



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Θερμότητας

Διπλωματική Εργασία

**«Μελέτη αναβάθμισης κτιρίου γραφείων σε κτίριο θετικού
ενεργειακού ισοζυγίου με χρήση του λογισμικού
DesignBuilder»**

Χαρίκλεια Παντίσκα

Επιβλέπων:

Τζιβανίδης Χρήστος

Καθηγητής Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2022

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Χαρίκλεια Παντίσκα

Ευχαριστίες

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Χρήστο Τζιβανίδη για την καθοδήγησή του κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη στήριξη και συμπαράσταση καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου, και ιδίως τους γονείς μου στους οποίους αφιερώνω την παρούσα διπλωματική εργασία.

Περιεχόμενα

Περίληψη	8
Abstract	9
1 Εισαγωγικά στοιχεία για την μελέτη και περιγραφή λογισμικού DesignBuilder	10
1.1 Γενικά εισαγωγικά στοιχεία	10
1.2 Γενικά χαρακτηριστικά του λογισμικού DesignBuilder	12
2 Γενικά χαρακτηριστικά και μοντελοποίηση επιλεγμένου κτιρίου	23
2.1 Γενικά χαρακτηριστικά - Εσωτερική διάρθρωση κτιρίου	23
2.1.1 Κατόψεις – Όψεις Κτιρίου	24
2.1.2 Θερμικές Ζώνες	27
2.2 Δομικά Υλικά (Construction tab DesignBuilder)	28
2.2.1 Εξωτερικοί τοίχοι	29
2.2.2 Εσωτερικοί τοίχοι	30
2.2.3 Δάπεδα	31
2.2.4 Οροφή – Στέγη	33
2.2.5 Πόρτες	34
2.2.6 Υαλοπίνακες	36
2.3 Χαρακτηριστικά δεδομένα λειτουργίας του κτιρίου (Activity tab DesignBuilder)	41
2.4 Σύστημα Θέρμανσης και Ψύξης (HVAC tab DesignBuilder)	43
2.4.1 Σύστημα Detailed HVAC για την υφιστάμενη κατάσταση του υπό μελέτη κτιρίου	43
2.4.2 Πρόγραμμα λειτουργίας συστημάτων	46
2.4.3 Λέβητας	47
2.4.4 Δίκτυο διανομής και τερματικά	50
2.4.5 Αερόψυκτος ψύκτης (chiller)	53
2.5 Φωτισμός (Lighting tab DesignBuilder)	56
2.6 Αεροστεγανότητα (Airtightness)	57
2.7 Μηχανικός Αερισμός (Mechanical Ventilation)	57
2.8 Θερμογέφυρες	59
3 Προσομοίωση υφιστάμενης κατάστασης κτιρίου και αποτελέσματα στο DesignBuilder	63

3.1 Αποτελέσματα και διαγράμματα προσομοίωσης της υφιστάμενης κατάστασης	63
3.2 Χαρακτηριστικοί πίνακες τιμών για την προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης	70
4 Βελτιωτικές παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας για το κτίριο	74
4.1 Υαλοπίνακες και κουφώματα: Τοποθέτηση κουφωμάτων με θερμοδιακοπή	74
4.1.1 Μοντελοποίηση στο DesignBuilder και αποτελέσματα προσομοίωσης για την 1η παρέμβαση εξοικονόμησης ενέργειας	74
4.2 Φωτισμός κτιρίου: Αλλαγή λαμπτήρων σε LED	77
4.2.1 Βασικά πλεονεκτήματα λαμπτήρων LED	77
4.2.2 Μοντελοποίηση στο DesignBuilder και αποτελέσματα προσομοίωσης για την 2η παρέμβαση εξοικονόμησης ενέργειας	79
4.3 Κτιριακό κέλυφος: Τοποθέτηση θερμομόνωσης	81
4.3.1 Βασικά στοιχεία για την θερμομόνωση	81
4.3.2 Θερμομόνωση εξωτερικής τοιχοποιίας	83
4.3.3 Θερμομόνωση στέγης	86
4.3.4 Θερμομονωτικά Υλικά	86
4.3.5 Μοντελοποίηση θερμομόνωσης στο DesignBuilder για την 3η παρέμβαση εξοικονόμησης ενέργειας	87
4.3.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης για την 3η παρέμβαση εξοικονόμησης ενέργειας	92
4.4 Σύστημα HVAC: Επιλογή γεωθερμικής αντλίας θερμότητας	94
4.4.1 Βασικά στοιχεία για τις αντλίες θερμότητας	95
4.4.2 Κύκλος ψύξης και κύκλος θέρμανσης στις αντλίες θερμότητας	98
4.4.3 Βασικές κατηγορίες αντλιών θερμότητας	100
4.4.4 Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας	102
4.4.5 Πλεονεκτήματα και απόδοση αντλιών θερμότητας	107
4.4.6 Μοντελοποίηση στο DesignBuilder για την 4η παρέμβαση εξοικονόμησης ενέργειας	109
4.4.7 Αποτελέσματα προσομοίωσης για την 4η παρέμβαση εξοικονόμησης ενέργειας	112
5 Βέλτιστη ενεργειακά επιλογή για το κτίριο και τοποθέτηση φωτοβολταϊκού συστήματος στην στέγη	115
5.1 Βέλτιστη ενεργειακά επιλογή για το κτίριο γραφείων	115
5.2 Φωτοβολταϊκό σύστημα στην στέγη του κτιρίου	120

5.2.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο και κατηγορίες φωτοβολταϊκών στοιχείων	120
5.2.2 Σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων και Αντιστροφείς τάσης (inverters)	123
5.2.3 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων	126
5.2.3.1 Διασυνδεδεμένα συστήματα (net-metering)	126
5.2.3.2 Αυτόνομα και υβριδικά συστήματα	129
5.2.4 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος στο υπό μελέτη κτίριο και αποτελέσματα	132
5.2.5 Θετικό ενεργειακό ισοζύγιο βελτιωμένου ενεργειακά κτιρίου	142
6 Οικονομική αξιολόγηση προτεινόμενων αλλαγών	143
6.1 Βασικοί οικονομικοί δείκτες και κριτήρια αξιολόγησης επενδύσεων	143
6.1.1 Κριτήριο Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV - Net Present Value)	144
6.1.2 Κριτήριο Εσωτερικού Συντελεστή Απόδοσης (IRR- Internal Rate of Return)	146
6.2 Ανάλυση αρχικού κόστους επένδυσης για τις προτεινόμενες αλλαγές	147
6.2.1 Αρχικό κόστος επένδυσης για τις παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας	147
6.2.2 Αρχικό κόστος επένδυσης για το διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα στέγης	149
6.3 Ετήσιο λειτουργικό κόστος κτιρίου γραφείων για κάθε ενεργειακή κατάσταση	151
6.4 Τελική οικονομική αξιολόγηση (NVP, IRR, χρόνος απόσβεσης)	156
6.4.1 Τελική οικονομική αξιολόγηση για την επένδυση στις προτεινόμενες παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας	156
6.4.2 Τελική οικονομική αξιολόγηση για την συνολική επένδυση στις προτεινόμενες παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας και την εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος στέγης	158
6.4.3 Τελική οικονομική αξιολόγηση μεμονωμένα για την επένδυση στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος στέγης	160
Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	163
Αναφορές	167

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αναβάθμιση ενός επιλεγμένου κτιρίου γραφείων σε κτίριο θετικού ενεργειακού ισοζυγίου (Positive Energy Building – PEB). Ως υπολογιστικό εργαλείο για την μελέτη χρησιμοποιείται το λογισμικό προσομοίωσης DesignBuilder. Αρχικά σχεδιάζεται το μοντέλο του κτιρίου γραφείων μέσα στο λογισμικό με όλες τις απαραίτητες λεπτομέρειες και παραμετροποιείται η ενεργειακή συμπεριφορά και όλα τα συστήματά του. Εν συνεχεία, αξιολογείται η υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου με εκτέλεση σχετικών προσομοιώσεων και εντοπίζονται τα σημεία τα οποία επιδέχονται ενεργειακή βελτίωση με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας. Μοντελοποιούνται ορισμένες παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας σε διάφορους τομείς του κτιρίου και, με την βοήθεια του λογισμικού, βάσει προσομοιώσεων και υπολογισμών, μελετάται η επίδραση κάθε αλλαγής στην ενεργειακή κατάσταση του κτιρίου και στην καταναλισκόμενη ενέργεια σε ετήσια βάση. Κατ’ αυτόν τον τρόπο, συγκροτείται και προτείνεται ένας συνδυασμός βέλτιστων αλλαγών βάσει των οποίων η ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου μειώνεται κατά το δυνατόν περισσότερο. Έπειτα, επέρχεται η μετατροπή του κτιρίου σε κτίριο θετικού ισοζυγίου, καθώς γίνεται μελέτη και ολοκληρωμένη πρόταση για εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος στην στέγη του, ούτως ώστε, συνδυαστικά με τις προτεινόμενες αλλαγές εξοικονόμησης ενέργειας, το κτίριο να είναι σε θέση να παράγει σε ετήσια βάση, στα πλαίσια του net-metering, ποσό ηλεκτρικής ενέργειας τέτοιο που να υπερκαλύπτει τις ανάγκες του. Τέλος, γίνεται κατάλληλη οικονομική αξιολόγηση για να διαπιστωθεί η βιωσιμότητα των προτεινόμενων αλλαγών.

Abstract

The main objective of this thesis is the upgrade of a selected office building to a Positive Energy Building (PEB). The computational tool used for the study is the DesignBuilder simulation software. Initially, the model of the office building is designed with all the necessary details and its energy behaviour and all its systems are configured within the software. Subsequently, the existing energy condition of the building is evaluated by performing relevant simulations and identifying the points that require improvement aiming at energy saving. A number of energy saving interventions are modelled in various sectors of the building and the impact of each change on the energy status of the building and on the annual energy consumed, is studied, using the software's simulations and calculations. Therefore, a combination of optimal changes is established and proposed, based on which, the energy consumption of the building is reduced as much as possible. Then, the building is converted into a positive energy building by the study and comprehensive proposal for the installation of a photovoltaic system on its roof, so that, combined with the implementation of the proposed energy saving changes, the building is able to produce, within the framework of net-metering, an amount of electricity that exceeds its needs on an annual basis. Finally, an appropriate economic evaluation is carried out to establish the viability of the proposed changes and modifications.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγικά στοιχεία για την μελέτη και περιγραφή λογισμικού DesignBuilder

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποια γενικά εισαγωγικά στοιχεία για την μελέτη που αφορούν την υφιστάμενη κατάσταση σε σχέση με την ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίων και στην συνέχεια αναλύονται οι βασικές ρυθμίσεις και δυνατότητες που παρέχει το επιλεχθέν λογισμικό DesignBuilder.

