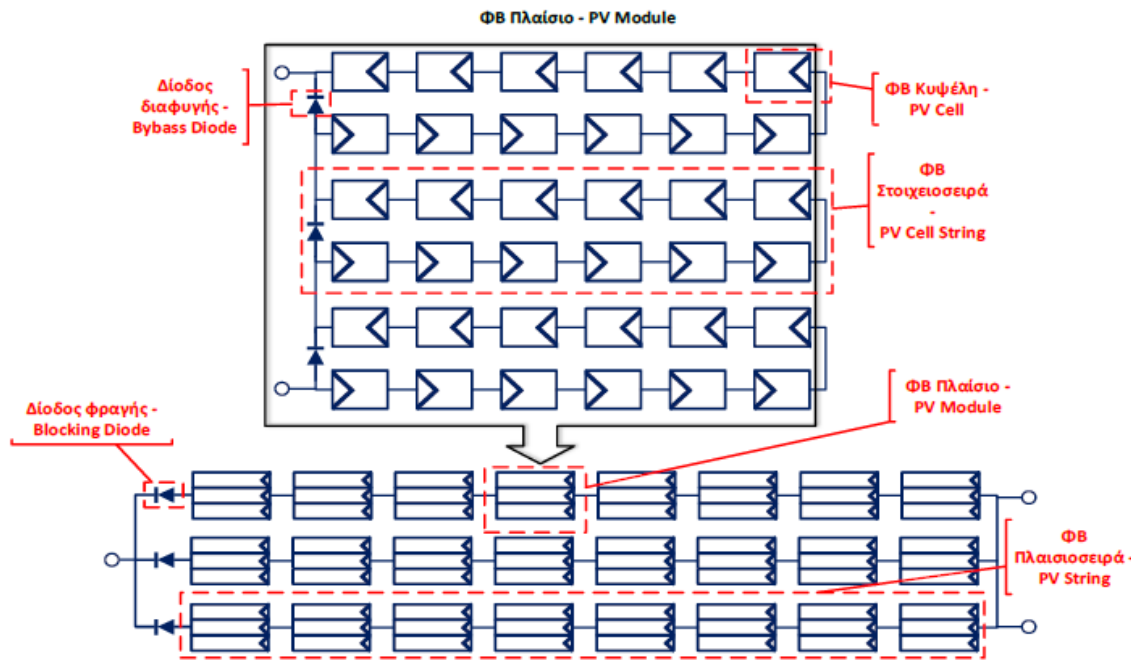
$$I = I_{PV} - I_D = I_{PV} - I_0 \left[e^{\frac{q*V}{k*T}} - 1 \right]$$

Όπου :

- I_0 : είναι το ρεύμα κορεσμού της διάταξης , δηλαδή το ρεύμα της διόδου κατά την απουσία φωτός
- k : Η σταθερά Boltzmann ($-1.380653 * 10^{-23}$ J/K)
- T : η θερμοκρασία της ένωσης
- q : Το φορτίο ηλεκτρονίου ($1.60217646 * 10^{-19}$ C)

- Κυριότερες ΦΒ διατάξεις [15]

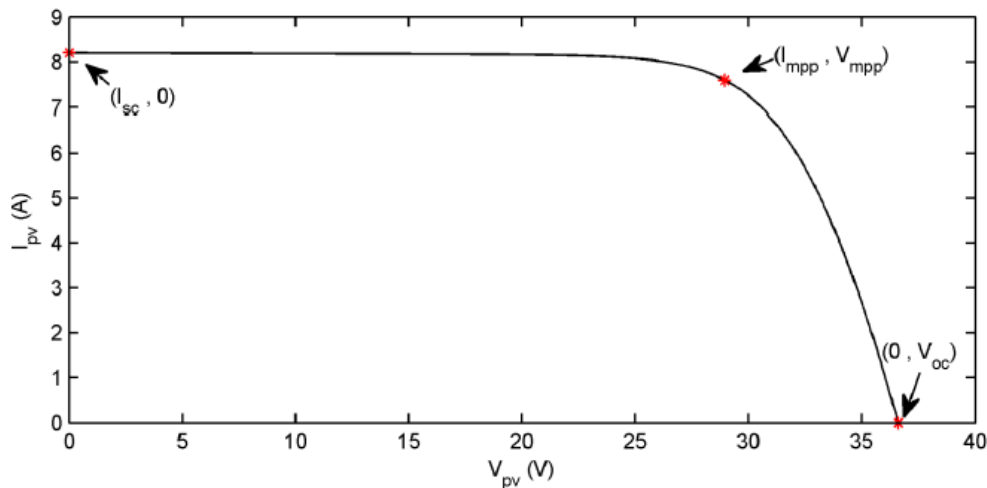
Καθώς οι περισσότερες εφαρμογές των ΦΒ έχουν εύλογες ενεργειακές απαιτήσεις, είναι προφανές ότι η ΦΒ κυψέλη δε θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μόνη της, καθώς αναπτύσσει διαφορά δυναμικού της τάξης των 0.5-1 V. Συνδέοντας πολλές ΦΒ κυψέλες σε σειρά και παράλληλα δημιουργείται μια ΦΒ διάταξη (η οποία αποτελεί τη μονάδα που δέχεται σαν είσοδο του ο μετατροπέας ισχύος) . Εμπορικά, η μικρότερη δομική μονάδα μιας ΦΒ διάταξης είναι το ΦΒ πλαίσιο (PV module), το οποίο αποτελείται από πολλές ΦΒ κυψέλες (PV cells), συνδεδεμένες εν σειρά. Το ΦΒ πλαίσιο είναι υδατοστεγές και προστατεύει τις κυψέλες από το εξωτερικό περιβάλλον, ενώ αναπτύσσει τάση της τάξης των λίγων δεκάδων Volts. Στο εσωτερικό κάθε πλαισίου και ανά κάποιο αριθμό ΦΒ κυψελών, που καθορίζεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε πλαισίου, συνδέονται παράλληλα δίοδοι για λόγους προστασίας της ΦΒ διάταξης σε ανομοιόμορφες συνθήκες λειτουργίας, οι οποίες αποκαλούνται δίοδοι διαφυγής (Bypass diodes). Η μονάδα που περιλαμβάνει N_S το πλήθος κυψέλες συνδεδεμένες παράλληλα με μια δίοδο διαφυγής, ονομάζεται ΦΒ στοιχειοσειρά (PV cell string). Τελικά, το ΦΒ πλαίσιο αποτελείται από N_{CS} το πλήθος τέτοιες στοιχειοσειρές συνδεδεμένες εν σειρά, κάθε μία από τις οποίες περιλαμβάνει N_S κυψέλες. Τυπικές τιμές για τις ποσότητες αυτές είναι $N_S = 12-36$ και $N_{CS} = 1-6$, συνιστώντας ΦΒ πλαίσια με συνήθως 36-72 κυψέλες. Αν, τώρα, συνδεθούν σε σειρά N_m ΦΒ πλαίσια σχηματίζουν τη ΦΒ πλαισιοσειρά (PV string), ενώ N_p πλαισιοσειρές συνδεδεμένες παράλληλα σχηματίζουν μια ΦΒ συστοιχία (PV array). Συνήθως, ο αριθμός N_m κυμαίνεται από 10 έως 30 πλαίσια, ενώ το πλήθος N_p δεν ξεπερνά τις 4 πλαισιοσειρές για συστήματα χαμηλής τάσης. Κάποιες φορές, τοποθετείται μια δίοδος φραγής (blocking diode) σε σειρά με κάθε πλαισιοσειρά για αποφυγή ανάστροφων ρευμάτων σε καταστάσεις σφάλματος.



Εικόνα 2.15: Ανάλυση διάταξης φωτοβολταϊκών πλαισίων [15]

Στο τεχνικό φυλλάδιο (data sheet) ενός εμπορικού ΦΒ πλαισίου, εκτός από τα πλήθη N_S και N_{CS} των κυψελών και των διόδων διαφυγής αντίστοιχα, αναγράφονται πάντα και τα χαρακτηριστικά τριών βασικών σημείων λειτουργίας σε πρότυπες συνθήκες λειτουργίας (STC), (ακτινοβολία είναι ίση με 1000 W/m^2 και θερμοκρασία είναι ίση με $25 \text{ }^\circ\text{C}$). Αναλυτικά, τα σημεία αυτά είναι (τα οποία απεικονίζονται και επί της τυπική I-V καμπύλη λειτουργίας ενός ΦΒ):

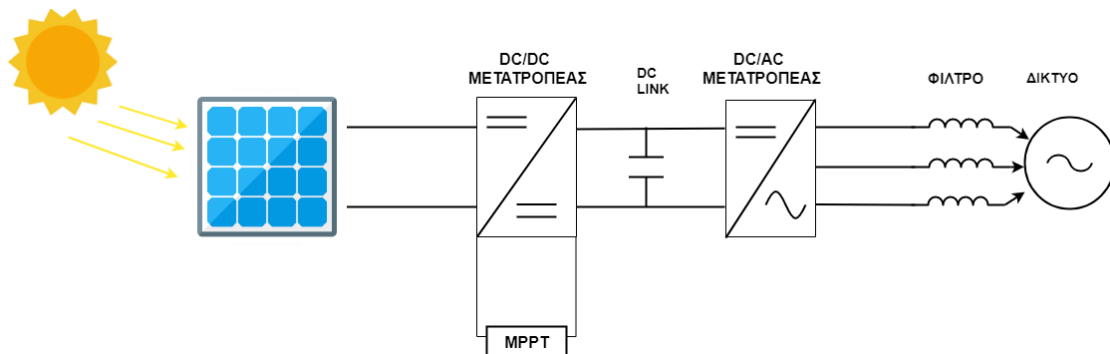
- Το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος (Maximum Power Point – MPP), στο οποίο προσφέρεται η μέγιστη ισχύς P_{mpp} υπό τάση V_{mpp} και ρεύμα I_{mpp} .
- Το σημείο βραχυκύκλωσης (Short Circuit – SC), κατά το οποίο το ΦΒ πλαίσιο είναι βραχυκυκλωμένο και ως εκ τούτου διαρρέεται από το μέγιστο δυνατό ρεύμα I_{sc} .
- Το σημείο ανοιχτοκύκλωσης (Open Circuit – OC), όπου το ΦΒ πλαίσιο είναι ανοιχτοκυκλωμένο (δεν διαρρέεται από ρεύμα), ενώ η τάση του V_{oc} είναι μέγιστη.



Εικόνα 2.16: Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας ΦΒ πλαισίου με ενδείξεις βασικότερων σημείων

2.3.2 Οι διατάξεις ισχύος του ΦΒ

Εν γένει, τα ΦΒ συστήματα, όπως γνωρίζουμε, δεν συνδέονται άμεσα στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά κατά την διασύνδεση τους, παρεμβάλλονται συγκεκριμένες διατάξεις ισχύος, προκειμένου να διαμορφωθεί η τάση εξόδου στο κατάλληλο επίπεδο για χρήση από το δίκτυο. Στην εικόνα 2.17 που ακολουθεί, φαίνεται η τυπική συνδεσμολογία ενός ΦΒ συστήματος (η οποία χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα διπλωματική εργασία) καθώς και τα κυκλώματα ισχύος που είναι απαραίτητα για τη σύνδεση του ΦΒ συστήματος στο δίκτυο χαμηλής τάσης.



Εικόνα 2.17:Συνήθης συνδεσμολογία ΦΒ συστήματος

Όπως είναι εμφανές, ο μετατροπέας ισχύος του συστήματος αποτελείται από δύο κύριες βαθμίδες: τον DC/DC μετατροπέα (buck-boost converter) και τον DC/AC αντιστροφέα (inverter), που είναι συνδεδεμένοι σε σειρά (τοπολογία δύο επιπέδων – two stage topology). Με τη βοήθεια του αλγορίθμου εύρεσης σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking – MPPT), το πρώτο υποσύστημα παίζει το ρόλο του ρυθμιστή του σημείου λειτουργίας ώστε να εξάγεται η μέγιστη δυνατή ισχύς από το σύστημα και, επίσης, είτε ανυψώνει είτε υποβιβάζει την τάση της ΦΒ διάταξης σε κατάλληλα επίπεδα για την τροφοδότηση του ηλεκτρικού δικτύου.

2.3.2.1 DC/DC μετατροπέας

Ο μετατροπέας ισχύος (DC/DC converter) αναλαμβάνει να ανυψώσει ή να υποβιβάσει την τάση εξόδου του συστήματος στο οποίο εφαρμόζεται.

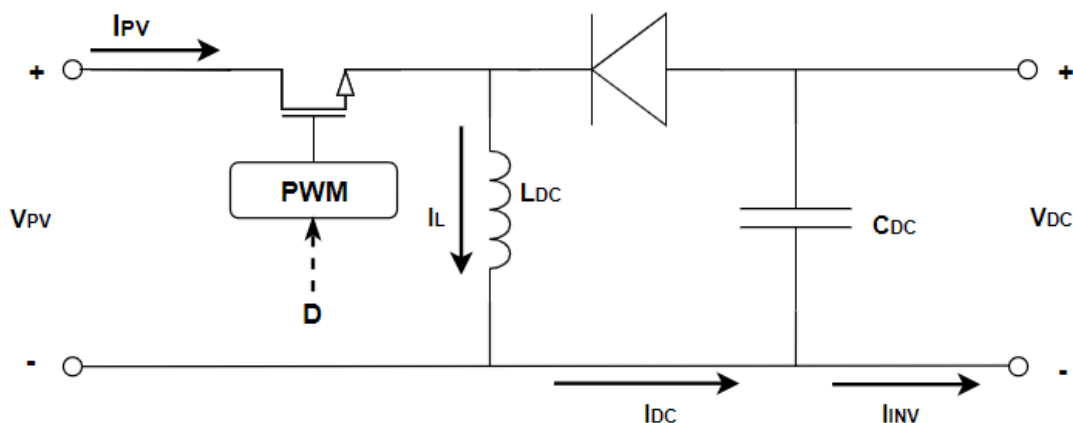
Υπάρχουν τρία βασικά είδη DC/DC μετατροπέων :

- Μετατροπέας ανύψωσης συνεχούς τάσης (Boost DC-DC Converter)
Με χρήση της συγκεκριμένης διάταξης επιτυγχάνεται ανόρθωση της τάσης εξόδου, σε υψηλότερο επίπεδο (ως τέσσερις φορές μεγαλύτερη) από την εφαρμοζόμενη τάση εισόδου.

- Μετατροπέας υποβιβασμού συνεχούς τάσης (Buck DC-DC Converter)
Στην συγκεκριμένη διάταξη, η τάση εξόδου μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως και την τιμή της τάσης εισόδου .
- Μετατροπέας υποβιβασμού – ανύψωσης συνεχούς τάσης (Buck – Boost Converter) [16]
Στην συγκεκριμένη διάταξη, η τάση εξόδου μπορεί να πάρει τιμές μεγαλύτερες ή/και μικρότερες της τάσης εισόδου . Προφανώς ο μετατροπέας αυτός κρίνεται ιδανικός σε εφαρμογές που απαιτείται ανύψωση και υποβιβασμός της τάσης εξόδου, ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες που μπορούν να επηρεάσουν την τάση εισόδου .

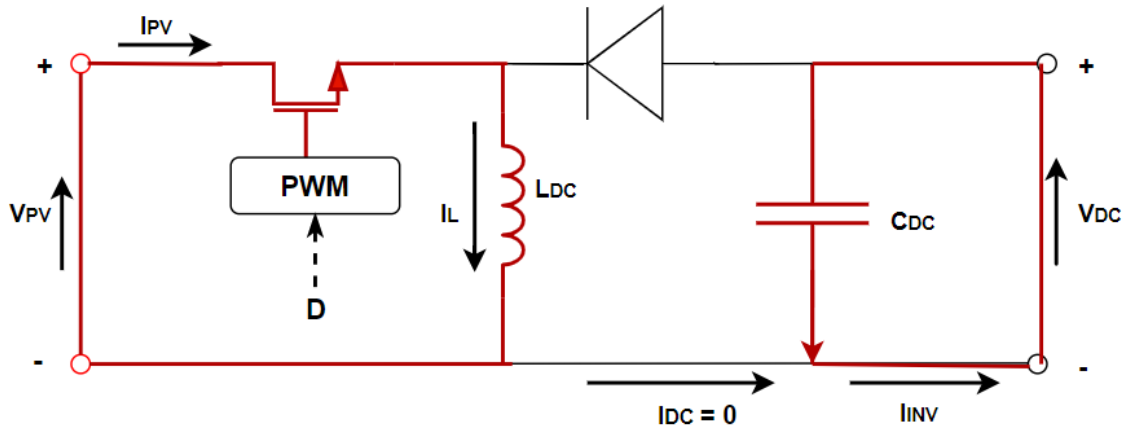
Για λόγους πληρότητας ακολουθεί περιγραφή του τρίτου είδους μετατροπέα, με χρήση του οποίου μπορεί να επιτευχθεί ανύψωση ή υποβιβασμός τάσης εξόδου (Buck – Boost Converter) .

Τα βασικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται (όπως απεικονίζονται και στο ακόλουθο σχήμα είναι ένας ημιαγωγικός διακόπτης (συνήθως IGBT ή MOSFET), ένα πηνίο L_{DC} συνδεδεμένο παράλληλα με την τάση εισόδου, μία δίοδος D και ένας πυκνωτής C_{DC} τοποθετημένος παράλληλα με την τάση εξόδου. Συχνά παρατηρείται και ένας πυκνωτής συνδεδεμένος παράλληλα με την τάση εισόδου ,προκειμένου να επιτευχθεί εξομάλυνση της .



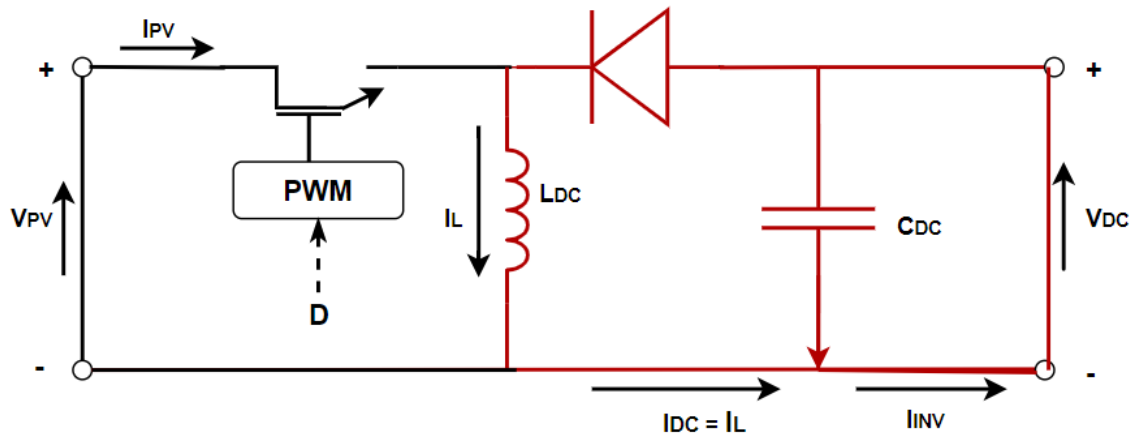
Εικόνα 2.18:Κύκλωμα μετατροπέα υποβιβασμού – ανύψωσης συνεχούς τάσης

Ο ημιαγωγικός διακόπτης που χρησιμοποιείται μπορεί να βρεθεί σε δύο καταστάσεις λειτουργίας, στην κατάσταση αγωγής ή στην κατάσταση αποκοπής . Όταν δοθεί παλμός οδήγησης στην πύλη του ημιαγωγικού στοιχείου, μεταβαίνει στην κατάσταση αγωγής και παραμένει εκεί καθ' όλη τη διάρκεια του παλμού . Τότε η δίοδος βρίσκεται σε αποκοπή και η πλευρά του DC link τροφοδοτείται από τον πυκνωτή χωρητικότητας C_{DC} , ο οποίος αποφορτίζεται . Παράλληλα, το ρεύμα της φωτοβολταϊκής διάταξης I_{PV} οδηγείται στο πηνίο αυτεπαγωγής L_{DC} , φορτίζοντας το .



Εικόνα 2.19:Κύκλωμα μετατροπέα υποβιβασμού – ανύψωσης συνεχούς τάσης σε κατάσταση αγωγής

Το ημιαγωγικό/διακοπτικό στοιχείο οδηγείται σε κατάσταση αποκοπής όταν ο παλμός στην πύλη του πάρει ξανά μηδενική τιμή. Τότε και εφόσον η δίοδος άγει, ο πυκνωτής C_{DC} φορτίζεται από το ρεύμα που προέρχεται από το πηνίο L_{DC} , ενώ το ρεύμα της DC πλευράς του DC/AC μετατροπέα προκύπτει από το ρεύμα του πηνίου και του πυκνωτή του DC link .



Εικόνα 2.20:Κύκλωμα μετατροπέα υποβιβασμού – ανύψωσης συνεχούς τάσης σε κατάσταση αποκοπής

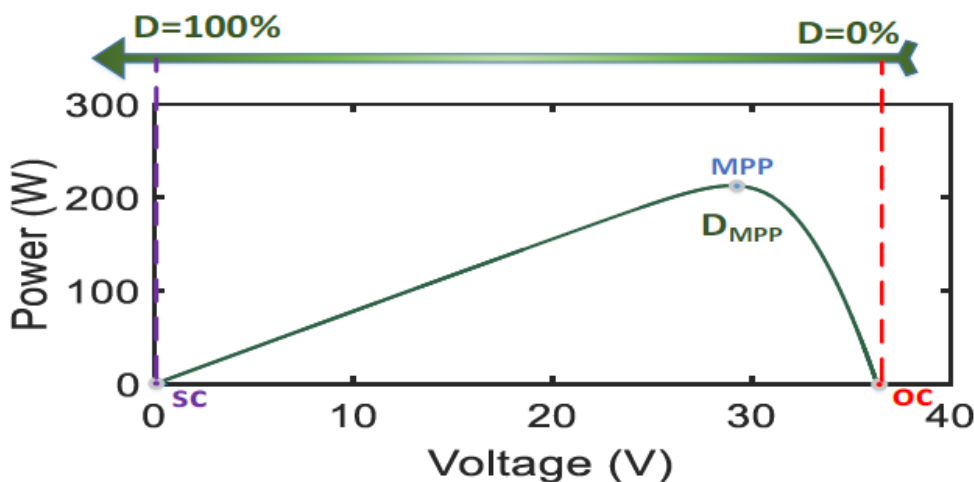
Το ποσοστό της χρονικής περιόδου κατά την οποία η διακοπτική διάταξη βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής, αποκαλείται βαθμός χρησιμοποίησης (duty cycle) και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$D = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}}$$

Μεταβάλλοντας το duty cycle αλλάζει η τάση εισόδου V_{PV} , η οποία αντιστοιχεί στην τάση λειτουργίας της ΦΒ διάταξης. Δηλαδή, ο έλεγχος του σημείου λειτουργίας της τελευταίας επιτυγχάνεται με κατάλληλη ρύθμιση του duty cycle του DC/DC μετατροπέα με βάση τον εξής τύπο :

$$\frac{V_{PV}}{V_{DC}} = \frac{1 - D}{D}$$

Προφανώς όταν $D = 100\%$ και ο ημιαγωγικός διακόπτης άγει συνεχώς, το σύστημα λειτουργεί στη βραχυκύκλωση. Αντίθετα όταν $D = 0\%$ ο διακόπτης βρίσκεται μονίμως σε αποκοπή και πρακτικά ο μετατροπέας παρακάμπτεται. Επιλέγοντας $D > 0,5$ ο buck-boost μετατροπέας ανυψώνει την τάση, ενώ η τάση υποβιβάζεται για $D < 0,5$.



Εικόνα 2.21: Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας ΦΒ πλαισίου με ενδείξη ποσοστού duty cycle

2.3.2.2 Αλγόριθμος εύρεσης σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT)

Ανεξάρτητα από τον τελικό προορισμό της ηλιακής ενέργειας, η αποδοτικότητα/απόδοση της μεταφοράς ισχύος από το ηλιακό στοιχείο, εξαρτάται τόσο από την ποσότητα ηλιακού φωτός που πέφτει στα ηλιακά πάνελ όσο και από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του φορτίου. Καθώς μεταβάλλεται η ηλιακή ακτινοβολία, το σημείο λειτουργίας του ΦΒ μετατοπίζεται σε θέσεις πέραν του μεγίστου παρατηρούμενου επί της καμπύλης τάσης-ισχύος. Λύση στο πρόβλημα αυτό μπορούν να δώσουν οι αλγόριθμοι Maximum Power Point Tracking. Πρόκειται για τεχνικές εξαγωγής της μέγιστης δυνατής ισχύος της φωτοβολταϊκής διάταξης, υπό οποιεσδήποτε συνθήκες λειτουργίας και ο τρόπος να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι ρυθμίζοντας το duty cycle στην είσοδο του διακοπτικού στοιχείου του DC/DC μετατροπέα [17].

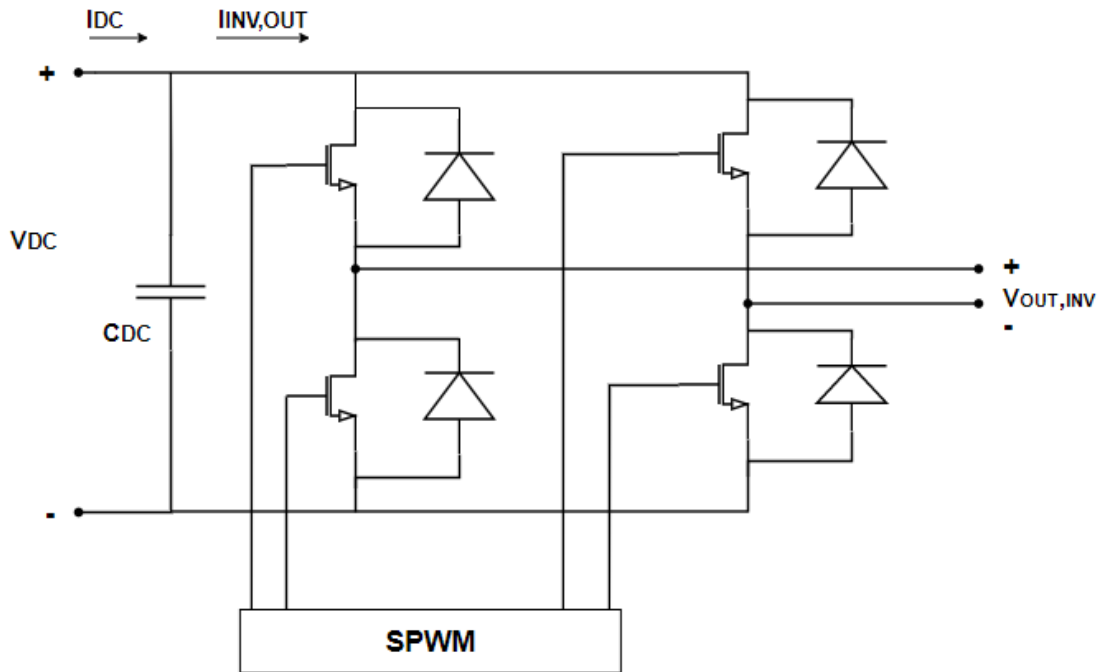
Υπάρχουν διάφορες τεχνικές υπολογισμού, σε πραγματικό χρόνο, του κατάλληλου duty cycle που θα πρέπει να εφαρμοστεί στην διάταξη. Οι σημαντικότερες είναι οι αλγόριθμοι Perturb & Observe (P&O) και Incremental Conductance (INC). Βασική

φιλοσοφία των εν λόγω αλγορίθμων είναι η δημιουργία συνεχούς διαταραχής περιορισμένου εύρους (1-5% περίπου) στο duty cycle, ώστε να ταλαντώνεται μονίμως το σημείο λειτουργίας σε ένα μικρό τμήμα της χαρακτηριστικής P-V, οδηγώντας το έτσι προς την κατεύθυνση που υπόσχεται μεγαλύτερη ισχύ .

2.3.2.3 DC/AC Μετατροπέας

Ο μονοφασικός DC/AC αντιστροφέας αποτελείται από τέσσερις διακοπτικές διατάξεις (στην περίπτωση μας IGBTs), συνδεδεμένους ανά δύο σε σειρά και κάθε μια σειρά παράλληλα με την τάση εισόδου . Κάθε ένα ημιαγωγικό στοιχείο συνδέεται παράλληλα με μια δίοδο . Τέτοιου τύπου μετατροπείς – σε αντίθεση με τους μετατροπείς που απαρτίζονται από *θυρίστορς* (*thyristors*) – έχουν τη δυνατότητα ελέγχου της αέργου ισχύος τους και έχουν σημαντικά χαμηλότερο αρμονικό περιεχόμενο στο ρεύμα τους . Επιπρόσθετα μπορούν να λειτουργήσουν και δίχως προϋπάρχουσα AC τάση στην οποία συνδέονται, μπορούν δηλαδή να δημιουργήσουν ηλεκτρικό δίκτυο.

Η τοπολογία του μονοφασικού DC/AC μετατροπέα του ακόλουθου σχήματος, επιτρέπει στο ρεύμα της AC πλευράς να είναι είτε θετικό είτε αρνητικό, ανάλογα με το εάν άγει η δίοδος ή ο πλήρως ελεγχόμενος διακόπτης της εκάστοτε φάσης. Οι ελεγχόμενοι ημιαγωγικοί διακόπτες αναβοσβήνουν σε διαγώνια ζευγάρια (όταν δηλαδή οι ελεγχόμενοι ημιαγωγικοί διακόπτες TR1 και TR2 είναι σε αγωγή, οι TR3 και TR4 είναι σε αποκοπή και τανάπαλιν). Θεωρώντας εξιδανικευμένους διακόπτες, έχουμε ότι η τάση της κάθε φάσης είναι ανεξάρτητη της φοράς του ρεύματος και εξαρτάται μόνο από την κατάσταση αγωγής των πλήρως ελεγχόμενων διακοπών . Επομένως, αφού μπορεί να προκύψει και η τοπολογία αυτού του μετατροπέα ισχύος μπορεί να λειτουργήσει και ως inverter, αλλά και ως ανορθωτής. Καθώς μπορεί να ρυθμιστεί και η διαφορά φάσης μεταξύ και ο DC/AC μετατροπέας αυτός έχει τη δυνατότητα να εγχέει και να απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο στο οποίο συνδέεται.



Εικόνα 2.22:Κύκλωμα DC/AC μετατροπέα

Η διαμόρφωση των παλμών οι οποίοι ελέγχουν την κατάσταση αγωγής των IGBTs μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους, όπως η Διαμόρφωση Τετραγωνικής Κυματομορφής, η *Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)* και η *Space Vector Modulation (SVM)*. Στην SPWM τεχνική οι παλμοί των IGBTs παράγονται από τη σύγκριση ενός ημιτονοειδούς σήματος ελέγχου (φέρων) με μια τριγωνική κυματομορφή. Ο λόγος του πλάτους του φέροντος προς αυτό της τριγωνικής κυματομορφής ονομάζεται λόγος διαμόρφωσης πλάτους m_a , ο οποίος είναι επιθυμητό – για λόγους αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως εξόδου – να διατηρείται μικρότερος της μονάδας. Η RMS τιμή της κυρίαρχης αρμονικής της πολικής τάσεως εξόδου εξαρτάται από τον λόγο διαμόρφωσης πλάτους m_a και την τάση εισόδου V_{DC} όπως ορίζει η ακόλουθη σχέση :

$$V_{LL,RMS_1} \approx 0,612 * m_a * V_{DC}$$

Κεφάλαιο 3^ο – Ανάπτυξη μοντέλων για τα επιμέρους υποσυστήματα

Τα κτήρια σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης αποτελούν πρακτική που ήδη έχει ξεκινήσει και θα συνεχίσει να εφαρμόζεται κατά κόρον ακόμη και στην χώρα μας . Σύμφωνα με ευρωπαϊκές οδηγίες θα πρέπει (μέχρι το τέλος του 2021) , τα νέα κτήρια που κατασκευάζονται να είναι σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης και τα ήδη σε χρήση να τροποποιηθούν κατάλληλα ώστε να μπορούν να ενταχθούν σε αυτή την κατηγορία .

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται τρόποι επίτευξης του συγκεκριμένου στόχου (με βάση στοιχεία ήδη υπάρχουσας οικίας που ανήκει στην Β γεωγραφική ζώνη) και πραγματοποιείται δυναμική προσομοίωση των προτεινόμενων συνδεσμολογιών, με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Modelica.

Στις επόμενες παραγράφους θα γίνει εκτενής αναφορά στην προαναφερθείσα γλώσσα προγραμματισμού καθώς και στην υλοποίηση των διαφόρων μοντέλων που δομούν τις προς εξέταση τοπολογίες στο συγκεκριμένο προγραμματιστικό περιβάλλον .

3.1 Η γλώσσα προγραμματισμού Modelica

Η Modelica είναι μια αντικειμενοστραφής, δηλωτική, πολύ-πεδιακή γλώσσα προγραμματισμού για μοντελοποίηση σύνθετων συστημάτων (που να περιέχουν ηλεκτρολογικά, ηλεκτρονικά, θερμικά υδραυλικά, μηχανολογικά, κ.ά. υποσυστήματα), δημιουργώντας πακέτα βασιζόμενη στα στοιχεία που τα αποτελούν . Έχει αναπτυχθεί από τον μη κερδοσκοπικό οργανισμό “Modelica Association ” και παρότι μοιάζει αρκετά με υπόλοιπες γλώσσες αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού (όπως η C++ και η Java), έχει δύο βασικές ειδοποιούς διαφορές :

- Οι κλάσεις της (Modelica) δεν μεταγλωττίζονται, όπως των υπόλοιπων γλωσσών, αλλά μεταφράζονται πρώτα σε αντικείμενα τα οποία στην συνέχεια επεξεργάζεται ο μεταγλωττιστής (δεν υπάρχουν απαιτήσεις για συγκεκριμένο μεταγλωττιστή) .
- Παρόλο που οι τάξεις μπορούν να περιέχουν αλγοριθμικά στοιχεία παρόμοια με δηλώσεις ή τμήματα κώδικα στις κοινές γλώσσες προγραμματισμού, το κύριο περιεχόμενο τους είναι ένα σύνολο εξισώσεων. Οι εξισώσεις δεν περιγράφουν ανάθεση, αλλά ισότητα (μπορούν να διαβαστούν τόσο από δεξιά προς αριστερά, όσο και αντίστροφα) και δεν έχουν προκαθορισμένη αιτιατότητα (ο μεταγλωττιστής επιλέγει την σειρά

ανάγνωσης και ποία δεδομένα θα χρησιμοποιηθούν σαν είσοδος ή αποτέλεσμα του συστήματος).

Η προσπάθεια σχεδιασμού της Modelica ξεκίνησε τον Σεπτέμβριο του 1996 από τον Hilding Elmqvist και βασίστηκε στην διδακτορική του διατριβή . Ο στόχος ήταν να αναπτυχθεί μια αντικειμενοστρεφής γλώσσα για τη μοντελοποίηση τεχνικών συστημάτων με σκοπό την επαναχρησιμοποίηση και την ανταλλαγή δυναμικών μοντέλων συστημάτων σε τυποποιημένη μορφή.

Η Modelica έχει τους τέσσερις ενσωματωμένους τύπους Real, Integer, Boolean, String. Συνήθως, οι τύποι που ορίζονται από το χρήστη παράγονται, για τη συσχέτιση της φυσικής ποσότητας, μονάδας, ονομαστικών τιμών και άλλων χαρακτηριστικών. Η αλληλεπίδραση ενός εξαρτήματος με άλλα συστατικά ορίζεται από φυσικές θύρες, καλούμενες συνδέσεις .Ο σχεδιασμός γραμμών σύνδεσης μεταξύ των θυρών, έχει σαν αποτέλεσμα οι αντίστοιχες μεταβλητές σύνδεσης χωρίς το πρόθεμα "flow" να ταυτίζονται ενώ οι αντίστοιχες μεταβλητές σύνδεσης με το πρόθεμα "flow" να ορίζονται από εξίσωση αλγεβρικού αθροίσματος με μηδενικό αποτέλεσμα .

Ένα βασικό μοντέλο περιέχει εξισώσεις που περιγράφουν τη σχέση μεταξύ των συνδετικών θυρών σε δηλωτική μορφή. Στόχος είναι, το διασυνδεδεμένο σύστημα συστατικών, να οδηγήσει σε ένα σύνολο διαφορικών, αλγεβρικών και διακριτών εξισώσεων όπου ο αριθμός των άγνωστων και ο αριθμός των εξισώσεων είναι ταυτόσημος (τότε το μοντέλο θεωρείται σταθμισμένο-ισορροπημένο). Η ταυτόχρονη συναλήθευση όλων των εξισώσεων οδηγεί στην δυναμική επίλυση του συστήματος [18].

3.2 Περιγραφή διατάξεων-εγκαταστάσεων

Στις παραγράφους 2.2 και 2.3 του προηγούμενου κεφαλαίου έγινε αναφορά στην δομή, τις αρχές λειτουργίας και την τεχνολογία πίσω από τα επιμέρους υποσυστήματα των διατάξεων που εξετάζονται στην συγκεκριμένη εργασία. Στις παραγράφους που ακολουθούν αναλύεται η ανάπτυξη μοντέλων για κάθε υποσύστημα ,ενώ συνοψίζονται οι παραδοχές και οι εξισώσεις οι οποίες τα διέπουν. Επίσης για κάθε μοντέλο περιγράφονται οι παράμετροι του, όπως και οι μεταβλητές εισόδου-εξόδου που ορίζουν την αλληλεπίδραση του με άλλα μοντέλα.

3.2.1 Μοντέλο κτηρίου (Τοίχου)

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, για την περιγραφή του κτηρίου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το εργαλείο της ιστοσελίδας Webtools του Ευρωπαϊκού προγράμματος tabula/episcopus.

Είδος επιφάνειας	A(m ²)	U[W/(m ² *K)]	b(-)	Uεπιφ[W/(m ² *K)]
Δάπεδο1	45	1,90	1	85,5
Δάπεδο2	90	0,50	1	45
Οροφή	135	0,50	1	67,5
Εξ. τοίχος	137	0,70	1	95,9
Πόρτα/Παράθυρα	27	4,10	1	110,7
ΣΥΝΟΛΟ	434	-	-	404,6

Πίνακα 3.1 : Πίνακας συντελεστών θερμομονωτικής επάρκειας κτηρίου

Το κτήριο που επιλέχθηκε ανήκει στην γεωγραφική ζώνη Β και με βάση την θέση του, τα δομικά του συστατικά και τα κουφώματα του (πόρτες & παράθυρα) υπολογίζονται τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ο συντελεστής της μέσης θερμοπερατότητας του είναι $\bar{U} = 0,9323 \frac{W}{m^2 * K}$
- Ο συντελεστής της μέσης θερμικής αντίστασης, ο οποίος είναι αντίστροφος του συντελεστή της μέσης θερμοπερατότητας του κτηρίου πολλαπλασιασμένου με το σύνολο των θερμαινόμενων επιφανειών, βρέθηκε :

$$\bar{R} = \frac{1}{\bar{U} * \sum_1^n A_i} = \frac{1}{0,9323 \frac{W}{m^2 * K} * 434 m^2} \rightarrow \bar{R} = 0,00247 \frac{K}{W}$$

Προφανώς, η θερμική αντίσταση του κτηρίου μπορεί να απεικονιστεί από δύο ίσες θερμικές αντιστάσεις R_i , συνδεδεμένες σειριακά μεταξύ τους, όπου:

$$R_i = \frac{\bar{R}}{2} = 0,00124 \frac{K}{W}$$

- Ανάμεσα τους παρεμβάλλεται ένα στοιχείο αποθήκευσης θερμότητας, ο HeatCapacitor1 (για να προσομοιωθεί η «συγκράτηση ενέργειας » λόγω δομικών-μονωτικών χαρακτηριστικών της κατασκευής), η τιμή του οποίου προκύπτει από τα δεδομένα του εργαλείου webtools του ευρωπαϊκού προγράμματος eriscopre (πρώην Tabula).

$$HeatCapacitor1 = 45 \frac{Wh}{m^2 \text{ θερμαινόμενης} * K} ,$$

Πολλαπλασιάζοντας με τα δευτερόλεπτα μια ώρα και το εμβαδόν του κτηρίου (* 3600 sec* 115 m²), προκύπτει ότι :

$$HeatCapacitor1 = 18.630.000 \frac{J}{K}$$

- Παράλληλα με την περιγραφείσα διάταξη, συνδέεται ακόμη μια θερμική αντίσταση, που αντιπροσωπεύει τις απώλειες κτηρίου λόγω αερισμού (η

τιμή της παραμέτρου U_{vent} προκύπτει πάλι από τα δεδομένα του εργαλείου webtools του ευρωπαϊκού προγράμματος eriscorpe)

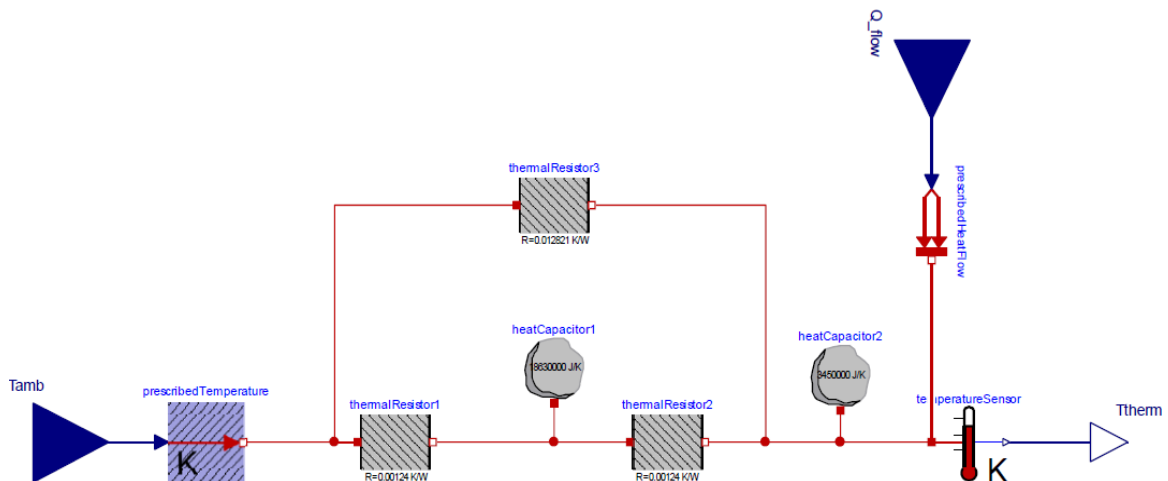
$$R_{vent} = \frac{1}{U_{vent}} = \frac{1}{147 \frac{W}{K}} = 0,012821 \frac{K}{W}$$

- Στην συνέχεια, συνδέεται, σε σειρά στην σχηματισμένη τοπολογία, ακόμη ένα στοιχείο αποθήκευσης θερμότητας, ο HeatCapacitor2 που αντιπροσωπεύει την «συγκράτηση ενέργειας» λόγω του στρώματος αέρα που περιβάλλει εσωτερικά τους τοίχους και λειτουργεί μονωτικά

$$HeatCapacitor2 = 3.450.000 \frac{J}{K}$$

- Τέλος προστίθεται σειριακά ένα στοιχείο που μας προσομοιώνει την έγχυση θερμικής ισχύος στο εσωτερικό του κτηρίου, Q_{flow} , (το οποίο επί της ουσίας επιτρέπει την εισαγωγή των δεδομένων του επιλεγμένου τρόπου θέρμανσης –fan coil και heat pump).

Η άνωθεν περιγραφείσα διάταξη απεικονίζεται ακολούθως :



Εικόνα 3.1 : Μοντέλο κτηρίου

Το δεδομένο εξόδου του συγκεκριμένου μπλοκ, είναι η θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, T_{them} , υπολογισμένη με βάση την θερμοκρασία περιβάλλοντος (είσοδος στο σύστημα - T_{amb}), τα δομικά χαρακτηριστικά του κτηρίου(προσομοιωμένα όπως αναλύθηκε στην συγκεκριμένη παράγραφο) και την θέρμανση του κτηρίου (Q_{flow}).

Η εξίσωση που υλοποιείται στο μοντέλο της θερμικής αντίστασης του κτηρίου (ThermalResistor) της Modelica [19], [20] είναι για τον υπολογισμό της καταναλισκόμενης ισχύος κατά μήκος της είναι :

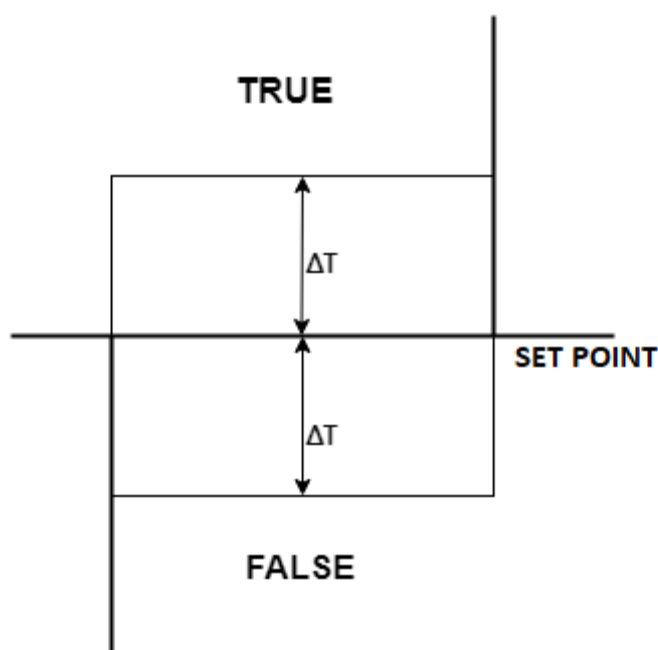
$$dT = R * Q_{flow}$$

Η εξίσωση που υλοποιείται στο μοντέλο του θερμικού πυκνωτή του κτηρίου (HeatCapacitor) της Modelica είναι για τον υπολογισμό της καταναλισκόμενης ισχύος κατά μήκος του είναι:

$$C * \frac{dT}{dt} = Q_{flow}$$

3.2.2 Θερμοστάτης

Το μοντέλο του Θερμοστάτη [[19], [20], στην ουσία αποτελεί έναν διακόπτη ελέγχου.

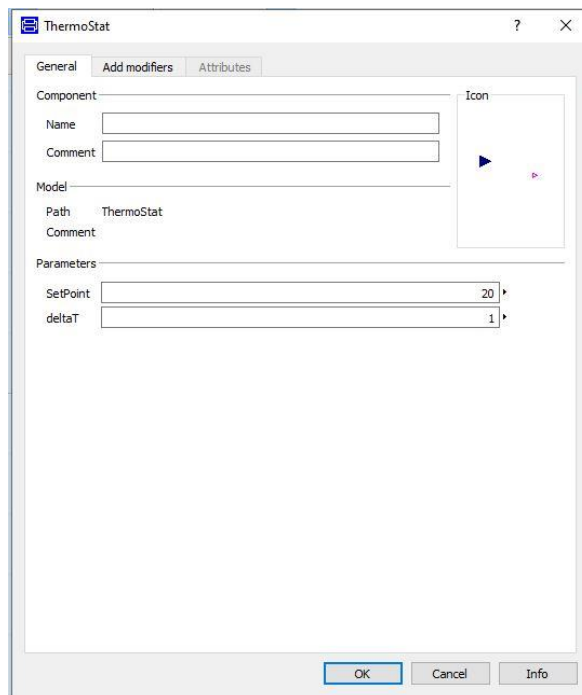


Εικόνα 3.2 : Μοντέλο θερμοστάτη

Δέχεται σαν είσοδο μια επιλεγμένη τιμή θερμοκρασίας-Tin (μεταβλητή τύπου Real) και την συγκρίνει με την παράμετρο SetPoint με εύρος διακύμανσης deltaT . Η έξοδος του είναι μια μεταβλητή τύπου Boolean που αναλόγως με τις επικρατούσες συνθήκες δίνει τιμή On ή Off ,καθιστώντας αυτό το μπλοκ κατάλληλο για έλεγχο του λοιπού εξοπλισμού της εγκατάστασης . Συνεπώς:

- Εάν $T_{in} > \text{SetPoint} - \Delta T$ το μπλοκ δίνει σαν έξοδο τιμή Off (False)

- Εάν Tin <SetPoint – ΔT το μπλοκ δίνει σαν έξοδο τιμή On (True)



Εικόνα 3.3 : Παράμετροι μοντέλου θερμοστάτη

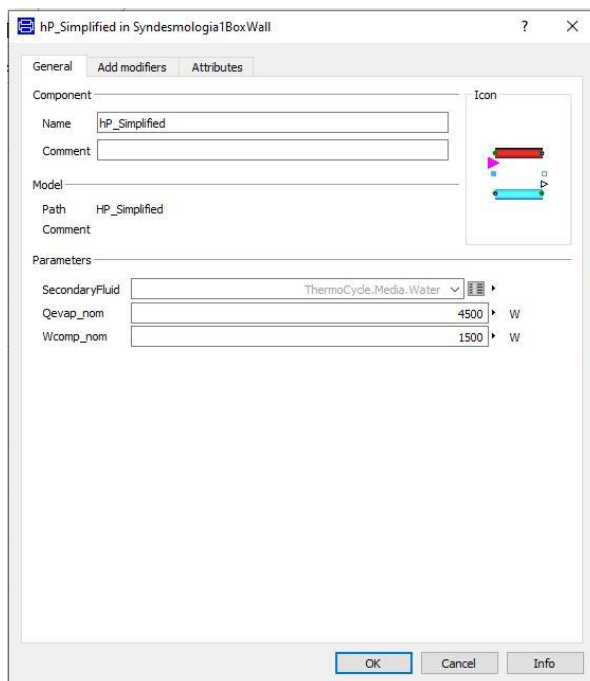
3.2.3 Αντλία Θερμότητας

Στην συγκεκριμένη εργασία μελετάται η θέρμανση του χώρου με χρήση της αντλίας θερμότητας. Το μοντέλο της αντλίας θερμότητας [19], [20] βασίζεται στην διάταξη της, όπως περιγράφηκε σε παράγραφο του προηγούμενου κεφαλαίου (παράγραφος 2.2.3). Πρόκειται για μια αντλία ψυκτικού - νερού, δηλαδή το θερμικό μέσο απόδοσης είναι το νερό.

Αποτελείται από δύο εναλλάκτες θερμότητας, τον συμπυκνωτή (απόδοση θερμότητας μέσω ψυκτικού) και τον ατμοποιητή (απορρόφηση θερμότητας μέσω ψυκτικού), η θέση των οποίων μπορεί να αλλάξει, (μέσω βαλβίδων που ρυθμίζουν την πορεία του ρευστού) ανάλογα με την λειτουργία ψύξης/θέρμανσης καθώς και από τον συμπιεστή, μηχανική διάταξη που επιτρέπει την συμπίεση των ατμών του ρευστού προκειμένου να επιτελέσουν ψυκτικό κύκλο με φορά αντίστροφη αυτής της φυσικής.

ΜΕ βάση το μοντέλο που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο ατμοκινητήρων και λεβήτων του ΕΜΠ, η ονομαστική ισχύς που καταναλώνεται στον συμπιεστή ($W_{COMP_{NOM}}$) 1.500 Watt και η θερμική που αποδίδεται στον ατμοποιητή ($Q_{EVAP_{NOM}}$), είναι 4.500 Watt. Συνεπώς, η θερμική συνολική ισχύς για την λειτουργία της αντλίας θερμότητας είναι 6.000 Watt. Τα δύο αυτά μεγέθη μαζί με την επιλογή του δευτερεύοντος ψυκτικού ρευστού της αντλίας θερμότητας

αποτελούν τις παραμέτρους του μοντέλου (οι οποίες θα τροποποιηθούν στην συνέχεια).



Εικόνα 3.4 : Παράθυρο παραμέτρων μοντέλου αντλίας θερμότητας

Το μοντέλο θεωρείται ιδανικό (δεν υπάρχουν θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον) και έχει τις εξής θύρες διασύνδεσης :

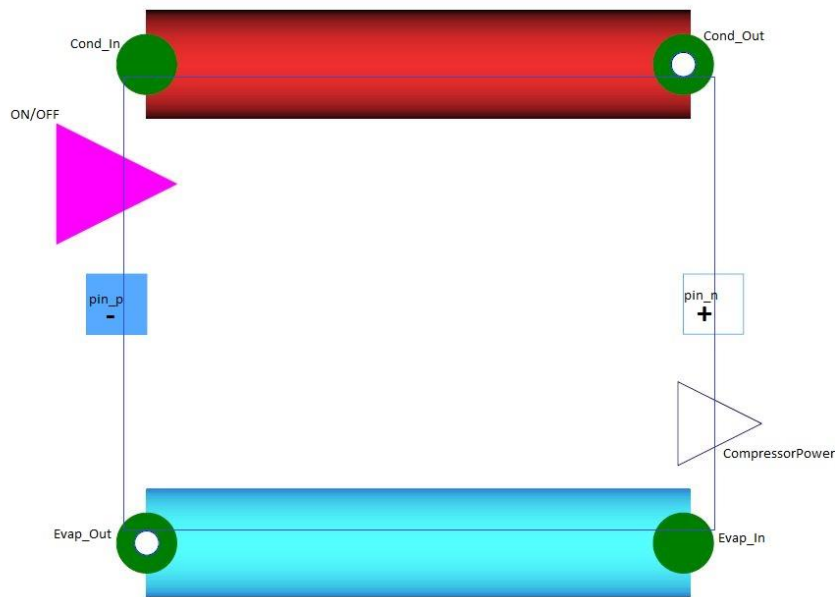
ΕΙΣΟΔΟΙ :

- Evap_In (τύπου FlangeA_pT)
Πρόκειται για την θύρα εισόδου του ρευστού στον ατμοποιητή
- Cond_In (τύπου FlangeA_pT)
Πρόκειται για την θύρα εισόδου του ρευστού στον συμπιεστή
- OnOff (τύπου Boolean)
Αποτελεί την θύρα ελέγχου λειτουργίας της αντλίας θερμότητας
- pin_p (τύπου PositivePin)
Είναι ο θετικός πόλος ρευματοδότησης της αντλίας θερμότητας
- pin_n (τύπου NegativePin)
Είναι ο αρνητικός πόλος ρευματοδότησης της αντλίας θερμότητας

ΕΞΟΔΟΙ :

- Evap_Out (τύπου FlangeB_pT)
Πρόκειται για την θύρα εξόδου του ρευστού από τον ατμοποιητή
- Cond_Out (τύπου FlangeB_pT)
Πρόκειται για την θύρα εξόδου του ρευστού από τον συμπιεστή

- CompressorPower (τύπου Real)
Είναι η θύρα εξόδου που μεταφέρει την πληροφορία της κατανάλωσης ισχύος της αντλίας θερμότητας ,δηλαδή της ισχύος του συμπιεστή.



Εικόνα 3.5 : Διαγραμματική απεικόνιση μοντέλου αντλίας θερμότητας

Να σημειωθεί ότι οι τύποι θύρας FlangeA_pT και FlangeB_pT, χρησιμοποιούνται για την διασύνδεση ρευστών μιας μόνο φάσης και οι μεταβλητές πίεσης και θερμοκρασίας εισόδου/εξόδου (όπως υποδηλώνεται και στο όνομα του κονέκτορα) παίρνουν τις τιμές που έχει το ρευστό κατά την διέλευση του από την φλάντζα. Συνεπώς η πίεση και η θερμοκρασία είναι across variables, δηλαδή ορίζουν την κατάσταση του ρευστού, ενώ η παροχή μάζας είναι through μεταβλητή- μεταβάλλεται κατά μήκος της διαδρομής του ρευστού .

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ :

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το μοντέλο της αντλίας θερμότητας αναπτύχθηκε στο εργαστήριο, οπότε δεν θα αναλυθεί σε βάθος ο τρόπος υλοποίησής του, αλλά συνοπτικά θα αναφερθούν οι εξισώσεις που το διέπουν.

Όλες οι εξισώσεις ισχύουν όταν η θύρα OnOff έχει είσοδο True (On)

- ΕΝΕΡΓΕΙΑ-ΙΣΧΥΣ :

Στο μοντέλο της αντλίας θερμότητας ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις, που αφορούν την συναλλαγή θερμότητας και την κατανάλωση ισχύος :

$$x = \frac{T_{IN_{EVAP}}(^{\circ}C)}{12}$$

Όπου γίνεται διαμοιρασμός της θερμοκρασίας που εφαρμόζεται στην είσοδο του ατμοποιητή στον αριθμό των πλακών που έχει (n=12) .

$$y = \frac{T_{IN_{COND}}(^{\circ}C)}{30}$$

Όπου γίνεται διαμοιρασμός της θερμοκρασίας που εφαρμόζεται στην είσοδο του συμπυκνωτή στον αριθμό των πλακών που έχει (m=30) .

Με βάση τις ανηγμένες θερμοκρασίες στον αριθμό πλακών των δύο εναλλακτών και τις ονομαστικές τιμές ισχύος που εισάγει ο χρήστης στο σύστημα υπολογίζεται η ισχύς του ατμοποιητή και η ισχύς του συμπιεστή .

$$Q_{EVAP} = (c_1 + c_2 * x + c_3 * x^2 + c_4 * y + c_5 * y^2 + c_6 * x * y + c_7 * x^2 * y + c_8 * x * y^2 + c_9 * x^2 * y^2) * \frac{Q_{EVAP_{NOM}}}{13,32}$$

$$W_{COMP} = (d_1 + d_2 * x + d_3 * x^2 + d_4 * y + d_5 * y^2 + d_6 * x * y + d_7 * x^2 * y + d_8 * x * y^2 + d_9 * x^2 * y^2) * \frac{W_{COMP_{NOM}}}{3}$$

Η ισχύς του συμπυκνωτή ισούται με :

$$Q_{COND} = Q_{EVAP} + 0,93 * W_{COMP}$$

Όπου 0,93 είναι ο ηλεκτρομηχανικός βαθμός απόδοσης του κινητήρα του συμπιεστή .

Οι τιμές των συντελεστών των εξισώσεων φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα και αντικατοπτρίζουν τον χάρτη λειτουργίας μιας εμπορικής αντλίας θερμότητας .

c1	8,358	d1	3,746
c2	12,21	d2	-2,7
c3	-3,015	d3	1,134
c4	2,914	d4	-3,104
c5	-2,69	d5	2,493
c6	-12,24	d6	5,654
c7	6,149	d7	-2,404
c8	4,227	d8	-2,79
c8	-2,513	d9	1,206

Πίνακας 3.2 : Τιμές των συντελεστών των εξισώσεων ισχύος του μοντέλου αντλίας θερμότητας

Ακόμη γνωρίζουμε ότι :

$$Q_{COND} = 4190 * \Delta T_{COND} * Cond_{In} \cdot m_{flow}$$

$$Q_{EVAP} = 4190 * (-\Delta T_{EVAP}) * Evap_{In} \cdot m_{flow}$$

$$W_{COMP} = v * i * \cos(0)$$

- ΑΡΧΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΜΑΖΑΣ:

$$Evap_{In} \cdot m_{flow} + Evap_{Out} \cdot m_{flow} = 0$$

$$Cond_{In} \cdot m_{flow} + Cond_{Out} \cdot m_{flow} = 0$$

- ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ:

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι θερμοκρασίες στην είσοδο του ατμοποιητή και του συμπυκνωτή ισούνται με τις θερμοκρασίες που έχει το ρευστό κατά την διέλευση του από την αντίστοιχη φλάντζα . Στην έξοδο όμως:

$$Cond_{Out} \cdot T = Cond_{In} \cdot T + \frac{Q_{COND}}{4190 * Cond_{In} \cdot m_{flow}}$$

$$Evap_{Out} \cdot T = Evap_{In} \cdot T - \frac{Q_{EVAP}}{4190 * Evap_{In} \cdot m_{flow}}$$

3.2.4 Τερματικό σώμα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας (Fan Coil Unit)

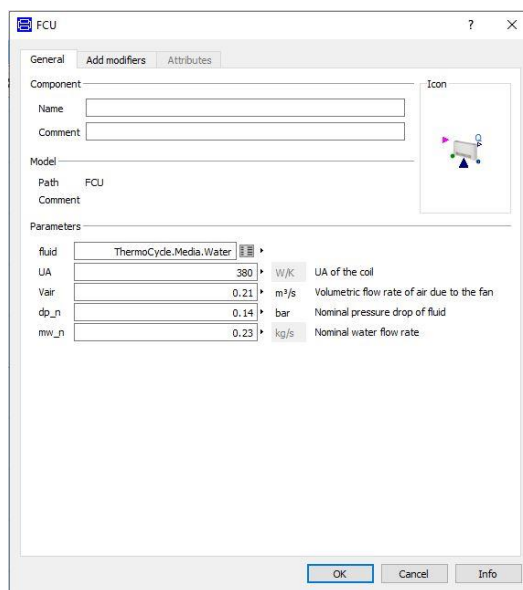
Το fan coil [19], [20] είναι το θερμαντικό (ενίοτε και ψυκτικό) σώμα που ρυθμίζει την θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου στα επιθυμητά επίπεδα .Το (μη δυναμικό) μοντέλο του αναπτύχθηκε στο εργαστήριο -εργαστήριο ατμοκινητήρων και λεβήτων ΕΜΠ -οπότε δεν θα αναλυθεί σε βάθος ο τρόπος υλοποίησης του, αλλά συνοπτικά θα αναφερθούν οι εξισώσεις που το διέπουν.

Στην ουσία αποτελείται από έναν ανεμιστήρα που «τραβάει » τον αέρα του κτηρίου στο εσωτερικό της μονάδας και φέρνοντας τον σε επαφή με κατάλληλο εναλλάκτη τον θερμαίνει (όταν η θερμοκρασία ψυκτικού μέσου τον εναλλάκτη είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία περιβάλλοντος) ή τον ψύχει (στην αντίστροφη περίπτωση) .Όταν η συναλλαγή θερμότητας ανάμεσα στα δύο ρευστά ολοκληρωθεί , ο αέρας (με την βοήθεια του ανεμιστήρα) επανεισάγεται στον χώρο.

Από τον πίνακα παραμέτρων του μοντέλου, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει :

- Το εργαζόμενο μέσο (νερό), που ρέει εντός του εναλλάκτη του fan coil

- Την θερμική αγωγιμότητα του πηνίου του fan coil (δηλαδή την δυνατότητα-ευκολία συναλλαγής θερμότητα του αέρα χώρου με τον εναλλάκτη) $[W/K]$.
- Την ογκομετρικό ρυθμό ροής αέρα λόγω ανεμιστήρα του fan coil $[m^3/sec]$
- Την ονομαστική πτώση πίεσης ψυκτικού εντός της διάταξης [bar]
- Τον ονομαστικό ρυθμό ροής μάζας ψυκτικού εντός του πηνίου της διάταξης $[kg/sec]$



Εικόνα 3.6: Παράθυρο παραμέτρων μοντέλου FCU

Όπως φαίνεται και από το εικονίδιο του μοντέλου, το fan coil έχει 5 θύρες διασύνδεσης .

ΕΙΣΟΔΟΙ :

- OnOff (τύπου Boolean)
Αποτελεί την θύρα ελέγχου λειτουργίας του FCU και συνδέεται με την έξοδο του μοντέλου του θερμοστάτη
- InFlow (τύπου FlangeA_pT)
Πρόκειται για την θύρα εισόδου του ψυκτικού ρευστού στην μονάδα του fan coil
- Troom (τύπου Real)
Αποτελεί την θύρα που μεταφέρει την πληροφορία της θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου, προς χρήση από τις εξισώσεις του μοντέλου του FCU

ΕΞΟΔΟΙ :

- Qsens (τύπου Real)
Η συγκεκριμένη θύρα αφορά την θερμική ισχύ που μεταφέρει η μονάδα Fan Coil στον χώρο
- OutFlow (τύπου FlangeA_pT)
Πρόκειται για την θύρα εξόδου του ψυκτικού ρευστού στην μονάδα του fan coil



Εικόνα 3.7 : Διαγραμματική απεικόνιση μοντέλου FCU

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ :

Όλες οι εξισώσεις ισχύουν όταν η θύρα OnOff έχει είσοδο True (On). Τότε:

Η θερμοκρασία στην είσοδο της μονάδας παίρνει την τιμή που έχει το ρευστό, όταν διέρχεται από την θύρα εισαγωγής .

Η μέση θερμοκρασία της μονάδας του Fan Coil είναι :

$$T_{FCU} = 0,5 * (InFlow.T_{outflow} + OutFlow.T_{outflow})$$

Ενώ η μέση θερμοκρασία του χώρου:

$$T_a = T_{room} + T_{aout}$$

Αντιστοίχως και η ροή μάζας καθορίζεται από τον ρυθμό διέλευσης του ψυκτικού από την φλάντζα εισαγωγής ($m_w = InFlow.m_flow$)

$$Η\ πτώση\ πίεσης : dp = dp_{nom} * \left(\frac{m_w}{m_{wnom}} \right)^2$$

Προφανώς η πίεση στην έξοδο της διάταξης υπολογίζεται από : $p_{out} = dp + p_{in}$

Ισχύει η αρχή διατήρησης της μάζας στο σύνολο του FCU:
$$\text{InFlow} \cdot m_{\text{flow}} + \text{OutFlow} \cdot m_{\text{flow}} = 0$$

Τέλος από το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων για τον υπολογισμό της θερμικής ισχύος που συναλλάσσεται ανάμεσα στην μονάδα Fan Coil και τον εσωτερικό χώρο, μπορούν να υπολογιστούν τα υπόλοιπα άγνωστα μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν σε άλλες εξισώσεις:

$$Q_{\text{sens}} = U * A * (T_{\text{FCU}} - T_a) \rightarrow$$

$$Q_{\text{sens}} = C_{p_{\text{air}}} * m_w * (\Delta T_{\text{Flow}}) \rightarrow$$

$$Q_{\text{sens}} = 4200 * m_w * (\text{InFlow} \cdot T_{\text{outflow}} - \text{OutFlow} \cdot T_{\text{outflow}}) \rightarrow$$

$$Q_{\text{sens}} = C_{p_{\text{air}}} * \rho_{\text{air}} (T_{\text{aout}} - T_{\text{room}}) = 1000 * 1,2 * (T_{\text{aout}} - T_{\text{room}})$$

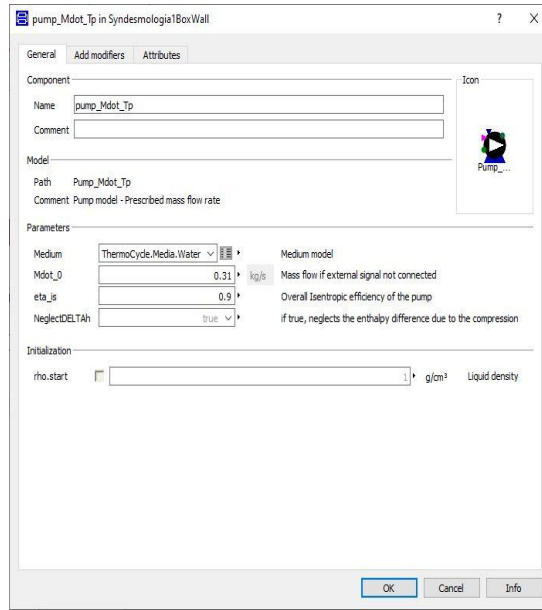
3.2.5 Αντλία - Pump

Το μοντέλο της αντλίας [19] προσομοιώνει μια ιδανική πηγή παροχής μάζας. Πρόκειται για ένα συσσωρευμένο μοντέλο (lumped model), βασιζόμενο στον ορισμό μιας προκαθορισμένης τιμής παροχής μάζας και στον υπολογισμό της απαιτούμενης ενεργείας μέσω ενός ολικού ισεντροπικού βαθμού απόδοσης. Ως ιδανική πηγή μάζας η συγκεκριμένη αντλία μπορεί να επιτύχει οποιοδήποτε μανομετρικό. Ισχύουν οι ακόλουθες υποθέσεις :

- Μη δυναμικό μοντέλο
- Δεν παρατηρείται ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον
- Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης και ο ρυθμός ροής μάζας υπολογίζονται με βάση τον χάρτη απόδοσης

Με βάση τις άνωθεν παραδοχές, οι παράμετροι του μοντέλου, τις οποίες επιλέγει ο χρήστης είναι (Εικόνα 3.8):

- Το εργαζόμενο μέσο του κυκλώματος στο οποίο θα συνδεθεί η αντλία (Medium)
- Η αρχική ροή μάζας ρευστού, σε περίπτωση που δεν υπάρχει σήμα εισόδου (Mdot_0)
- Ο συνολικός ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του μπλοκ (η_{is})
- Εάν το module θα είναι ιδανικό , δηλαδή εάν θα αγνοείται η μεταβολή ενθαλπίας ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο της αντλίας (επιλογή NeglectDELTAh - true/false)



Εικόνα 3.8: Παράθυρο παραμέτρων μοντέλου αντλίας

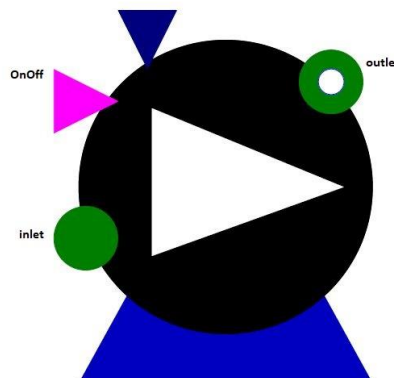
Οι θύρες διασύνδεσης του module είναι :

ΕΙΣΟΔΟΙ :

- inlet (τύπου FlangeA_pT)
Πρόκειται για την θύρα εισόδου του ρευστού στην αντλία.
- OnOff (τύπου Boolean)
Αποτελεί την θύρα ελέγχου λειτουργίας της αντλίας .

ΕΞΟΔΟΣ :

- outlet (τύπου FlangeB_pT)
Πρόκειται για την θύρα εξόδου του ρευστού από την αντλία .



Εικόνα 3.9 : Διαγραμματική απεικόνιση μοντέλου αντλίας

Προκειμένου να γίνει υπολογισμός των απαιτούμενων μεγεθών για την λειτουργία του μοντέλου εφαρμόζονται οι ακόλουθες εξισώσεις .

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ :

Εφόσον αγνοείται η μεταβολή ενθαλπίας ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο της αντλίας (NeglectDELTAh = true) και η αντλία είναι ιδανική (δεν γίνεται συναλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον) η θερμοκρασία εξόδου είναι ίδια με αυτήν στην είσοδο:

$$\text{outlet.T}_{\text{out}} = \text{inlet.T}_{\text{out}}$$

Δεν υπάρχουν πηγές ή καταβόθρες μάζας, αρά ισχύει η αρχή διατήρησης μάζας:

$$\text{inlet.m}_{\text{flow}} + \text{outlet.m}_{\text{flow}} = 0$$

Τέλος η ισχύς της αντλίας υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση (οι πιέσεις στην είσοδο και έξοδο έχουν τις τιμές που έχει το ρευστό, όταν τις διαπερνά)

$$W_{\text{PUMP}} = \frac{m_{\text{flow}} * (\text{outlet.p} - \text{inlet.p})}{\rho * \eta_{\text{is}}}$$

3.2.6 Θερμοδοχείο

Το θερμοδοχείο [20], [21], [22] αποτελεί επί της ουσίας την συσκευή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας της τοπολογίας, διάταξη που μας επιτρέπει να χρησιμοποιούμε την αντλία θερμότητας σε ώρες όπου έχουμε διαθέσιμη ενέργεια από τα ΦΒ μέσω της αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, με την θερμοκρασία ανύψωση του περιεχομένου εργαζόμενου μέσου (νερό) .

Πρόκειται για ένα κυλινδρικό μονωμένο δοχείο (με πολύ μικρή θερμική αγωγιμότητα υλικού τοιχωμάτων), στο οποίο καταλήγει το θερμό νερό που αναχωρεί από την αντλία θερμότητας πριν φτάσει στην μονάδα fan coil .Υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης ηλεκτρικής αντίστασης, προκειμένου να επιτευχθεί ακόμη μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας του περιεχομένου του, για την κάλυψη αναγκών ΖΝΧ, αν και αυτή η λειτουργία δεν χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Το μοντέλο ακολουθεί μια τεχνική πεπερασμένων όγκων (Finite Volume), σύμφωνα με την οποία η δομική μονάδα στην οποία έχει βασιστεί είναι το θερμικό κελί (CellPT), εντός του οποίου ορίζονται οι εξισώσεις διατήρησης μάζας και ενέργειας. Η σειριακή ένωση πολλών κελίων, οδηγεί στην κυρίως δομή του θερμοδοχείου, το μοντέλο TankCdot_PT .

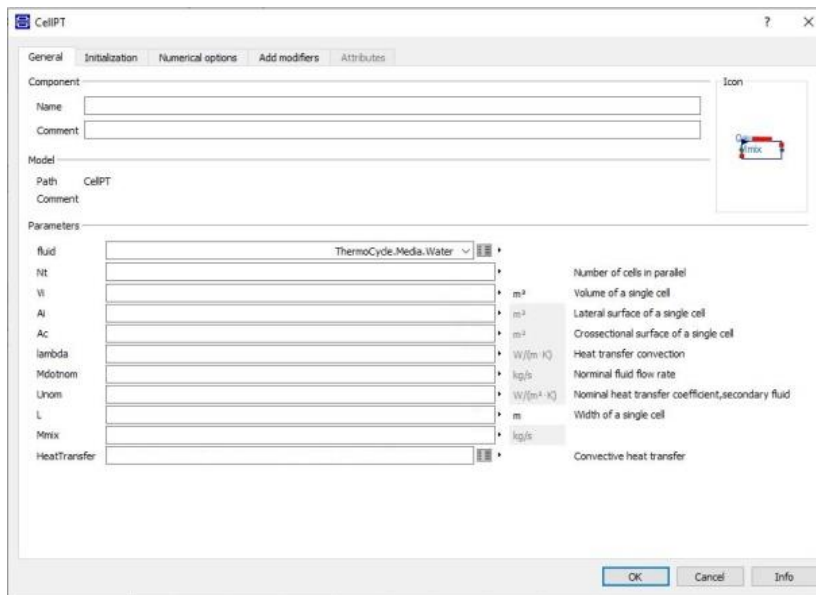
3.2.6.1 Θερμικό κελί - CellPT

Το μοντέλο CellPT περιγράφει την ροή του εργαζόμενου μέσου μέσα από ένα κελί, δηλαδή έναν πεπερασμένο όγκο-τμήμα της συνολικής διάταξης. Ολόκληρο το ΘΔ μπορεί να μοντελοποιηθεί με την διακριτοποίηση του σε πολλά κελία CellPT. Στο συγκεκριμένο μοντέλο ισχύουν οι ακόλουθες υποθέσεις:

- Η ταχύτητα ροής θεωρείται σταθερή κατά μήκος του κελιού
- Η πίεση και η θερμική αγωγιμότητα του κελιού έχουν σταθερή τιμή

Παράμετροι:

- *Fluid* :Επιλέγεται το είδος του ψυκτικού που ρέει κατά μήκος του κελιού
- N_t :Δηλώνεται ο αριθμός των κελίων που είναι συνδεδεμένα παράλληλα μεταξύ τους-συστοιχία (στην συγκεκριμένη εργασία αυτή η επιλογή μένει κενή, για λόγους που θα εξηγηθούν στην συνέχεια, άρα κάθε κελί μπορεί να διαφέρει από τα εκατέρωθεν του)
- V_i :Ο συνολικός όγκος κάθε κελιού $V_i = \frac{V_{TANK}}{N} [m^3]$
- A_i :Το εμβαδόν της πλευρικής επιφάνειας [m^2]
- A_c :Το εμβαδόν της κάθετης επιφάνειας [m^2]
- λ :Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λόγω συναγωγής [$W/(m * K)$]
- $M_{dot_{nom}}$:Ο ονομαστικός ρυθμός της ροής ψυκτικού [kg/sec]
- U_{nom} :Ο συντελεστής ονομαστικής μεταφοράς θερμότητας [$W/(m^2 * K)$]
- L :Το πλάτος κελιού [m]
- M_{min} :Ο ελάχιστος ρυθμός ροής ψυκτικού [kg/sec]
- HeatTransfer:Ο τρόπος μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής (διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος ψυκτικού, το σχήμα διακριτοποίησης κ.ά.)