1.1 Γενικά εισαγωγικά στοιχεία

Στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχει υπάρξει δέσμευση για εξοικονόμηση του 20% της προβλεπόμενης κατανάλωσης ενέργειας των κρατών μελών έως το 2020 και του 32,5% έως το 2030 [1]. Κάθε κράτος μέλος αναλαμβάνει ποικίλες πρωτοβουλίες προς αυτή την κατεύθυνση, μία εκ των οποίων είναι η ανάληψη μέτρων με στόχο την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Η εστίαση στον κτιριακό τομέα προκύπτει διότι στην Ευρωπαϊκή Ένωση τα κτίρια ευθύνονται για το 40% περίπου της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας [1]. Για αυτό και σήμερα τόσο τα νέα κτίρια όσο και τα υφιστάμενα που ανακαινίζονται σε μεγάλη κλίμακα, πρέπει να ικανοποιούν ορισμένες ελάχιστες απαιτήσεις προσαρμοσμένες στο τοπικό κλίμα όσον αφορά στην ενεργειακή απόδοση.

Στην Ελλάδα, το 43% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης προκύπτει από τον κτιριακό τομέα, επομένως στον τομέα αυτόν υπάρχει παράλληλα ένα μεγάλο αναξιοποίητο δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας. Το ελληνικό κτιριακό απόθεμα συντίθεται κυρίως από κτίρια κατοικιών και ένα αριθμό κτιρίων άλλων χρήσεων του τριτογενούς τομέα, τα οποία απογράφονται κάθε δέκα χρόνια στο σύνολο της επικράτειας. Σύμφωνα με την τελευταία απογραφή κτιρίων της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής, ο αριθμός των κτιρίων της χώρας είναι 4.105.637 [2]. Από το σύνολο των κτιρίων, ποσοστό περίπου 80% είναι κτίρια κατοικιών, ενώ τα κτίρια άλλων χρήσεων αντιστοιχούν περίπου στο 20%. Ως προς την χρονική περίοδο κατασκευής των κτιρίων, προκύπτει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των κτιρίων (704.340 κτίρια) κατασκευάστηκε την περίοδο 1971-1980 (ποσοστό 17,2%). Τα αμέσως επόμενα ποσοστά είναι 15,6% (639.475 κτίρια) που κατασκευάστηκαν την χρονική περίοδο 1961-1970 και 14% (573.250 κτίρια) που κατασκευάστηκαν την περίοδο 1946-1960 [2]. Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι κατά την περίοδο 2008 ως 2012, λόγω της οικονομικής κρίσης, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση του αριθμού των οικοδομικών αδειών και για διαδοχικά έτη η οικοδομική δραστηριότητα έφθινε με μέση ετήσια μείωση της τάξης του 20%.

Προφανώς, το έτος κατασκευής ενός κτιρίου επιδρά άμεσα στην ενεργειακή του απόδοση καθώς με την πάροδο των χρόνων το τεχνολογικό αλλά και νομοθετικό πλαίσιο αλλάζει και το επίπεδο ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων ολοένα και βελτιώνεται. Στην Ελλάδα η ύπαρξη υψηλού ποσοστού παλιών κτιρίων σε συνδυασμό με την περιορισμένη ανέγερση νέων, ενεργειακά αποδοτικότερων,

επιδρά σημαντικά στο ύψος της ενέργειας που καταναλώνεται εν γένει στον κτιριακό τομέα. Συνολικά, λοιπόν, ιδίως στην Ελλάδα, ο κτιριακός τομέας αποτελεί έναν βασικό πυλώνα που πρέπει να ληφθεί υπόψη για την επίτευξη εξοικονόμησης ενέργειας και την πορεία προς την βιώσιμη ανάπτυξη και την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) στο πλαίσιο της εθνικής και ευρωπαϊκής στρατηγικής.

Το νομικό πλαίσιο για την θερμική συμπεριφορά των κτιρίων αρχικά υιοθετήθηκε το 1980 με τον Κανονισμό Θερμομόνωσης Κτιρίων (ΚΘΚ) ο οποίος συγκέντρωνε τις απαιτήσεις ώστε να εξασφαλίζεται ικανοποιητική θερμομόνωση στις κτιριακές κατασκευές. Στην συνέχεια, το 2010, εγκρίθηκε ο Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (ΚΕΝΑΚ), σύμφωνα με τον οποίο προβλέπεται η ενσωμάτωση ενός ολοκληρωμένου ενεργειακού σχεδιασμού των κτιρίων με σκοπό την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσής τους, την εξοικονόμηση ενέργειας και την προστασία του περιβάλλοντος, με συγκεκριμένες δράσεις που αφορούν στην εκπόνηση μελέτης ενεργειακής απόδοσης κτιρίων, στην ενεργειακή κατάταξη κτιρίων (Πιστοποιητικό Ενεργειακής Απόδοσης) και στις ενεργειακές επιθεωρήσεις κτιρίων, λεβήτων & εγκαταστάσεων θέρμανσης και εγκαταστάσεων κλιματισμού [2]. Οι στόχοι εξοικονόμησης που θέτει ο ΚΕΝΑΚ επιτυγχάνονται μέσω της χρήσης ενεργειακά αποδοτικών δομικών υλικών και ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων καθώς και της ενσωμάτωσης ΑΠΕ για ηλεκτροπαραγωγή. Ο ΚΕΝΑΚ εφαρμόζεται από το 2010 και έπειτα και εξελίσσεται ανάλογα με την ποιοτική κατάσταση και τις ενεργειακές τεχνολογίες. Σύμφωνα με την τελευταία απογραφή κτιρίων, ο αριθμός των κτιρίων που έχει κατασκευαστεί μετά το 2010, με τις ελάχιστες απαιτήσεις του ΚΕΝΑΚ είναι μόλις το 1,5% του συνολικού κτιριακού αποθέματος της ελληνικής επικράτειας [2].

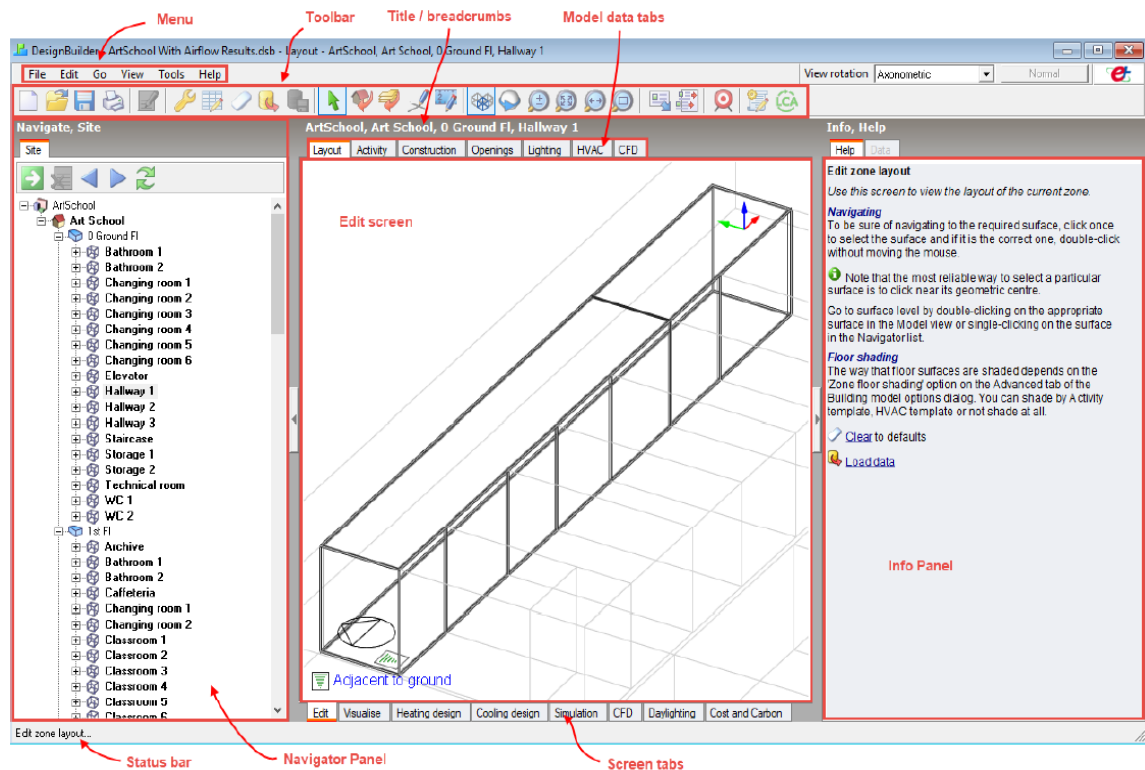
Για την βελτίωση της παραπάνω εικόνας, λοιπόν, τα τελευταία χρόνια προωθούνται συστηματικά δράσεις με στόχο τις ριζικές ανακαινίσεις υφιστάμενων κτιρίων, ανεξαρτήτως του μεγέθους τους και δίνονται κίνητρα για λήψη σχετικών μέτρων, καθώς με την χρήση κατάλληλων τεχνικών και οικονομικά αποτελεσματικών τεχνολογιών είναι δυνατή η επίτευξη σημαντικής βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας των ήδη υφιστάμενων κτιρίων. Η ευρύτερη εφαρμογή αυτών των μέτρων αποδίδει σημαντικά κοινωνικά οφέλη, μιας και η μειωμένη κατανάλωση ενέργειας σε συνδυασμό με την αυξημένη χρήση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές προωθούν τόσο την προστασία του περιβάλλοντος όσο και την ανεξαρτησία και ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού. Με στόχο, μάλιστα, την αύξηση του αριθμού των κτιρίων που, όχι μόνον ικανοποιούν τις υφιστάμενες ελάχιστες απαιτήσεις, αλλά χαρακτηρίζονται από ακόμα υψηλότερη ενεργειακή απόδοση, καταρτίζονται εθνικά σχέδια αύξησης του αριθμού των Κτιρίων Μηδενικού Ενεργειακού Ισοζυγίου (Zero Energy Buildings – ZEB) τα οποία ως κτίρια επί της ουσίας έχουν την δυνατότητα αυτοπαραγωγής όσης ενέργειας απαιτείται για την κατά το δυνατόν πληρέστερη κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών κατά την διάρκεια του έτους μέσα από ανανεώσιμες πηγές [3].

Στο αυτό το πλαίσιο, λοιπόν, επιλέχθηκε και το αντικείμενο της παρούσας μελέτης, η οποία στοχεύει στην ενεργειακή αναβάθμιση ενός επιλεγμένου κτιρίου γραφείων και στην μετατροπή του σε κτίριο Θετικού Ενεργειακού Ισοζυγίου (Positive Energy Building – PEB) μέσα από μια σειρά στοχευμένων παρεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας και τελικώς με την εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος για την αυτοπαραγωγή ενέργειας. Για την υπολογιστική μελέτη επιλέχθηκε η χρήση του ενεργειακού λογισμικού προσομοίωσης DesignBuilder, το οποίο ως πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα πλήρους ενεργειακής ανάλυσης για τα κτίρια.