Εικόνα 3.10: Παράθυρο παραμέτρων μοντέλου θερμικού κελιού

Οι θύρες διασύνδεσης του μοντέλου είναι :

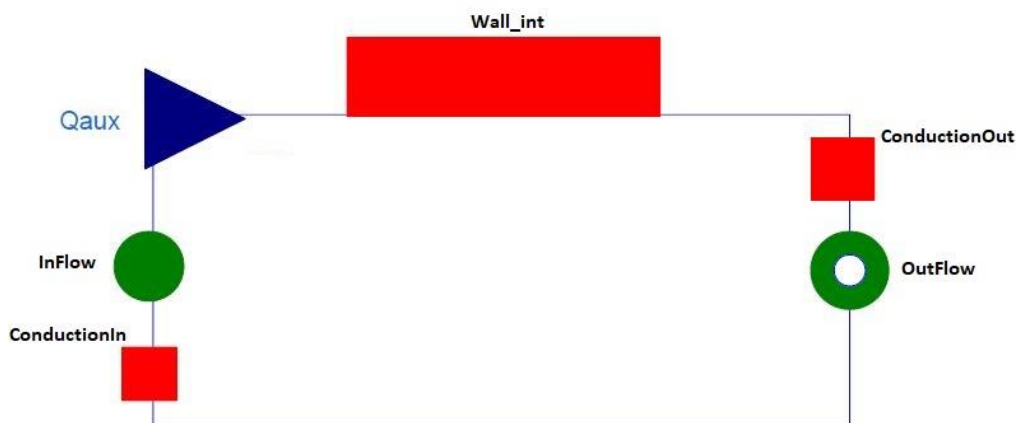
ΕΙΣΟΔΟΙ :

- InFlow (τύπου FlangeA_pT)
Πρόκειται για την θύρα εισόδου του ρευστού στο κελί .
- Qaux (τύπου Real)
Η είσοδος αυτή χρησιμοποιείται μόνο στις περιπτώσεις όπου συνδέεται/ενεργοποιείται αντίσταση εσωτερικά του θερμοδοχείου για επιπλέον θέρμανση του ψυκτικού (ώρες αιχμής) .Εκφράζει μια άμεση έγχυση θερμότητας επί του συνόλου των θερμικών ροών λόγω φαινομένου μεταφοράς (θερμότητας) (δηλαδή είναι απλά ένας καθαρός αριθμός που προστίθεται στην εξίσωση υπολογισμού θερμότητας).
- ConductionIn (τύπου ThermalPort)
Αποτελεί την θύρα (τύπου θερμοστοιχείου) που προσομοιώνει την ροή θερμικής ισχύος –προς το κελί, από το προηγούμενο του- ανά μονάδα επιφάνειας .Ο συντελεστής αυτός πολλαπλασιαζόμενος με την κατάλληλη επιφάνεια (την διεπιφάνεια επαφής των 2 κελιών) αντιπροσωπεύει την ανταλλαγή-μεταφορά θερμότητας τμηματικά κατά μήκος του θερμοδοχείου.
- Wall_int (τύπου ThermalPort)
Αποτελεί την θύρα (τύπου θερμοστοιχείου) που προσομοιώνει την ροή θερμικής ισχύος από τα τοιχώματα του δοχείου προς το ψυκτικό ανά μονάδα επιφάνειας .Ο συντελεστής αυτός πολλαπλασιαζόμενος με την κατάλληλη επιφάνεια (την περιφέρεια κυλίνδρου για εσωτερικά κελία ή την περιφέρεια κυλίνδρου και μια εκ των δύο βάσεων για ακραία κελιά) αντιπροσωπεύει την ανταλλαγή-μεταφορά θερμότητας του ψυκτικού με το

περιβάλλον .Εξαρτάται άμεσα από το υλικό κατασκευής και την μόνωση των τοιχωμάτων του δοχείου .

ΕΞΟΔΟΙ :

- OuFlow (τύπου FlangeB_pT)
Πρόκειται για την θύρα εξόδου του ρευστού από το κελί.
- ConductionOut (τύπου ThermalPort)
Αποτελεί την θύρα (τύπου θερμοστοιχείου) που προσομοιώνει την ροή θερμικής ισχύος –απο το κελί, προς το προηγούμενο του- ανά μονάδα επιφάνειας .Ο συντελεστής αυτός πολλαπλασιαζόμενος με την κατάλληλη επιφάνεια (την διεπιφάνεια επαφής των 2 κελιών) αντιπροσωπεύει την ανταλλαγή-μεταφορά θερμότητας τμηματικά κατά μήκος του θερμοδοχείου.



Εικόνα 3.11 : Διαγραμματική απεικόνιση μοντέλου θερμικού κελιού

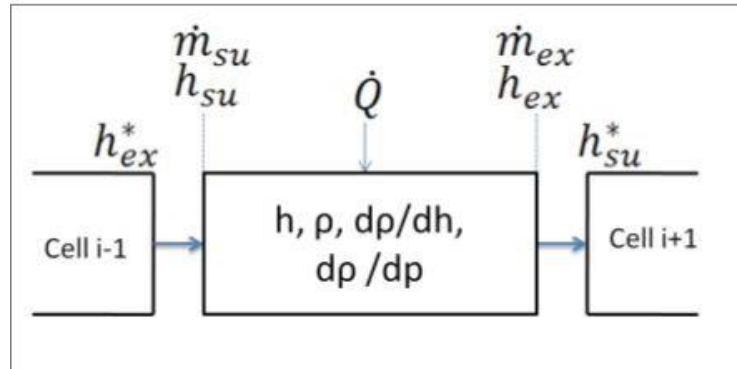
Η μεγαλύτερη πρόκληση κατά την δημιουργία του συγκεκριμένου μοντέλου, έγκειται στην δυνατότητα προσομοίωσης όχι μόνο της ροής ρευστού κατά μήκος του δοχείου, αλλά και τις σωστής μεταφοράς θερμότητας παράλληλα με την ροή ρευστού, ώστε σε συνθήκες μόνιμης λειτουργίας το θερμό ψυκτικό να βρίσκεται στην κορυφή του δοχείου και το ψυχρό στην βάση του . Προκειμένου να καταστρωθούν οι κατάλληλες εξισώσεις και να λειτουργεί σωστά το μοντέλο του κελιού, θα πρέπει πρώτα να γίνει μια αναφορά στα «συστατικά» του.

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ :

Εισαγωγή:

Μπορούν να παρατηρηθούν δύο είδη μεταβλητών .Οι μεταβλητές κελίου και οι μεταβλητές κόμβου . Οι μεταβλητές κόμβου διακρίνονται από το πρόθεμα su (supply-παροχή) και ex (exhaust-εξαγωγή) και χαρακτηρίζουν στην είσοδο και έξοδο κάθε κελίου αντίστοιχα . Ο δείκτης «*» υποδεικνύει τιμή, κελίου εκατέρωθεν του κελίου αναφοράς (h_{ex}^* :ενθαλπία ρευστού κατά την έξοδο του από το προηγούμενο κελί , h_{su}^* : ενθαλπία ρευστού κατά την είσοδο του στο επόμενο κελί).

Εντός των ορίων του κελιού ισχύουν οι αρχές διατήρησης μάζας και ενέργειας .



Εικόνα 3.12 : Μονογραμμική απεικόνιση διασύνδεσης εκατέρωθεν κελίων (ισοζύγια μεταβλητών)

Το ισοζύγιο μάζας του κελιού εκφράζεται σαν συνάρτηση των διαφορικών των μεταβλητών πυκνότητας (ρ) και ενθαλπίας (h) (εισόδου & εξόδου).

$$\dot{M}_{ex} - \dot{M}_{su} = V * \frac{d\rho}{dt} = V * \left(\frac{\partial \rho}{\partial h} * \frac{dh}{dt} + \frac{\partial \rho}{\partial p} * \frac{dp}{dt} \right)$$

Και το ισοζύγιο ενέργειας του :

$$V * \rho * \frac{dh}{dt} = \dot{M}_{su} * (h_{su} - h) - \dot{M}_{ex} * (h_{ex} - h) + \dot{Q} + V * \frac{d\rho}{dt} \quad (A)$$

Όπου :

V : ο όγκος του κελιού [m^3]

ρ : η πυκνότητα του ψυκτικού που ρέει εντός του κελιού [$\frac{kg}{m^3}$]

\dot{M}_{su} : η παροχή μάζας ψυκτικού στην είσοδο του κελιού [kg/sec]

\dot{M}_{ex} : η παροχή μάζας ψυκτικού στην έξοδο του κελιού [kg/sec]

h : η ενθαλπία στο εσωτερικό του κελιού (η τιμή της καθορίζεται από το σχήμα διακριτοποίησης [KJ/kg]

h_{su} : η ενθαλπία ψυκτικού στην είσοδο του κελιού [KJ/kg]

h_{ex} : η ενθαλπία ψυκτικού στην έξοδο του κελιού [KJ/kg]

\dot{Q} : η ροή θερμότητας από το περιβάλλον προς το κελί [W/m^2]

Η σχέση ανάμειξη στις μεταβλητές κελίου και κόμβου καθορίζεται από το επιλεγμένο σχήμα διακριτοποίησης. Η γλώσσα προγραμματισμού modelica μας δίνει την δυνατότητα να επιλέξουμε ανάμεσα στα εξής σχήματα διακριτοποίησης:

- *Σχήμα διακριτοποίησης κεντρικών διαφορών (Central Differences Scheme-Basic)*. Αφορά μονοδιάστατη ομαλή ροή και η τιμή της ενθαλπίας στο εσωτερικό του κελίου ορίζεται ως ο μέσος όρος των τιμών των εκατέρωθεν θυρών.

$$T = \frac{T_{su} + T_{ex}}{2}$$

- *Σχήμα διακριτοποίησης ανάντη (αριστερά) τιμών (Upwind Scheme-Basic)*. Αφορά μονοδιάστατη ομαλή ροή και η τιμή της ενθαλπίας στο εσωτερικό του κελίου ισούται με την τιμή στην θύρα εισόδου.

$$T = T_{su}$$

Μοντέλο (τιμήμα) μεταφοράς θερμότητας :

Αρχικά γίνεται αντιστοίχιση των τιμών που εισάγει ο χρήστης στο παράθυρο των παραμέτρων με τις μεταβλητές του μοντέλου του κελίου, με σκοπό τον υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής με το περιβάλλον.

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω επαφής με τα τοιχώματα του δοχείου, ισούται με τον ήδη εισαγμένο από τις παραμέτρους U_{nom} , ενώ ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω διάχυσης κατά την επαφή των διαδοχικών κελίων υπολογίζεται :

$$U_{cell} = \frac{\text{συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ρευστού}}{\text{πλάτος κελιού}} = \frac{\text{lambda}}{L}$$

Με βάση τα άνωθεν δεδομένα, και χρήση του μοντέλου «PartialHeatTransfer_IdealFluid» προκύπτει η ροή θερμότητας (q_{port}) κατά την επαφή με τα τοιχώματα του θερμοδοχείου :

$$Q_{port} = A_i * \sum q_{port} \quad [W]$$

Με χρήση του μοντέλου «Buoyancy_IdealFluid» προκύπτει η ροή θερμότητας λόγω διάχυσης κατά την διεπαφή των κελίων (q_{diff}) :

$$q_{diff} = q_{diff_R} + q_{diff_L}$$

$$Q_{diff} = A_c * \sum q_{diff}$$

Τότε η μεταφορά θερμότητας (λόγω συναγωγής και διάχυσης) ισούται με:

$$Q_{tot} = Q_{port} + Q_{diff}$$

Τελικά (και σε περίπτωση που υπάρχει αντιστάτης εσωτερικά του δοχείου για επιπλέον θέρμανση του ψυκτικού, δηλαδή $Q_{aux} \neq 0$) η συνολική μεταφορά θερμότητας προκύπτει από την ακόλουθη σχέση, (από την οποία μπορούν να υπολογιστούν τυχόν άγνωστα μεγέθη):

$$V_i * C_p * \rho * \frac{dT}{dt} + \dot{M} * C_p * (T_{ex} - T_{su}) = Q_{tot} + Q_{aux}$$

Προφανώς και ισχύει παντού στο μοντέλο η εξίσωση στατικού ισοζυγίου μάζας .

όπου :

\dot{M} : η ροή μάζας κατά μήκος ενός κελιού

\dot{M}_{ex} : η ροή μάζας στην έξοδο του κελιού

\dot{M}_{su} : η ροή μάζας στην είσοδο του κελιού

C_p : η ειδική θερμοχωρητικότητα (υπό σταθερή πίεση) [J/K]

T_{ex} : η θερμοκρασία ψυκτικού στην έξοδο του κελιού

T_{su} : η θερμοκρασία ψυκτικού στην είσοδο του κελιού

3.2.6.2 Μοντέλο δοχείου (TankCdot_PT)

Η διάταξη που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση και με την οποία αλληλεπιδρά επί της ουσίας ο χρήστης είναι το θερμοδοχείο, το οποίο αποτελείται από πλήθος (όσων επιλεγούν) κελιών .Είναι κατασκευασμένο από υλικό πολύ μικρής θερμικής αγωγιμότητας, προκειμένου να διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία ψυκτικού στο εσωτερικό του .Το συγκεκριμένο μοντέλο αναπτύχθηκε με βάση ένα μοντέλο του εργαστηρίου (το οποίο βασίστηκε στο αντίστοιχο της βιβλιοθήκης ThermoCycle).

Ισχύουν (προφανώς) οι ίδιες υποθέσεις με το κελί:

- Η ταχύτητα ροής θεωρείται σταθερή κατά μήκος του δοχείου
- Η πίεση και η θερμική αγωγιμότητα του δοχείου έχουν σταθερή τιμή

Στην καρτέλα των παραμέτρων εμφανίζονται οι ακόλουθες συνιστώσες, οι οποίες αντιστοιχίζονται στα κατάλληλα μεγέθη του μοντέλου του κελιού (ο χρήστης εισάγει τις επιθυμητές τιμές στην καρτέλα παραμέτρων του δοχείου και μεταφέρονται στις παραμέτρους κελιού προς χρήση από τις αντίστοιχες εξισώσεις και υπολογισμό της μεταφερόμενης θερμότητας) :

- *Fluid*: Επιλέγεται το είδος του ψυκτικού που ρέει κατά μήκος του δοχείου [-]

- N : Το πλήθος των κελίων από τα οποία αποτελείται το δοχείο [-]
- $chosen_ros$: Το κελί στο οποίο συνδέεται η εξωτερική πηγή άμεσης θερμότητας (πχ αντιστάτης), αν υπάρχει [-]
- $Tsensor_ros$: Το κελί στο οποίο συνδέεται αισθητήρας θερμοκρασίας (γνωστοποίηση δεδομένου) [-]
- aux_inlet_ros : Το κελί της εισόδου της δεύτερης ροής ψυκτικού στο δοχείο (σύνδεση Fan coil Unit) [-]
- aux_outlet_ros : Το κελί της εξόδου της δεύτερης ροής ψυκτικού στο δοχείο (σύνδεση Fan coil Unit) [-]
- V_{tank} : Ο συνολικός όγκος του δοχείου [m^3]
- $total_length$: Το συνολικό ύψος του δοχείου [m]
- $diameter (D)$: Η διάμετρος του δοχείου [m]
- U_{nom} :Ο συντελεστής ονομαστικής μεταφοράς θερμότητας [$W/(m^2 * K)$]
- λ :Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λόγω συναγωγής [$W/(m * K)$]
- M_{min} :Ο ελάχιστος ρυθμός ροής ψυκτικού [kg/sec]
- $Tstart$:Η θερμοκρασία αναφοράς (περιβάλλοντος) [$^{\circ}C$]
- L :Το πάχος του εκάστοτε κελιού [m]
- $A_{C_{first-last}}$: Το εμβαδόν της κάθετης επιφάνειας του πρώτου και τελευταίου κελιού [m^2]

$$A_{C_{first-last}} = \frac{\pi * D^2}{4}$$

- $A_{C_{middle}}$: Το εμβαδόν της κάθετης επιφάνειας (διεπαφής) των μεσαίων κελιών [m^2]

$$A_{C_{middle}} = \frac{\pi * D^2}{4}$$

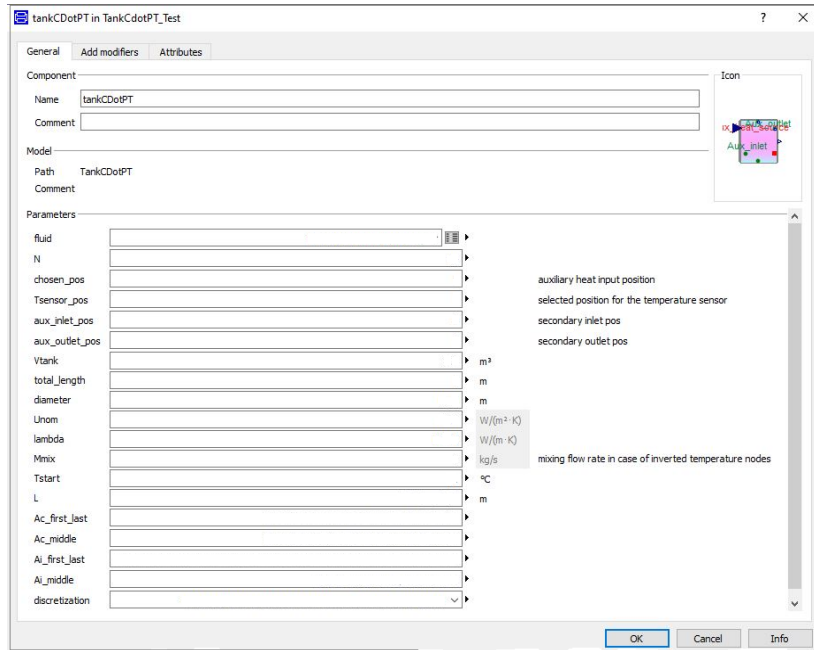
- $A_{i_{first-last}}$: Το εμβαδόν της πλευρικής επιφάνειας του πρώτου και τελευταίου κελιού [m^2]

$$A_{i_{first-last}} = \frac{\pi * D^2}{4} + \pi * D * L$$

- $A_{i_{middle}}$: Το εμβαδόν της πλευρικής επιφάνειας των μεσαίων κελιών [m^2]

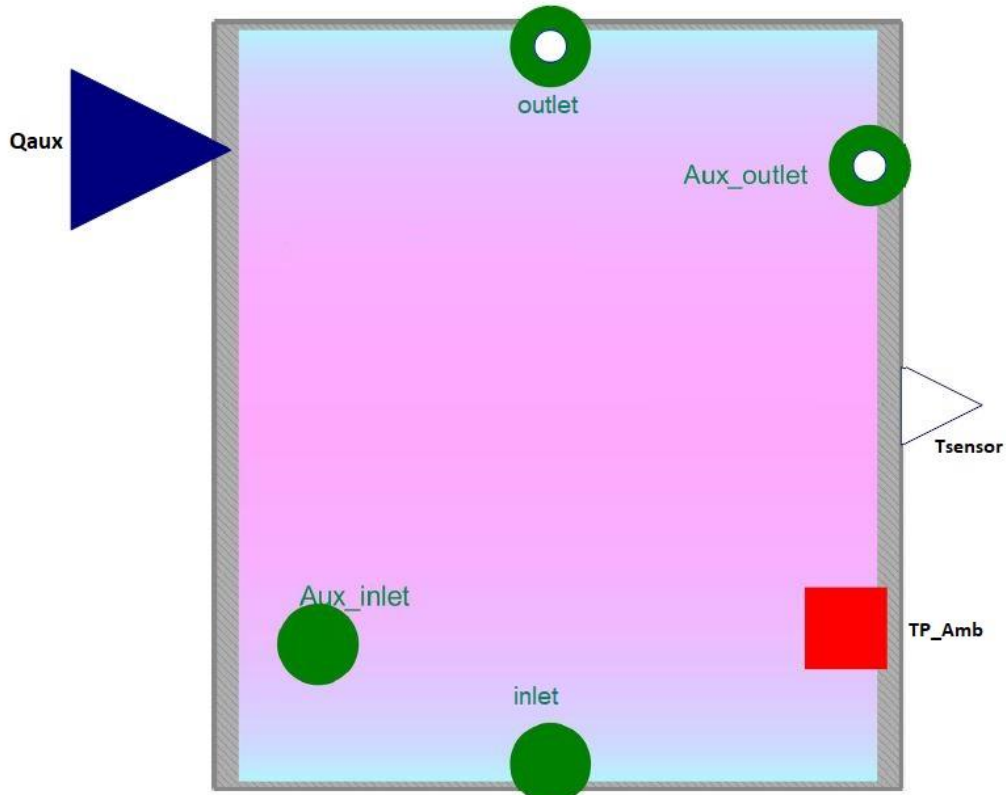
$$A_{i_{middle}} = \pi * D * L$$

- $discretization$: Το σχήμα διακριτοποίησης (όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 3.2.6.1)



Εικόνα 3.13: Παράθυρο παραμέτρων μοντέλου θερμοδοχείου

Οι θύρες διασύνδεσης του μοντέλου του θερμοδοχείου, όπως απεικονίζονται και στο ακόλουθο σχήμα, είναι :



Εικόνα 3.14 : Διαγραμματική απεικόνιση μοντέλου θερμοδοχείου

ΕΙΣΟΔΟΙ :

- inlet (τύπου FlangeA_pT) :
Πρόκειται για την πρωτεύουσα θύρα εισόδου του ρευστού στο δοχείο (σύνδεση αντλίας θερμότητας στο μοντέλο).
- Aux_inlet (τύπου FlangeA_pT) :
Πρόκειται για την δεύτερη θύρα εισόδου του ρευστού στο δοχείο (σύνδεση Fan Coil Unit στο μοντέλο).
- Qaux (τύπου Real)
Αντιπροσωπεύει την σύνδεση αντιστάτη εσωτερικά του δοχείου για να επιτευχθεί επιπλέον θέρμανση του ψυκτικού (απευθείας έγχυση θερμότητας για χρήση σε ώρες αιχμής)
- TP_Amb (τύπου ThermalPort)
Αποτελεί την θύρα (τύπου θερμοστοιχείου) που προσομοιώνει την ροή θερμικής ισχύος από τα τοιχώματα του δοχείου προς το ψυκτικό ανά μονάδα επιφάνειας .Ο συντελεστής αυτός πολλαπλασιαζόμενος με την κατάλληλη επιφάνεια (την περιφέρεια κυλίνδρου για εσωτερικά κελιά ή την περιφέρεια κυλίνδρου και μια εκ των δύο βάσεων για ακραία κελιά) αντιπροσωπεύει την ανταλλαγή-μεταφορά θερμότητας του ψυκτικού με το περιβάλλον .Εξαρτάται άμεσα από το υλικό κατασκευής και την μόνωση των τοιχωμάτων του δοχείου .Η θύρα αυτή συνδέεται με τα αντίστοιχα θερμοστοιχεία (Wall_int) κάθε κελίου από τα αποτελείται το θερμοδοχείο .

ΕΞΟΔΟΙ :

- outlet (τύπου FlangeA_pT) :
Πρόκειται για την πρωτεύουσα θύρα εξόδου του ρευστού από το δοχείο (σύνδεση αντλίας θερμότητας στο μοντέλο).
- Aux_outlet (τύπου FlangeA_pT) :
Πρόκειται για την δεύτερη θύρα εξόδου του ρευστού από το δοχείο (σύνδεση Fan Coil Unit στο μοντέλο).
- Tsensor (τύπου Real):
Αποτελεί την θύρα μέσω της οποίας εξάγεται η θερμοκρασία ενός επιλεγμένου κελίου .

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ:

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το θερμοδοχείο, αποτελείται από πλήθος (όσων επιλέξει ο χρήστης) θερμικών κελίων, συνδεδεμένων σειριακά μεταξύ τους . Προφανώς στο συγκεκριμένο μοντέλο δεν εμφανίζονται νέες εξισώσεις (αναφορικά με τα προς

μελέτη θερμικά μεγέθη), πέραν εκείνων για την διασύνδεση των επιμέρους τμημάτων .

Η έξοδος ρευστού κάθε κελίου συνδέεται με την είσοδο του επόμενου μεταφέροντας την αντίστοιχη πληροφορία των θερμοδυναμικών μεγεθών .Έτσι δημιουργείται η δομή του θερμοδοχείου . Στην βάση της δομής (1^ο κελί) υπάρχει η κύρια φλάντζα εισόδου (inlet), με χρήση της οποίας το δοχείο πληρώνεται με το νερό υψηλής θερμοκρασίας που τροφοδοτείται από την αντλία θερμότητας. Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται άμεση σύνδεση της θύρας inlet με την θύρα εισόδου του πρώτου κελίου. Αντιστοίχως παρατηρείται στην κορυφή της δομής (τελευταίο κελί διάταξης) η κύρια φλάντζα εξόδου, η οποία επιστρέφει στην αντλία θερμότητας νερό, χαμηλότερης από πριν θερμοκρασίας, από το δοχείο (άμεση σύνδεση θύρας outlet με θύρα εξόδου τελευταίου κελίου) .

Στην δομή, παρατηρείται ακόμη ένα δεύτερο ζεύγος θυρών (εισαγωγής- *aux inlet* *ros* & εξαγωγής- *aux outlet ros*) σε θέσεις που επιλέγει ο χρήστης , με το οποίο επιτυγχάνεται η σύνδεση του δοχείου με την μονάδα τερματικό σώματος εξαναγκασμένης κυκλοφορίας. Προφανώς η δευτερεύουσα φλάντζα εισαγωγής συνδέεται με την φλάντζα εισόδου του επιλεγμένου κελίου ενώ η εξαγωγής με την υποδειγμένη θύρα εξόδου.

Η αλγεβρική τιμή των μεγεθών που μεταφέρονται από μια θύρα ρευστού στην επόμενη, εξαρτάται από το σχήμα διακριτοποίησης που έχει επιλεγεί

Προκειμένου να γίνει εφικτή η μοντελοποίηση των φαινομένων άνωσης στην περίπτωση θερμικής αναστροφής – δηλαδή η συγκέντρωση των θερμότερων ρευμάτων στην κορυφή του δοχείου (προς τον κόμβο N) χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της εικονικής ροής, η οποία υλοποιείται μέσω μίας ιδανικής πηγής παροχής μάζας. Για την ιδανική πηγή μάζας αξιοποιήθηκε το μοντέλο αντλίας που περιγράφεται σε προηγούμενο κεφάλαιο, ενώ η τιμή της πλασματικής αυτής παροχής μάζας αποτελεί παράμετρο του μοντέλου. Ως εκ τούτου, μεταξύ δύο διαδοχικών κελιών πραγματοποιείται έλεγχος ύπαρξης θερμικής αναστροφής μέσω σύγκρισης των θερμοκρασιών του κάθε κελίου και αν το αποτέλεσμα είναι θετικό, ενεργοποιείται η ιδανική πηγή μάζας, η οποία φέρνει με φυσικό τρόπο το θερμότερο στρώμα προς τα άνω.

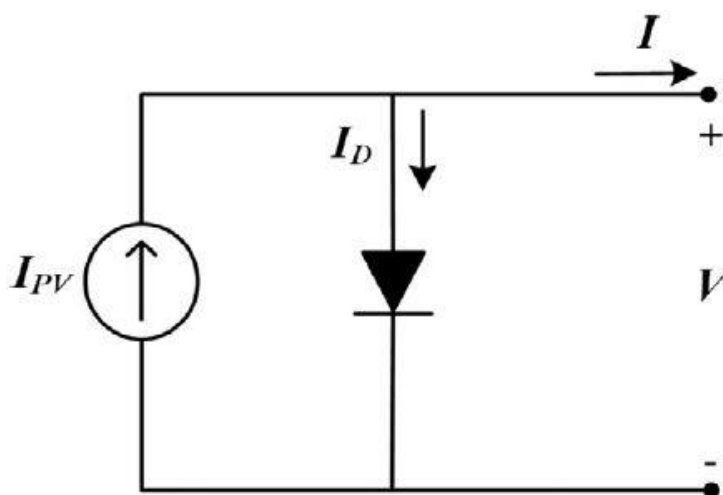
3.2.7 Φωτοβολταϊκά πάνελ (Μοντέλο SimplePlantSymmetric- PV Array)

Το μοντέλο της διάταξης των φωτοβολταϊκών πλαισίων βασίζεται στην συνδεσμολογία που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.3.1 .

Αποτελείται από συστοιχία παράλληλα και εν σειρά συνδεδεμένων PV modules (=ΦΒ κελία σε σειρά).

3.2.7.1 Μοντέλο ΦΒ Κελίου

Το πιο βασικό συστατικό κάθε προσομοίωσης φωτοβολταϊκής διάταξης είναι το μοντέλο του φωτοβολταϊκού κελίου. Είναι επιθυμητό, το μοντέλο, να προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο τις πραγματικές αρχές λειτουργίας του κελίου .Η πιο δημοφιλής προσομοίωση έγκειται στην χρήση του ηλεκτρικού ισοδύναμου κυκλώματος που συνδυάζει γραμμικά και μη γραμμικά στοιχεία .Το ισοδύναμο κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη μελέτη προήλθε από το ιδανικό μοντέλο ΦΒ κελίου.



Εικόνα 3.15 :Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικού μοντέλου κελίου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε προηγούμενη παράγραφο, το ΦΒ κελί αποτελείται από φωτοδιόδους, (p-n junctions), οι οποίες κατά την έκθεση τους σε ηλιακό φως μπορούν να εμφανίσουν ρεύμα στα άκρα τους . Κατά την απουσία ακτινοβολίας η φωτοδίοδος συμπεριφέρεται σαν απλή δίοδος .Τα χαρακτηριστικά του μοντέλου που σχηματίζεται προκειμένου να αναπαρασταθεί αυτή η συμπεριφορά (άνωθεν σχήμα), προσομοιώνονται με χρήση των εξισώσεων Shockley .Τότε το ρεύμα της διάταξης (ρεύμα διόδου) προκύπτει :

$$I_D = I_o \left[e^{\frac{q*V}{a*k*T}} - 1 \right]$$

όπου :

I_o : το ρεύμα κορεσμού

I_D :το ρεύμα διόδου

a : ο συντελεστής ιδανικότητας/απόδοσης της διόδου

q : η απόλυτη τιμή του φορτίου του ηλεκτρονίου ($-1.60217646 * 10^{-19}$ Cb)

k : η σταθερά Boltzmann

T : η θερμοκρασία της φωτοδιόδου

Με την παρουσία ακτινοβολίας η φωτοδιόδος απορροφά φωτόνια και παράγει ζεύγη σπών-ελεύθερων ηλεκτρονίων (φορείς) .Οι φορείς πολώνονται και παρατηρείται διαφορά δυναμικού κατά μήκος της διάταξης . Το φαινόμενο αυτό, ονομάζεται ΦΒ φαινόμενο και το ρεύμα που εμφανίζεται φωτορεύμα I_{PV} . Το πλάτος του εξαρτάται από την ροή της άμεσης ακτινοβολίας καθώς και την ικανότητα απορρόφησης του ημιαγωγικού υλικού της ΦΒ διάταξης .Η εισαγωγή του ρεύματος που προκύπτει από το φωτοβολταϊκό κελί, στην εξίσωση Shockley, οδηγεί στην δημιουργία της στοιχειώδους περιγραφής ενός πεφωτισμένου κελίου, αποτελούμενου από μια πηγή ρεύματος συνδεδεμένη παράλληλα με μια διόδο τύπου p-n επαφής .Αυτό είναι το ιδανικό μοντέλο .Το ρεύμα εξόδου του κελίου προκύπτει:

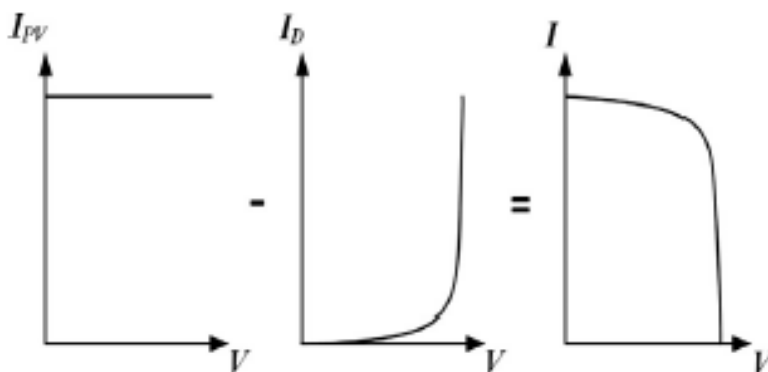
$$I = I_{PV} - I_D = I_{PV} - I_o \left[e^{\frac{q*V}{a*k*T}} - 1 \right]$$

Όπου:

I_{PV} :Το ρεύμα φωτοδιόδου

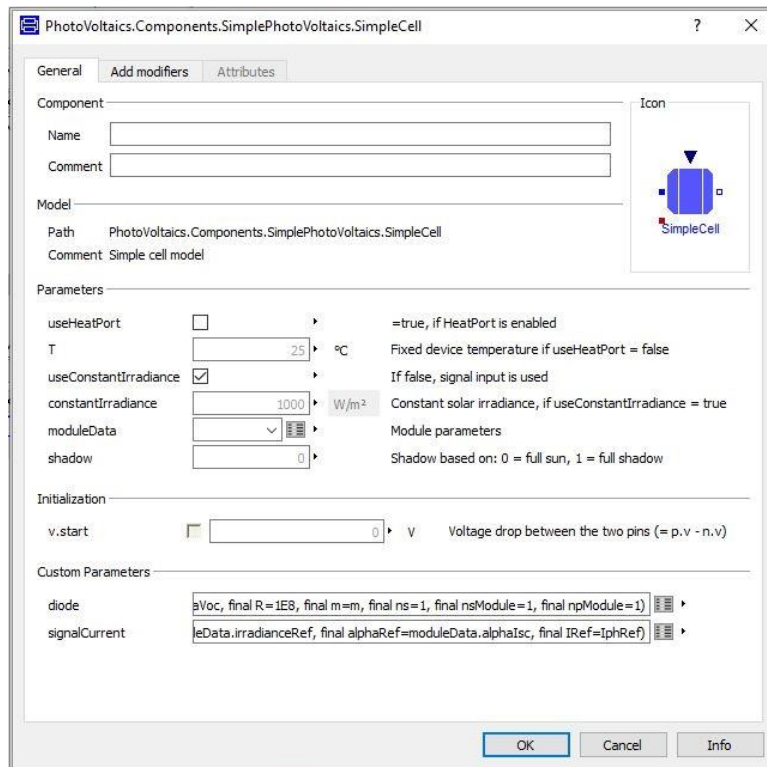
I_o :Το ρεύμα κορεσμού

Με χρήση των μεγεθών I_{PV} , I_o , a δημιουργούνται οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας του ΦΒ κελίου .



Εικόνα 3.16 :Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας του ΦΒ κελίου .

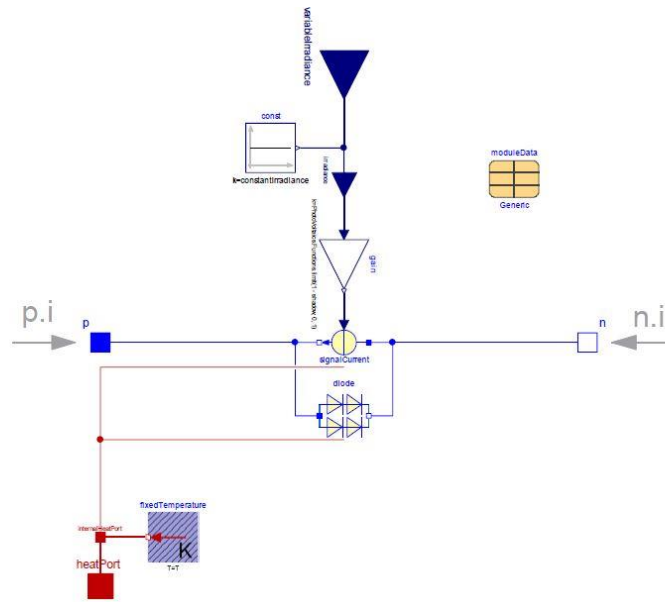
Τα δεδομένα του φωτοβολταϊκού κελίου [25], [26], [27], εφαρμόζονται στο μοντέλο μέσω της παραμέτρου «moduleData», η οποία περιέχει όλα τα χαρακτηριστικά μεγέθη όπως έχουν προκύψει από το data sheet του κατασκευαστή .Παράλληλα δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί η θερμοκρασία περιβάλλοντος αντί της αναφοράς και να επιλεγεί ο κατάλληλος συντελεστής σκίασης της διάταξης .