1.2 Γενικά χαρακτηριστικά του λογισμικού DesignBuilder

Το DesignBuilder αποτελεί ένα λογισμικό προσομοίωσης για κτίρια και διαθέτει περιβάλλον εργασίας ιδιαίτερα εύχρηστο και φιλικό προς τον χρήστη, στο οποίο μπορούν να εισαχθούν όλες οι πληροφορίες και οι λεπτομέρειες που αφορούν ένα κτίριο. Στα πλαίσια του DesignBuilder οι υπολογισμοί εκτελούνται από το υπολογιστικό εργαλείο EnergyPlus, βασικό θετικό στοιχείο του οποίου αποτελεί η δυνατότητα χρήσης πολύ μικρού χρονικού βήματος για τους υπολογισμούς (έως και μισή ώρα). Βασικό χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί το DesignBuilder από άλλα αντίστοιχα ενεργειακά προγράμματα είναι ότι το εκάστοτε κτίριο σχεδιάζεται μέσα στο πρόγραμμα από το μηδέν και μέσα στις επιμέρους καρτέλες ορίζονται όλες οι απαιτούμενες παράμετροι για την επίτευξη αξιόπιστης ενεργειακής προσομοίωσης.

Με στόχο την ολοκληρωμένη ενεργειακή μελέτη ενός κτιρίου, αρχικά ορίζεται από τον χρήστη η τοποθεσία του κτιρίου και έτσι αντιστοιχίζεται στο κτίριο το κατάλληλο αρχείο καιρού της περιοχής από το οποίο θα αντληθούν τα απαραίτητα μετεωρολογικά δεδομένα για τις προσομοιώσεις. Εν συνεχεία, ο χρήστης καλείται να σχεδιάσει το κτίριο εισάγοντας όλα τα χαρακτηριστικά που αφορούν τα επιμέρους δομικά του στοιχεία (τοίχους, δάπεδα κ.λπ.) και προχωρώντας εισάγονται όλες οι απαραίτητες λεπτομέρειες για κάθε χαρακτηριστικό του κτιρίου στις επιμέρους καρτέλες και οθόνες του προγράμματος. Ειδικότερα, στο πρόγραμμα υπάρχουν δύο οριζόντιες γραμμές εντολών εκατέρωθεν της οθόνης σχεδίασης, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 1.1**, η οποία ελήφθη από το επίσημο εγχειρίδιο του προγράμματος. Η πάνω γραμμή (model data tabs) σχετίζεται με την εισαγωγή δεδομένων και η κάτω γραμμή (screen tabs) σχετίζεται με την εξαγωγή των αποτελεσμάτων βάσει των δεδομένων αυτών. Η γραμμή εργαλείων εισαγωγής είναι ο βασικός τρόπος εισαγωγής δεδομένων στο πρόγραμμα, όμως υπάρχει και δεύτερος τρόπος εισαγωγής μέσω του γραφικού περιβάλλοντος, επιλέγοντας στην εικόνα το σημείο που χρειάζεται αλλαγή και εκτελώντας την αναλόγως.



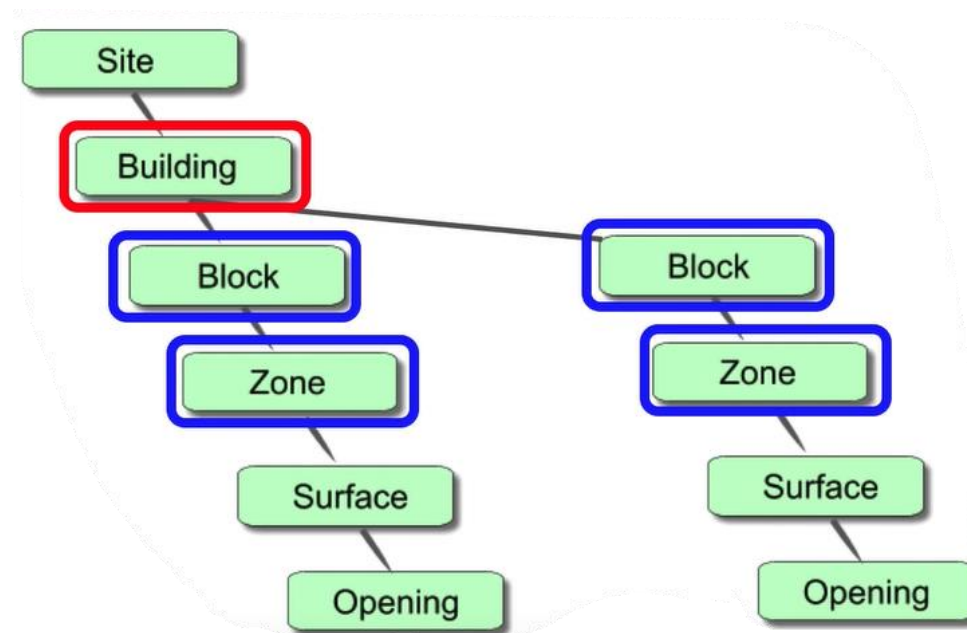
Εικόνα 1.1: Βασικό περιβάλλον εργασίας του DesignBuilder [4]

Η γραμμή των εργαλείων εισαγωγής διαθέτει τις εξής καρτέλες:

- **Activity tab:** σε αυτήν εισάγονται δεδομένα που σχετίζονται με το προφίλ δραστηριότητας και τα εσωτερικά θερμικά κέρδη του κτιρίου. Ειδικότερα, ορίζεται η χρήση και το είδος της δραστηριότητας για κάθε θερμική ζώνη του κτιρίου με την εισαγωγή βασικών πληροφοριών που αφορούν την πληρότητα των χώρων σε ανθρώπινο δυναμικό, τον εξαιρισμό, την ένταση φωτισμού καθώς και τον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό του κτιρίου. Το βασικότερο τμήμα της καρτέλας Activity σχετίζεται με την ρύθμιση των θερμοστατών θέρμανσης και ψύξης του χώρου, δηλαδή με την εισαγωγή των επιθυμητών θερμοκρασιών στις οποίες απαιτείται να βρίσκονται οι θερμικές ζώνες.
- **Construction tab:** σε αυτήν εισάγονται δεδομένα που αφορούν το κτιριακό κέλυφος και τα στοιχεία που το απαρτίζουν, όπως οι εξωτερικοί και εσωτερικοί τοίχοι, τα δάπεδα, η στέγη και οι πόρτες. Για κάθε δομικό στοιχείο καθορίζονται επί της ουσίας οι θερμικές ιδιότητες, αφού εισάγεται ο αριθμός των στρωμάτων του και τα υλικά κατασκευής και τα πάχη όλων των επιμέρους στρωμάτων ένα προς ένα.
- **Openings tab:** σε αυτήν εισάγονται τα δεδομένα των «ανοιγμάτων» του κτιρίου, δηλαδή τα υλικά και επιμέρους στρώματα των υαλοπινάκων, των κουφωμάτων, των πορτών και των αεραγωγών, εάν υπάρχουν.

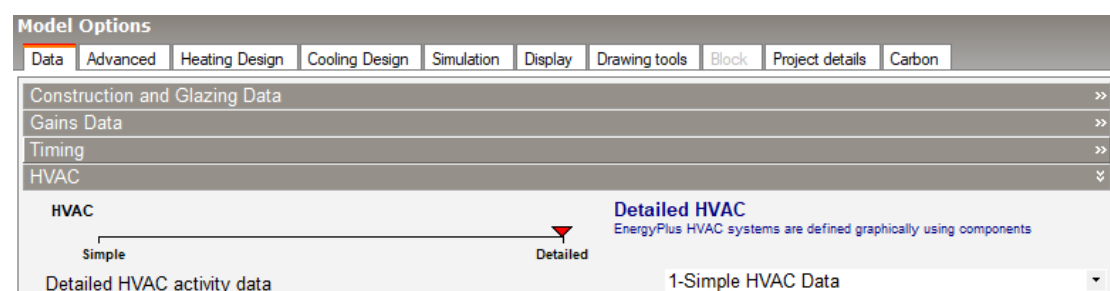
- **Lighting tab:** σε αυτήν εισάγονται τα δεδομένα που σχετίζονται με την ισχύ του φωτισμού του κτιρίου καθώς και το πρόγραμμα λειτουργίας για τα φώτα. Σε κάθε περίπτωση οι είσοδοι αυτές έχουν σημαντική επίδραση στα εσωτερικά θερμικά φορτία του χώρου και κατ' επέκταση στην ενεργειακή κατανάλωση.
- **HVAC tab:** στην καρτέλα HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) εισάγονται δεδομένα σχετικά με το σύστημα θέρμανσης και ψύξης, το σύστημα παραγωγής ζεστού νερού χρήσης και την ύπαρξη φυσικού ή μηχανικού αερισμού για το κτίριο.
- **CFD tab:** στην καρτέλα CFD (Computational Fluid Dynamics) προσδιορίζονται οι οριακές συνθήκες και οι επιμέρους απαιτούμενες λεπτομέρειες στην περίπτωση που χρειάζεται να γίνει ανάλυση υπολογιστικής ρευστομηχανικής για την ροή του αέρα στο εσωτερικό του κτιρίου.

Για όλες τις παραπάνω καρτέλες, δίνεται η δυνατότητα οι ρυθμίσεις να οριστούν τόσο σε επίπεδο κτιρίου οπότε ιεραρχικά μεταφέρονται σε όλους τους επιμέρους χώρους, όσο και σε χαμηλότερο επίπεδο, δηλαδή σε επιμέρους δωμάτια, θερμικές ζώνες, επιφάνειες και ανοίγματα, με στόχο να υπάρξει εξειδικευμένη ρύθμιση κάθε λεπτομέρειας και ιδιαιτερότητας του κτιρίου και έτσι να επιτευχθεί κατά το δυνατόν η μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Πιο αναλυτικά, η ιεραρχία είναι σημαντικό στοιχείο του προγράμματος DesignBuilder, καθώς, με στόχο την πιο ευέλικτη και γρήγορη ρύθμιση του κτιρίου, όσα δεδομένα ορίζονται σε υψηλότερο ιεραρχικά επίπεδο οργάνωσης του κτιρίου, περνούν αυτόματα και στα χαμηλότερα επίπεδα. Όπως φαίνεται και στο αριστερό τμήμα της επιφάνειας εργασίας του DesignBuilder, ο χρήστης δύναται να πλοηγείται στα επιμέρους επίπεδα του μοντέλου τα οποία παρατίθενται σε λίστα στο Navigation Panel. Στο κομμάτι του σχεδιασμού του κτιρίου, στην υψηλότερη θέση είναι η τοποθεσία του κτιρίου (site) από την οποία όλα τα κλιματικά δεδομένα περνούν στο κτίριο. Και στην συνέχεια, οι βασικές δομικές μονάδες που απαρτίζουν το ίδιο το κτίριο είναι τα blocks, τα οποία αφού σχεδιαστούν καταλλήλως γεωμετρικά ως «κουτιά» στην καρτέλα Layout, διαμορφώνονται περαιτέρω και χωρίζονται ανάλογα με την διαμόρφωση του κτιρίου σε επιμέρους θερμικές ζώνες, δωμάτια, επιφάνειες και ανοίγματα. Τα δεδομένα τα οποία ορίζονται χειροκίνητα σε επίπεδο κτιρίου (ή και σε οποιοδήποτε άλλο επίπεδο) φαίνονται στις επιμέρους καρτέλες με κόκκινο χρώμα, ενώ τα δεδομένα που στο τρέχον επίπεδο απλώς «κληρονομούνται» από κάποιο άλλο υψηλότερο επίπεδο στο οποίο έχουν πρωταρχικώς τεθεί, φαίνονται με μπλε χρώμα. Η λογική της ιεραρχίας μεταξύ των επιμέρους επιπέδων στο μοντέλο ενός κτιρίου στο DesignBuilder φαίνεται σχηματικά στην **Εικόνα 1.2:**



Εικόνα 1.2: Ιεραρχικό σύστημα για το μοντέλο ενός κτιρίου στο DesignBuilder [4]

Στο σημείο αυτό γίνεται ειδική αναφορά στις δυνατότητες ρυθμίσεων για το HVAC σύστημα. Στα πλαίσια του λογισμικού DesignBuilder δίνονται δύο διαφορετικές επιλογές για τον τρόπο ρύθμισης του συστήματος HVAC ενός κτιρίου: το Simple HVAC και το Detailed HVAC. Υπάρχει η επιλογή Model Options στο άνω toolbar της επιφάνειας εργασίας του λογισμικού από την οποία επιλέγονται βασικές διαμορφώσεις (configurations) για το μοντέλο σε διάφορους τομείς, για παράδειγμα σε σχέση με τις ισχύουσες γεωμετρικές συμβάσεις κατά την σχεδίαση κτιρίου ή με τις μονάδες στις οποίες εισάγονται τα δεδομένα για τον μηχανικό αερισμό, κ.ά. Έτσι δίνεται η δυνατότητα για εξατομίκευση των ρυθμίσεων με τρόπο που να διευκολύνει την εξειδικευμένη μελέτη βάσει των εκάστοτε αναγκών και στόχων. Από εκεί, λοιπόν, επιλέγεται και ο τρόπος ρύθμισης του συστήματος HVAC για το κτίριο, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.3** ακολούθως.



Εικόνα 1.3: Ορισμός τρόπου ρύθμισης συστήματος HVAC στο DesignBuilder

Η επιλογή του Simple HVAC είναι η απλούστερη εκ των δύο και αποτελεί έναν ρεαλιστικό, ωστόσο όχι ιδιαίτερα λεπτομερή, τρόπο προσέγγισης, αφού για τα

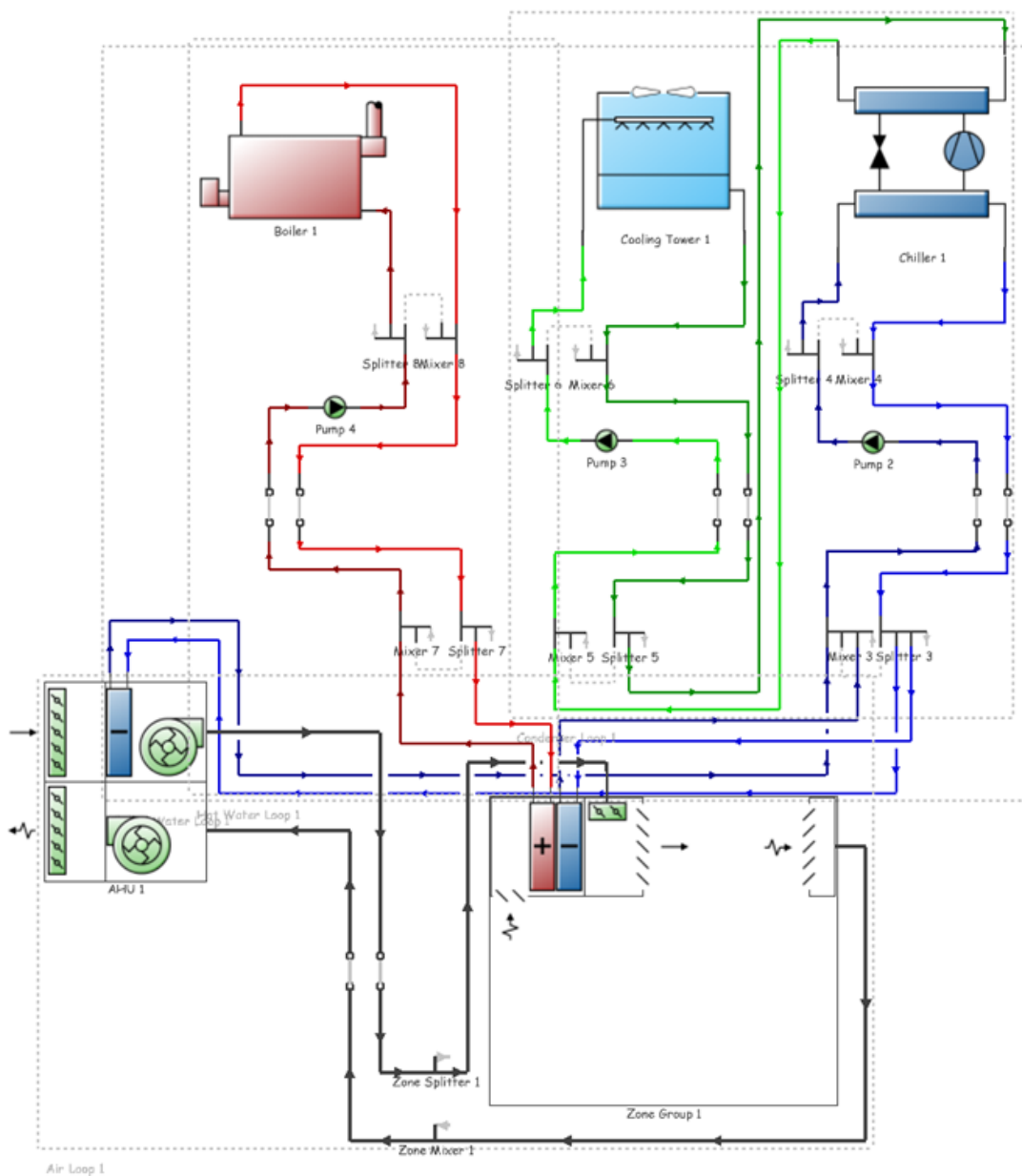
συστήματα θέρμανσης, ψύξης και εξαερισμού γίνεται μόνο συμπλήρωση των βασικότερων χαρακτηριστικών τους. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο από αρχιτέκτονες όταν δεν απαιτείται ιδιαίτερη έμφαση στα συστήματα θέρμανσης και ψύξης αλλά κύριο στόχο μελέτης αποτελεί η σωστή επιλογή δομικών υλικών και ανοιγμάτων στο κτίριο. Δηλαδή επιλέγεται κατά τις περιπτώσεις όπου η μελέτη επικεντρώνεται στις απώλειες του κτιριακού κελύφους και όχι τόσο στις καταναλώσεις για θέρμανση και ψύξη. Στην παρακάτω **Εικόνα 1.4** παρατίθεται το τυπικό περιβάλλον του Simple HVAC, στο οποίο έχουν οριστεί κάποιες βασικές παράμετροι.



Εικόνα 1.4: Περιβάλλον Simple HVAC στο DesignBuilder

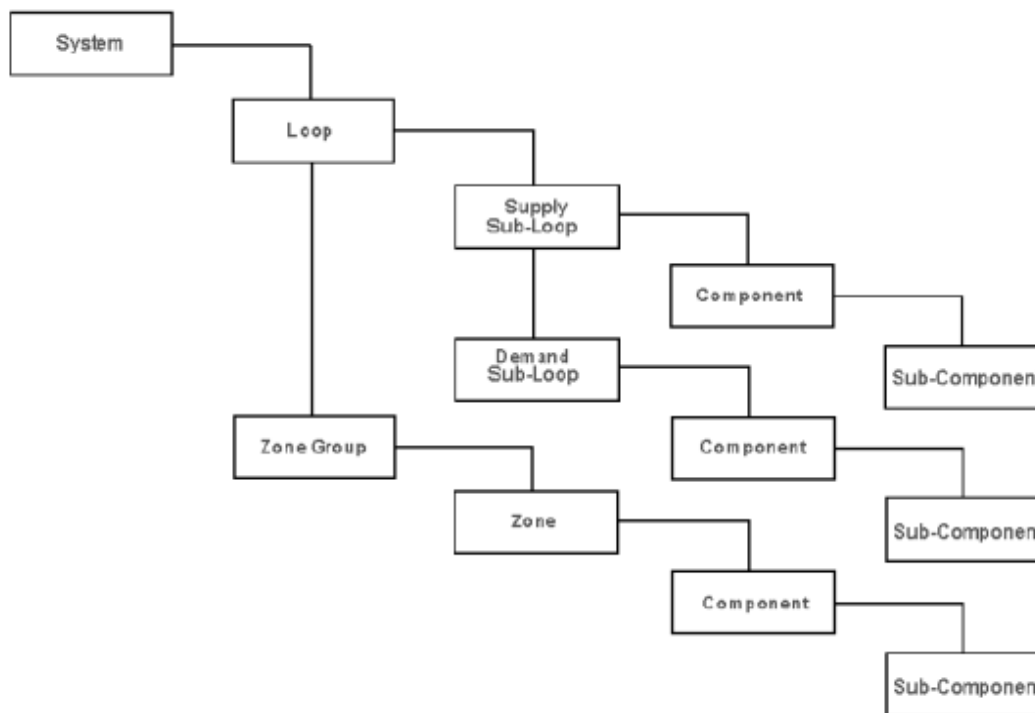
Από την άλλη, όταν ορίζεται ως μέθοδος το Detailed HVAC, τότε η μελέτη είναι λεπτομερέστατη και ο ορισμός των συστημάτων εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, αφού το κάθε σύστημα ουσιαστικά «συναρμολογείται» κατάλληλα μέσα στο γραφικό περιβάλλον του προγράμματος από τον χρήστη, ο οποίος συνδυάζει κύκλους νερού και αέρα μαζί με κατάλληλο εξοπλισμό για να διαμορφώσει πλήρη συστήματα. Έτσι διαμορφώνονται σχηματικά διαγράμματα των συστημάτων, των επιμέρους

συστατικών και του τρόπου με τον οποίον αυτά συνδέονται μεταξύ τους και οι ρυθμίσεις μπορεί να είναι εντελώς εξατομικευμένες. Στις μελέτες που αφορούν την ενεργειακή απόδοση κτιρίου και την επιλογή του βέλτιστου συστήματος για την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών αναγκών, συνιστάται να γίνεται χρήση του Detailed HVAC, το οποίο, όπως είναι πρόδηλο, παρέχει μεγάλη ευελιξία για επεξεργασία συστημάτων θέρμανσης, ψύξης, παραγωγής ζεστού νερού χρήσης και μηχανικού αερισμού. Για αυτό και στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, επιλέχθηκε η μέθοδος του Detailed HVAC για την μοντελοποίηση των υφιστάμενων αλλά και των προτεινόμενων συστημάτων για το κτίριο. Ακολούθως στην **Εικόνα 1.5** απεικονίζεται το περιβάλλον του Detailed HVAC.