Εικόνα 3.17: Παράθυρο παραμέτρων μοντέλου ΦΒ κελίου

ΘΥΡΕΣ :

Η μοναδική θύρα εισόδου του μοντέλου του ΦΒ κελίου είναι η θύρα της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας ,ενώ σαν έξοδοι εμφανίζονται το θετικό και αρνητικό Pin που μεταφέρουν τις πληροφορίες των παραγόμενων ηλεκτρολογικών μεγεθών της διάταξης (v,I S,P,Q) . Υπάρχει ακόμη και η δυνατότητα χρήσης εισόδου heatport, τύπου θερμοστοιχείου, όταν επιλεγεί η χρήση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (αντί της αναφοράς) στο μοντέλο.



Εικόνα 3.18: Διαγραμματική απεικόνιση μοντέλου ΦΒ κελιού

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ :

Οι εξισώσεις υπολογισμού του ρεύματος εξόδου, προκύπτουν άμεσα από το ιδανικό μοντέλο φωτοβολταϊκού κελιού (όπως έχει ήδη περιγραφεί) .Πρωτίστως δομείται η εξίσωση (και εξάγεται η τιμή) του φωτορεύματος της διάταξης :

$$I_{PV} = I_{PVREF} * \frac{irradiance}{irradiance_{REF} + alpha_{REF} * (T_{heatport} - T_{REF})}$$

$$I_{PVREF} = I_{OREF} \left[e^{\frac{V_{CELLREF}}{a * V_{CELL}}} - 1 \right]$$

$$I_{PVREF} = I_{OREF} \left[e^{\frac{V_{CELLREF}}{a * V_{CELL}}} - 1 \right] + I_{MPREF}$$

Ακολουθεί ο υπολογισμός του ρεύματος διόδου

$$I_D = I_O * e^{\frac{V}{V_t}} + I_B * e^{\frac{-(V+B_V)}{N_{bt} * V_t}}$$

Τελικά το ρεύμα εξόδου από το ΦΒ κελί προκύπτει από την ακόλουθη σχέση :

$$I = I_{PV} - I_D$$

Όπου:

$I_{PV_{REF}}$: Το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού κελιού

$I_{O_{REF}}$: Το ρεύμα κορεσμού (saturation)

$V_{CELL_{REF}}$: Η τάση αναφοράς του φωτοβολταϊκού κελιού

V_{CELL} : Η τάση του φωτοβολταϊκού κελιού

$I_{MP_{REF}}$: Η τάση αναφοράς του MPP Tracker

α : Ο συντελεστής ιδανικότητας

$I_{MP_{REF}}$: I max power

V_t : τάση ανάλογη της θερμοκρασίας [$k \cdot T / Q$]

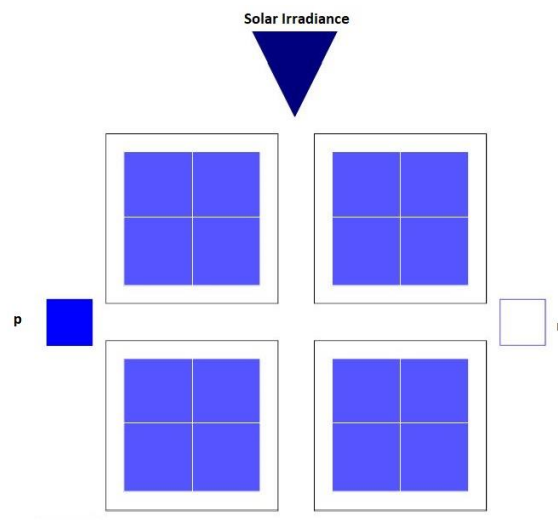
I_B : Το ρεύμα του φωτοβολταϊκού κελιού στο σημείο γονάτου

B_V : Η τάση του φωτοβολταϊκού κελιού στο σημείο γονάτου

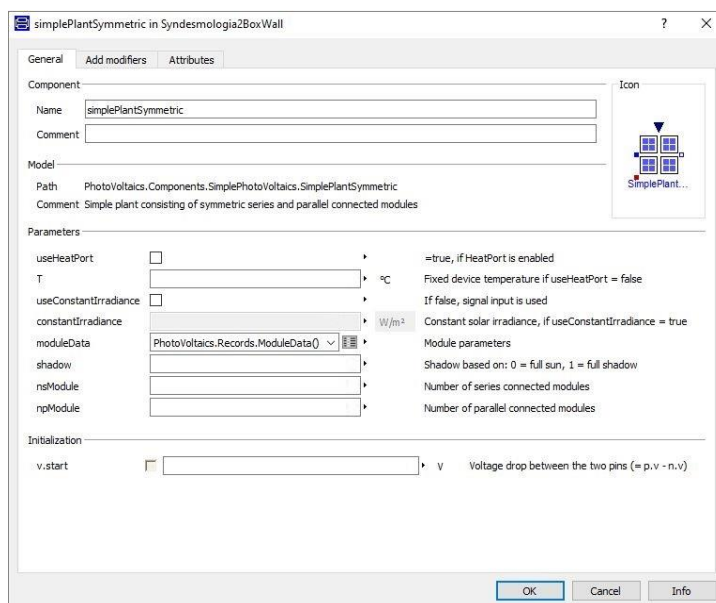
N_{bt} : Ο συντελεστής εκπομπής γονάτου

3.2.7.2 Μοντέλο Συστοιχίας ΦΒ (PV Array)

Το μοντέλο συστοιχίας ΦΒ πάνελ, είναι επί της ουσίας μια δομή αποτελούμενη από άθροισμα πολλών κελιών . Ισχύουν οι ίδιες εξισώσεις για τον υπολογισμό το ρεύματος εξόδου (ΦΒ) κάθε κελιού και η τελική τιμή ρεύματος εξόδου της διάταξης καθορίζεται από την διάταξη των κελιών . Η παράμετρος n_s υποδηλώνει τον αριθμό κελιών σε σειρά και η n_p παράλληλα . Το μοντέλο δέχεται σαν είσοδο την άμεση ακτινοβολία και οι έξοδοι του είναι τα άκρα p (positive) και n (negative) των ηλεκτρολογικών μεγεθών της συστοιχίας .



Εικόνα 3.19: Διαγραμματική απεικόνιση μοντέλου ΦΒ πάνελ



Εικόνα 3.20: Παράθυρο παραμέτρων μοντέλου ΦΒ πάνελ

3.2.8 Διάταξη μετασχηματισμού των φωτοβολταϊκών

Εφόσον η χρονική κλίμακα των τρανζίστορ των διατάξεων μετασχηματισμού συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη είναι διαφορετική (πολύ ταχύτερη) από την χρονική κλίμακα των θερμικών συστημάτων δεν υπάρχει η ανάγκη δημιουργίας αναλυτικού μοντέλου μετασχηματισμού (slow dynamics) .Συνεπώς η εργασία δεν επικεντρώνεται στο σύστημα μετασχηματισμού, αλλά στην μελέτη και σύγκριση των τοπολογιών θέρμανσης εσωτερικού χώρου.

ΘΥΡΕΣ

Το μοντέλο ανόρθωσης πλήρους γέφυρας [28], [29] βασίζεται στον αλγεβρικό υπολογισμό αγνώστων μεγεθών .Χρησιμοποιεί σαν είσοδο την τάση και την ένταση του παραγόμενου ρεύματος από την συστοιχία ΦΒ , καθώς και την τιμή της συνεχούς τάσης αναφοράς. Ο λόγος που γίνεται αυτό, είναι για να πραγματοποιείται σύγκριση της τάσης εισόδου με την αναφοράς και να καθορίζεται σε κάθε χρονική στιγμή το βέλτιστο σημείο λειτουργίας μέσω αλγορίθμου MPPT.

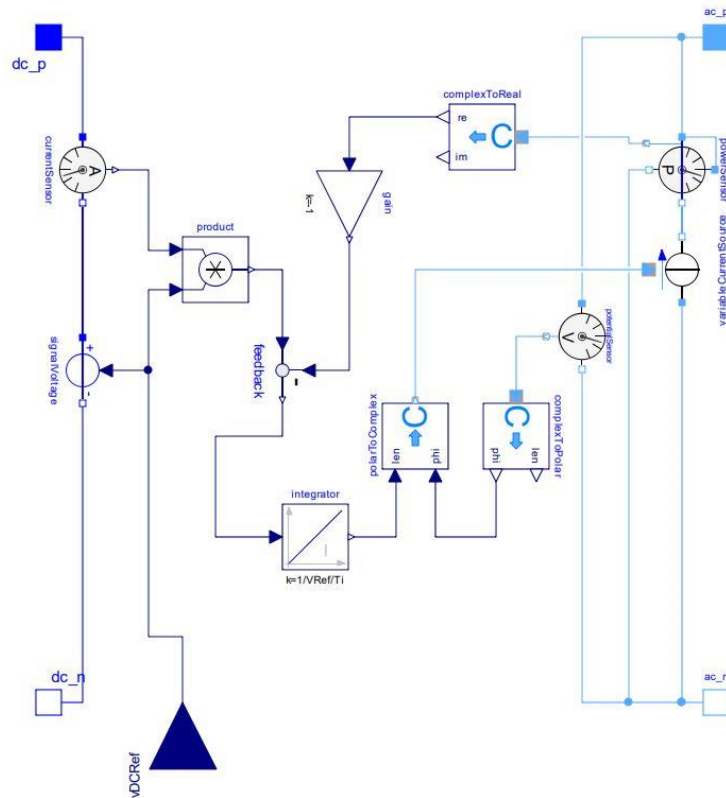
Οι θύρες εξόδου του μοντέλου είναι το θετικό και αρνητικό pin των ηλεκτρολογικών μεγεθών στο δεξί τμήμα της διάταξης μετασχηματισμού (εναλλασσόμενα μεγέθη).

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

Η δομική αρχή λειτουργίας στην οποία βασίζεται αυτή η διάταξη είναι το ισοζύγιο ισχύος Οι απώλειες αγνοούνται και θεωρούμε, χωρίς μεγάλο σφάλμα, ότι η παραγόμενη ενέργεια από τα ΦΒ πάνελ μεταφέρεται αυτούσια στην μεριά AC.

$$V_{DC} * I_{DC} + \text{real}(V_{AC} * I_{AC}) = 0$$

Να σημειωθεί εδώ, ότι η συνδεδεμένη στο εναλλασσόμενο τμήμα της διάταξης, βρίσκεται πηγή έντασής, μέσω της οποίας ο χρήστης ορίζει το μέτρο και κυρίως την γωνία του ρεύματος εξόδου .



Εικόνα 3.20: Διαγραμματική απεικόνιση μοντέλου μετασχηματισμού συνεχών σε εναλλασσόμενα μεγέθη.

3.2.9 Δεδομένα καιρού [30]

Στην συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν γενικά ετήσια δεδομένα καιρού για την ευρύτερη περιοχή της Αθήνας (Β΄ Θερμική ζώνη Ελλάδας). Το μοντέλο των δεδομένων περιέχει πληροφορίες ανά λεπτό για την ηλιακή ακτινοβολία (άμεση και έμμεση – σε W/m^2) και την θερμοκρασία περιβάλλοντος (σε βαθμούς Κ) .

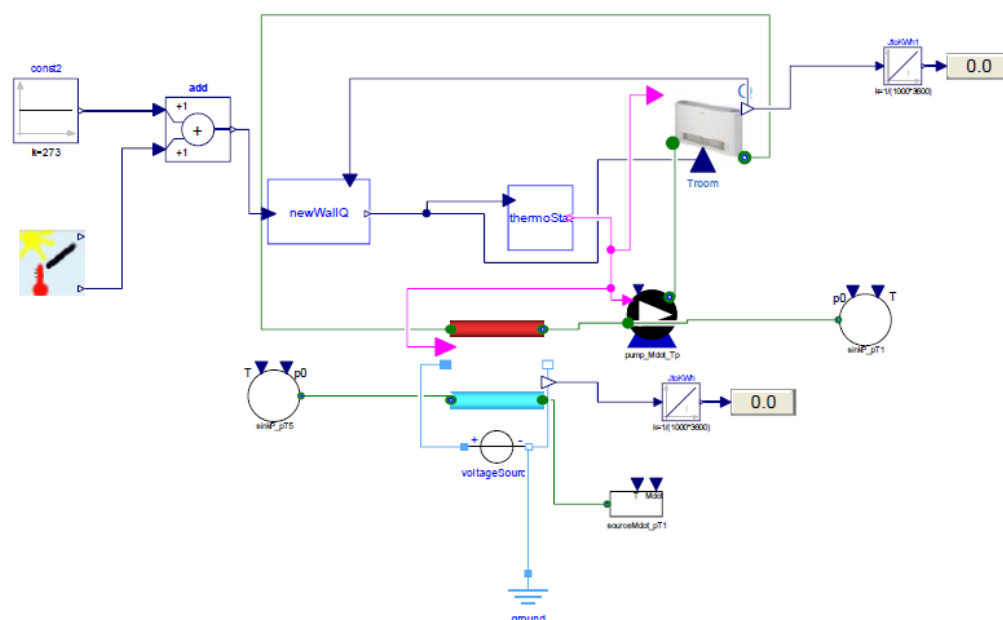
Η ρουτίνα υπολογισμού ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια δόθηκε από το εργαστήριο. Ακολουθεί την κλασική μεθοδολογία της ASHRAE .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο – Προσομοίωση - Διατάξεις- Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων των τριών τοπολογιών . Η πρώτη συνδεσμολογία δεν μας προσφέρει αρκετές πληροφορίες σχετικές με τις μεθόδους εξοικονόμησης ενέργειας στα κτήρια σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης, αλλά χρησιμοποιείται σαν σημείο αναφοράς- σύγκρισης για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των άλλων δύο τοπολογιών .

4.1 Τοπολογία 1

Η τοπολογία αυτή είναι η απλούστερη της εργασίας και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των σωστών μεγεθών των επιμέρους τμημάτων κάθε διάταξης .



Εικόνα 4.1: Μοντέλο πρώτης συνδεσμολογίας

Αρχικά εφαρμόζεται στην συνδεσμολογία το μοντέλο της αντλίας που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο .Πρόκειται για μια γεωθερμική αντλία, ψυκτικού-ψυκτικού με τα εξής χαρακτηριστικά:

$$Q_{cond} = 6000W$$

$$Q_{evap} = 4500W$$

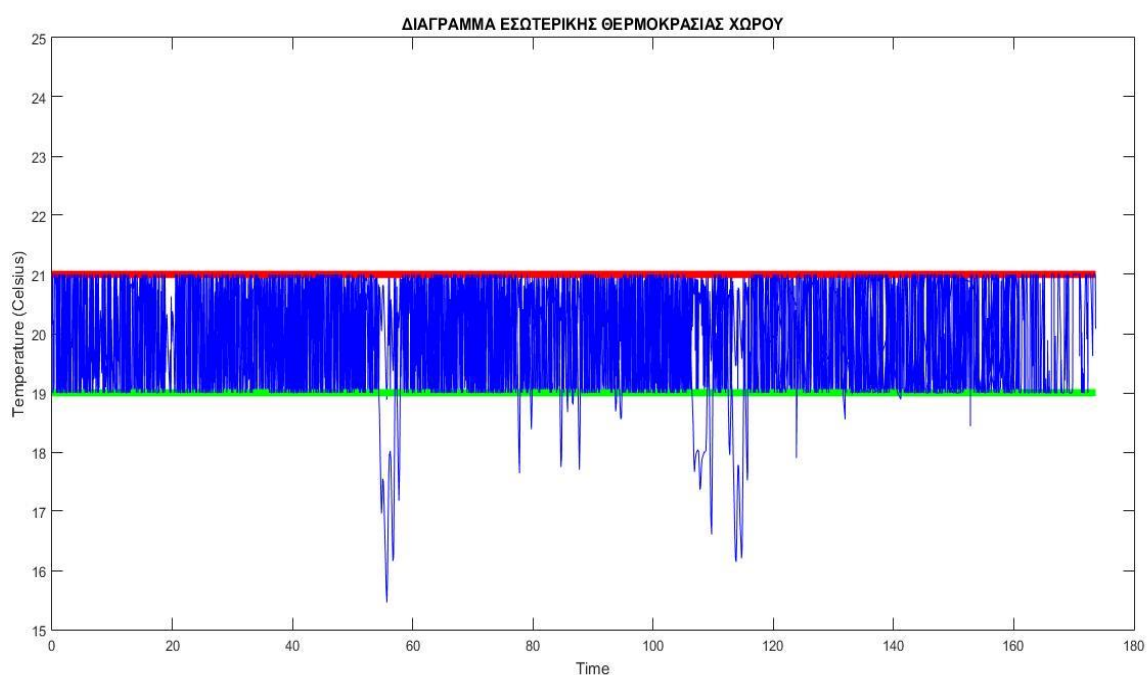
$$W_{comp} = 1500W$$

$$\text{Τότε } COP_{th} \approx \frac{Q_{evap}}{W_{comp}} = 3$$

Υποθέτουμε ότι η ροή ψυκτικού είναι $m_{HP} \dot{=} 0,21 \text{ kg/sec}$

Συνεπώς η ίδια ροή ψυκτικού παρατηρείται και στο κλειστό κύκλωμα της μονάδας του Fan Coil.

Πραγματοποιώντας προσομοίωση της λειτουργίας της διάταξης για την χειμερινή περίοδο της γεωγραφικής ζώνης Β (1^η Νοεμβρή-15^η Απρίλη), με τις αρχικές συνθήκες της αντλίας και του FCU και παρουσιάζοντας σε διάγραμμα τα δεδομένα που επικρατούν στο εσωτερικό του οικήματος όταν τεθεί σε εφαρμογή η συγκεκριμένη αντλία θερμότητας, γίνεται εμφανές ότι το μέγεθος της δεν είναι επαρκές για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του χώρου. Επομένως θα πρέπει να επαναδιαστασιολογηθεί .



Εικόνα 4.2: Θερμοκρασία εσωτερικού χώρου -Αρχική αντλία

ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΤΛΙΑΣ & FCU :

Ως πρώτο βήμα, πρέπει να υπολογιστούν οι θερμικές ανάγκες του κτηρίου .Η ελάχιστη θερμοκρασία που παρατηρείται στην γεωγραφική ζώνη Β, σύμφωνα με τα καιρικά δεδομένα που έχουν εφαρμοστεί στο μοντέλο είναι 2 °C, ενώ η θερμοκρασία εσωτερικού χώρου θεωρείται σταθερή στους 20° C. Συνεπώς η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά που καλείται να καλύψει η αντλία είναι 18 ° C .

$$Q_{\kappa\tau\eta\rho\iota\upsilon} = Q_h + Q_{\alpha\epsilon\rho}$$

$$\text{όπου } Q_h = \overline{U}_{\kappa\tau} * A_{\epsilon\nu\nu} * \Delta T$$

$$Q_{\alpha\epsilon\rho} = V_{\text{air}} * C_{p\text{air}} * \rho_{\text{air}} * \Delta T$$

$$\text{Άρα } Q_{\kappa\tau\eta\rho\iota\upsilon} = Q_h + Q_{\alpha\epsilon\rho} = (\overline{U}_{\kappa\tau} * A_{\epsilon\nu\nu} + V_{\text{air}} * C_{p\text{air}} * \rho_{\text{air}}) * \Delta T$$

$$Q_{\kappa\tau\eta\rho\iota\upsilon} = \left(0,8323 \frac{W}{m^2 * K} * 434 m^2 + 0,028 \frac{m^3}{sec} * 1000 \frac{J}{kg * K} * 1,2 \frac{kg}{m^3} \right) * 18 K \rightarrow$$

$$Q_{\kappa\tau\eta\rho\iota\upsilon} \simeq 7160 W$$

Η θερμική ισχύς της αντλίας θερμότητας (και της μονάδας FCU) θεωρούνται κατά 200 W υψηλότερες των θερμικών αναγκών του κτηρίου ,ώστε να υπάρχει πρόβλεψη χρήσης σε περιόδους αιχμής. Τότε

$$Q_{\text{cond}} = Q_{\text{FCU}} = 7360 W_{\text{th}}$$

Σύμφωνα με τα φυλλάδια τεχνικών προδιαγραφών (data sheets) του κατασκευαστή, ο βαθμός απόδοσης μια τέτοιας αντλίας θερμότητας κατά την χρήση για θέρμανση χώρου είναι κοντά στο 4 .Στην συγκεκριμένη εργασία υποτίθεται ότι $COP_{\text{th}} = 3,71$.

$$COP_{\text{th}} \approx \frac{Q_{\text{evap}}}{P_{\text{comp}}} \rightarrow P_{\text{comp}} = \frac{Q_{\text{evap}}}{COP_{\text{th}}} = \frac{7360}{3,71} = 1980 W_e$$

Ο ηλεκτρομηχανικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή είναι $\eta = 0,93$.

$$W_{\text{comp}} = \eta * P_{\text{comp}} = 1840 W_{\text{th}}$$

$$Q_{\text{cond}} = Q_{\text{evap}} + W_{\text{comp}} \rightarrow Q_{\text{evap}} = Q_{\text{cond}} - W_{\text{comp}} = 5520 W_{\text{th}}$$

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΟΩΝ ΜΑΖΩΝ ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΩΝ ΜΕΣΩΝ :

Η συνήθης θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο του ρευστού στον εξατμιστή και τον συμπυκνωτή είναι $\Delta T_{\text{evap}} = \Delta T_{\text{cond}} = 5^\circ \text{C}$.

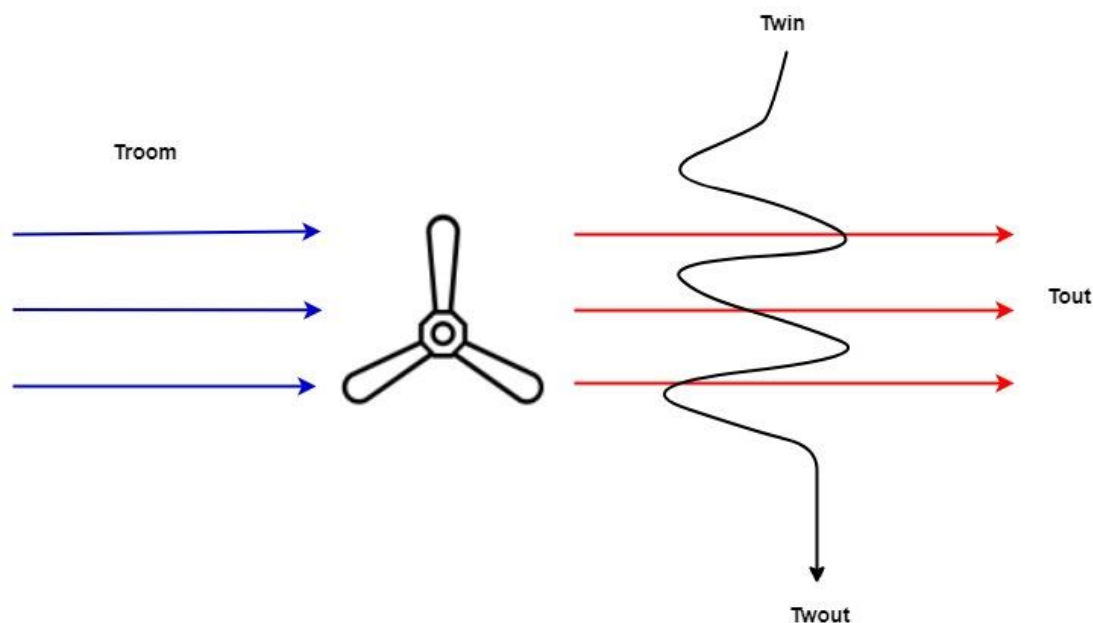
$$Q_{\text{evap}} = \dot{m}_{\text{evap}} * C_p * \Delta T_{\text{evap}} \rightarrow \dot{m}_{\text{evap}} = \frac{Q_{\text{evap}}}{C_p * \Delta T_{\text{evap}}} = \frac{5520}{4190 * 5} = 0,264 \text{ kg/sec}$$

$$Q_{\text{cond}} = \dot{m}_{\text{cond}} * C_p * \Delta T_{\text{cond}} \rightarrow \dot{m}_{\text{cond}} = \frac{Q_{\text{cond}}}{C_p * \Delta T_{\text{cond}}} = \frac{7360}{4190 * 5} = 0,352 \text{ kg/sec}$$

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΕΘΩΝ FCU :

Με χρήση των εξισώσεων του μοντέλου της μονάδας τερματικού σώματος εξαναγκασμένης κυκλοφορίας, όπως περιγράφηκαν στην παράγραφο 3.2.4,

μπορούν να υπολογιστούν τα άγνωστα μεγέθη, οι τιμές των οποίων είναι απαραίτητες για την αρχικοποίηση της προσομοίωσης. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται απλοποιημένα η διάταξη της μονάδας Fan Coil



Εικόνα 4.3:Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας μονάδας Fan coil

$$T_{out} = T_{room} + \frac{Q_{FCU}}{c_{p\ air} * \rho_{air} * V_{air}}$$

Σύμφωνα με τα τεχνικά φυλλάδια (data sheets) του κατασκευαστή, η εξαναγκασμένη ροή αέρα που αντιστοιχεί στην υπολογισθείσα θερμική ισχύ, είναι

$$V_{air} = 200 \frac{m^3}{hr} = 0,55 \frac{m^3}{sec}$$

$$\text{Τότε } T_{out} = 20 + \frac{7360}{1200 * 0,55} \rightarrow T_{out} = 31,15 \text{ } ^\circ C$$

$$T_f = \frac{T_{Win} + T_{Wout}}{2} = \frac{45 + 40}{2} = 42,5 \text{ } ^\circ C$$

$$T_a = \frac{T_{room} + T_{out}}{2} = \frac{20 + 31,15}{2} = 25,575 \text{ } ^\circ C$$

$$Q_{FCU} = U * A * (T_f - T_a) \rightarrow U * A = \frac{Q_{FCU}}{(T_f - T_a)} = \frac{7360}{(42,5 - 25,575)} \rightarrow$$

$$U * A = 434.86 \text{ W/K}$$

Όπου:

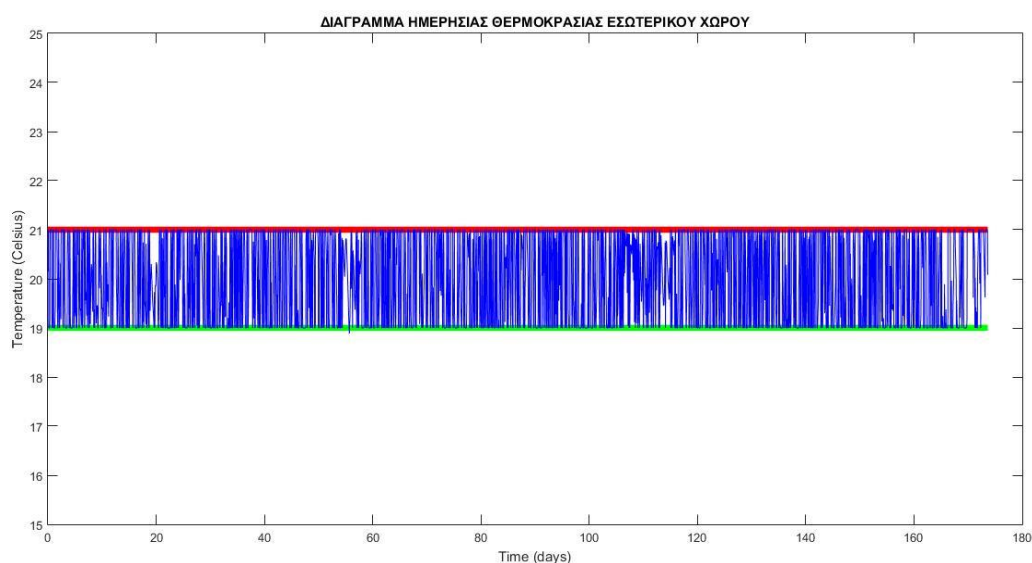
T_{out} :Η θερμοκρασία εξόδου του (θερμού) αέρα από την μονάδα Fan Coil

T_{room} :Η επικρατούσα θερμοκρασία εσωτερικού χώρου

T_{Win} : Η θερμοκρασία εισόδου του εργαζόμενου μέσου στον εναλλάκτη της μονάδας Fan Coil

T_{Wout} : Η θερμοκρασία εξόδου του εργαζόμενου μέσου από τον εναλλάκτη της μονάδας Fan Coil

Προφανώς, μετά τον επαναυπολογισμό των απαιτούμενων μεγεθών για την θέρμανση του εσωτερικού χώρου, η θερμοκρασία του, παραμένει καθ' όλη την διάρκεια της χειμερινής περιόδου εντός του επιθυμητού εύρους ,όπως έχει διαμορφωθεί από τον θερμοστάτη (19°C - 21 °C).



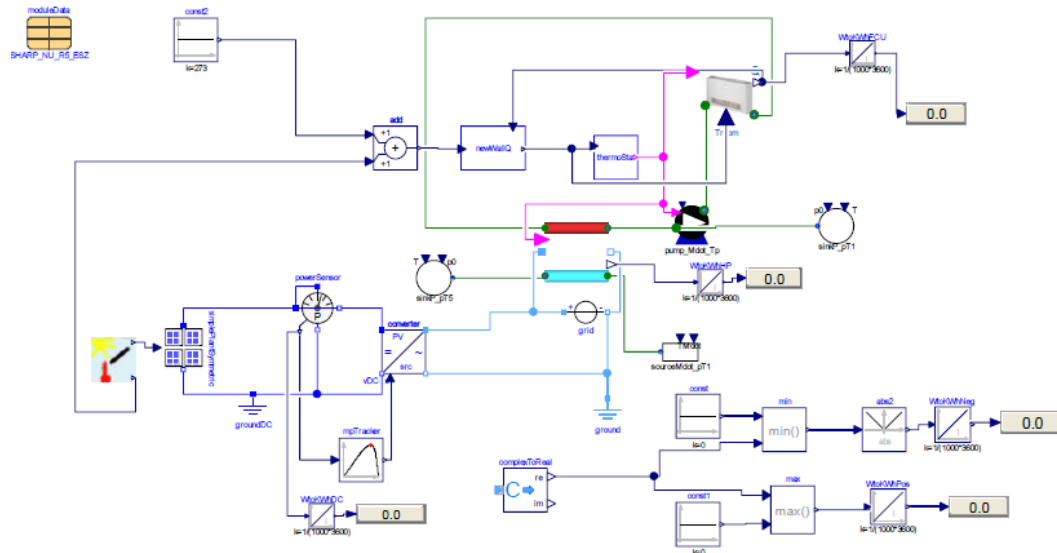
Εικόνα 4.4: Θερμοκρασία εσωτερικού χώρου –Επαναδιαστασιοποιημένη αντλία (μένει παραπάνω στην 0).

4.2 Τοπολογία 2

Η δεύτερη τοπολογία αποτελεί εξέλιξη της προηγούμενης καθώς σε αυτήν προστίθεται συστοιχία φωτοβολταϊκών. Στόχος της τροποποίησης είναι η μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας από το δίκτυο, με εκμετάλλευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας των ΦΒ πάνελ (για την τροφοδοσία του συμπιεστή της αντλίας). Προφανώς ο βαθμός απόδοσης της αντλία θερμότητας δεν θα πρέπει να επηρεαστεί εξ' αιτίας της επιπλέον διάταξης, αλλά επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας δικτύου, φέρνοντας το οίκημα ακόμη πιο κοντά στα χαρακτηριστικά του κτηρίου σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης – nZEB, λόγω της αξιοποίησης ΑΠΕ .

Το βασικό σύστημα ελέγχου (control system) της τοπολογίας είναι ο θερμοστάτης. Η συγκεκριμένη διάταξη αυτοματισμού δέχεται σαν είσοδο την επικρατούσα θερμοκρασία εσωτερικού χώρου (η οποία αυξομειώνεται με την χρήση της μονάδας

fan coil) και επιστρέφει δυαδική τιμή (true / false) για τον έλεγχο της λειτουργίας της αντλίας, της μονάδας fan coil και της αντλίας θερμότητας . Όταν η θερμοκρασία χώρου πέσει κάτω από τους 19 °C ενεργοποιούνται όλες οι προαναφερθείσες διατάξεις ,ενώ απενεργοποιούνται για θερμοκρασίες άνω των 21 °C .

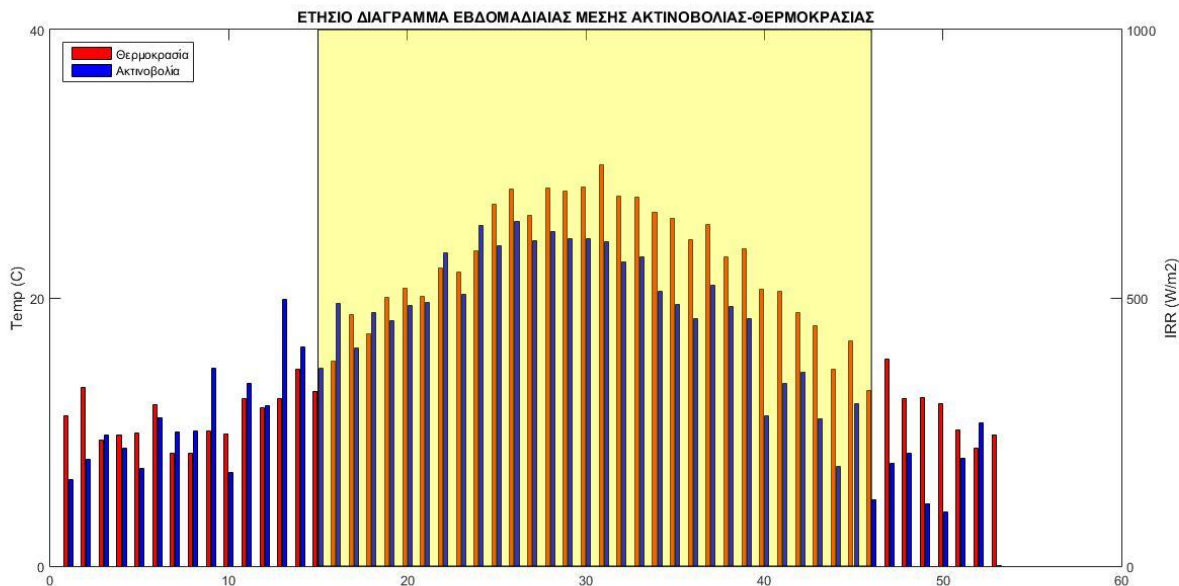


Εικόνα 4.5: Μοντέλο δεύτερης συνδεσμολογίας

Λόγω πολυπλοκότητας του μοντέλου, δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθούν τα αποτελέσματα του για όλη την χειμερινή περίοδο του έτους .Για τον λόγω αυτό επιλέγονται οι εξής δύο χαρακτηριστικές εβδομάδες (Εικόνα 4.3), προκειμένου να καταδειχθούν τα οφέλη των προσθηκών και πραγματοποιούνται προσομοιώσεις για 5 ημέρες σε κάθε περίπτωση :

- Εβδομάδα 8 : Όπου παρατηρούνται οι χαμηλότερες θερμοκρασίες της χειμερινής περιόδου, σε συνδυασμό με την υψηλότερη δυνατή ακτινοβολία.
- Εβδομάδα 14 : Όπου παρατηρούνται θερμοκρασίες της χειμερινής περιόδου μεσαίου εύρους , σε συνδυασμό με την υψηλότερη ακτινοβολία της χειμερινής περιόδου .Η εβδομάδα 14 αποτελεί και την τελευταία της χειμερινής περιόδου

Να σημειωθεί εδώ ότι ο χρόνος προσομοίωσης για κάθε έναν συνδυασμό της δεύτερης διάταξης κυμαίνεται από 5,5 έως 6,5 ώρες .



Εικόνα 4.6: Διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας & ακτινοβολίας εβδομάδων έτους

Η μέγιστη ισχύς του συμπιεστή ισούται περίπου με 2000 Watt .Για κάθε επιλεγθέν πενήνήμερο εξετάζονται δύο συστοιχίες διατάξεων ΦΒ, ικανές να παρέχουν περίπου το 60 % και το 85 % αυτής αντίστοιχα .

ΔΙΑΤΑΞΗ 60 %

Αποτελείται 7 μονοκρυσταλλικά ΦΒ πάνελ τύπου SHARP NU R5 ESZ συνδεδεμένα σε σειρά ικανά να επιτύχουν την συγκεκριμένη κάλυψη ενεργειακών αναγκών, με ονομαστική ισχύ (ενός) 175 Watt.

ΔΙΑΤΑΞΗ 85 %

Αποτελείται από 10 μονοκρυσταλλικά ΦΒ πάνελ τύπου SHARP NU R0 E3E συνδεδεμένα σε σειρά ικανά να επιτύχουν την συγκεκριμένη κάλυψη ενεργειακών αναγκών. Η ονομαστική ισχύς κάθε ενός είναι 170 Watt.

Τα χαρακτηριστικά και των δύο φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα .

Mechanical data		Limit values					
Cell	Monocrystalline (155.55 mm) ² Sharp silicon solar cells	Storage humidity	up to 90				%
Number and connection of cells	48 in series	Operating temperature (cell)	-40 to +90				°C
Dimensions	1.318 x 994 x 46 mm (1.31 m ²)	Storage temperature	-40 to +90				°C
Weight	16 kg	Maximum system voltage	1,000				V DC
Connection type	Cable with plug connector (MC-3)	Maximum mechanical load	2,400				N/m ²

Electrical data						
Module production in the EU		NU-185 (E1)	NU-180 (E1)			
Module production in Japan		NU-S5 (E3E)	NU-S0 (E3E)	NU-S0 (E3Z)	NU-R5 (E3Z)	NU-R0 (E3E)
Rated power		185 W _p	180 W _p	180 W _p	175 W _p	170 W _p
Open circuit voltage	V _{oc}	30.2	30.0	30.0	29.8	29.4
Short circuit current	I _{sc}	8.54	8.37	8.23	8.29	8.37
Voltage at maximum power	V _{pm}	24.0	23.7	23.7	23.2	22.4
Current at maximum power	I _{pm}	7.71	7.6	7.6	7.55	7.60
Module efficiency	η _m	14.1	13.7	13.7	13.4	13.0
Temperature coefficient - open circuit voltage	αV _{oc}	-104	-104	-104	-104	-104
Temperature coefficient - short circuit current	αI _{sc}	+0.053	+0.053	+0.053	+0.053	+0.053
Temperature coefficient - power	αP _m	-0.485	-0.485	-0.485	-0.485	-0.485

The electrical data apply under standard testing conditions (STC): Incident radiation 1.000 W/m² mit Lichtspektrum AM 1.5 with AM 1.5 light spectrum at a cell temperature of 25 °C. The power output is subject to a manufacturing tolerance of - 5 % and + 10 %. The modules manufactured in Europe and Japan are identical.

Εικόνα 4.7: Χαρακτηριστικά ΦΒ πάνελ τύπου SHARP NU R5 ESZ & SHARP NU R0 E3E

Προκειμένου να επιτευχθεί η σύγκριση των δύο διαφορετικών διατάξεων και να εξαχθούν συμπεράσματα όσον αφορά την απόδοση και ωφελιμότητα της προσθήκης ΑΠΕ χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι δείκτες :

1. $E_{PV_{HP}}$: Η παραγόμενη ενέργεια της διάταξης ΦΒ που εκμεταλλεύεται η αντλία θερμότητας
2. $E_{PV_{ΔΙΚΤΥΟ}}$: Η παραγόμενη ενέργεια της διάταξης ΦΒ που μένει ανεκμετάλλευτη, (επιστρέφει στο δίκτυο)
3. n_{α} : Ο βαθμός αξιοποίησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (της ΦΒ συστοιχίας) από την προς μελέτη διάταξη (τον συμπιεστή της αντλίας θερμότητας)

$$n_{\alpha} = \frac{E_{PV_{TOT}} - E_{PV_{POS}}}{E_{PV_{TOT}}}$$

4. $n_{\eta\sigma}$: Ο βαθμός συνεισφοράς ηλιακής ενέργειας στην συνολική κατανάλωση του συμπιεστή της αντλίας θερμότητας

$$n_{\eta\sigma} = \frac{E_{COMP} - E_{PV_{NEG}}}{E_{COMP}}$$

5. \overline{COP} : Για χάρη πληρότητας της παρουσίασης των αποτελεσμάτων, σαν 5^{ος} δείκτης υπολογίζεται ο μέσος συντελεστής απόδοσης της εκάστοτε διάταξης

$$COP = \frac{E_{COND}}{E_{COMP}}$$

Όπου:

$E_{PV_{TOT}}$: Η συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στον από τις διατάξεις ΦΒ

$E_{PV_{POS}}$: Η αναξιποίητη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις διατάξεις ΦΒ, (επιστροφή στο δίκτυο)

$$E_{PV_{POS}} = \begin{cases} 0 & , \text{όταν } P_{PV} - P_{HP} < 0 \\ \int (P_{PV} - P_{HP}) dt & , \text{όταν } P_{PV} - P_{HP} > 0 \end{cases}$$

$E_{PV_{NEG}}$: Η προερχόμενη από το δίκτυο καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια στον συμπιεστή της αντλίας θερμότητας

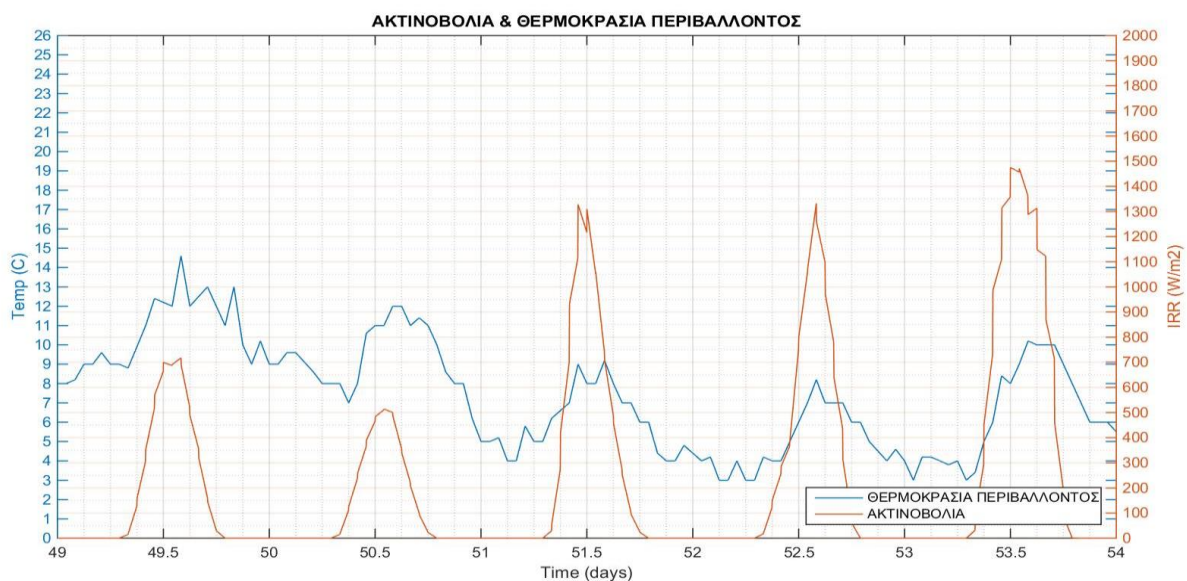
$$E_{PV_{NEG}} = \begin{cases} \int (P_{HP} - P_{PV}) dt & , \text{όταν } P_{PV} - P_{HP} < 0 \\ 0 & , \text{όταν } P_{PV} - P_{HP} > 0 \end{cases}$$

E_{COMP} : Η συνολική καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια στον συμπιεστή της αντλίας θερμότητας

E_{COND} : Η συνολική αποδιδόμενη (θερμική) ενέργεια από τον συμπυκνωτή της αντλίας θερμότητας

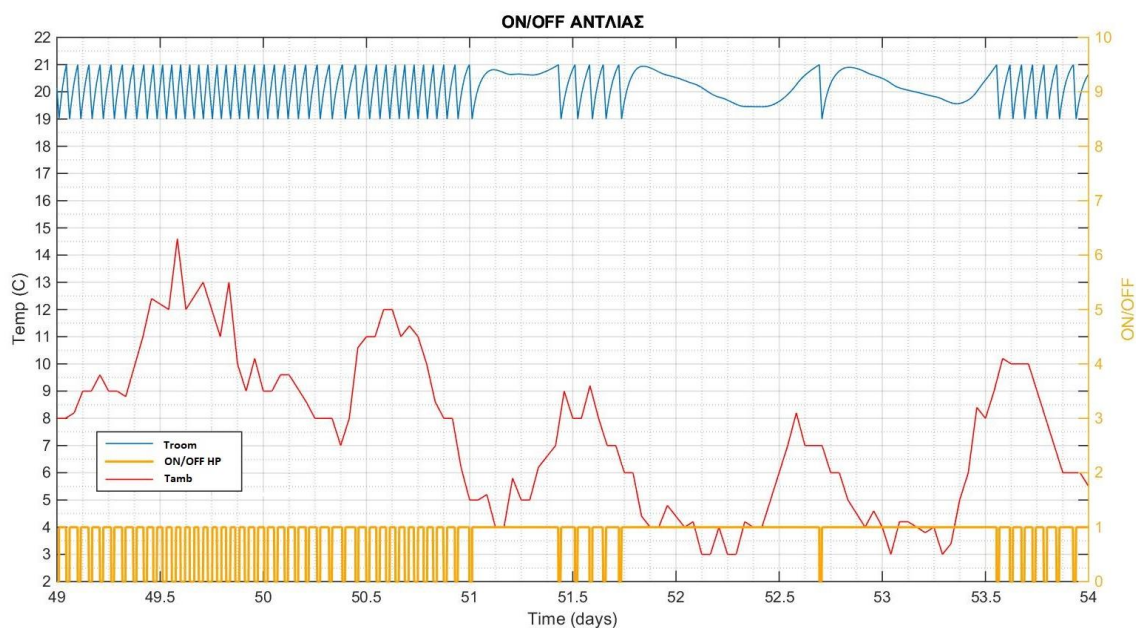
4.2.1 8^η Εβδομάδα Χειμερινής περιόδου

Η 8η εβδομάδα του έτους, είναι εκείνη που παρουσιάζει τις χαμηλότερες θερμοκρασίες σε συνδυασμό με τις υψηλότερες τιμές ακτινοβολίας (Εικόνα 4.8) . Οι παράμετροι που σχετίζονται με την απόδοση θερμότητας στον χώρο, την θερμοκρασία του και την λειτουργία του θερμοστάτη, δεν επηρεάζονται από την διάταξη ΦΒ και συνεπώς οι τιμές τους και για τις δύο συστοιχίες πάνελ είναι κοινές .



Εικόνα 4.8: Διάγραμμα ακτινοβολίας-θερμοκρασίας 8^{ης} εβδομάδας έτους

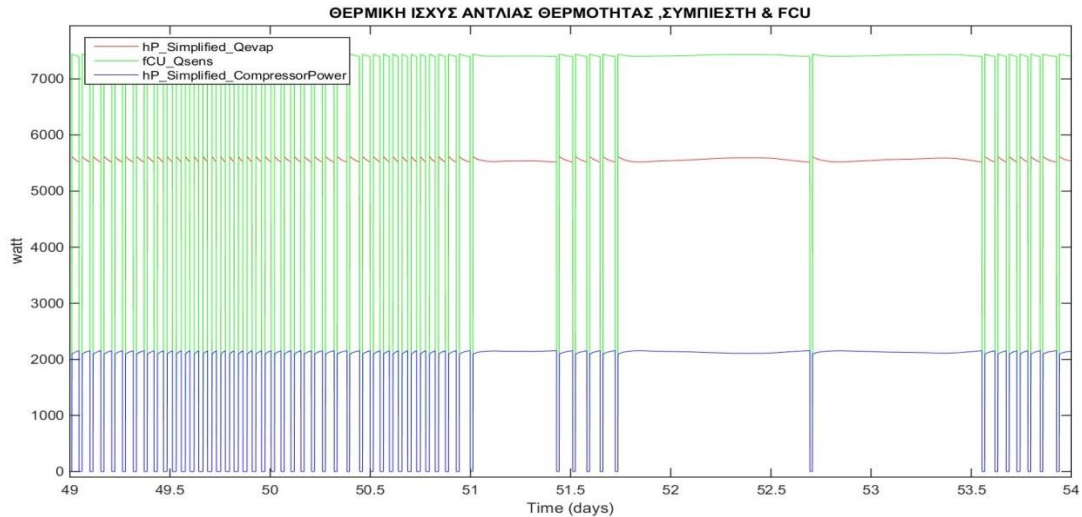
Προφανώς η αντλία θερμότητας έχει διαστασιολογηθεί καταλλήλως, ώστε να επαρκεί για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του χώρου, καθώς όπως φάνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα η θερμοκρασία παραμένει εντός εύρους 19-21 °C .Παρατηρούνται όμως πολύ μεγάλα διαστήματα συνεχούς λειτουργίας της (μεγάλες περίοδοι ανοίγματος του θερμοστάτη), γεγονός που δικαιολογείται πλήρως αν αναλογιστούμε τις επικρατούσες θερμοκρασίες (Εικόνα 4.9) .



Εικόνα 4.9:Διάγραμμα ON/OFF HP-θερμοκρασίας χώρου-θερμοκρασίας περιβάλλοντος 8^{ης} εβδομάδας έτους

Στο κάτωθεν διάγραμμα (Εικόνα 4.10), απεικονίζονται τα ισοζύγια (θερμικής) ισχύος .Όπως είναι εμφανές η θερμική ισχύς που καταλήγει στο εσωτερικό του οικήματος ισούται με την θερμική ισχύ του ατμοποιητή και την θερμική ισχύ του συμπιεστή της αντλίας θερμότητας .

$$Q_{cond} = Q_{FCU} = Q_{evap} + 0,93 * P_{comp}$$



Εικόνα 4.10:Ισοζύγιο ισχύος αντλίας θερμότητας 8^{ης} εβδομάδας έτους

Ο συντελεστής απόδοσης της αντλίας θερμότητας – Coefficient of Performance (CoP) υπολογίζεται σαν τον λόγο της ωφέλιμης θερμικής ισχύος του συμπυκνώτη της αντλίας, προς την καταναλισκόμενη, από τον συμπιεστή της, ηλεκτρική ισχύ, . Όσο υψηλότερος είναι, τόσο χαμηλότερο είναι το λειτουργικό κόστος της διάταξης .

$$COP = \frac{Q_{cond}}{P_{comp}}$$

Οι τιμές του κατά την προσομοίωση της συγκεκριμένης διάταξης (8^η εβδομάδα) έχουν εύρος 3,68-3,82, .Ελαχιστοποίηση παρατηρείται κυρίως την νύχτα, όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος μειώνεται, οπότε και πρέπει να καταναλωθεί περισσότερο έργο για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος .

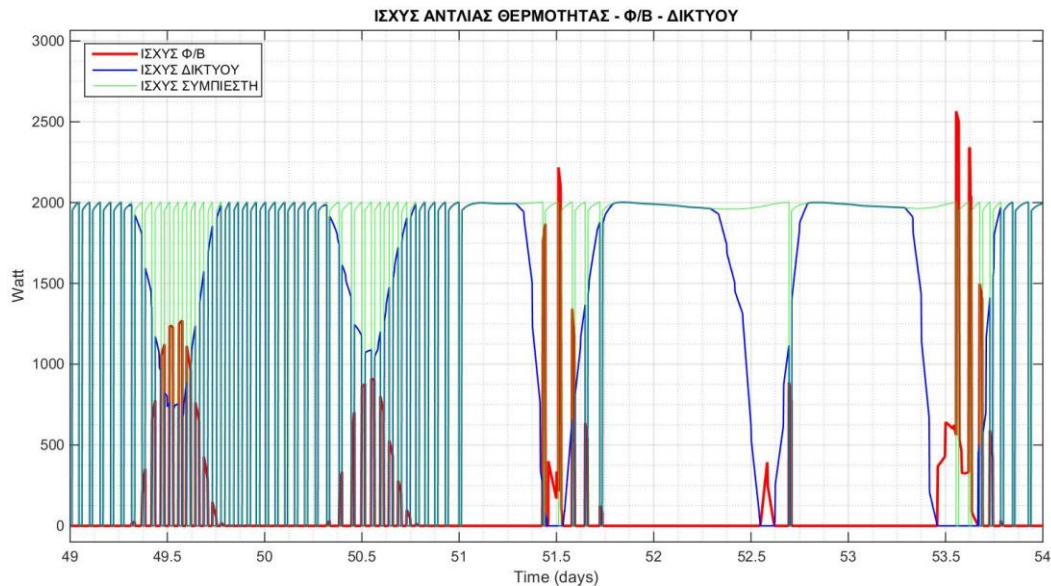
Εξετάζονται δύο σενάρια κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών (του συμπιεστή της αντλίας θερμότητας) από ΦΒ, όπως έχει ήδη αναφερθεί .Οι διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων στα μεγέθη που σχετίζονται με την διάταξη εκμετάλλευσης ηλιακής ενέργειας αναλύονται ακολούθως

4.2.1.1 Κάλυψη του 60 % της ενέργειας συμπιεστή από συστοιχία ΦΒ

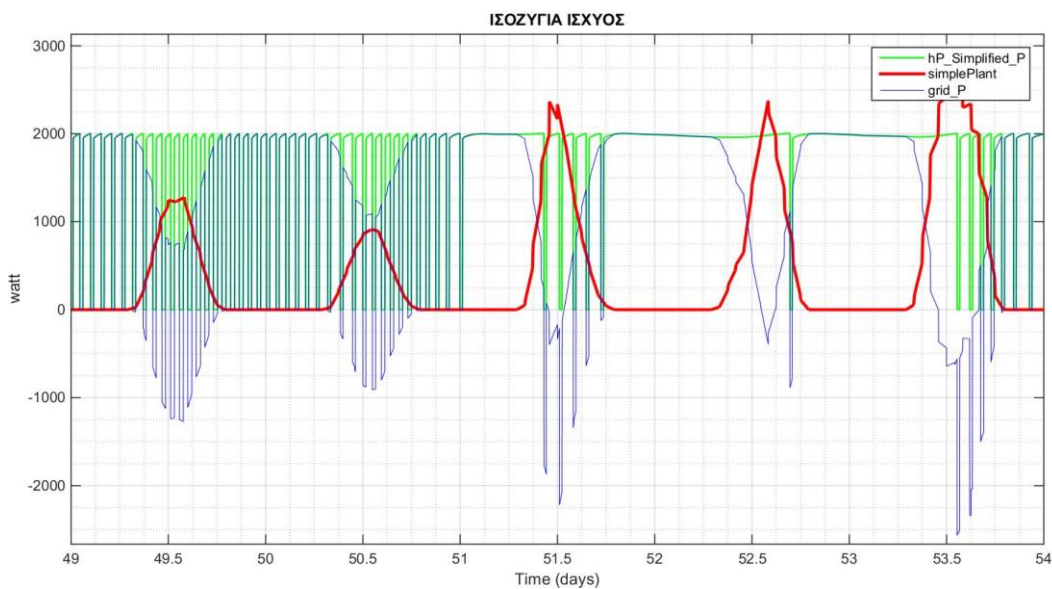
Στην αρχική διάταξη προστίθεται συστοιχία φωτοβολταϊκών πάνελ, που καλύπτει σχεδόν το 60% της ονομαστικής ισχύος του συμπιεστή ,αποτελούμενη, όπως έχει ήδη αναφερθεί από 7 πάνελ ισχύος 175 Watt, δυνδεδεμένα σειρικά μεταξύ τους.

Στα δύο διαγράμματα που ακολουθούν, (τα τελευταία της συγκεκριμένης εγκατάστασης), παρουσιάζονται τα ισοζύγια ηλεκτρικής ισχύος .Με πράσινο χρώμα απεικονίζεται η ισχύς του συμπιεστή της αντλίας θερμότητας , με κόκκινο η ισχύς

ΦΒ και με μπλε η ισχύς δικτύου που τροφοδοτεί τον συμπιεστή . Παρατηρούμε ότι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν υπάρχει ταυτοχρονισμός ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και προσφοράς ηλιακής ,οπότε τμήμα της παραγόμενης ενέργειας επιστρέφει στο δίκτυο . Η απορριπτόμενη ενέργεια φαίνεται στις αρνητικές τιμές της εικόνας 4.12.



Εικόνα 4.11: Ισχύς συμπιεστή , δικτύου και ΦΒ που επιστρέφει στο δίκτυο 8^{ης} εβδομάδας έτους-60 % κάλυψης από ΦΒ



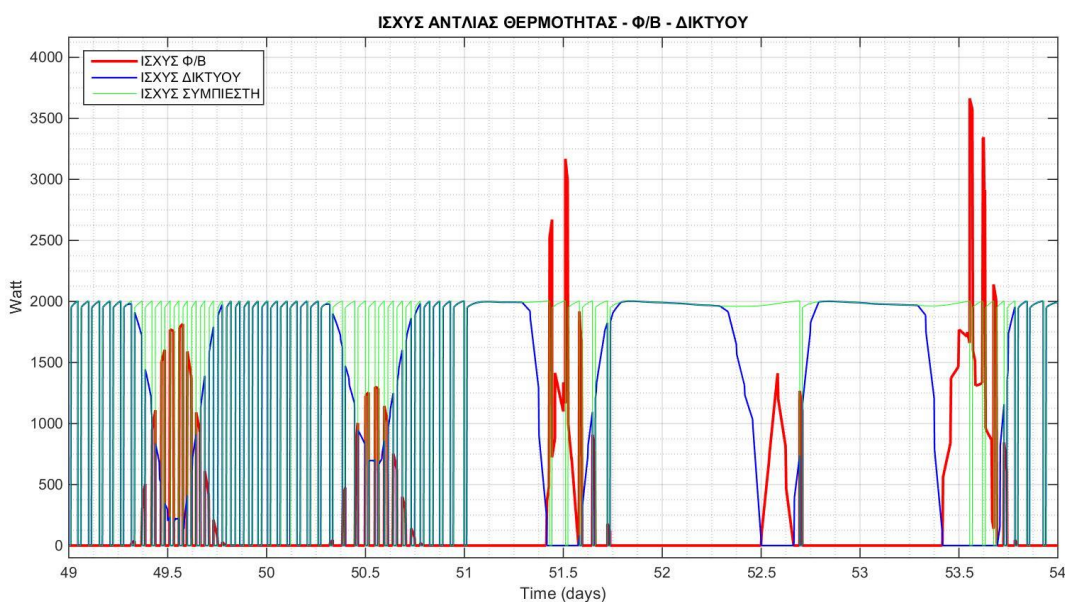
Εικόνα 4.12 : Ισχύς ΦΒ, συμπιεστή και δικτύου (αρνητικά επιστροφή λόγω ΦΒ) 8^{ης} εβδομάδας έτους 60 % κάλυψης από ΦΒ

Με βάση τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων υπολογίζονται οι τιμές των 5 δεικτών που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο

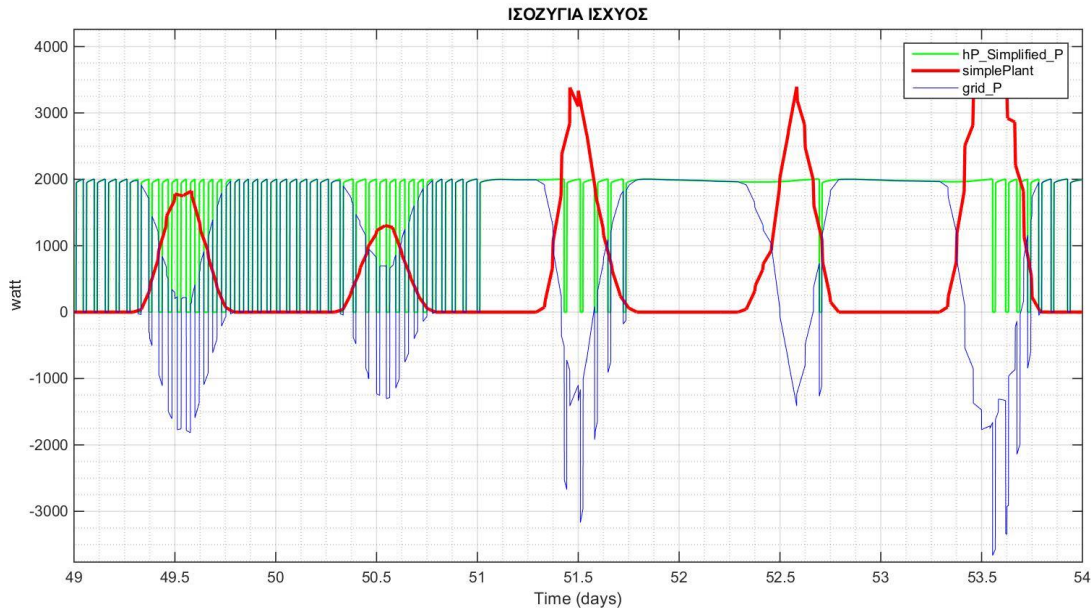
1. $E_{PV_{HP}} = 40,22 \text{ Kwh}$
2. $E_{PV_{ΔΙΚΤΥΟ}} = 11,77 \text{ Kwh}$
3. $n_{\alpha} = \frac{E_{PV_{TOT}} - E_{PV_{POS}}}{E_{PV_{TOT}}} = 77,36 \%$
4. $n_{\eta\sigma} = \frac{E_{COMP} - E_{PV_{NEG}}}{E_{COMP}} = 20,59 \%$
5. $\overline{COP} = 3,7341$

4.2.1.2 Κάλυψη του 85 % της ενέργειας συμπιεστή από συστοιχία ΦΒ

Σε αυτήν την παραλλαγή της διάταξης υπάρχει συστοιχία φωτοβολταϊκών πάνελ, που καλύπτει σχεδόν το 85% της ονομαστικής ισχύος του συμπιεστή. Κατ' αντιστοιχία με την, προαναφερθείσα, μικρότερη εγκατάσταση ΦΒ, στα ακόλουθα δύο διαγράμματα παρουσιάζονται τα ισοζύγια ηλεκτρικής ισχύος, (με πράσινο χρώμα απεικονίζεται η ισχύς του συμπιεστή της αντλίας θερμότητας, με κόκκινο η ισχύς ΦΒ και με μπλε η ισχύς δικτύου που τροφοδοτεί τον συμπιεστή). Παρατηρούμε ότι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν υπάρχει ταυτοχρονισμός ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και προσφοράς ηλιακής, οπότε τμήμα της παραγόμενης ενέργειας (προφανώς μεγαλύτερο από πριν, αφού σημειώνεται και περισσότερη παραγωγή) επιστρέφει στο δίκτυο. Η απορριπτόμενη ενέργεια φαίνεται στις αρνητικές τιμές της εικόνας 4.14.



Εικόνα 4.13: Ισχύς συμπιεστή, δικτύου και ΦΒ που επιστρέφει στο δίκτυο 85 % κάλυψης από ΦΒ



Εικόνα 4.14: Ισχύς ΦΒ, συμπιεστή και δικτύου (αρνητικά επιστροφή λόγω ΦΒ) 85 % κάλυψης από ΦΒ

Προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα υπολογίζονται οι ίδιοι με πριν δείκτες .

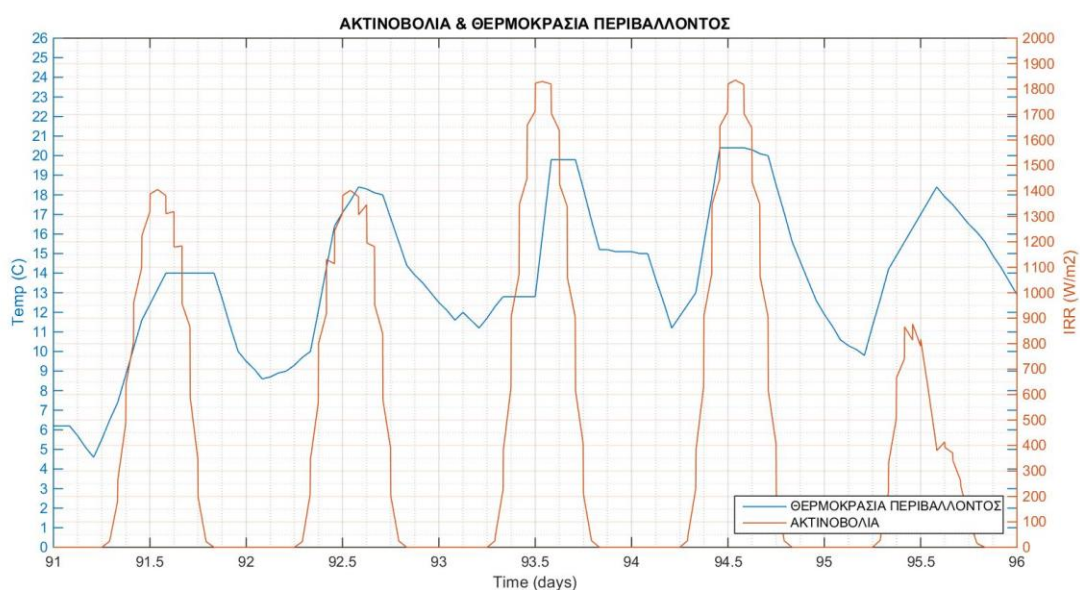
1. $E_{PV_{HP}} = 48,59 \text{ Kwh}$
2. $E_{PV_{ΔΙΚΤΥΟ}} = 25,68 \text{ Kwh}$
3. $n_{\alpha} = \frac{E_{PV_{TOT}} - E_{PV_{POS}}}{E_{PV_{TOT}}} = 65,42 \%$
4. $n_{\eta\sigma} = \frac{E_{COMP} - E_{PV_{NEG}}}{E_{COMP}} = 24,88 \%$
5. $\overline{COP} = 3,7341$

Παρατηρούμε ότι ο μέσος συντελεστής απόδοσης δεν αλλάζει με την τροποποίηση της εγκατάστασης ΦΒ , αφού δεν εξαρτάται από αυτήν .Όλα τα υπόλοιπα μεγέθη όμως, διαφοροποιούνται.

Εφόσον αυξάνεται εν γένει η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω μεγαλύτερης εκμετάλλευσης της ηλιακής, τόσο η αξιοποίηση ενέργεια από τον συμπιεστή της αντλίας θερμότητας, $E_{PV_{HP}}$, όσο και η απορριπτόμενη στο δίκτυο, $E_{PV_{ΔΙΚΤΥΟ}}$, είναι μεγαλύτερες από πριν .Προφανώς, μεγαλύτερος είναι και ο βαθμός συνεισφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, $n_{\eta\sigma}$, (εφόσον δεν έχει τροποποιηθεί η κατανάλωση του συμπιεστή). Τέλος ο βαθμός αξιοποίησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, n_{α} , μειώνεται καθώς δεν υπάρχει ταυτοχρονισμός ζήτησης (συμπιεστή) και προσφοράς ηλιακής ενέργειας, οπότε στις περιόδους ηλιοφάνειας που (λόγω μεγαλύτερης διάταξης πάνελ) παράγεται περισσότερη ενέργεια, οι ανάγκες της αντλίας θερμότητας είναι ήδη καλυμμένες (από την διάταξη 60 %, άρα μεγαλύτερο μερίδιο μένει αναξιοποίητο .

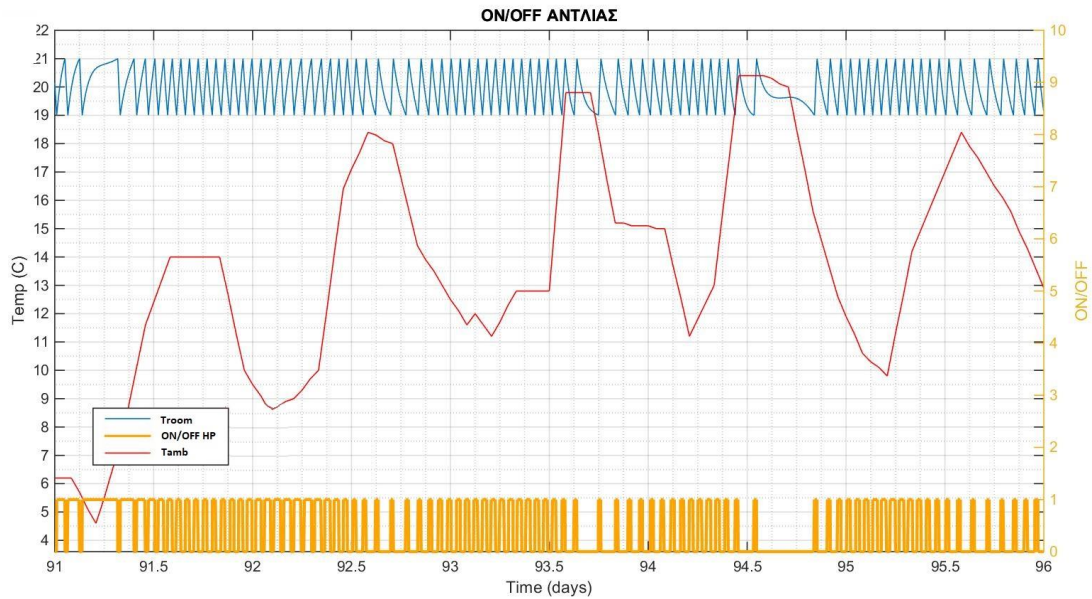
4.2.2 14^η Εβδομάδα έτους –τελευταία εβδομάδα χειμερινής περιόδου

Η 14^η εβδομάδα του έτους , επιλέχθηκε διότι παρουσιάζει μεσαίου εύρους θερμοκρασίες σε συνδυασμό με τις υψηλότερες τιμές ακτινοβολίας (Εικόνα 4.15) .Τα αποτελέσματα και για τις δύο συστοιχίες ΦΒ εξετάζονται/παρουσιάζονται μαζί, για τις παραμέτρους που είναι ανεξάρτητες της διάταξης φωτοβολταϊκών και στην συνέχεια μελετώνται ξεχωριστά τα επηρεαζόμενα από ΦΒ, μεγέθη των δύο εγκαταστάσεων με διαφορετική ηλιακή κάλυψη ισχύος συμπιεστή .



Εικόνα 4.15: Διάγραμμα ακτινοβολίας-θερμοκρασίας 14^{ης} εβδομάδας έτους

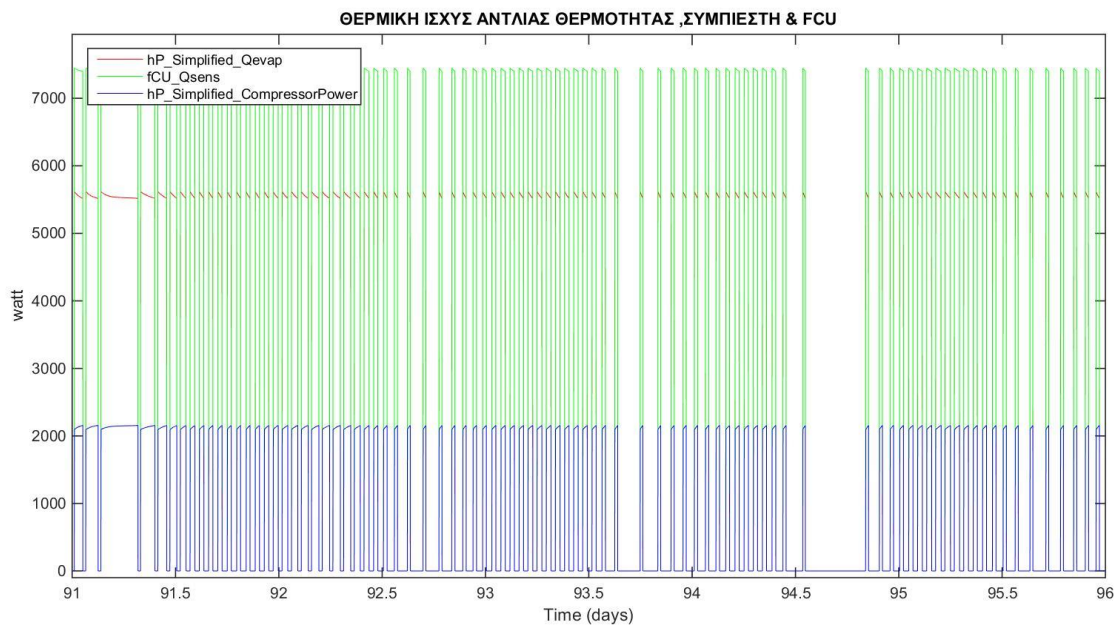
Προφανώς η αντλία θερμότητας έχει διαστασιολογηθεί επαρκώς, δεδομένου ότι μπορεί να θερμάνει τον χώρο κατά την 8^η (πιο κρύα εβδομάδα). Όπως φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα η θερμοκρασία παραμένει εντός εύρους 19-21 °C, αλλά τα διαστήματα συνεχούς λειτουργίας της (δηλαδή οι περίοδοι ανόιγματος του θερμοστάτη), είναι σημαντικά μικρότερα, συγκριτικά με την προηγούμενη διάταξη (Εικόνα 4.16) .



Εικόνα 4.16: Διάγραμμα ON/OFF ΗΡ-θερμοκρασίας χώρου-θερμοκρασίας περιβάλλοντος 14^{ης} εβδομάδας έτους

Στο κάτωθεν διάγραμμα (Εικόνα 4.17), απεικονίζονται τα ισοζύγια (θερμικής) ισχύος. Προφανώς η θερμική ισχύς που καταλήγει στο εσωτερικό του οικήματος ισούται με την θερμική ισχύς του ατμοποιητή και την θερμική ισχύ του συμπιεστή της αντλίας θερμότητας ,ενώ γίνεται ξανά εμφανές ότι η αντλία θερμότητας λειτουργεί λιγότερο από ότι κατά την 8^η εβδομάδα του έτους

$$Q_{cond} = Q_{FCU} = Q_{evap} + 0,93 * P_{comp}$$



Εικόνα 4.17: Ισοζύγιο ισχύος αντλίας θερμότητας 14^{ης} εβδομάδας έτους

Ο συντελεστής απόδοσης της αντλίας θερμότητας – Coefficient of Performance (CoP) υπολογίζεται όπως πριν, και έχει εύρος τιμών 3,68-3,82, με τις χαμηλότερες τιμές να παρατηρούνται όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος μειώνεται, οπότε και πρέπει να καταναλωθεί περισσότερο έργο για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος.

$$COP = \frac{Q_{cond}}{P_{comp}}$$

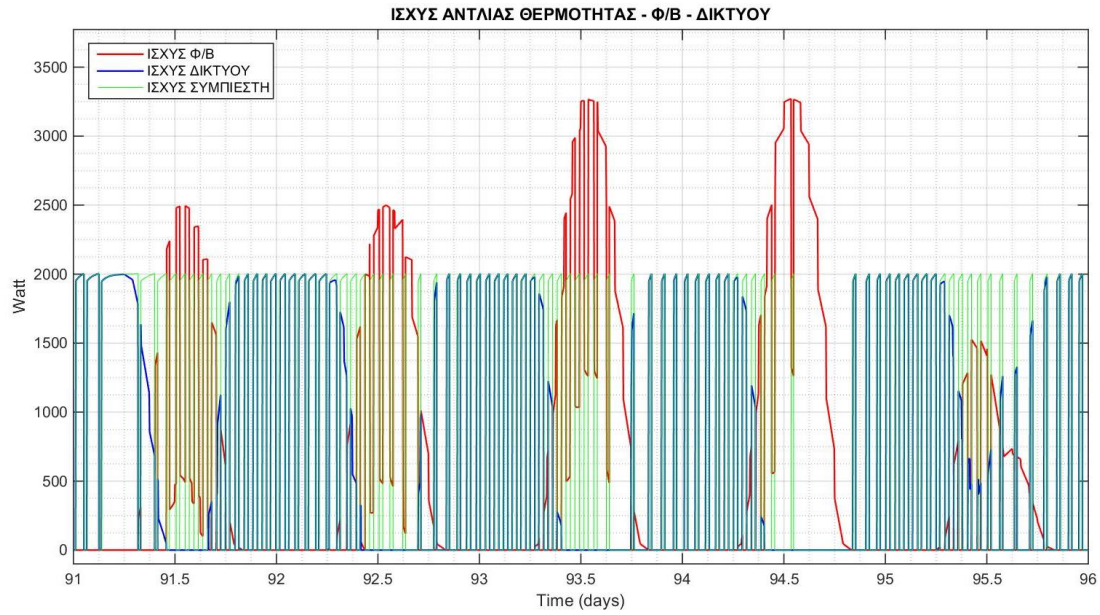
Παρ' ότι το εύρος του δεν έχει μεταβληθεί (αφού εξαρτάται κυρίως από τις προδιαγραφές της αντλίας θερμότητας), γίνεται εμφανές (από τις περιόδους λειτουργίας των διαγραμμάτων) ότι η αντλία χρησιμοποιείται λιγότερο κατά την διάρκεια της συγκεκριμένης περιόδου .