Εικόνα 1.5: Περιβάλλον Detailed HVAC στο DesignBuilder [4]

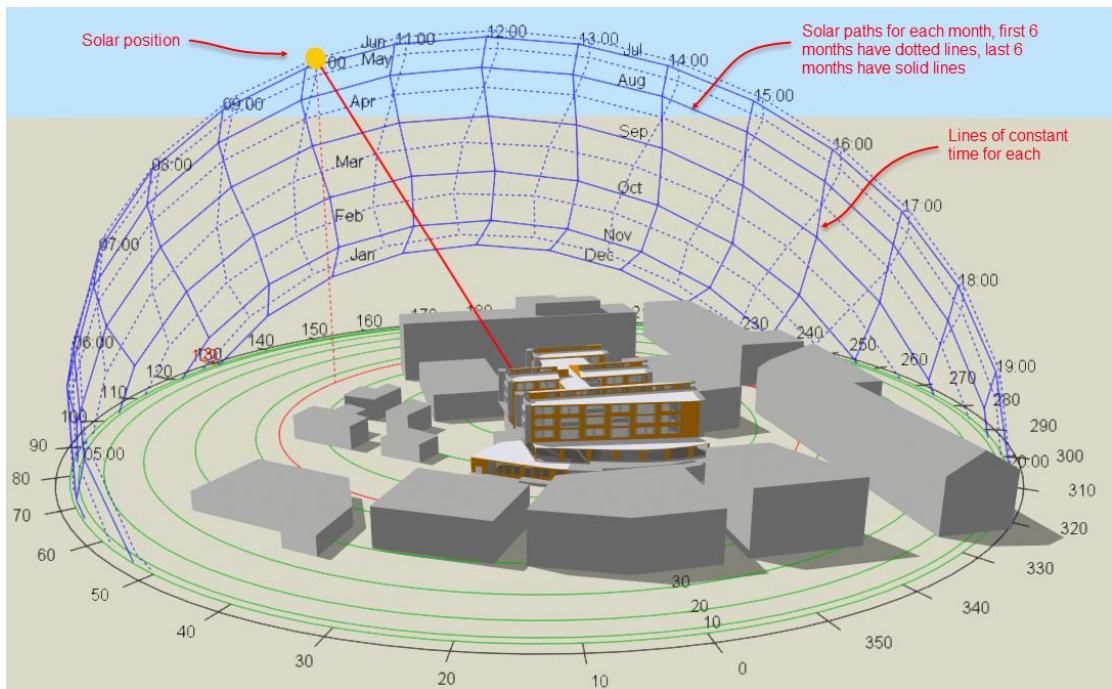
Στο Detailed HVAC υπάρχει ιεραρχία μεταξύ των επιπέδων ανάλογη με εκείνη που ισχύει στο κτιριακό μοντέλο και μπορεί ο χρήστης από το Navigation Panel να πλοηγηθεί στα επιμέρους τμήματα του εκάστοτε συστήματος. Απλά στην προκειμένη περίπτωση, τα επιμέρους επίπεδα κάτω από το όλο σύστημα είναι οι κύκλοι αέρα, οι κύκλοι νερού και τα τμήματα των μηχανικών συστημάτων (components), όπως φαίνεται στην ακόλουθη **Εικόνα 1.6**.



Εικόνα 1.6: Ιεραρχικό σύστημα για το μοντέλο ενός συστήματος Detailed HVAC στο DesignBuilder [4]

Η γραμμή των εργαλείων εξαγωγής των αποτελεσμάτων που βρίσκεται στο κάτω μέρος της οθόνης, όπως απεικονίζεται και στην **Εικόνα 1.1**, διαθέτει τις εξής καρτέλες:

- **Visualise screen tab:** σε αυτήν δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να δει γραφικά το κτιριακό μοντέλο που σχεδίασε σε ρεαλιστική αποτύπωση με χρώματα και υφές των επιμέρους στοιχείων. Επίσης εκεί απεικονίζεται και η σκίαση του κτιρίου, προερχόμενη είτε από το ίδιο το κτίριο είτε από γειτνιαζοντα οικοδομήματα, καθόλη την διάρκεια της ημέρας. Επιπροσθέτως, μαζί με την απεικόνιση του μοντέλου, εφόσον επιλεγεί, είναι εφικτό να αποτυπωθεί διαγραμματικά το μονοπάτι του ήλιου γύρω από το κτίριο (sunpath diagram), δηλαδή η καθημερινή και εποχιακή διαδρομή που ακολουθεί ο ήλιος καθώς η γη περιστρέφεται, αναλόγως φυσικά με την γεωγραφική τοποθεσία που έχει επιλεγεί για το κτίριο. Οπτικά η αποτύπωση για το sunpath diagram παρατίθεται ακολούθως στην **Εικόνα 1.7**.



Εικόνα 1.7: Αποτύπωση κτιριακού μοντέλου με sunpath diagram στην Visualise οθόνη του DesignBuilder [4]

- Heating design screen tab:** σε αυτήν το πρόγραμμα εκτελεί έναν steady-state υπολογισμό μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος του κτιρίου. Για την δεδομένη επιθυμητή θερμοκρασία που τέθηκε στους θερμοστάτες του κτιρίου, στα αποτελέσματα των υπολογισμών εμφανίζεται το απαιτούμενο θερμικό φορτίο που καλείται να καλύψει το σύστημα θέρμανσης για την διατήρηση αυτής της θερμοκρασίας. Έτσι, επί της ουσίας καθορίζεται η απαιτούμενη ονομαστική ισχύς και τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε επιλεγμένου εξοπλισμού θέρμανσης. Με στόχο την τελική διαστασιολόγηση αξιόπιστων συστημάτων θέρμανσης που ανταποκρίνονται επαρκώς στις ανάγκες κάθε χρονική στιγμή, για τους θερμικούς υπολογισμούς επιλέγονται ως πλαίσιο οι χειρότερες δυνατές συνθήκες σχεδιασμού (worst case winter design conditions), δηλαδή δεν λαμβάνονται υπόψη τα εσωτερικά θερμικά κέρδη από φωτισμό, ηλεκτρονικό εξοπλισμό και πληρότητα, ενώ παράλληλα οι υπολογισμοί εκτελούνται για τις πιο ακραίες δυνατές χειμερινές καιρικές συνθήκες που μπορεί να προκύψουν βάσει της γεωγραφικής τοποθεσίας του κτιρίου. Τα θερμικά φορτία που υπολογίζονται αναγράφονται τόσο για το κτίριο εν συνόλω, όσο και για κάθε χώρο ξεχωριστά, επιτρέποντας εξειδικευμένη μελέτη.
- Cooling design screen tab:** σε αυτήν εκτελείται περιοδικός steady-state υπολογισμός μεταφοράς θερμότητας για το κτίριο και στα αποτελέσματα των υπολογισμών εμφανίζονται τα ψυκτικά φορτία των χώρων του κτιρίου με βήμα μισής ώρας και οι προκύπτουσες λόγω αυτών θερμοκρασίες σε κάθε θερμική ζώνη. Έτσι, εμφανίζεται το μέγιστο ψυκτικό φορτίο που καλείται να

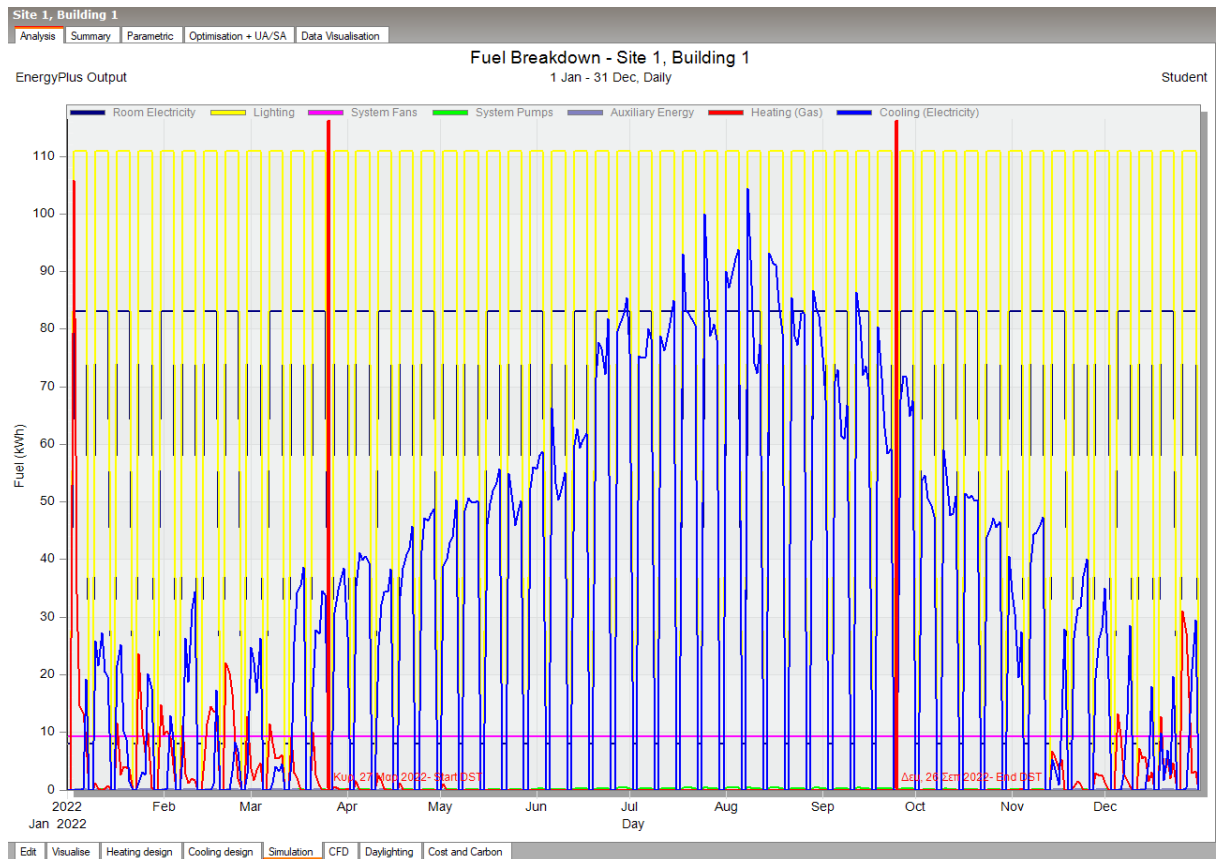
καλυφθεί και βάσει της επιθυμητής θερμοκρασίας που έχει τεθεί στους θερμοστάτες, καθορίζονται τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε επιλεγμένου εξοπλισμού ψύξης. Αντιστοίχως με τους θερμικούς υπολογισμούς, στους ψυκτικούς υπολογισμούς επίσης επιλέγονται ως πλαίσιο οι χειρότερες δυνατές συνθήκες σχεδιασμού (worst case summer design conditions), δηλαδή λαμβάνονται υπόψη όλα τα εσωτερικά θερμικά κέρδη του κτιρίου, ενώ οι υπολογισμοί εκτελούνται για τις πιο ακραίες δυνατές καλοκαιρινές καιρικές συνθήκες που μπορεί να προκύψουν βάσει της γεωγραφικής τοποθεσίας του κτιρίου. Ομοίως, τα ψυκτικά φορτία που υπολογίζονται αναγράφονται τόσο για το κτίριο εν συνόλω, όσο και για κάθε χώρο ξεχωριστά, επιτρέποντας εξειδικευμένη μελέτη.

- Simulation screen tab: σε αυτήν εκτελείται η προσομοίωση που είναι το πιο ουσιαστικό κομμάτι της όλης μελέτης μιας και εξάγονται σημαντικά αποτελέσματα, τόσο σε μορφή διαγραμμάτων όσο και σε μορφή πινάκων τιμών, τα οποία ποσοτικοποιούν την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Ο χρήστης επιλέγει τα χρονικά όρια εκτέλεσης της προσομοίωσης καθώς και το είδος των αποτελεσμάτων που θέλει εξάγει. Επιπλέον, το χρονικό βήμα της προσομοίωσης ορίζεται από τον χρήστη ανάλογα με τους στόχους του. Ειδικότερα, μικρότερα χρονικά βήματα επιλέγονται όταν δίδεται μεγαλύτερη σημασία στην υψηλή ακρίβεια των αποτελεσμάτων και όχι στην επακόλουθη αύξηση του χρόνου αναμονής. Αξίζει να αναφερθεί ότι στα πλαίσια του DesignBuilder, μέσω του εργαλείου Simulation Manager, δίνεται η δυνατότητα τρεξίματος προσομοίωσης ενόσω ο χρήστης δουλεύει και επεξεργάζεται το κτιριακό μοντέλο του και επίσης παρέχεται η δυνατότητα πρόσβασης στα αποτελέσματα προηγούμενων ήδη εκτελεσμένων προσομοιώσεων. Τέλος, μέσω του ίδιου εργαλείου, καθίσταται εφικτή η εκτέλεση πολλαπλών προσομοιώσεων ταυτόχρονα, για εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου. Το περιβάλλον του Simulation Manager είναι ιδιαίτερα εύχρηστο για την διαχείριση αλληπάληλων προσομοιώσεων καθώς περιέχει όλα τα στοιχεία που τις αφορούν, όπως την περιγραφή που θέτει ο χρήστης για κάθε προσομοίωση, το όνομα αρχείου στο οποίο αυτή αντιστοιχεί, το ποσοστό ολοκλήρωσής της, την διάρκειά της κ.ά. Το περιβάλλον του Simulation Manager κατά την εκτέλεση πολλαπλών προσομοιώσεων φαίνεται στην **Εικόνα 1.8**.

	Description	File Name	Message	Started	Duration	Server
🕒	annual sim PROP R1 - Optimisation, Gen 0, Run 18	1833-V0.13-DB600140-PR...	Proceeding with Initializin...	2018-12-17 20:30:36	00:00:10	ensims-x3290
🕒	annual sim PROP R1 - Optimisation, Gen 0, Run 17	1833-V0.13-DB600140-PR...	Warming up	2018-12-17 20:30:20	00:00:26	ensims-x3290
🕒	annual sim PROP R1 - Optimisation, Gen 0, Run 16	1833-V0.13-DB600140-PR...	Warming up	2018-12-17 20:30:01	00:00:45	ensims-x3290
🕒	annual sim PROP R1 - Optimisation, Gen 0, Run 15	1833-V0.13-DB600140-PR...	Simulating... 4%	2018-12-17 20:29:47	00:00:59	ensims-x3290
🕒	annual sim PROP R1 - Optimisation, Gen 0, Run 14	1833-V0.13-DB600140-PR...	Simulating... 6%	2018-12-17 20:29:31	00:01:15	ensims-x3290
🕒	annual sim PROP R1 - Optimisation, Gen 0, Run 13	1833-V0.13-DB600140-PR...	Simulating... 6%	2018-12-17 20:29:15	00:01:31	ensims-x3290
🕒	annual sim PROP R1 - Optimisation, Gen 0, Run 12	1833-V0.13-DB600140-PR...	Simulating... 15%	2018-12-17 20:28:59	00:01:47	ensims-x3290
🕒	annual sim PROP R1 - Optimisation, Gen 0, Run 11	1833-V0.13-DB600140-PR...	Simulating... 17%	2018-12-17 20:28:43	00:02:03	ensims-x3290
🕒	annual sim PROP R1 - Optimisation, Gen 0, Run 10	1833-V0.13-DB600140-PR...	Simulating... 25%	2018-12-17 20:28:25	00:02:21	ensims-x3290
🕒	annual sim PROP R1 - Optimisation, Gen 0, Run 9	1833-V0.13-DB600140-PR...	Simulating... 29%	2018-12-17 20:28:07	00:02:39	ensims-x3290
🕒	annual sim PROP R1 - Optimisation, Gen 0, Run 8	1833-V0.13-DB600140-PR...	Simulating... 38%	2018-12-17 20:27:48	00:02:58	ensims-x3290
🕒	annual sim PROP R1 - Optimisation, Gen 0, Run 7	1833-V0.13-DB600140-PR...	Simulating... 44%	2018-12-17 20:27:32	00:03:14	ensims-x3290
🕒	annual sim PROP R1 - Optimisation, Gen 0, Run 6	1833-V0.13-DB600140-PR...	Simulating... 60%	2018-12-17 20:27:16	00:03:30	ensims-x3290
🕒	annual sim PROP R1 - Optimisation, Gen 0, Run 5	1833-V0.13-DB600140-PR...	Simulating... 66%	2018-12-17 20:27:00	00:03:46	ensims-x3290
🕒	annual sim PROP R1 - Optimisation, Gen 0, Run 4	1833-V0.13-DB600140-PR...	Simulating... 69%	2018-12-17 20:26:42	00:04:04	ensims-x3290
🕒	annual sim PROP R1 - Optimisation, Gen 0, Run 3	1833-V0.13-DB600140-PR...	Simulating... 82%	2018-12-17 20:26:26	00:04:20	ensims-x3290
🕒	annual sim PROP R1 - Optimisation, Gen 0, Run 2	1833-V0.13-DB600140-PR...	Simulating... 87%	2018-12-17 20:26:08	00:04:38	ensims-x3290
🕒	annual sim PROP R1 - Optimisation, Gen 0, Run 1	1833-V0.13-DB600140-PR...	Simulating... 98%	2018-12-17 20:25:52	00:04:54	ensims-x3290
🕒	annual sim PROP R1 - Optimisation, Gen 0, Run 0	1833-V0.13-DB600140-PR...	EnergyPlus Completed Su...	2018-12-17 20:25:36	00:04:31	ensims-x3290

Εικόνα 1.8: Περιβάλλον εργαλείου *Simulation Manager* στο *DesignBuilder* [4]

Από το περιβάλλον του *Simulation Manager*, μπορεί ο χρήστης να «φορτώσει» τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είτε στο κανονικό περιβάλλον εργασίας του *DesignBuilder* στην οθόνη *Simulation*, είτε σε αυτόνομο παράθυρο που ονομάζεται *Results Viewer* και παρέχει παραπάνω δυνατότητες επεξεργασίας των αποτελεσμάτων. Γενικώς τα δεδομένα εξόδου στο *DesignBuilder* δίδονται είτε σε μορφή διαγραμμάτων, είτε σε μορφή πινάκων τιμών και δύναται να παρουσιαστούν από μηνιαίο βήμα έως υπο-ωριαίο βήμα αναλόγως με την λεπτομέρεια που απαιτείται να αποδοθεί. Ένα παράδειγμα εξαγωγής δεδομένων διαγραμματικά ακολουθεί στην **Εικόνα 1.9**.



Εικόνα 1.9: Δεδομένα εξόδου σε μορφή διαγράμματος στο *DesignBuilder*

Κεφάλαιο 2: Γενικά χαρακτηριστικά και μοντελοποίηση επιλεγμένου κτιρίου

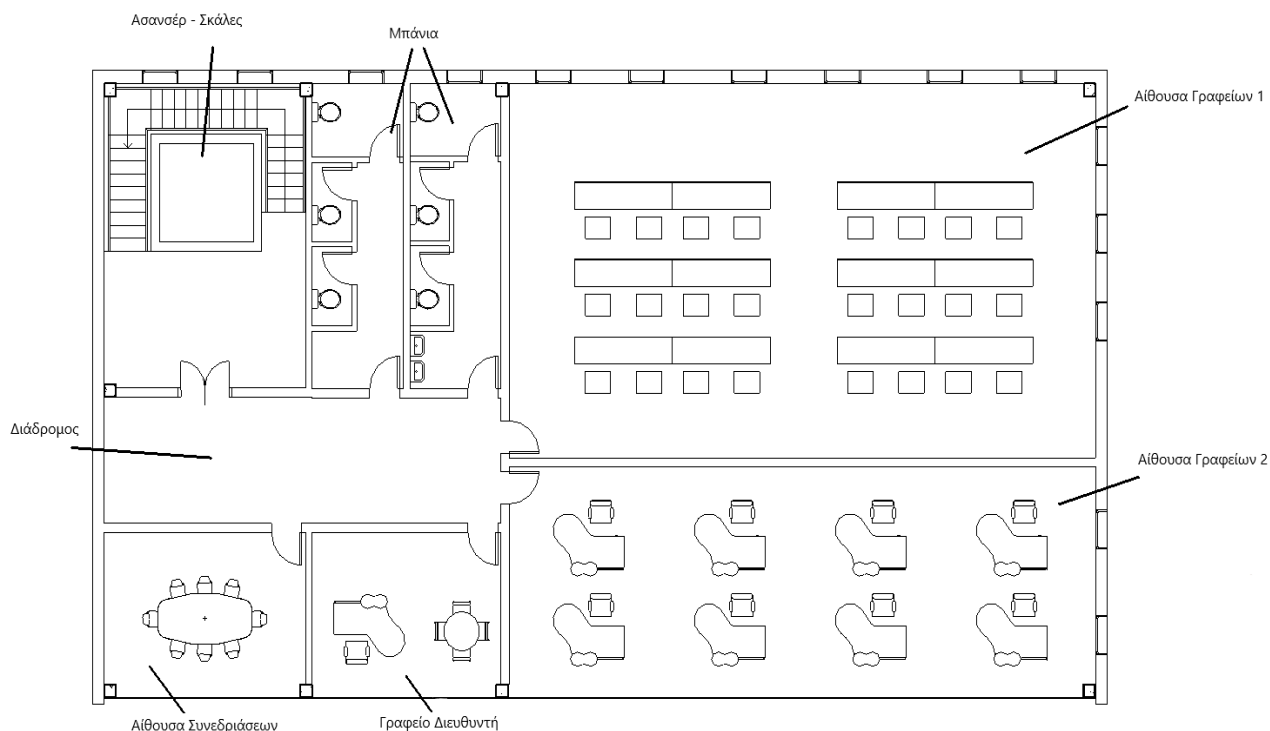
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η υφιστάμενη κατάσταση του υπό μελέτη κτιρίου γραφείων, όσον αφορά τόσο την βασική διάρθρωση και τα δομικά του χαρακτηριστικά, όσο και το υπάρχον σύστημα θέρμανσης, κλιματισμού και τον εξαερισμού (HVAC). Αποδίδεται η μοντελοποίηση όλων των υφιστάμενων συστημάτων του κτιρίου στα πλαίσια των ρυθμίσεων των επιμέρους καρτελών του λογισμικού DesignBuilder, ενώ παράλληλα δίνεται ως υπόβαθρο και μια θεωρητική ανάλυση που σχετίζεται με ορισμένους τομείς, όπως τα δομικά υλικά του κτιρίου και ο εξοπλισμός των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης.