Εξετάζονται, (όπως και για την εβδομάδα 8), δύο σενάρια κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών από συστοιχία ΦΒ. Οι διαφοροποιήσεις των αποτελεσμάτων στα μεγέθη που σχετίζονται με την διάταξη εκμετάλλευσης ηλιακής ενέργειας αναλύονται ακολούθως

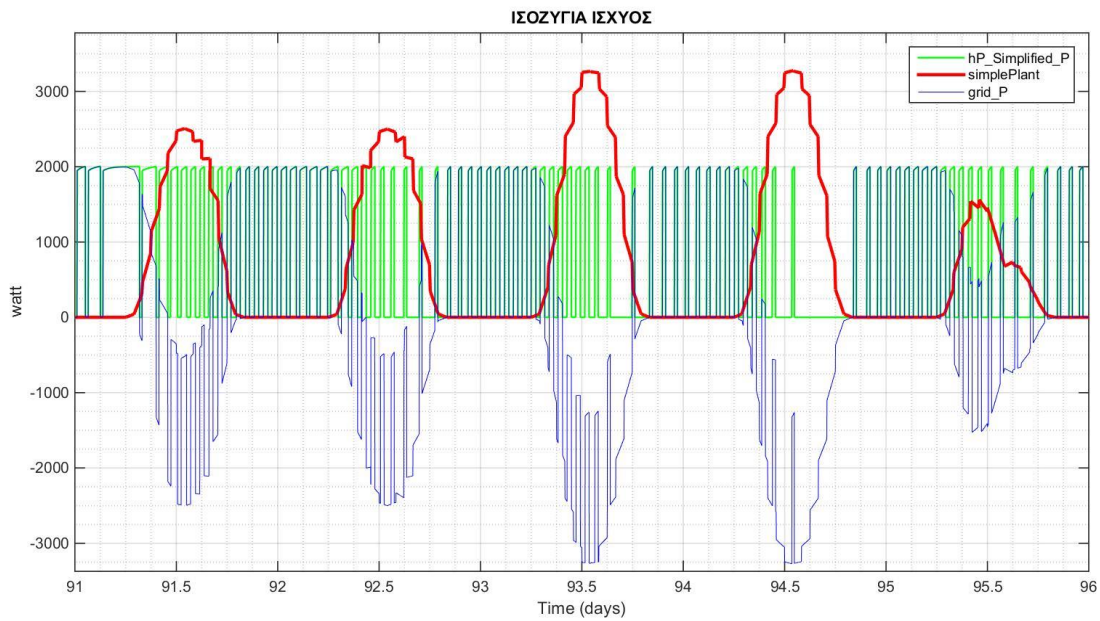
4.2.2.1 Κάλυψη του 60 % της ενέργειας συμπιεστή από συστοιχία ΦΒ

Στην αρχική διάταξη προστίθεται συστοιχία φωτοβολταϊκών πάνελ, που καλύπτει σχεδόν το 60% της ονομαστικής ισχύος του συμπιεστή ,αποτελούμενη, όπως έχει ήδη αναφερθεί από 7 πάνελ ισχύος 175 Watt, δυνδεδεμένα σειρικά μεταξύ τους.

Στα δύο διαγράμματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα ισοζύγια ηλεκτρικής ισχύος, όπως πριν (πράσινο χρώμα - ισχύς του συμπιεστή της αντλίας θερμότητας , με κόκκινο -η ισχύς ΦΒ και με μπλε -η ισχύς δικτύου που τροφοδοτεί τον συμπιεστή) .Παρατηρούμε ότι ούτε σε αυτή την χρονική περίοδο υπάρχει ταυτοχρονισμός ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και προσφοράς ηλιακής ,οπότε τμήμα της παραγόμενης ενέργειας επιστρέφει στο δίκτυο . Η απορριπτόμενη ενέργεια φαίνεται στις αρνητικές τιμές της εικόνας 4.19.



Εικόνα 4.18: Ισχύς συμπιεστή , δικτύου και ΦΒ που επιστρέφει στο δίκτυο 14^{ης} εβδομάδας έτους-60 % κάλυψης από ΦΒ



Εικόνα 4.19 : Ισχύς ΦΒ, συμπιεστή και δικτύου (αρνητικά επιστροφή λόγω ΦΒ) 14^{ης} εβδομάδας έτους-60 % κάλυψης από ΦΒ

Υπολογίζονται οι (κοινοί) δείκτες σύγκρισης:

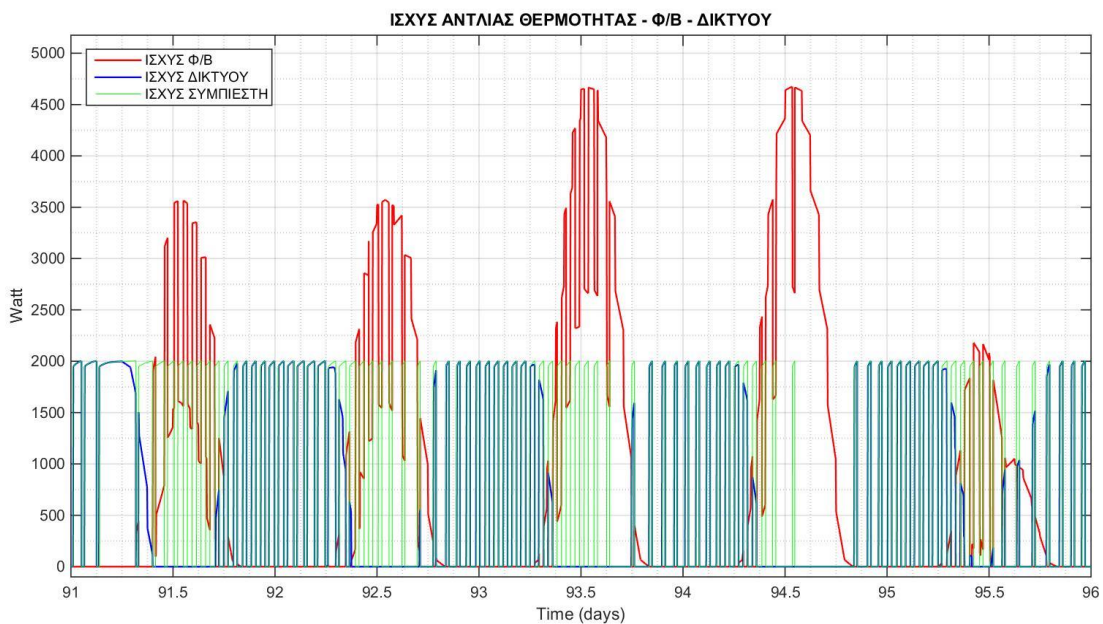
1. $E_{PV_{HP}} = 27,55 \text{ Kwh}$
2. $E_{PV_{ΔΙΚΤΥΟ}} = 66,19 \text{ Kwh}$
3. $n_{\alpha} = \frac{E_{PV_{TOT}} - E_{PV_{POS}}}{E_{PV_{TOT}}} = 29,39 \%$
4. $n_{\eta\sigma} = \frac{E_{COMP} - E_{PV_{NEG}}}{E_{COMP}} = 28,37 \%$

$$5. \overline{CoP} = 3,739$$

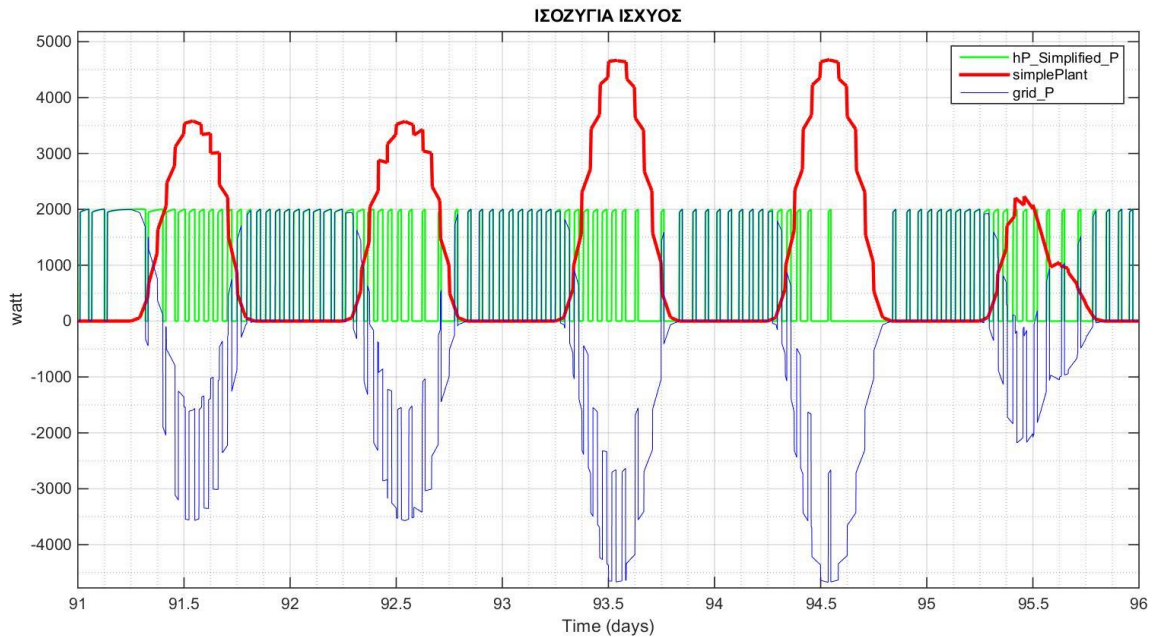
4.2.2.2 Κάλυψη του 85 % της ενέργειας συμπιεστή από συστοιχία ΦΒ

Σε αυτήν την παραλαγή της διάταξης υπάρχει συστοιχία φωτοβολταϊκών πάνελ, που καλύπτει σχεδόν το 85% της ονομαστικής ισχύος του συμπιεστή .

Κατ' αντιστοιχία με την, προαναφερθείσα, μικρότερη εγκατάσταση ΦΒ, στα ακόλουθα δύο διαγράμματα παρουσιάζονται τα ισοζύγια ηλεκτρικής ισχύος, (με πράσινο χρώμα απεικονίζεται η ισχύς του συμπιεστή της αντλίας θερμότητας , με κόκκινο η ισχύς ΦΒ και με μπλε η ισχύς δικτύου που τροφοδοτεί τον συμπιεστή) . Παρατηρούμε ότι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν υπάρχει ταυτοχρονισμός ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και προσφοράς ηλιακής ,οπότε τμήμα της παραγόμενης ενέργειας επιστρέφει στο δίκτυο . Η απορριπτόμενη ενέργεια, η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από οποιαδήποτε άλλη εγκαταστάτη και λόγω υψηλής ακτινοβολίας και λόγω ενεργειακής κάλυψης, φαίνεται στις αρνητικές τιμές της εικόνας 4.24.



Εικόνα 4.20:Ισχύς συμπιεστή , δικτύου και ΦΒ που επιστρέφει στο δίκτυο 14^{ης} εβδομάδας έτους-85 % κάλυψης από ΦΒ



Εικόνα 4.21: Ισχύς ΦΒ, συμπιεστή και δικτύου (αρνητικά επιστροφή λόγω ΦΒ) 14^{ης} εβδομάδας έτους-85 % κάλυψης από ΦΒ

Οι δείκτες σύγκρισης παίρνουν τις ακόλουθες τιμές:

1. $E_{PV_{HP}} = 31,35 \text{Kwh}$
2. $E_{PV_{ΔΙΚΤΥΟ}} = 102,57 \text{Kwh}$
3. $n_{\alpha} = \frac{E_{PV_{TOT}} - E_{PV_{POS}}}{E_{PV_{TOT}}} = 23,41 \%$
4. $n_{\eta\sigma} = \frac{E_{COMP} - E_{PV_{NEG}}}{E_{COMP}} = 32,29\%$
5. $\overline{COP} = 3,739$

Προφανώς, ο μέσος συντελεστής απόδοσης δεν αλλάζει με την τροποποίηση της εγκατάστασης ΦΒ, αφού δεν εξαρτάται από αυτήν.

Όλα τα υπόλοιπα μεγέθη όμως, διαφοροποιούνται καθώς η εκμετάλλευση μεγαλύτερου ποσοστού ηλιακής ενέργειας γίνεται καθ όλη την διάρκεια της ημέρας, άρα και σε ώρες πέραν του μεσημεριού, δηλαδή με αυξημένες θερμικές απαιτήσεις. Προφανώς λοιπόν, το ποσοστό εκμετάλλευσης ηλιακής ενέργειας αυξάνεται. Ο δείκτης αξιοποίησης, ωστόσο, μειώνεται λόγω ετεροχρονισμού ζήτησης ενέργειας από τον συμπιεστή της αντλίας θερμότητας και προσφοράς από τις διατάξεις ΦΒ. Τα συμπεράσματα μπορούν να επιβεβαιωθούν και από την σύγκριση των τιμών των υπολοίπων μεταβλητών

Τέλος συγκρίνοντας τις ομόλογες διατάξεις των δύο διαφορετικών πενθημέρων μεταξύ τους, παρατηρείται ότι ο συντελεστής απόδοσης παραμένει σχεδόν αμετάβλητος (αναμενόμενο συμπέρασμα).

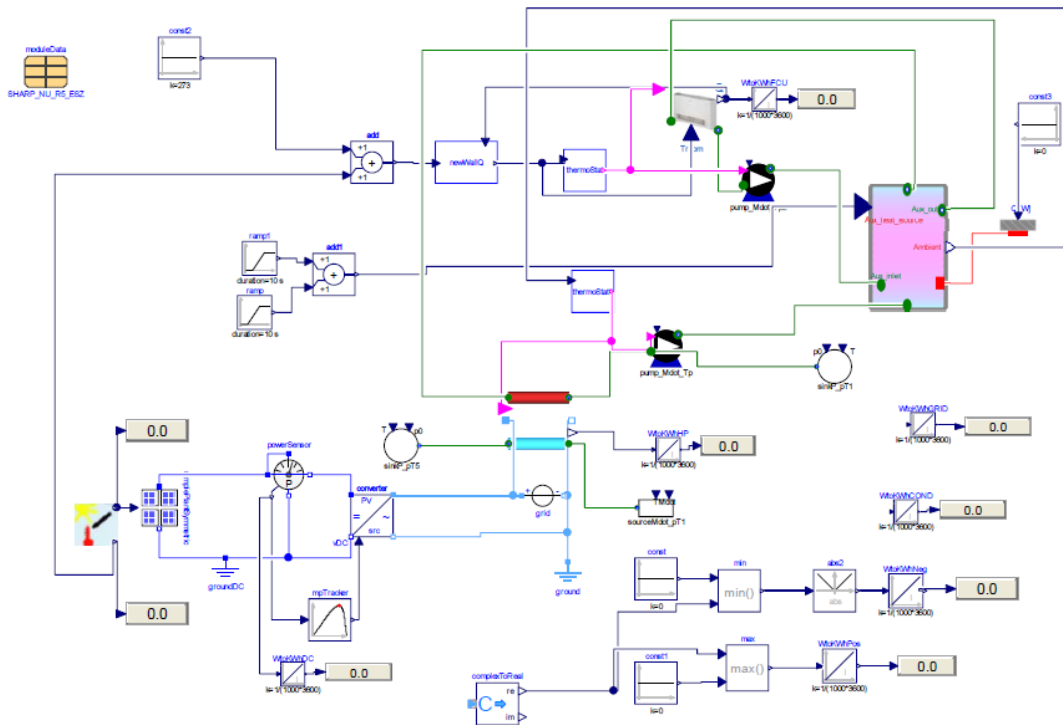
Ο δείκτης αξιοποίησης είναι πολύ χαμηλότερος για την 14^η εβδομάδα ,καθώς οι απαιτήσεις ενέργειας είναι μειωμένες και η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ πολύ υψηλή,

Ενώ ο δείκτης εκμετάλλευσης ηλιακής ενέργειας από την αντλία θερμότητας (κατά την 14^η εβδομάδα) αυξάνεται ,αφού οι μικρότερες απαιτήσεις συμπιεστή καλύπτονται ικανοποιητικότερα από την συστοιχία πάνελ .

4.3 Τοπολογία 3

Η τελευταία τοπολογία της εργασίας είναι εξέλιξη της προηγούμενης, στην οποία προστίθεται δοχείο αποθήκευσης θερμού νερού, με σκοπό να τροφοδοτηθεί η μονάδα fan coil, κυρίως κατά τις ώρες απουσίας ηλιακής ακτινοβολίας, ελαχιστοποιώντας ακόμη περισσότερο την κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από δίκτυο για τροφοδοσία της αντλίας .Στην ουσία, με την χρήση θερμοδοχείου επιδιώκεται η μετακίνηση της αιχμής παραγωγής ενέργειας από ΦΒ διατάξεις αργότερα μέσα στο 24ωρο, ώστε να μπορέσει να καλύψει μεγαλύτερο ποσοστό της αιχμής ζήτησης .Το θερμοδοχείο «φορτίζει» από την αντλία θερμότητας (τροφοδοτούμενη έμμεσα και από τον ήλιο) και μπορεί να αποδώσει την ενέργεια του στον χώρο όταν ζητηθεί . Όλες οι προσομοιώσεις της συνδεσμολογίας 3 πραγματοποιούνται έχοντας θεωρήσει συνεισφορά ΦΒ διάταξης στην ισχύ του συμπιεστή ίση με το 60 % της συνολικής ,τιμή που όπως έχει ήδη καταδειχθεί επιφέρει πολύ καλά αποτελέσματα .Προκειμένου να επιτευχθεί έλεγχος αυτής της τοπολογίας χρησιμοποιούνται δύο control units ,(δύο θερμοστάτες) :

- Θερμοστάτης 1 :Δέχεται σαν είσοδο την επικρατούσα θερμοκρασία εσωτερικού χώρου και η έξοδος του είναι λογική τιμή (true / false) για τον έλεγχο της λειτουργίας της μονάδας fan coil και της αντίστοιχης αντλίας ροής νερού .Απενεργοποιεί τις σχετικές διατάξεις όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 21 °C και τις ενεργοποιεί όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος πέσει κάτω από 19 °C .
- Θερμοστάτης 2 : Δέχεται σαν είσοδο την θερμοκρασία του νερού του ενδεδειγμένου κόμβου του θερμοδοχείου και η έξοδος του είναι λογική τιμή (true / false) για τον έλεγχο της αντλίας θερμότητας και της αντίστοιχης αντλίας ροής της . Όταν η θερμοκρασία νερού γίνει μικρότερη από 35°C ,τότε ενεργοποιείται η αντλία θερμότητας για την θέρμανση του. Αντίστοιχα, όταν η θερμοκρασία νερού ξεπεράσει τους 55°C, η αντλία θερμότητας απενεργοποιείται .



Εικόνα 4.22: Μοντέλο τρίτης συνδεσμολογίας

Λόγω πολυπλοκότητας του μοντέλου, δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθούν τα αποτελέσματα του για ολόκληρες τις περιόδους του run της προηγούμενης συνδεσμολογίας. Έτσι, προκειμένου να καταδειχθούν τα οφέλη των προσθηκών επιλέγονται οι εξής δύο χαρακτηριστικές μέρες (Εικόνες 4.8 & 4.15) και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μοντελοποιήσεων τους για διάστημα 24 ωρών (07:00 – 07:00)

- Ημέρα 53 :min T & max IRR
- Ημέρα 93 :medium T & max IRR

Να σημειωθεί εδώ ότι η προσομοίωση κάθε μοντέλου της τοπολογίας 3, διήρκτησε 10-12 ώρες, ανάλογα με τον υπολογιστή στον οποίο πραγματοποιήθηκε

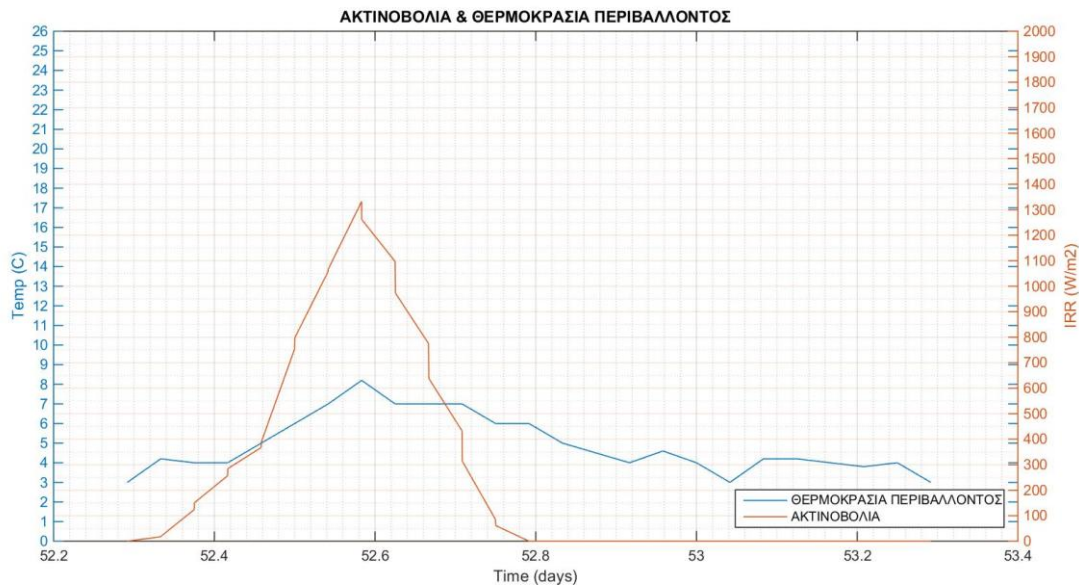
4.3.1 Τοπολογία 2 για τις ημέρες ενδιαφέροντος

Προκειμένου να εξάγουμε συμπεράσματα σχετικά με τα οφέλη της τρίτης συνδεσμολογίας, θα πρέπει να μπορέσουμε να την συγκρίνουμε με την προγενέστερη της σε ίδιο χρονικό παράθυρο. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιείται προσομοίωση της συνδεσμολογίας Β για τις χαρακτηριστικές μέρες που έχουν ήδη αναφερθεί. Χάρην πληρότητας της μελέτης οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται για δύο σενάρια χωρητικότητας θερμοδοχείου, 300 και 500 lt αντίστοιχα.

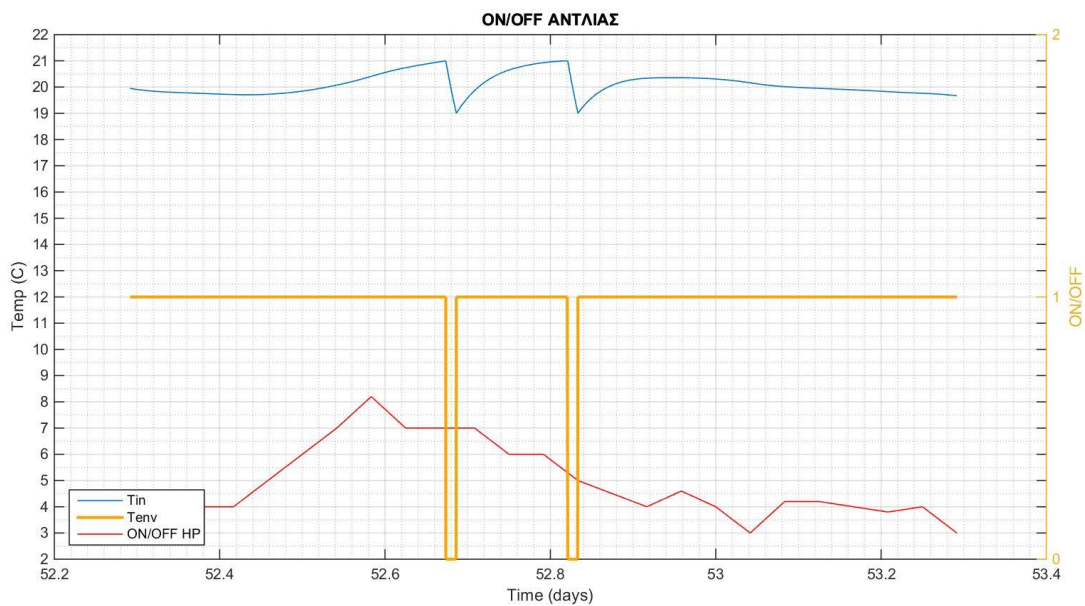
4.3.1.1 Ημέρα 53^η

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης της 2^{ης} τοπολογίας, για την 53^η ημέρα του έτους. Οι θερμοκρασίες κυμαίνονται σε πολύ

χαμηλά επίπεδα με αποτέλεσμα η αντλία θερμότητας να λειτουργεί σχεδόν συνεχώς (εικόνες 4.23 & 4.24).

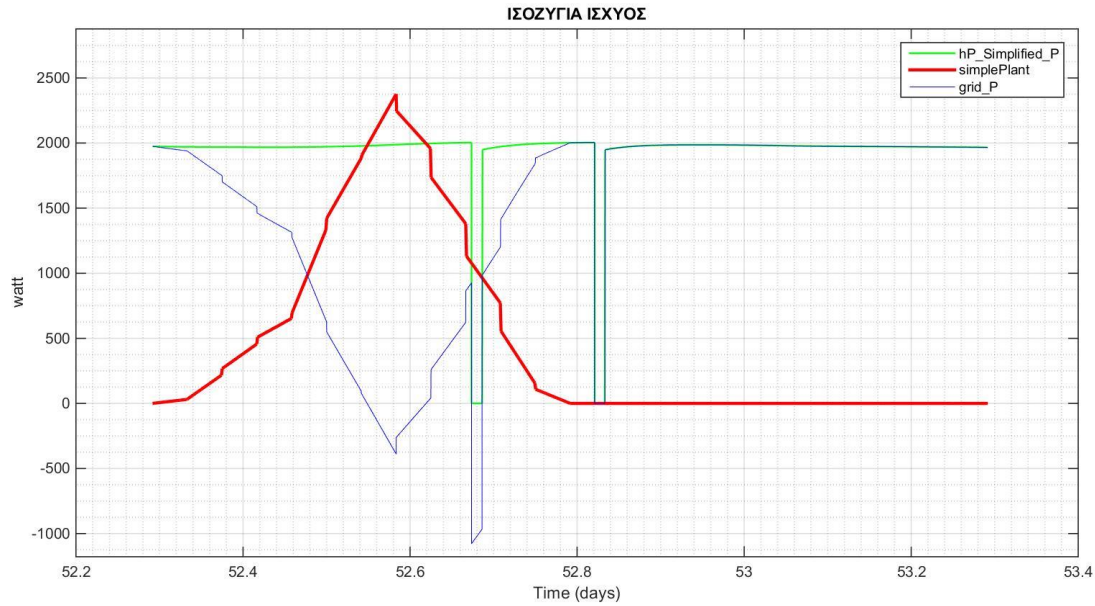


Εικόνα 4.23 : Διάγραμμα ακτινοβολίας-θερμοκρασίας 53^{ης} ημέρας έτους



Εικόνα 4.24: Διάγραμμα ON/OFF HP -θερμοκρασίας χώρου-θερμοκρασίας περιβάλλοντος 53^{ης} ημέρας έτους για την 2^η συνδεσμολογία

Παρά την ικανοποιητική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒ, η επιστροφή ισχύος στο δίκτυο είναι ελάχιστη, (λόγω της πολύ υψηλής ζήτησης), όπως συμπεραίνεται και από την εικόνα 4.25, στην οποία παρουσιάζεται με πράσινο χρώμα η ζήτηση του συμπιεστή, με κόκκινο η παραγωγή της διάταξης ΦΒ και με μπλε η κατανάλωση από το δίκτυο. Προφανώς οι αρνητικές τιμές της μπλε καμπύλης αντιπροσωπεύουν την επιστροφή ενέργειας από την διάταξη ΦΒ στο δίκτυο.



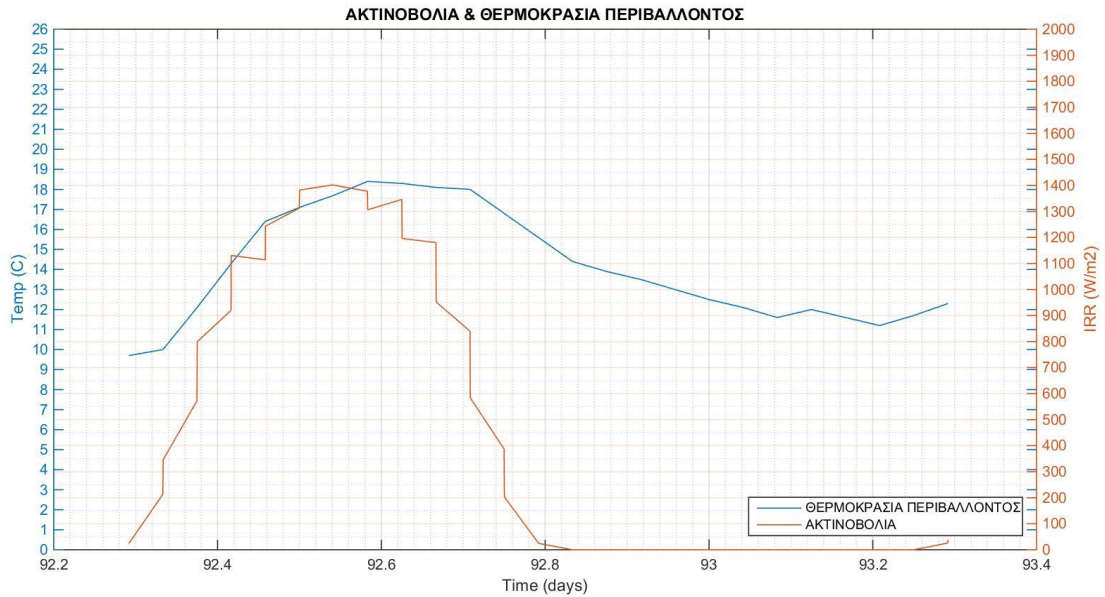
Εικόνα 4.25 : Ισχύς ΦΒ, συμπιεστή και δικτύου (αρνητικά επιστροφή λόγω ΦΒ) 53^{ης} ημέρας έτους 60 % κάλυψης από ΦΒ για την 2^η συνδεσμολογία

Οι δείκτες σύγκρισης, σε αυτήν την περίπτωση, παίρνουν τις ακόλουθες τιμές:

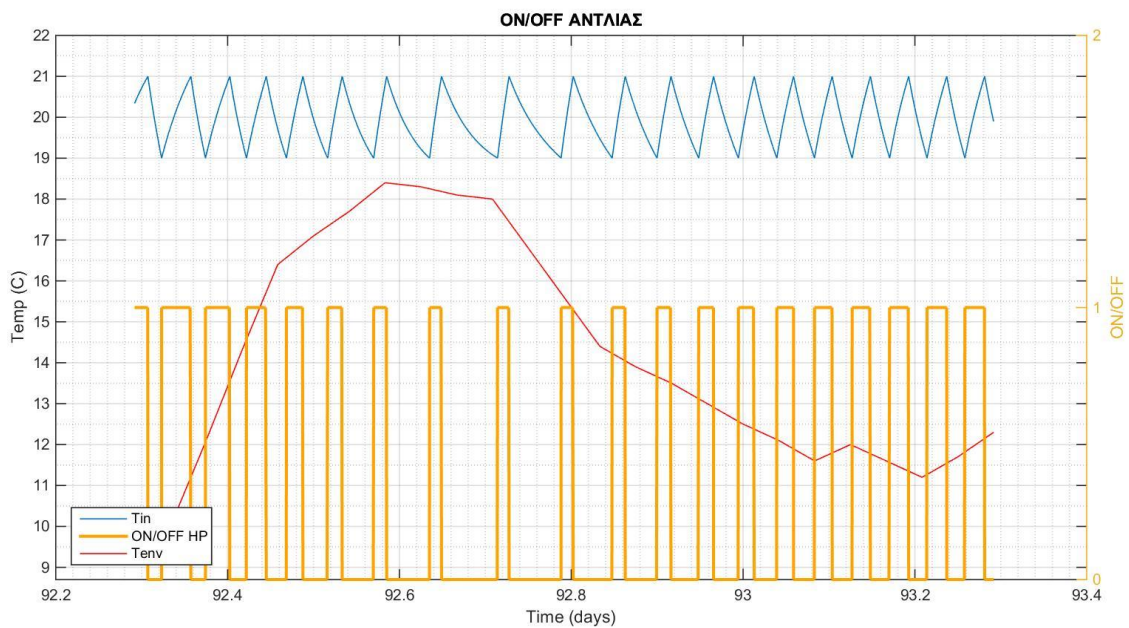
1. $E_{PV_{HP}} = 10,332 \text{Kwh}$
2. $E_{PV_{ΔΙΚΤΥΟ}} = 0,5875 \text{Kwh}$
3. $n_{\alpha} = \frac{E_{PV_{TOT}} - E_{PV_{POS}}}{E_{PV_{TOT}}} = 94,62 \%$
4. $n_{\eta\sigma} = \frac{E_{COMP} - E_{PV_{NEG}}}{E_{COMP}} = 22,31\%$
5. $\overline{COP} = 3,741$

4.3.1.2 Ημέρα 93^η

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης της 2^{ης} τοπολογίας, για την 93^η ημέρα του έτους. Οι θερμοκρασίες κυμαίνονται σε μεσαία (για την χειμερινή περίοδο) επίπεδα με αποτέλεσμα η αντλία θερμότητας να λειτουργεί διακεκομμένα, εμφανίζοντας μεγάλα διαστήματα απενεργοποίησης (εικόνες 4.26 & 4.27).

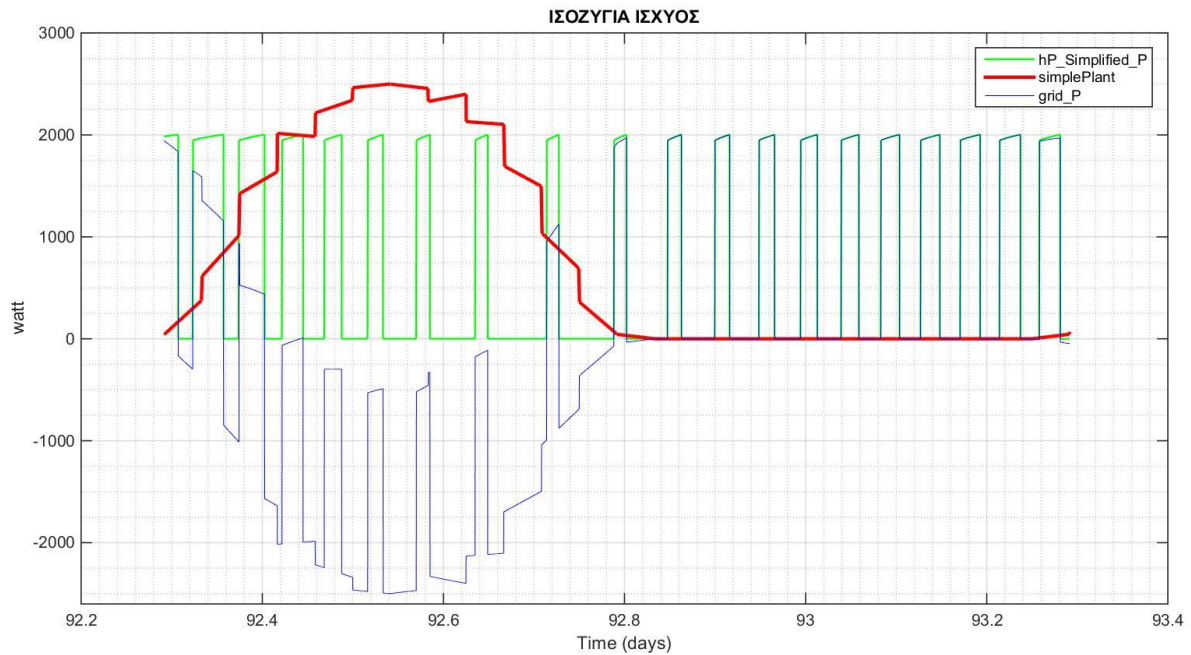


Εικόνα 4.26: Διάγραμμα ακτινοβολίας-θερμοκρασίας 93^{ης} ημέρας έτους



Εικόνα 4.27: Διάγραμμα ON/OFF HP -θερμοκρασίας χώρου-θερμοκρασίας περιβάλλοντος 93^{ης} ημέρας έτους για την 2^η συνδεσμολογία

Λόγω της ικανοποιητικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒ (κόκκινη καμπύλη εικόνας 4.28) και της μειωμένης, (συγκριτικά με την 53^η ημέρα), ζήτησης ενέργειας συμπιεστή (πράσινη καμπύλη εικόνας 4.28), η κατανάλωση από το δίκτυο είναι μειωμένη (μπλε καμπύλη εικόνας 4.28). Προφανώς οι αρνητικές τιμές της μπλε καμπύλης αντιπροσωπεύουν την επιστροφή ενέργειας από την διάταξη ΦΒ στο δίκτυο .



Εικόνα 4.28: Ισχύς ΦΒ, συμπιεστή και δικτύου (αρνητικά επιστροφή λόγω ΦΒ) 93^{ης} ημέρας έτους 60 % κάλυψης από ΦΒ για την 2^η συνδεσμολογία

Οι δείκτες σύγκρισης παίρνουν τις ακόλουθες τιμές:

1. $E_{PV_{HP}} = 6,056 \text{ Kwh}$
2. $E_{PV_{\DeltaΙΚΤΥΟ}} = 12,938 \text{ Kwh}$
3. $n_{\alpha} = \frac{E_{PV_{TOT}} - E_{PV_{POS}}}{E_{PV_{TOT}}} = 31,88 \%$
4. $n_{\eta\sigma} = \frac{E_{COMP} - E_{PV_{NEG}}}{E_{COMP}} = 32,70\%$
5. $\overline{COP} = 3,741$

4.3.2 Τοπολογία 3- Μέρα 53^η

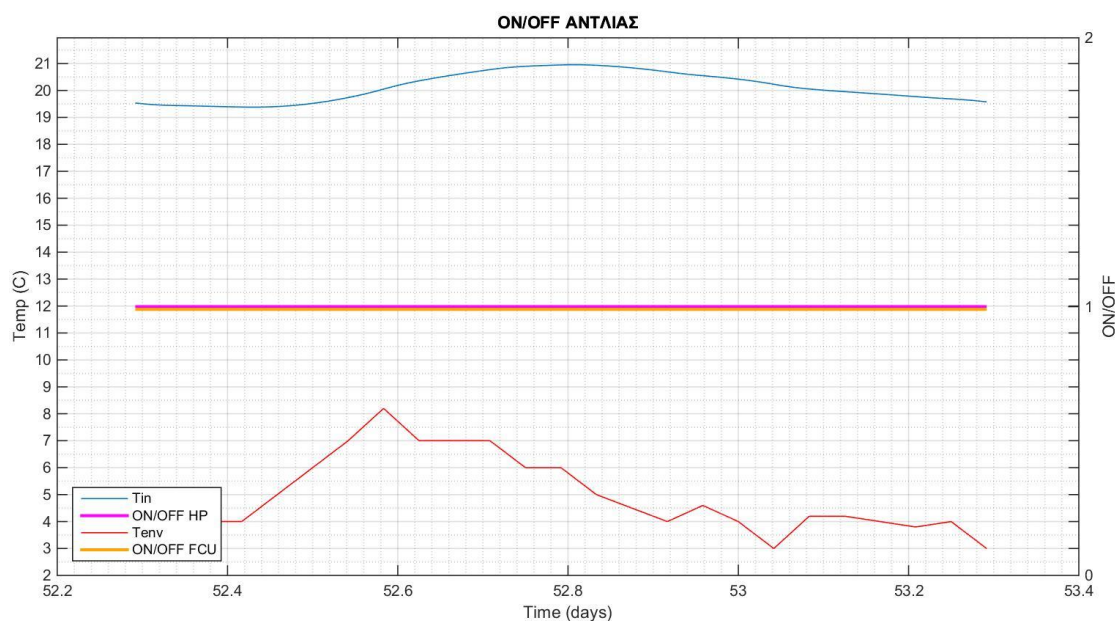
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η συγκεκριμένη μέρα, επιλέχθηκε για τις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, σε συνδυασμό με τις υψηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας. (εικόνα 4.23) .

Στις παραγράφους που ακολουθούν εξετάζεται η αποτελεσματικότητα των προσθηκών της τρίτης συνδεσμολογίας, δηλαδή η δυνατότητα θέρμανσης του νερού του θερμοδοχείου με χρήση της αντλίας θερμότητας ,τροφοδοτούμενη κατά το μέγιστο δυνατό από την διάταξη ΦΒ.

Επί της ουσίας επιδιώκεται η αξιοποίηση της αιχμής της καμπύλης ακτινοβολίας (θέρμανση νερού) και η απόδοση της ενέργειας της κατά τις ώρες μη ηλιοφάνειας.

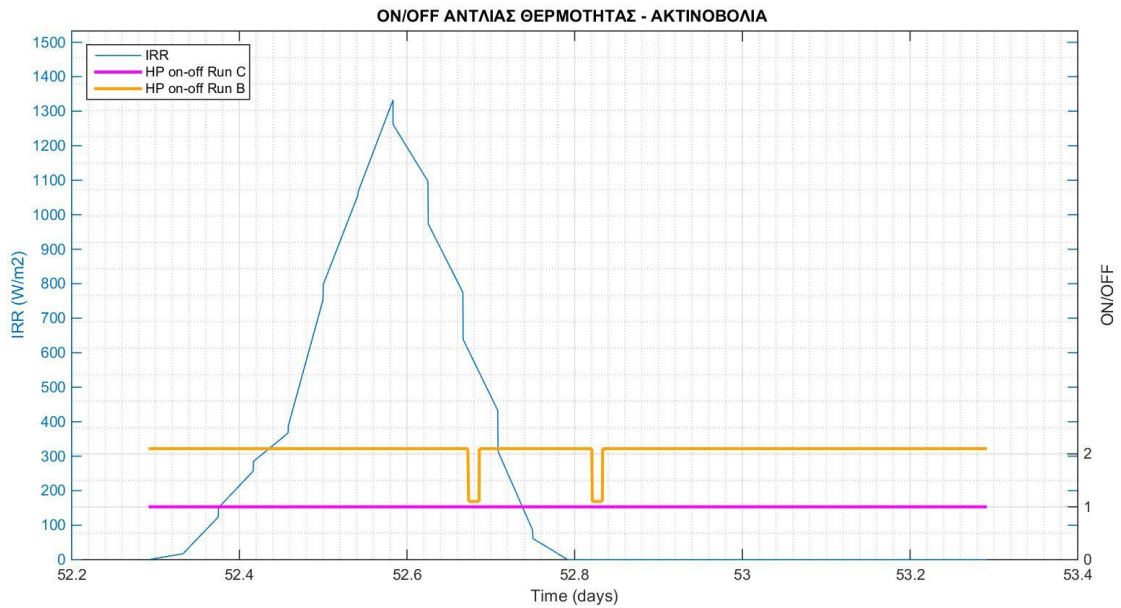
4.3.2.1 Ημέρα 53^η - Δοχείο 300 Lt

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τρίτης και τελευταίας συνδεσμολογίας, με προσθήκη θερμοδοχείου 300 lt. Σκοπός μας είναι η θέρμανση κτηρίου αξιοποιώντας, κατά το μέγιστο, την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από συστοιχίες ΦΒ (όπως έχει ήδη αναφερθεί). Πέραν της διατήρησης της θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου στα επιθυμητά επίπεδα (19-21 °C), επιδιώκεται, (με χρήση της αντλίας θερμότητας) και η θέρμανση του νερού που περιέχεται στο θερμοδοχείο, προκειμένου να αποδοθεί αργότερα η ενέργεια του στον χώρο. Για τον λόγο αυτό, εφόσον οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος είναι πολύ χαμηλές, η αντλία θερμότητας, όπως και η μονάδα τερματικού σώματος εξαναγκασμένης κυκλοφορίας λειτουργούν συνεχόμενα καθ' όλο το διάστημα προσομοίωσης (εικόνα 4.29). Η μεν αντλία για να διατηρήσει το νερό του δοχείου σε θερμοκρασίες 35-55 °C και η δε μονάδα fan coil για να διατηρήσει την θερμοκρασία χώρου σε εύρος 19-21 °C.



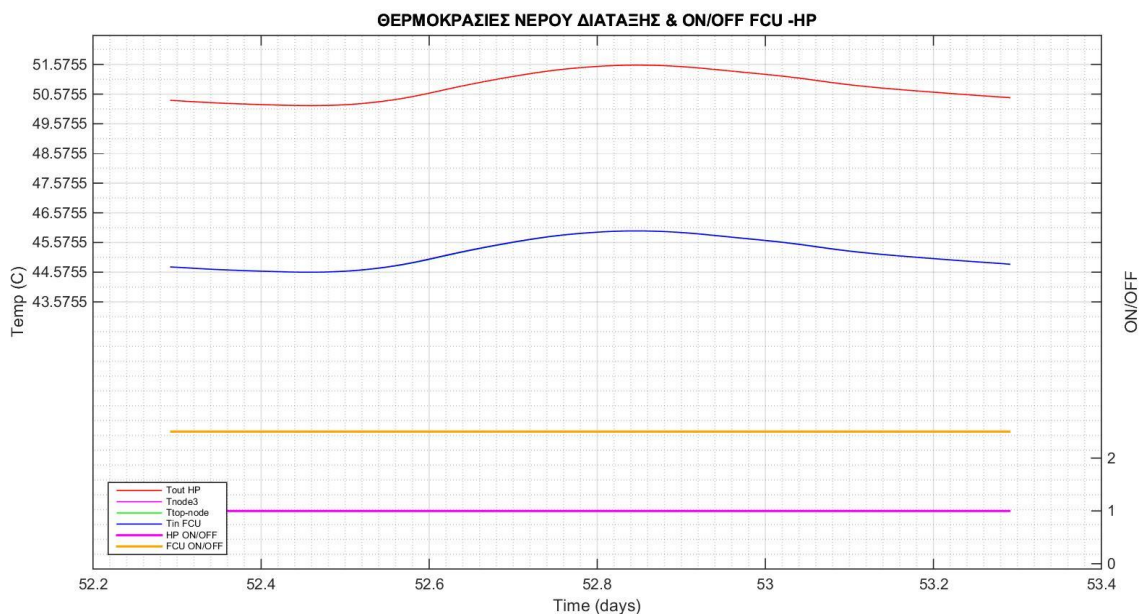
Εικόνα 4.29 : Διάγραμμα ON/OFF HP & FCU-θερμοκρασίας χώρου-θερμοκρασίας περιβάλλοντος 53^{ης} ημέρας έτους για την 3^η συνδεσμολογία & δοχείο 300 lt

Στο ακόλουθο διάγραμμα (εικόνα 4.30), απεικονίζονται σε κοινούς άξονες: η λειτουργία της αντλίας θερμότητας της αντίστοιχης, με την εξεταζόμενη, διάταξης της συνδεσμολογίας 2, η λειτουργία της αντλίας θερμότητας της συνδεσμολογίας 3 και η επικρατούσα ακτινοβολία. Έτσι μπορεί να παρατηρηθεί πιθανή η αύξηση της αξιοποίησης τη ηλιακής ενέργειας.



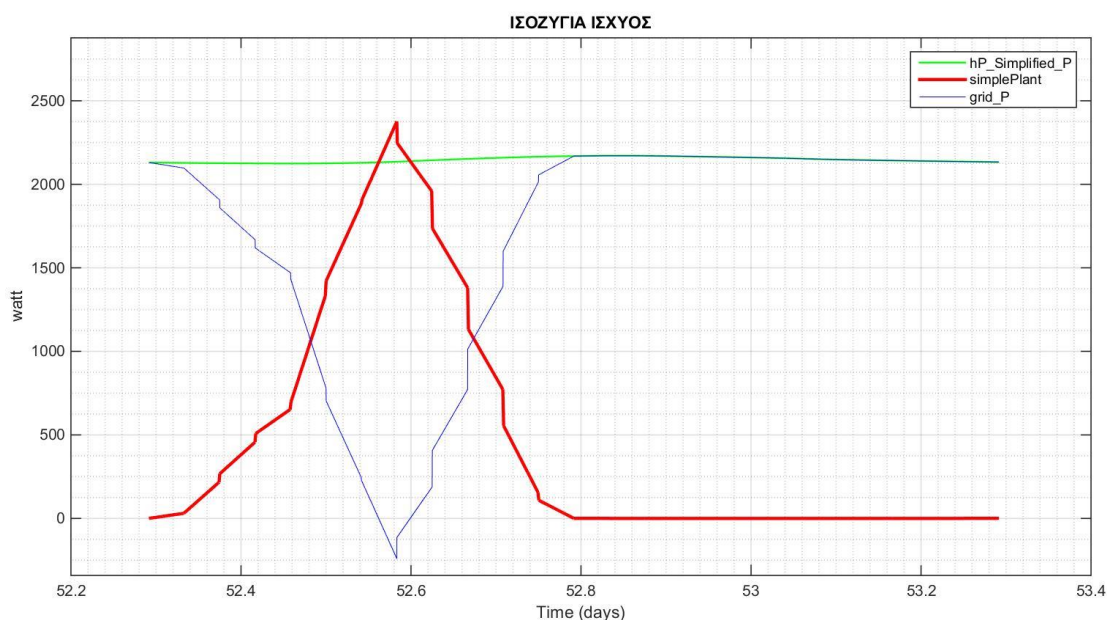
Εικόνα 4.30: Διάγραμμα ON/OFF HP &FCU-ακτινοβολίας 53^{ης} ημέρας έτους για την 3^η συνδεσμολογία & δοχείο 300 lt

Εφόσον παρατηρείται αδιάλειπτη ροή νερού κατά μήκος του θερμοδοχείου (και των υπόλοιπων δομών της διάταξης), το δοχείο συμπεριφέρεται σαν ένας κόμβος, δηλαδή η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου σε όλα τα κελία του είναι κοινή (δεν γίνεται διαστρωμάτωση - εικόνα 4.31). Ξεχωρίζει, μόνο, ως καμπύλη κορυφής, η καμπύλη της θερμοκρασίας με την οποία πληρώνεται το δοχείο από την αντλία θερμότητας .



Εικόνα 4.31: Διάγραμμα ON/OFF HP &FCU-θερμοκρασιών κόμβων δοχείου νερού 53^{ης} ημέρας έτους για την 3^η συνδεσμολογία & δοχείο 300 lt

Στο τελευταίο διάγραμμα της παραγράφου (εικόνα 4.32) παρουσιάζονται τα ισοζύγια ισχύος (ενέργειας) της διάταξης (ενέργεια συμπιεστή -πράσινη καμπύλη, παραγωγή ΦΒ διάταξης – κόκκινη καμπύλη, κατανάλωση από το δίκτυο - μπλε καμπύλη). Προφανώς οι αρνητικές τιμές της μπλε καμπύλης αντιπροσωπεύουν την επιστροφή ενέργειας από την διάταξη ΦΒ στο δίκτυο .



Εικόνα 4.32: Ισχύς ΦΒ, συμπιεστή και δικτύου (αρνητικά επιστροφή λόγω ΦΒ) 53^{ης} ημέρας έτους 60 % κάλυψης από ΦΒ για την 3^η συνδεσμολογία & δοχείο 300 lt

Οι τιμές των δεικτών σύγκρισης είναι οι ακόλουθες :

1. $E_{PV_{HP}} = 10,84 \text{ Kwh}$
2. $E_{PV_{ΔΙΚΤΥΟ}} = 0,084 \text{ Kwh}$
3. $n_{\alpha} = \frac{E_{PV_{TOT}} - E_{PV_{POS}}}{E_{PV_{TOT}}} = 99,23 \%$
4. $n_{\eta\sigma} = \frac{E_{COMP} - E_{PV_{NEG}}}{E_{COMP}} = 21,03\%$
5. $\overline{CoP} = 3,388$

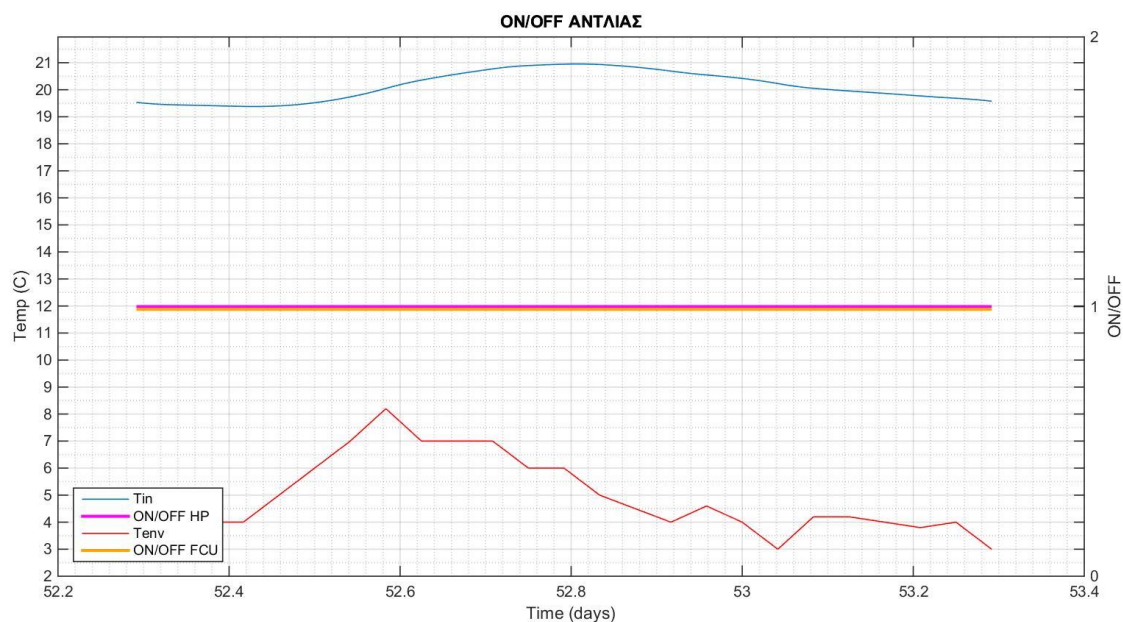
Παρεμβάλλοντας τις με τις τιμές που προέκυψαν από την προσομοίωση της τοπολογίας Β για τον ίδιο χρόνο, γίνεται εμφανές ότι:

- Ο συντελεστής απόδοσης της αντλίας θερμότητας μειώθηκε, καθώς η παραγόμενη θερμότητα της αντλίας αποδόθηκε στον χώρο και το θερμοδοχείο.
- Ο βαθμός αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας από την συστοιχία των ΦΒ αυξήθηκε, εφόσον χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερο ποσοστό ηλιακής ενέργειας και για την θέρμανση του νερού του δοχείου

- Ο βαθμός συνεισφοράς ηλιακής ενέργειας στην αντλία θερμότητας μειώθηκε, καθώς αυξήθηκε γενικά η απαιτούμενη ενέργεια της αντλίας, προκειμένου να θερμανθεί και το νερό του δοχείου. Άρα η ηλιακή (που είναι δεδομένη) αποτελεί μικρότερο ποσοστό της συνολικής

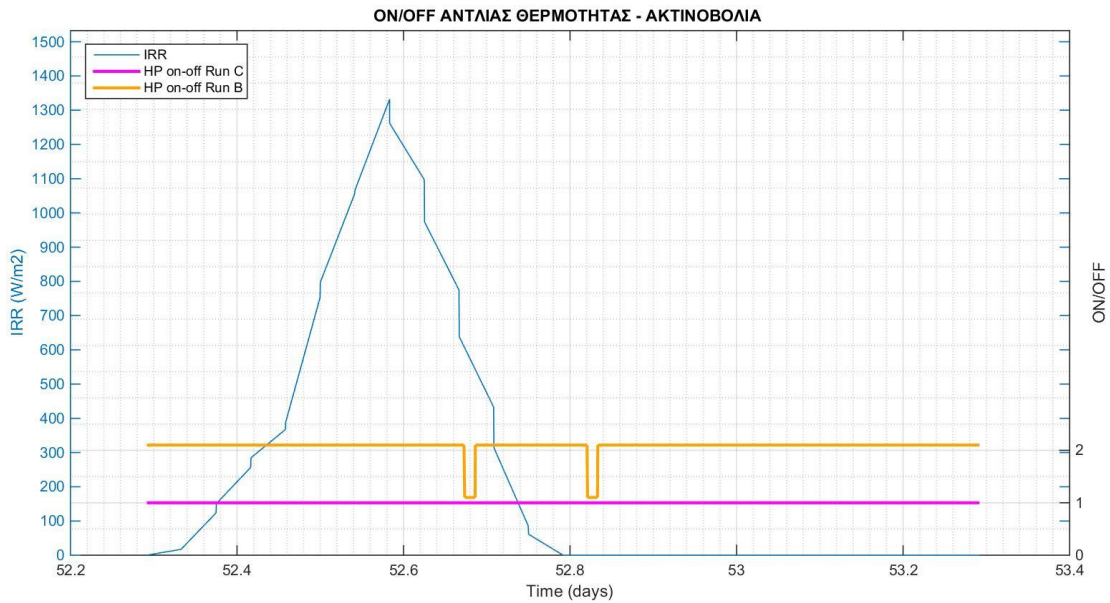
4.3.2.2 Ημέρα 53^η - Δοχείο 500 lt

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τρίτης συνδεσμολογίας, με προσθήκη θερμοδοχείου 500 lt. Τα συμπεράσματα είναι ανάλογα με εκείνα που προέκυψαν χρησιμοποιώντας θερμοδοχείο 300 lt. Προφανώς οι ενεργειακές ανάγκες για θέρμανση μεγαλύτερου όγκου νερού έχουν αυξηθεί και η αντλία θερμότητας, όπως και η μονάδα τερματικού σώματος εξαναγκασμένης κυκλοφορίας λειτουργούν συνεχόμενα καθ' όλο το διάστημα προσομοίωσης (εικόνα 4.33)



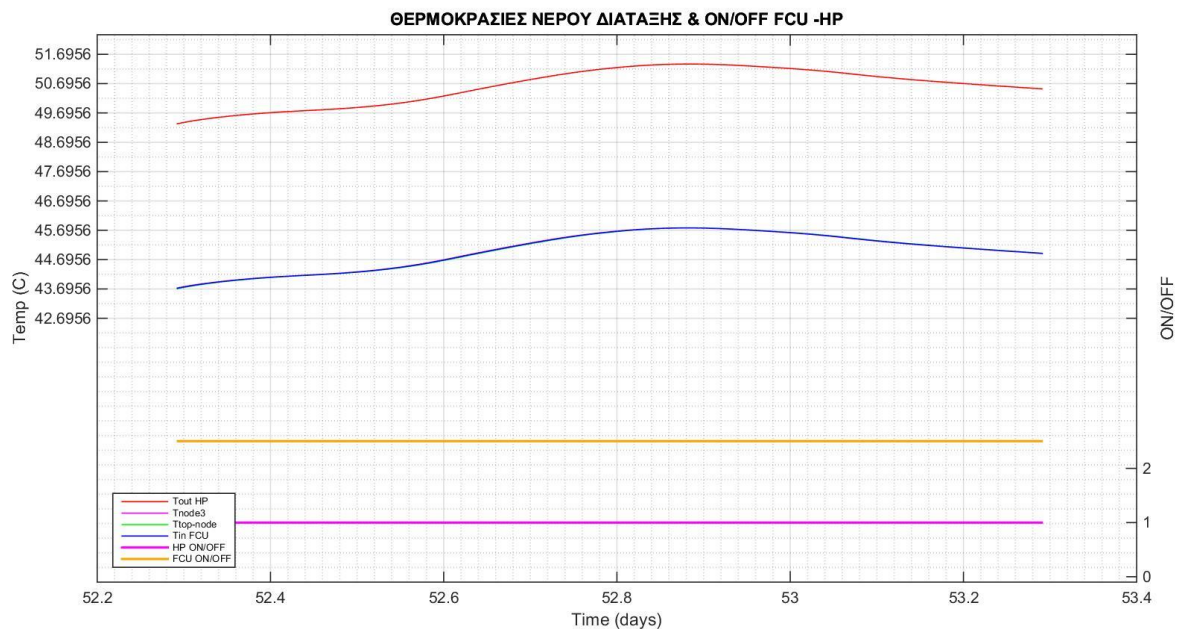
Εικόνα 4.33: Διάγραμμα ON/OFF HP & FCU-θερμοκρασίας χώρου-θερμοκρασίας περιβάλλοντος 53^{ης} ημέρας έτους για την 3^η συνδεσμολογία & δοχείο 500 lt

Η πιθανή μεγαλύτερη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα (εικόνα 4.34 -απεικόνιση σε κοινούς άξονες της λειτουργία της αντλίας θερμότητας της αντίστοιχης διάταξης της συνδεσμολογίας 2, της λειτουργία της αντλίας θερμότητας της συνδεσμολογίας 3 και της επικρατούσας ακτινοβολίας)+++



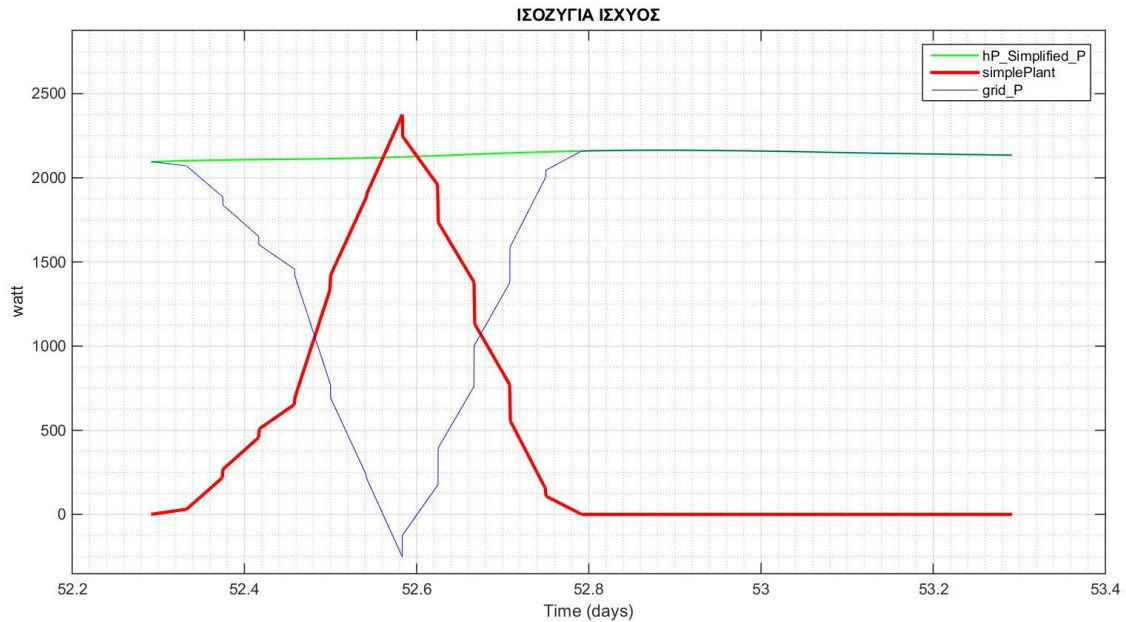
Εικόνα 4.34: Διάγραμμα ON/OFF HP &FCU-ακτινοβολίας 53^{ης} ημέρας έτους για την 3^η συνδεσμολογία & δοχείο 500 lt

Όπως και με το μικρότερο δοχείο, εφόσον συμβαίνει αδιάλειπτη ροή νερού κατά μήκος του θερμοδοχείου 500 lt, αυτό συμπεριφέρεται σαν ένας κόμβος, δηλαδή η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου σε όλα τα κελία του είναι κοινή (δεν γίνεται διαστρωμάτωση - εικόνα 4.35).



Εικόνα 4.35: : Διάγραμμα ON/OFF HP &FCU-θερμοκρασιών κόμβων δοχείου νερού 53^{ης} ημέρας έτους για την 3^η συνδεσμολογία & δοχείο 500 lt

Τέλος ακολουθεί το διάγραμμα ισοζυγίου ενέργειας της διάταξης (εικόνα 4.36 – ισχύει η ίδια απεικόνιση με πριν).



Εικόνα 4.36: : Ισχύς ΦΒ, συμπιεστή και δικτύου (αρνητικά επιστροφή λόγω ΦΒ) 53^{ης} ημέρας έτους 60 % κάλυψης από ΦΒ για την 3^η συνδεσμολογία & δοχείο 500 lt

Οι τιμές των δεικτών σύγκρισης διαμορφώνονται ως εξής :

1. $E_{PV_{HP}} = 10,825 \text{ Kwh}$
2. $E_{PV_{ΔΙΚΤΥΟ}} = 0,094 \text{ Kwh}$
3. $n_{\alpha} = \frac{E_{PV_{TOT}} - E_{PV_{POS}}}{E_{PV_{TOT}}} = 99,14 \%$
4. $n_{\eta\sigma} = \frac{E_{COMP} - E_{PV_{NEG}}}{E_{COMP}} = 21,09\%$
5. $\overline{COP} = 3,4032$

Συγκρίνοντας τους με τις τιμές που προέκυψαν από την προσομοίωση της τοπολογίας Β για τον ίδιο χρόνο, ισχύουν οι ίδιες παρατηρήσεις που διατυπώθηκαν στην παράγραφο 4.3.2.1 .

Συγκρίνοντας τους όμως, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της διάταξης με δοχείο 300 lt γίνεται εμφανές ότι συμβαίνει ελάχιστα χειρότερη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, (ο βαθμός αξιοποίησης παραγόμενης ενέργειας από ΦΒ παρουσιάζει πολύ μικρή μείωση), αλλά παρατηρείται ελάχιστα μεγαλύτερη συνεισφορά ηλιακής ενέργειας στην ζήτηση του συμπιεστή . Αυτό συμβαίνει λόγω ετεροχρονισμού παραγωγής ηλιακής ενέργειας και ζήτησης για κάλυψη θερμικών αναγκών (δοχείου και χώρου) . Τέλος παρουσιάζεται πολύ μικρή αύξηση συντελεστή απόδοσης της αντλίας ,καθώς το μεγαλύτερο δοχείο αποδίδει περισσότερη θερμότητα στον χώρο .

4.3.3 Τοπολογία C- Μέρα 93^η

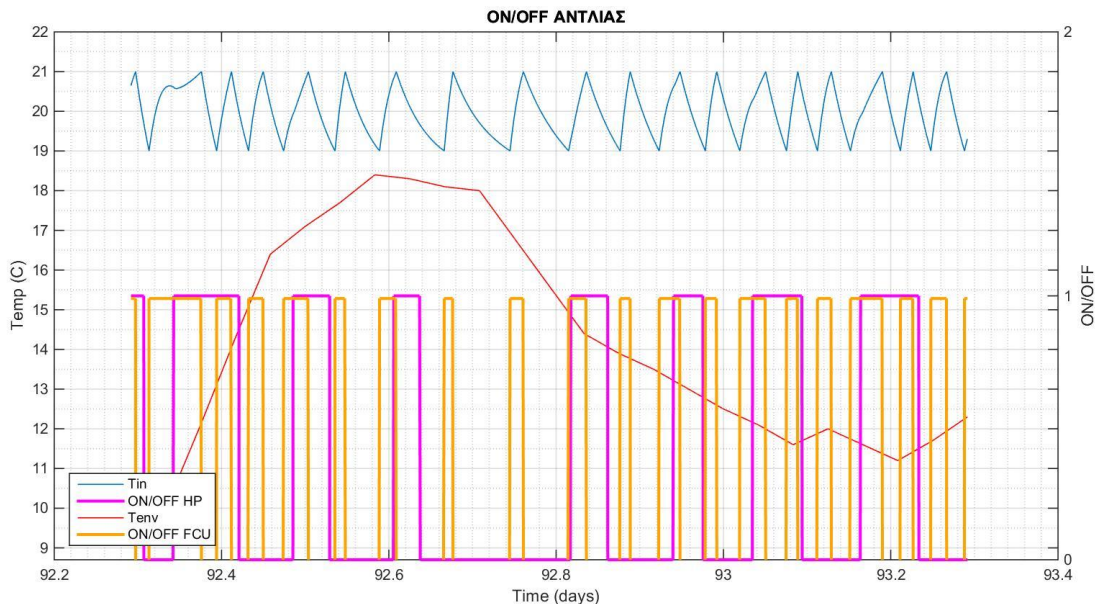
Η συγκεκριμένη μέρα, επιλέχθηκε για τις μέτριες (για χειμερινή περίοδο) θερμοκρασίες περιβάλλοντος, σε συνδυασμό με τις υψηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας. (εικόνα 4.26) .

Στις παραγράφους που ακολουθούν εξετάζεται η αποτελεσματικότητα της προσθήκης θερμοδοχείου και η θέρμανση του νερού που περιέχει με χρήση της αντλίας θερμότητας ,τροφοδοτούμενη κατά το μέγιστο δυνατό από την διάταξη ΦΒ.

Επί της ουσίας επιδιώκεται η αξιοποίηση της αιχμής της καμπύλης ακτινοβολίας (θέρμανση νερού) και η απόδοση της ενέργειας της κατά τις ώρες μη ηλιοφάνειας.

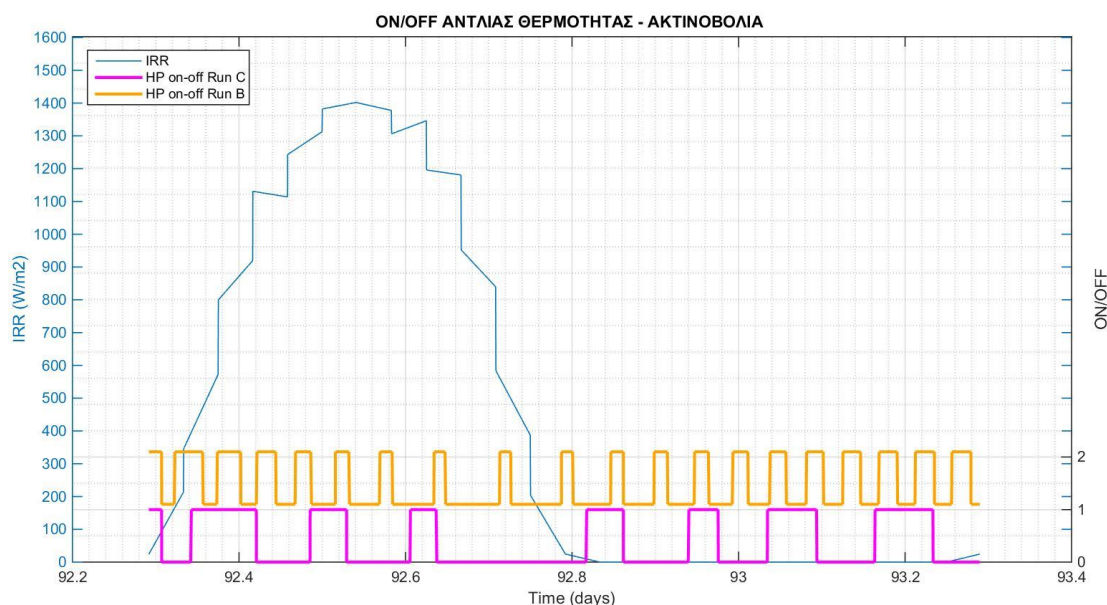
4.3.3.1 Ημέρα 93^η - Δοχείο 300 lt

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τρίτης συνδεσμολογίας, για την 93^η ημέρα του έτους, με προσθήκη θερμοδοχείου 300 lt. Σκοπός μας είναι η θέρμανση κτηρίου αξιοποιώντας, κατά το μέγιστο, την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από συστοιχίες ΦΒ. Πέραν της διατήρησης της θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου στα επιθυμητά επίπεδα (19-21 °C), επιδιώκεται ,(με χρήση της αντλίας θερμότητας) και η θέρμανση του νερού που περιέχεται στο θερμοδοχείο, προκειμένου να αποδοθεί αργότερα η ενέργεια του στον χώρο .Οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος κυμαίνονται σε μέτρια επίπεδα, οπότε η αντλία θερμότητας, όπως και η μονάδα τερματικού σώματος εξαναγκασμένης κυκλοφορίας δεν λειτουργούν συνεχόμενα καθ' όλο το διάστημα προσομοίωσης (εικόνα 4.37).



Εικόνα 4.37: Διάγραμμα ON/OFF HP &FCU-θερμοκρασίας χώρου-θερμοκρασίας περιβάλλοντος 93^{ης} ημέρας έτους για την 3^η συνδεσμολογία & δοχείο 300 lt

Στην νέα διάταξη η αντλία θερμότητας λειτουργεί για μεγαλύτερο διάστημα, κυρίως κατά την περίοδο υψηλής ηλιοφάνειας (εικόνα 4.38), καθώς πέραν της θέρμανσης εσωτερικού χώρου, αυξάνει και την θερμοκρασία νερού του δοχείου.