2.1 Γενικά χαρακτηριστικά - Εσωτερική διάρθρωση κτιρίου

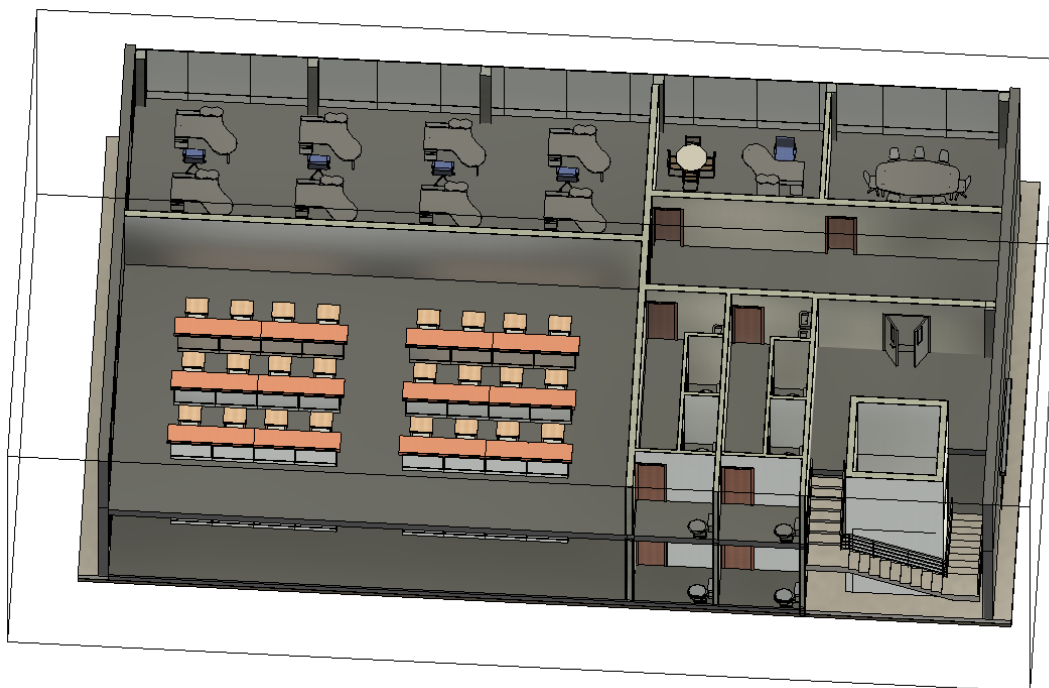
Πρόκειται για ένα κτίριο γραφείων που τοποθετείται στην Αθήνα και έχει νότιο προσανατολισμό. Έχει συνολικό ύψος (μαζί με την επικλινή στέγη) 13,5 m και αποτελείται από δύο ορόφους (ισόγειο και πρώτος όροφος), οι οποίοι έχουν την ίδια διάταξη χώρων μεταξύ τους. Ο κάθε όροφος είναι 350,08 m², επομένως η συνολική έκταση του κτιρίου είναι 700,16 m². Από το συνολικό εμβαδόν του κτιρίου, οι θερμαινόμενες-κλιματιζόμενες επιφάνειες είναι 625,04 m² και συγκεκριμένα 312,52 m² για κάθε όροφο, μιας και ο χώρος στον οποίο βρίσκονται οι σκάλες και το ασανσέρ θεωρείται μη κλιματιζόμενος χώρος και εξαιρείται από τους υπολογισμούς της παρούσας μελέτης. Ο κάθε όροφος αποτελείται από τέσσερις διακριτούς χώρους γραφείων, οι οποίοι αναλυτικότερα είναι: η αίθουσα συνεδριάσεων και το γραφείο του διευθυντή και έπειτα δύο μεγάλοι χώροι επιμέρους γραφείων του προσωπικού. Κεντρικά βρίσκεται ο διάδρομος και επίσης υπάρχει χώρος με σκάλες και ασανσέρ για την μετακίνηση των εργαζομένων από τον έναν όροφο στον άλλον.

Το υπό μελέτη κτίριο σχεδιάστηκε από το μηδέν βάσει των αρχιτεκτονικών του σχεδίων μέσα στην Layout καρτέλα της οθόνης Edit του DesignBuilder. Επίσης το κτίριο σχεδιάστηκε και στο 3D πρόγραμμα Revit όπου για παραστατικότητα τοποθετήθηκαν και τα έπιπλα που διαθέτει σε κάθε χώρο, όπως καταδεικνύεται παρακάτω στις σχετικές **Εικόνες 2.1 και 2.2**. Ακολουθούν χαρακτηριστικές εικόνες όψεων του κτιρίου από το λογισμικό DesignBuilder.

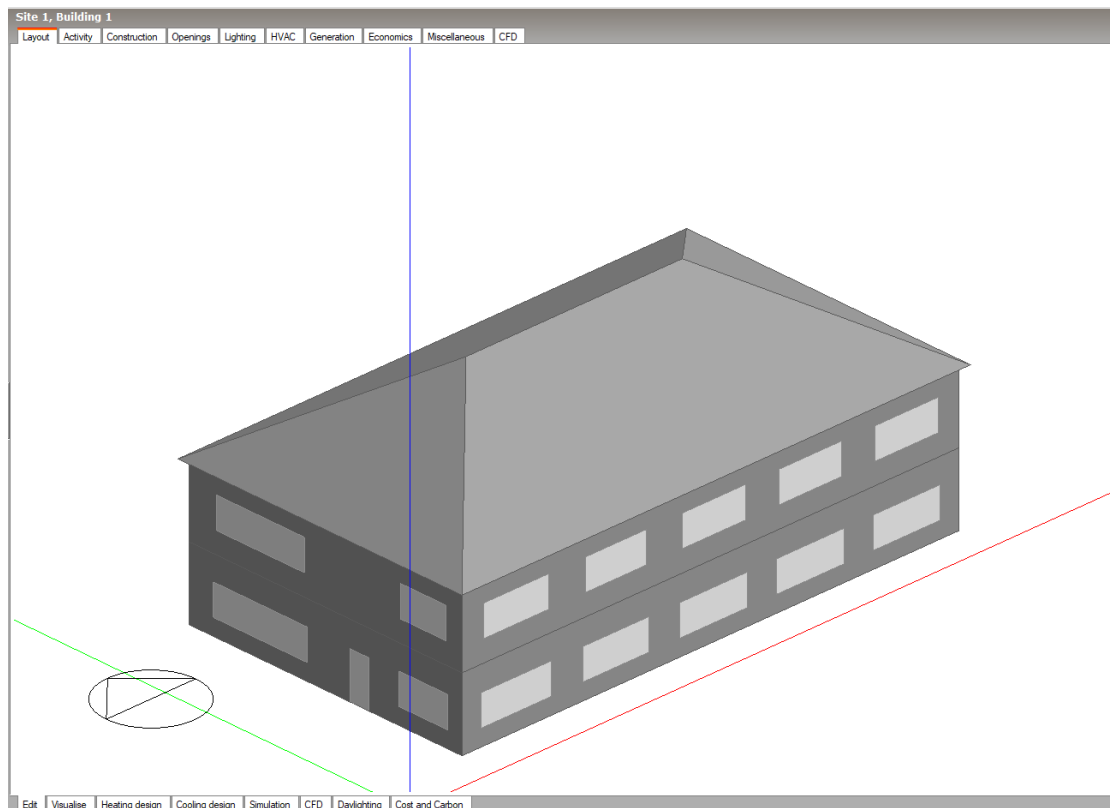
2.1.1 Κατόψεις – Όψεις Κτιρίου



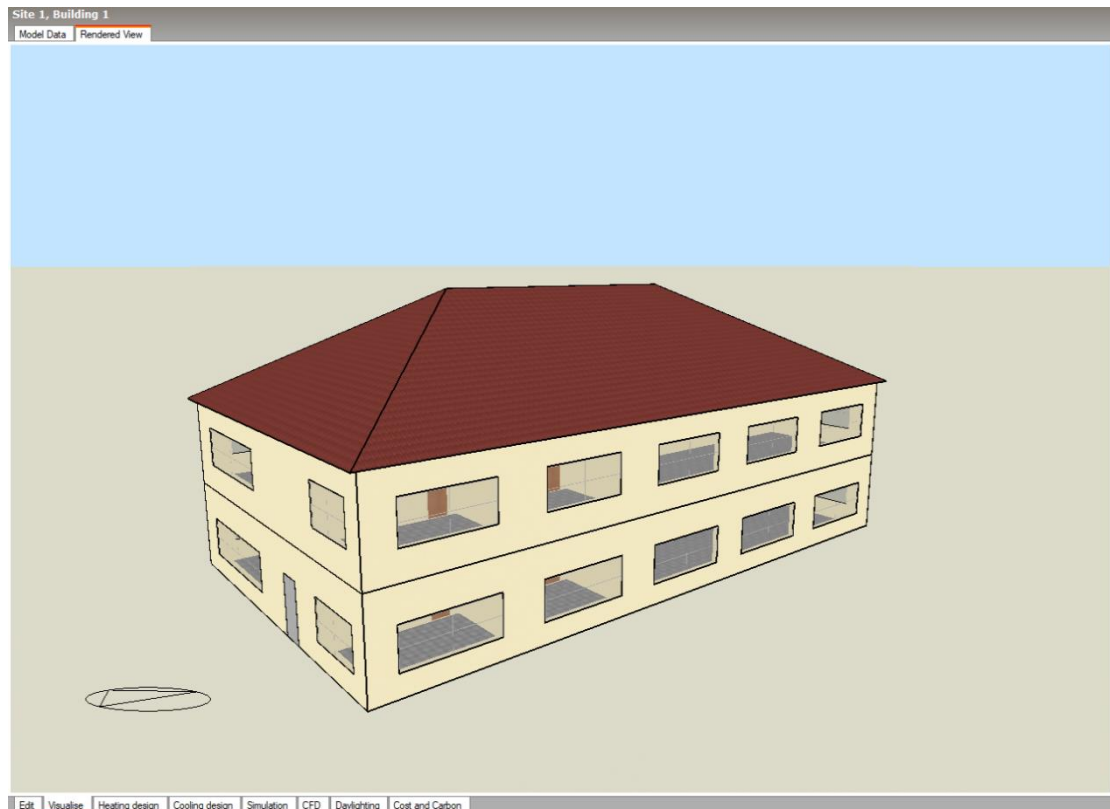
Εικόνα 2.1: Κάτοψη πρώτου ορόφου κτιρίου γραφείων από το Revit (ακριβώς η ίδια εσωτερική διάρθρωση και στο ισόγειο)