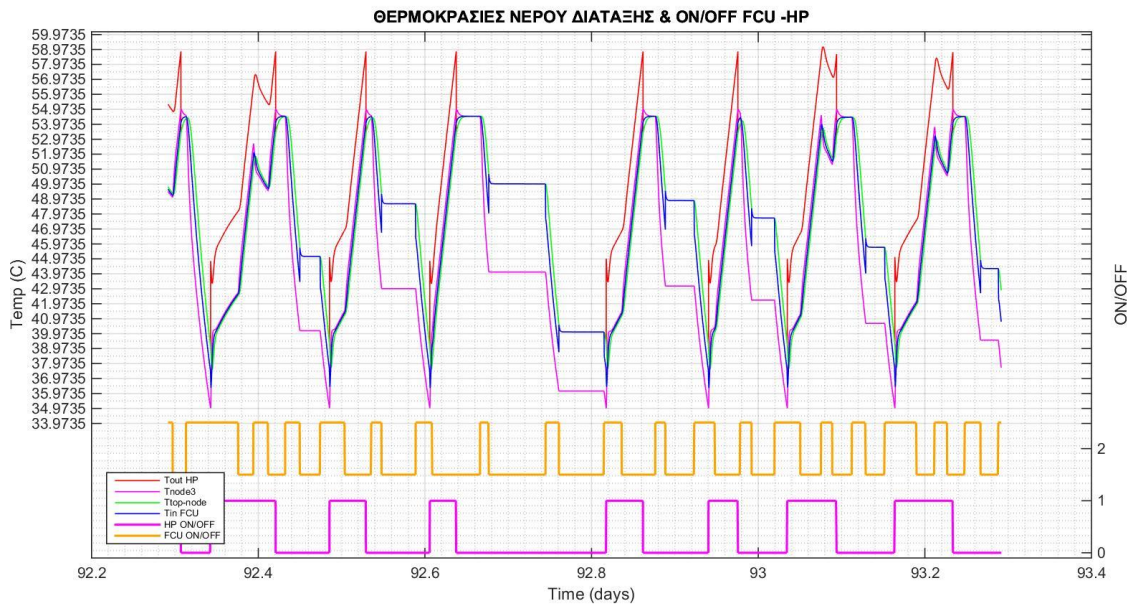


Εικόνα 4.38: Διάγραμμα ON/OFF HP & FCU-θερμοκρασίας χώρου-θερμοκρασίας περιβάλλοντος 93^{ης} ημέρας έτους για την 3^η συνδεσμολογία & δοχείο 300 lt

Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες νερού τριών κόμβων του θερμοδοχείου (οι οποίες παραμένουν εντός εύρους 35-55 °C), η θερμοκρασία εξόδου νερού από την αντλία θερμότητας και τα διαστήματα λειτουργίας της αντλίας θερμότητας και της μονάδας FCU. Τα ανοδικά τμήματα καμπυλών δείχνουν φόρτιση (θέρμανση) και τα καθοδικά αποφόρτιση (απόδοση στον χώρο).

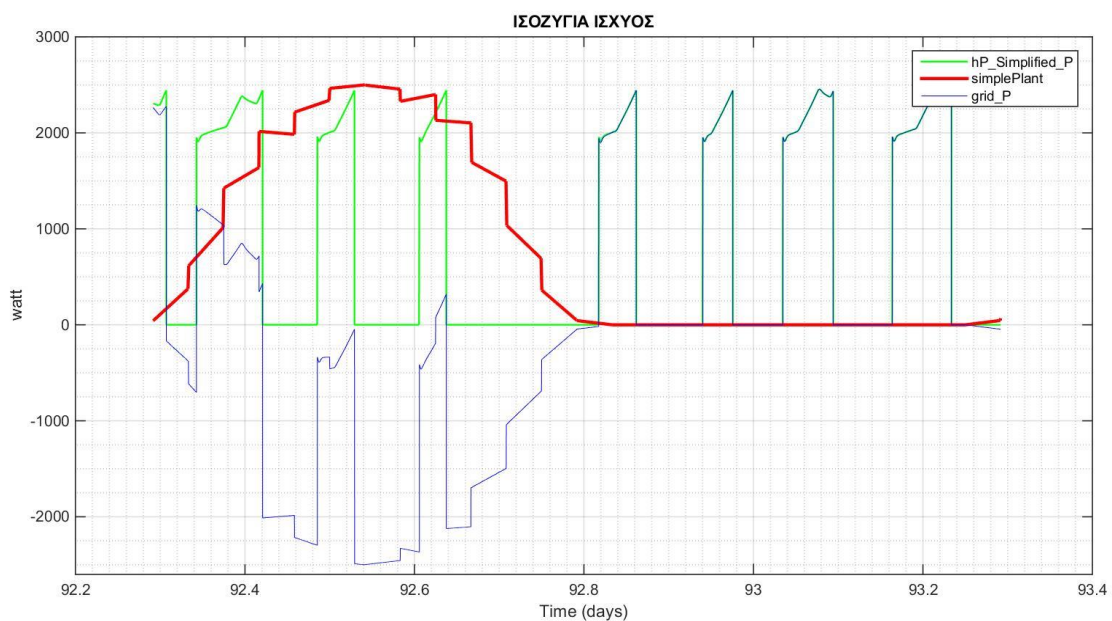
Κατά τις περιόδους λειτουργίας της αντλίας θερμότητας για αύξηση της θερμοκρασίας του περιεχομένου του δοχείου, (όταν ο θερμοστάτης ελέγχου της έχει τιμή ON), πραγματοποιείται συνεχής ροή νερού. Το δοχείο, τότε, συμπεριφέρεται σαν ένας κόμβος, δηλαδή η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου σε όλα τα κελία του είναι κοινή (δεν γίνεται διαστρωμάτωση - εικόνα 4.39)..Κατά τις αποφορτίσεις παρατηρείται διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στον 3^ο κόμβο του δοχείου (όπου είναι συνδεδεμένος ο αισθητήρας θερμοκρασίας δοχείου) και τους δύο άνωθεν του κόμβους (τον κόμβο κορυφής-6 και τον κόμβο εισόδου στην μονάδα fan coil-5). Αυτό συμβαίνει διότι, τραβώντας νερό από κόμβο ανώτερο του αισθητήρα αφαιρείται από το δοχείο εργαζόμενο μέσο υψηλής θερμοκρασίας. Τότε προκαλείται ροή από την έξοδο της μονάδας fan coil (η οποία έχει περίπου 5 βαθμούς χαμηλότερη θερμοκρασία από την είσοδο της) και αυτή η πληροφορία μεταφέρεται στον αισθητήρα. Η θερμοκρασιακή διαφορά διατηρείται όση ώρα διαρκεί η αποφόρτιση

Στα υπόλοιπα διαστήματα παρατηρείται μικρή διαστρωμάτωση .



Εικόνα 4.39: Διάγραμμα ON/OFF HP & FCU-θερμοκρασιών κόμβων δοχείου νερού 93^{ης} ημέρας έτους για την 3^η συνδεσμολογία & δοχείο 300 lt

Στο τελευταίο διάγραμμα της παραγράφου (εικόνα 4.40) παρουσιάζονται τα ισοζύγια ισχύος (ενέργειας) της διάταξης (ενέργεια συμπιεστή -πράσινη καμπύλη, παραγωγή ΦΒ διάταξης – κόκκινη καμπύλη, κατανάλωση από το δίκτυο - μπλε καμπύλη). Προφανώς οι αρνητικές τιμές της μπλε καμπύλης αντιπροσωπεύουν την επιστροφή ενέργειας από την διάταξη ΦΒ στο δίκτυο .



Εικόνα 4.40: Ισχύς ΦΒ, συμπιεστή και δικτύου (αρνητικά επιστροφή λόγω ΦΒ) 93^{ης} ημέρας έτους 60 % κάλυψης από ΦΒ για την 3^η συνδεσμολογία & δοχείο 300 lt

Οι τιμές των δεικτών σύγκρισης διαμορφώνονται ως εξής :

1. $E_{PVHP} = 6,248 \text{ Kwh}$
2. $E_{PV\DeltaΙΚΤΥΟ} = 12,745 \text{ Kwh}$
3. $n_{\alpha} = \frac{E_{PVTOT} - E_{PVPOS}}{E_{PVTOT}} = 32,90\%$
4. $n_{\eta\sigma} = \frac{E_{COMP} - E_{PVNEG}}{E_{COMP}} = 31,84 \%$
5. $\overline{COP} = 3,3546$

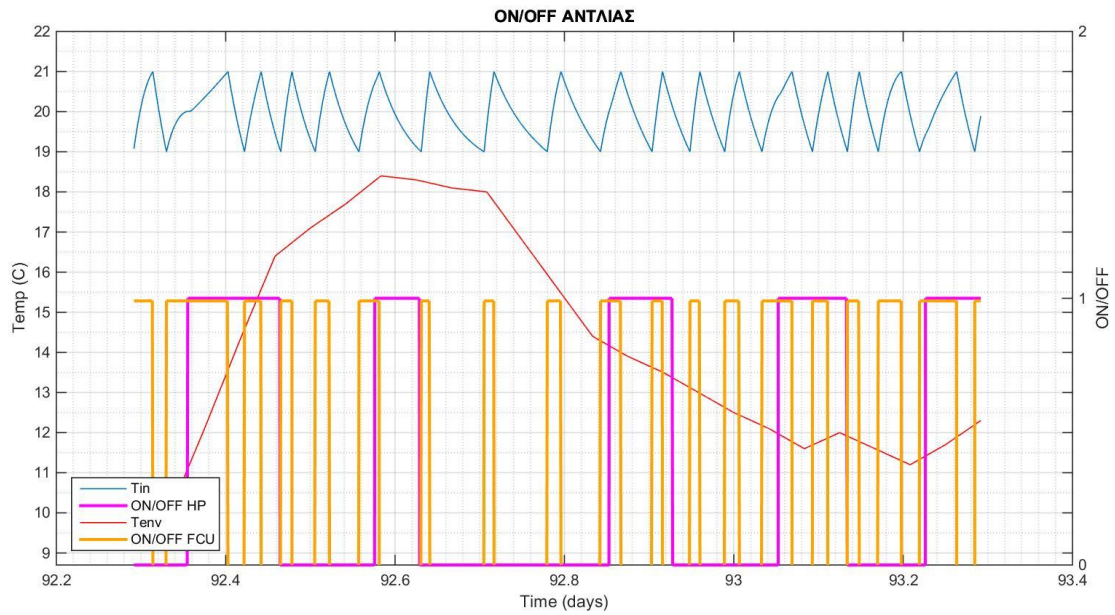
Παρεμβάλλοντας τις με τις τιμές που προέκυψαν από την προσομοίωση της τοπολογίας Β για τον ίδιο χρόνο, γίνεται εμφανές ότι:

- Ο συντελεστής απόδοσης της αντλίας θερμότητας μειώθηκε, καθώς η παραγόμενη θερμότητα της αντλίας αποδόθηκε στον χώρο και το θερμοδοχείο.
- Ο βαθμός αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας από την συστοιχία των ΦΒ αυξήθηκε, εφόσον χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερο ποσοστό ηλιακής ενέργειας και για την θέρμανση του νερού του δοχείου
- Ο βαθμός συνεισφοράς ηλιακής ενέργειας στην αντλία θερμότητας μειώθηκε, διότι αυξήθηκε γενικά η απαιτούμενη ενέργεια της αντλίας, προκειμένου να θερμανθεί και το νερό του δοχείου. Άρα η ηλιακή (που είναι δεδομένη) αποτελεί μικρότερο ποσοστό της συνολικής

4.3.3.2 Ημέρα 93^η - Δοχείο 500 It

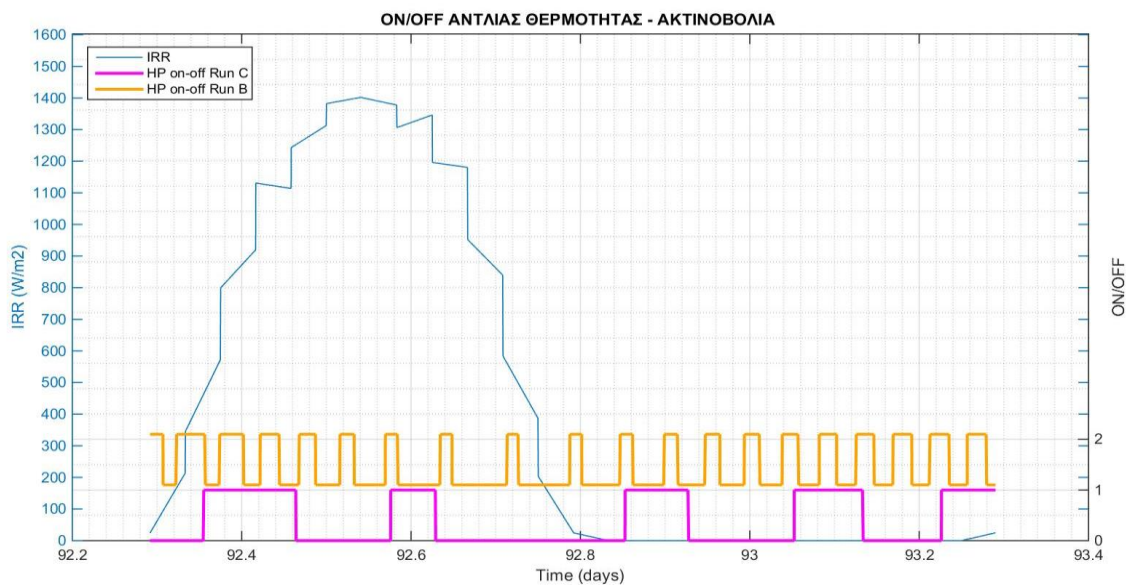
Στην τελευταία παράγραφο του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της τρίτης συνδεσμολογίας, για την 93^η μέρα του έτους, με προσθήκη θερμοδοχείου 500 It .Τα συμπεράσματα είναι ανάλογα με εκείνα που προέκυψαν χρησιμοποιώντας θερμοδοχείο 300 It .Προφανώς οι ενεργειακές ανάγκες για θέρμανση μεγαλύτερου όγκου νερού έχουν αυξηθεί, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.41, παρατηρώντας τα διαστήματα λειτουργίας της αντλίας θερμότητας .

Τα διαστήματα λειτουργίας του δοχείου (για απόδοση θερμότητας στο χώρο) παραμένουν σχεδόν αμετάβλητα .



Εικόνα 4.41: Διάγραμμα ON/OFF HP &FCU-θερμοκρασίας χώρου-θερμοκρασίας περιβάλλοντος 93^{ης} ημέρας έτους για την 3^η συνδεσμολογία & δοχείο 500 lt

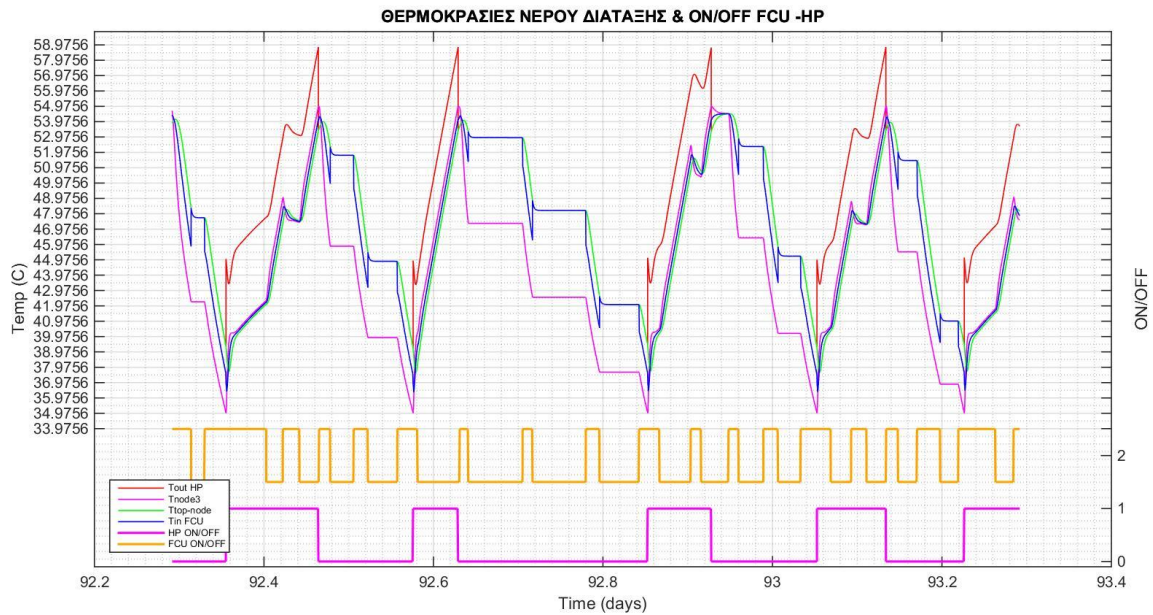
Όπως και στην διάταξη δοχείου μικρότερου όγκου, στην νέα διάταξη, η αντλία θερμότητας λειτουργεί για μεγαλύτερο διάστημα, κυρίως κατά την περίοδο υψηλής ηλιοφάνειας (εικόνα 4.42), καθώς πέραν της θέρμανσης εσωτερικού χώρου, αυξάνει και την θερμοκρασία νερού του δοχείου.



Εικόνα 4.42: Διάγραμμα ON/OFF HP &FCU-θερμοκρασίας χώρου-θερμοκρασίας περιβάλλοντος 93^{ης} ημέρας έτους για την 3^η συνδεσμολογία & δοχείο 500 lt

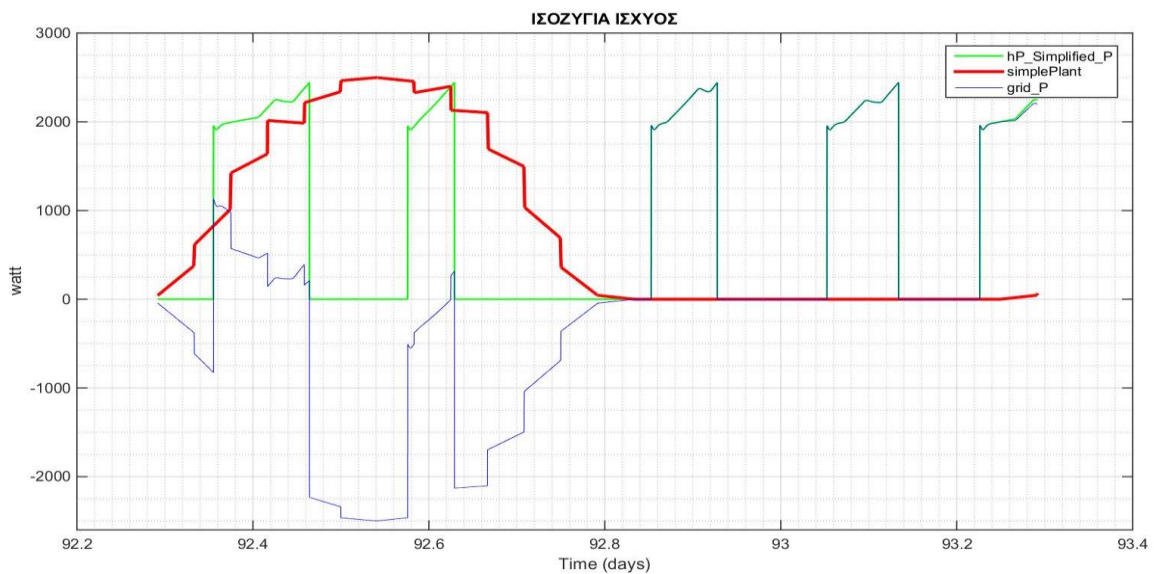
Οι θερμοκρασίες των κόμβων του δοχείου έχουν την ίδια ερμηνεία με την προσομοίωση της παραγράφου 4.3.3.1, δηλαδή μικρή διαστρωμάτωση κατά τις περιόδους ηρεμίας, συμπεριφορά κοινού κόμβου κατά την φόρτιση και

(θερμοκρασιακή) διαφορά κόμβου αισθητήρα με τους άνωθεν του κατά την αποφόρτιση. Η βασική διαφορά με πριν, έγκειται στις μεγαλύτερες περιόδους φόρτισης, λόγω μεγαλύτερου όγκου δοχείου.



Εικόνα 4.43: Διάγραμμα ON/OFF HP &FCU-θερμοκρασιών κόμβων δοχείου νερού 93^{ης} ημέρας έτους για την 3^η συνδεσμολογία & δοχείο 500 lt

Τέλος, στην εικόνα 4.44, παρουσιάζονται τα ισοζύγια ισχύος (ενέργειας) της διάταξης (ενέργεια συμπιεστή -πράσινη καμπύλη, παραγωγή ΦΒ διάταξης – κόκκινη καμπύλη, κατανάλωση από το δίκτυο - μπλε καμπύλη). Προφανώς οι αρνητικές τιμές της μπλε καμπύλης αντιπροσωπεύουν την επιστροφή ενέργειας από την διάταξη ΦΒ στο δίκτυο.



Εικόνα 4.44: Ισχύς ΦΒ, συμπιεστή και δικτύου (αρνητικά επιστροφή λόγω ΦΒ) 93^{ης} ημέρας έτους 60 % κάλυψης από ΦΒ για την 3^η συνδεσμολογία & δοχείο 500 lt

Οι τιμές των δεικτών σύγκρισης διαμορφώνονται ως εξής :

1. $E_{PVHP} = 7,03 \text{Kwh}$
2. $E_{PV\DeltaΙΚΤΥΟ} = 11,964 \text{ Kwh}$
3. $n_{\alpha} = \frac{E_{PVTOT} - E_{PVPOS}}{E_{PVTOT}} = 37,01 \%$
4. $n_{\eta\sigma} = \frac{E_{COMP} - E_{PVNEG}}{E_{COMP}} = 35,74 \%$
5. $\overline{COP} = 3,4118$

Συγκρίνοντας τους με τις τιμές που προέκυψαν από την προσομοίωση της τοπολογίας Β για τον ίδιο χρόνο, ισχύουν οι ίδιες παρατηρήσεις που διατυπώθηκαν στην παράγραφο 4.3.3.1.

Συγκρίνοντας τους όμως, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της διάταξης με δοχείο 300 lt, γίνεται εμφανές ότι συμβαίνει καλύτερη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας και παρατηρείται μεγαλύτερη συνεισφορά ηλιακής ενέργειας στην ζήτηση του συμπιεστή. Αυτό συμβαίνει διότι οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος δεν είναι πολύ χαμηλές, άρα η αντλία θερμότητας έχει σχετικά μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις, (μεγάλη περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒ). Όποτε υπάρχει η δυνατότητα αξιοποίησης μεγαλύτερου ποσοστού ηλιακής ενέργειας από τον συμπιεστή (κατά τις ώρες αιχμής της ακτινοβολίας) ,με σκοπό να θερμανθεί το περιεχόμενο του δοχείου και να αποδοθεί αργότερα στον χώρο .

Όσον αφορά συντελεστή τον απόδοσης της αντλίας, παρουσιάζεται πολύ μικρή αύξηση ,καθώς το μεγαλύτερο δοχείο αποδίδει περισσότερη θερμότητα στον χώρο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο – Συμπεράσματα και προτάσεις

Η ανάγκη καθιέρωσης των κτηρίων (σχεδόν) μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης είναι πλέον επιτακτική. Στην Ελλάδα, όλες οι νέες κατασκευές από τον Ιανουάριο του 2021 και μετά, θα πρέπει να πληρούν τα (ενεργειακά και δομικά) κριτήρια που έχουν θεσμοθετηθεί από διεθνείς και εγχώριους οργανισμούς, με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν συνολικά οι καταναλώσεις τους, άρα και το ενεργειακό τους αποτύπωμα .

Στην συγκεκριμένη εργασία, λοιπόν, εξετάστηκαν μέθοδοι εξοικονόμησης ενέργειας κατά την θέρμανση εσωτερικού χώρου χαρακτηριστικού οικήματος της γεωγραφικής ζώνης Β της Ελλάδας. Η βασική δομή των συνδεσμολογιών που προτάθηκαν είναι η αντλία θερμότητας. Αρχικά εξεταστήκαν τα αποτελέσματα εξοικονόμησης με χρήση αντλίας θερμότητας ρευματοδοτούμενης, μερικώς, από διάταξη φωτοβολταϊκών κατόπτρων (μελέτη κάλυψης του 60 % και 85 % του συμπιεστή της αντλίας) για δύο χαρακτηριστικές εβδομάδες της χειμερινής περιόδου και εν συνεχεία τα αποτελέσματα με προσθήκη, στην ήδη υπάρχουσα διάταξη, δοχείου αποθήκευσης θερμού νερού. Το εργαζόμενο μέσο του δοχείου, (νερό), θερμαίνεται («φορτίζει») από την αντλία θερμότητας (κυρίως κατά τις περιόδους αιχμής της ηλιακής ακτινοβολίας) και μπορεί να προσδώσει την ενέργεια του στο χώρο ,όταν χρειαστεί, ελαχιστοποιώντας την χρήση της (μειώνοντας τις καταναλώσεις της ενέργειας δικτύου) .Οι προσομοιώσεις της διάταξης του δοχείου πραγματοποιήθηκαν για 2 ημέρες της χειμερινής περιόδου (ήμερα 53 & 93) και για δύο μεγέθη δοχείων (300 lt & 500 lt).

Στους ακόλουθους πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία και αναλύονται συνοπτικά .

ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ Β

Δείκτης	W8 - 60 %	W8 - 85%	W14 - 60 %	W14 - 85%
$E_{PV_{HP}}$	40,22 KWh	48,59 KWh	27,55 KWh	31,35 KWh
$E_{PV_{ΔΙΚΤΥΟ}}$	11,77 KWh	25,68 KWh	66,19 KWh	102,57 KWh
n_{α}	77,36 %	65,42 %	29,39 %	23,41 %
$n_{\eta\sigma}$	20,59 %	24,88 %	28,37 %	32,29 %
\overline{CoP}	3,734	3,734	3,739	3,739

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα τοπολογίας Β.

Παρατηρείται ότι :

- Ο συντελεστής απόδοσης της αντλίας είναι σχεδόν αμετάβλητος και στις τέσσερις εκδοχές της διάταξης, καθώς δεν επηρεάζονται η ενέργεια συμπιεστή και συμπυκνωτή (αποτελούν χαρακτηριστικά της αντλίας)

- Τόσο και κατά την 8^η εβδομάδα του έτους (χαμηλότερες θερμοκρασίες), όσο και κατά την 14^η (μέτριες θερμοκρασίες) αυξάνονται οι συντελεστές αξιοποίησης ενέργειας ΦΒ διάταξης (n_{α}) και συνεισφοράς ηλιακής ενέργειας στο σύνολο της καταναλισκόμενης του συμπιεστή ($n_{\eta\sigma}$) με την αύξηση της κάλυψης ενέργειας από ΦΒ.
- Ωστόσο αυξάνεται και η επιστροφή μη χρησιμοποιούμενης (ωφέλιμης) ενέργειας στο δίκτυο, καθώς η αιχμή ζήτησης θερμότητας δεν ταυτίζεται με την αιχμή της καμπύλης ακτινοβολίας (παρατηρείται μεγάλη παραγωγή σε περιόδους μειωμένης ζήτησης) .Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας η περίσσεια ηλιακής ενέργειας μένει αναξιοποίητη .
- Γενικά και στις τέσσερις προσομοιώσεις της δεύτερης συνδεσμολογίας, η επιστροφή ηλιακής ενέργειας στο δίκτυο, είναι μεγάλη (αναξιοποίητη). Προφανώς και θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί εγκατάσταση ΦΒ μικρότερης κάλυψης της ενέργειας του συμπιεστή της αντλίας θερμότητας, καθώς η πολύ μικρή αύξηση των βαθμών ηλιακής συνεισφοράς δεν αιτιολογεί το κόστος της μεγαλύτερης εγκατάστασης πάνελ .

ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ Γ

	ΗΜΕΡΑ 53			ΗΜΕΡΑ 93		
Δείκτης	B-D53	Γ-D53-300lt	Γ-D53-500lt	B-D93	Γ-D93-300lt	Γ-D93-500lt
$E_{PV_{HP}}$	10,332 KWh	10,835 KWh	10,825KWh	6,056 KWh	6,248 KWh	7,03 KWh
$E_{PV_{ΔΙΚΤΥΟ}}$	0,5875 KWh	0,084 KWh	0,094 KWh	12,94 KWh	12,745 KWh	11,964 KWh
n_{α}	94,62 %	99,23 %	99,14 %	31,88 %	32,90 %	37,01 %
$n_{\eta\sigma}$	22,31 %	21,03 %	21,09 %	32,70 %	31,84 %	35,74 %
\overline{COP}	3,734	3,388	3,403	3,734	3,355	3,412

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα τοπολογίας Γ

Παρατηρείται ότι :

- Εν γένει αυξάνεται η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας από τον συμπιεστή της αντλίας θερμότητας με την προσθήκη θερμοδοχείου (οποιοδήποτε μεγέθους),καθώς απαιτείται περισσότερη ενέργεια (τόσο ηλεκτρική, όσο και δικτύου) για να θερμανθεί το περιεχόμενο του. Η θέρμανση επιτυγχάνεται και κατά τις περιόδους ηλιοφάνειας. Αυτό φαίνεται στην ποσότητα επιστροφής της ηλιακής ισχύος στο δίκτυο (που έχει

μειωθεί), αλλά και στο βαθμό αξιοποίησης (ο οποίος για την 53η μέρα πλησιάζει το 100 %)

- Ο συντελεστής αξιοποίησης μειώνεται με την προσθήκη οποιουδήποτε θερμοδοχείου. Αυτό συμβαίνει διότι ο αισθητήρας που μεταφέρει την πληροφορία της θερμοκρασίας του περιεχομένου του δοχείου στον θερμοστάτη, για τον έλεγχο της αντλίας που θερμαίνει το νερό του δοχείου, βρίσκεται σε χαμηλότερο κελί από εκείνο που τροφοδοτεί την μονάδα Fan coil. Συνεπώς η αντλία θερμότητας ζεσταίνει το νερό περισσότερο του ενδεδειγμένου, άρα λόγω αύξησης θερμοκρασίας του παρατηρείται και αύξηση πίεσης συμπίεστη. Η πίεση στον ατμοποιητή δεν επηρεάζεται και έτσι αυξάνεται η διαφορά πίεσης συμπίεστη-ατμοποιητή. Ο ισεντροπικός βαθμός λειτουργίας της αντλίας θερμότητας επιδεινώνεται, απαιτείται μεγαλύτερη κατανάλωση ρεύματος για την επίτευξη των ίδιων αποτελεσμάτων («κουράζω» την αντλία), γεγονός που οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή αξιοποίησης.
- Για την 53η μέρα του έτους, το δοχείο όγκου 300 lt αξιοποιεί λίγο καλύτερα την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από συστοιχία ΦΒ .Αυτό συμβαίνει διότι οι περίοδοι φόρτισης του συμπίπτουν με την αιχμή της καμπύλης ακτινοβολίας .Ωστόσο δεν παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά και στο δοχείο 500 lt (έχει μεγαλύτερες περιόδους φόρτισης - αποφόρτισης ,μεταφορά ζήτησης του δεξιότερα της μέγιστης ακτινοβολίας) . Αυτό το μεγαλύτερο εύρος φόρτισης, όμως επιτρέπει την διείσδυση ελάχιστα περισσότερης ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακή στο μεγαλύτερο δοχείο (εκμετάλλευση και περιόδων μη αιχμής) .
- Για την 93η μέρα του έτους, το δοχείο όγκου 500 lt παρουσιάζει καλύτερη δείκτες από το μικρότερο (παρατηρείται μεγαλύτερος συντελεστής αξιοποίησης και διείσδυσης ηλιακής ενέργειας). Η συμπεριφορά εξηγείται λαμβάνοντας υπόψη ότι την συγκεκριμένη χρονική περίοδο επικρατούν θερμοκρασίες μεσαίου εύρους .Οπότε η αντλία θερμότητας καλείται να καλύψει μικρότερες θερμικές ανάγκες χώρου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση θερμοκρασίας νερού μεγαλύτερου όγκου δοχείο, χωρίς να επηρεαστούν οι συνθήκες κτιρίου. Συνεπώς ενδείκνυται η παρατεταμένη φόρτιση κατά την διάρκεια της ημέρας (μειωμένης απαιτήσεως) και η εκφόρτιση μπορεί να τροφοδοτήσει τον εσωτερικό χώρο για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (συγκριτικά με το μικρότερο δοχείο).

Η συγκεκριμένη εργασία εκπονήθηκε με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Modelica (περιβάλλον που δεν προορίζεται για οικιακή χρήση) και αναπτύχθηκαν κάποια πολύ αναλυτικά (κυρίως για το θερμοδοχείο), αλλά αργά μοντέλα. Πραγματοποιήθηκαν δυναμικές προσομοιώσεις και τα αποτελέσματα τους αξιολογήθηκαν με γνώμονα την εξοικονόμηση ενέργειας. Για τον λόγο αυτό, τα μοντέλα που δεν σχετίζονται άμεσα με την βελτιστοποίηση της εγκατάστασης δεν αναπτύχθηκαν εξ αρχής αλλά χρησιμοποιήθηκαν έτοιμες εκδόσεις από άλλους χρήστες (πχ μοντέλο διάταξης ΦΒ) .

Με το πέρας της ανοίγεται ένα ευρύ πεδίο για την περαιτέρω μελέτη αυτών των εγκαταστάσεων. Ενδεικτικά αναφέρονται κάποιες μελλοντικές εργασίες/τροποποιήσεις επί του θέματος που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον:

- Εκπόνηση προσομοιώσεων σε πιο γρήγορο/εύχρηστο λογισμικό
- Εκπόνηση προσομοιώσεων για κτήριο άλλων διαστάσεων ή γεωγραφικής ζώνης
- Εκπόνηση προσομοιώσεων και για άλλα μεγέθη υπομοντέλων (πχ διαφορετική διαστασιολόγηση αντλίας θερμότητας ,ΦΒ διάταξης κ.ά)
- Διαφορετική τεχνική ελέγχου της λειτουργίας της αντλίας θερμότητας και του δοχείου (σε όσες διατάξεις το περιείχαν).

Στην συγκεκριμένη εργασία εφαρμόστηκε τεχνική έλεγχου με γνώμονα μόνο την θερμοκρασία εσωτερικού χώρου ή/και του εργαζόμενου μέσου (νερό δοχείου) .Προτείνεται «έξυπνη» τεχνική ώστε να μην φορτίζει το δοχείο σε περιόδους χαμηλής ακτινοβολίας, (παρά την θερμοκρασία του) άλλα όλη η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια να χρησιμοποιείται για θέρμανση χώρου.

- Αναλυτικότερο μοντέλο μετασχηματισμού συνεχούς ρεύματος συστοιχίας ΦΒ σε εναλλασσόμενο
- Μελέτη αξιοποίησης περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒ
- Αξιοποίηση του περιεχομένου του θερμοδοχείου και για κατανάλωση Ζεστών Νερών Χρήσης
- Οικονομική μελέτη των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων .

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) – Study of the European Commission
- [2] Οδηγία 2010/31/ΕΕ
- [3] Ecofys
- [4] Towards NZEB in Greece: A comparative study between cost optimality and energy efficiency for newly constructed residential buildings
(Platon Pallis , Nikolaos Gkonis , Efstratios Varvagiannis , Konstantinos Braimakis , Sotirios Karellas , Miltiadis Katsaros , Panagiotis Vourliotis, Dimitrios Sarafianos)
- [5] Tabula –Episcopo
- [6] Κανονισμός Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2017
- [7] http://dspace.lib.ntua.gr/dspace2/bitstream/handle/123456789/8214/pelekid_organic.pdf?sequence=1
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_pump_and_refrigeration_cycle
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_pump
- [10] <http://weaverheating.com/cooling/heat-pump/>
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Fan_coil_unit
- [12] <https://www.pellergy.com/why-is-thermal-storage-essential-for-pellet-boilers/>
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_effect
- [14] <https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics>
- [15] Σύγκριση Αλγορίθμων ΜΡΡΤ για ΦΒ Συστήματα σε Συνθήκες Μερικής Σκίασης (Καλομοίρης Κωνσταντίνος)
- [16] https://en.wikipedia.org/wiki/Buck%E2%80%93boost_converter
- [17] https://en.wikipedia.org/wiki/Maximum_power_point_tracking
- [18] An open toolchain for generating Modelica code from Building Information Models
- [19] <http://www.thermocycle.net>
- [20] ThermoCycle: A Modelica library for the simulation of thermodynamic systems
- [21] (Sylvain Quoilin, Adriano Desideri, Jorrit Wronski, Ian Bell and Vincent Lemort
- [22] Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review
(Vun Jack Chin, Zainal Salam, Kashif Ishaque)
- [23] A validated model for mixing and buoyancy in stratified hot water storage tanks for use in building energy simulations
(Brecht Baeten, Thomas Confrey, Sébastien Pecceu, Frederik Rogiers, Lieve Helsen)
- [24] Performance modeling and parametric study of a stratified water thermal storage tank
(Aowabin Rahmana, Amanda D. Smitha, Nelson Fumo)

(Matthis Thorade Jörg Rädler Peter Remmen Tobias Maile Reinhard Wimmer Jun Cao Moritz Lauster Christoph Nytsch-Geusen Dirk Müller Christoph van Treeck)

- [25] Photovoltaics Modelica Library
- [26] Improved Model of Photovoltaic Systems
(Dmitry Altshuller Peter Hüsson Christopher Alain Jones Leonard Janczyk)
- [27] Modelling and simulation of a grid connected photovoltaic heat pump system with thermal energy storage using Modelica
(R. De Coninck, R. Baetens, B. Verbruggen, J. Driesen, D. Saelens, L. Helsen)
- [28] Photovoltaic Power Converter Modeling in Modelica
Modelling and simulation of a grid connected photovoltaic heat pump system with thermal energy storage using Modelica
(R. De Coninck, R. Baetens, B. Verbruggen, J. Driesen, D. Saelens, L. Helsen)
- [29] Photovoltaic Power Converter Modeling in Modelica
(Raúl Rodríguez Pearson)
- [30] https://energyplus.net/weather-region/europe_wmo_region_6/GRC%20%20