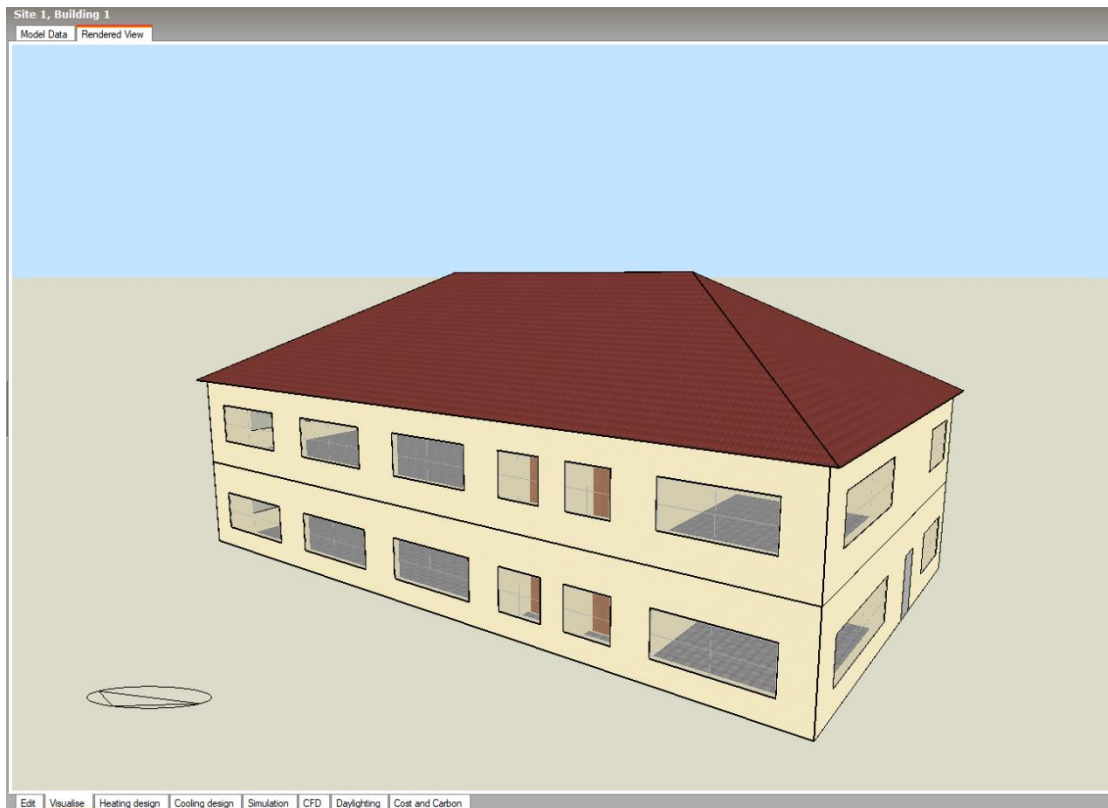
Εικόνα 2.2: Βόρεια πλάγια όψη πρώτου ορόφου κτιρίου γραφείων από το Revit μέσω της εντολής Section Box



Εικόνα 2.3: Το υπό μελέτη κτίριο στην καρτέλα *Layout* της οθόνης *Edit* του *DesignBuilder*



Εικόνα 2.4: Νοτιοδυτική όψη του κτιρίου στην καρτέλα *Rendered View* της οθόνης *Visualise*



Εικόνα 2.5: Βορειοδυτική όψη του κτιρίου στην καρτέλα *Rendered View* της οθόνης *Visualise*



Εικόνα 2.6: Εσωτερικός χώρος του κτιρίου από τον διάδρομο του ισογείου αμέσως μετά την κεντρική είσοδο, στην καρτέλα *Rendered View* της οθόνης *Visualise*

2.1.2 Θερμικές Ζώνες

Σύμφωνα με τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (ΚΕΝΑΚ) καθώς και την πιο πρόσφατη οδηγία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος [5] με στόχο την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης ενός κτιρίου, είναι αναγκαίος ο χωρισμός του σε «θερμικές ζώνες», δηλαδή σε χώρους με παρόμοια χρήση, ίδιο προφίλ λειτουργίας ή/και κοινά ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα.

Ως γενική αρχή προτείνεται ο διαχωρισμός του κτιρίου στον κατά τον δυνατόν μικρότερο αριθμό ζωνών και επίσης συνιστάται τμήματα του κτιρίου με όγκο μικρότερο από το 10% του συνολικού όγκου του κτιρίου να εξετάζονται ενταγμένα σε άλλες, παρόμοιες θερμικές ζώνες. Ο καθορισμός ανεξάρτητων διαφορετικών θερμικών ζωνών σύμφωνα με τον ΚΕΝΑΚ [5] επιβάλλεται στις περιπτώσεις κατά τις οποίες η επιθυμητή θερμοκρασία των εσωτερικών χώρων διαφέρει περισσότερο από 4 K (4 °C) σε σχέση με τα άλλα τμήματα του κτιρίου κατά την χειμερινή ή/και την θερινή περίοδο. Αυτό κυρίως συμβαίνει όταν υπάρχουν χώροι με διαφορετική χρήση και λειτουργία, οι οποίοι απαιτούν διαφορετικές εσωτερικές συνθήκες σχεδιασμού (θερμοκρασία, σχετική υγρασία, νωπό αέρα κ.ά.).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, το κτίριο χωρίστηκε σε οκτώ θερμικές ζώνες (4 θερμικές ζώνες στον κάθε έναν από τους δύο πανομοιότυπους ορόφους), ωστόσο η μία θερμική ζώνη δεν λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς ακριβώς επειδή δεν αποτελεί κλιματιζόμενο χώρο. Στον παρακάτω **Πίνακα 2.1** φαίνεται αναλυτικά για κάθε όροφο η επιφάνεια κάθε χώρου, καθώς και η συνολική επιφάνεια των ενιαίων θερμικών ζωνών οι οποίες θεωρήθηκαν για την υπολογιστική ανάλυση. Σημειώνεται ότι τα αριθμητικά δεδομένα τα οποία αναγράφονται προκύπτουν από τους υπολογισμούς του λογισμικού σύμφωνα με τα αρχιτεκτονικά σχέδια του κτιρίου.

Πίνακας 2.1: Θερμικές ζώνες του κτιρίου και αντίστοιχες επιφάνειες

	Χώρος	Επιφάνεια [m^2]
Θερμική Ζώνη 1 211,99 m^2	Αίθουσα Γραφείων 1	132,64
	Αίθουσα Γραφείων 2	79,35
Θερμική Ζώνη 2 68,48 m^2	Γραφείο Διευθυντή	18,18
	Αίθουσα Συνεδριάσεων	19,08
	Διάδρομος	31,22
Θερμική Ζώνη 3 32,05 m^2	Μπάνια	32,05
Θερμική Ζώνη 4 37,56 m^2	Ασανσέρ - Σκάλες	37,56

2.2 Δομικά Υλικά (Construction tab DesignBuilder)

Όσον αφορά τα βασικά δομικά υλικά, οι φυσικές τους ιδιότητες που αφορούν την μεταφορά θερμότητας είναι οι εξής:

- Πυκνότητα ρ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
- Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
- Ειδική θερμοχωρητικότητα C_p $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$
- Συντελεστής αντίστασης σε διάχυση υδρατμών μ

Σαφώς υπάρχουν πολλές ακόμα ιδιότητες που περιγράφουν τα δομικά υλικά (για παράδειγμα οι μηχανικές ιδιότητες, όπως το όριο διαρροής, το όριο αντοχής κ.ά.), ωστόσο στην παρούσα εργασία αναφέρονται οι ιδιότητες εκείνες που αφορούν την θερμική συμπεριφορά των υλικών.

Για καθένα από τα βασικά δομικά υλικά που χρησιμοποιούνται στο κτίριο και αναφέρονται αναλυτικά παρακάτω, παρατίθενται στον **Πίνακα 2.2** οι θερμοφυσικές ιδιότητες όπως προκύπτουν από τα στοιχεία της TOTEE [6]:

Πίνακας 2.2: Θερμοφυσικές ιδιότητες τυπικών δομικών υλικών

Υλικό	Πυκνότητα ρ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	Ειδική θερμοχωρητικότητα C_p $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$	Συντελεστής αντίστασης σε διάχυση υδρατμών μ
Σοβάς	1900	1,00	1100	35
Οπτοπλινθοδομή	1700	0,58	1000	5 - 10
Οπλισμένο συκρόδεμα	2400	2500	1000	130
Τσιμεντοκονία	2000	1400	1100	25 - 35
Κεραμικά πλακάκια	2000	1,84	840	250
Κεραμίδια	2000	0,40	800	40
Πίλημα στέγης	1100	0,23	1000	50000
Αλουμίνιο	2800	160	880	-
Ξύλο (κόντρα πλακέ)	500	0,13	1600	200

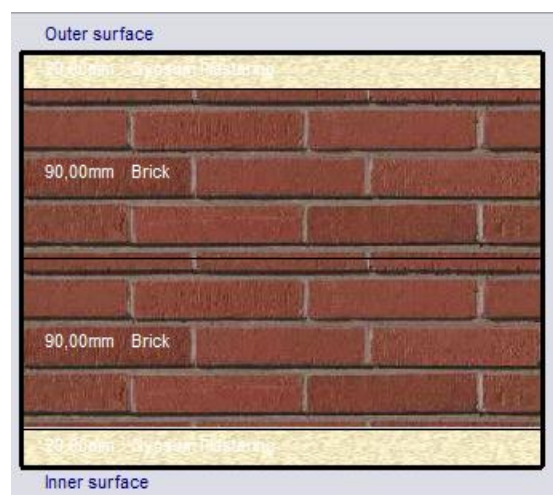
2.2.1 Εξωτερικοί τοίχοι

Οι εξωτερικοί τοίχοι του κτιρίου έχουν τέσσερα στρώματα (layers) τα οποία με σειρά από το εξωτερικό προς το εσωτερικό στρώμα είναι:

- Εξωτερικό επίχρισμα (σοβάς) με πάχος 2cm
- Οπτοπλινθοδομή (τούβλο) με πάχος 9 cm
- Οπτοπλινθοδομή (τούβλο) με πάχος 9cm
- Εσωτερικό επίχρισμα (σοβάς) με πάχος 2 cm

Παρακάτω φαίνεται η μοντελοποίηση των εξωτερικών τοίχων στο λογισμικό DesignBuilder καθώς και οι απαραίτητες θερμικές ιδιότητες:

Constructions	
Layers	Surface properties
Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	2,152
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,540
Surface resistance (m ² -K/W)	0,130
Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	19,870
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,130
Surface resistance (m ² -K/W)	0,040
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	2,857
R-Value (m ² -K/W)	0,520
U-Value (W/m²-K)	1,923
With Bridging (BS EN ISO 6946)	
Thickness (m)	0,2200
Km - Internal heat capacity (kJ/m ² -K)	149,0240
Upper resistance limit (m ² -K/W)	0,520
Lower resistance limit (m ² -K/W)	0,520
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	2,857
R-Value (m ² -K/W)	0,520
U-Value (W/m²-K)	1,923



Εικόνα 2.7: Χαρακτηριστικά εξωτερικής τοιχοποιίας

Ακολουθούν αναλυτικές περιγραφές του κάθε υλικού κατασκευής.

Το εξωτερικό και το εσωτερικό επίχρισμα ενός τοίχου, που στην καθομιλουμένη αναφέρεται ως σοβάς, ουσιαστικά αποτελεί μίγμα τσιμεντοκονιάματος, ασβεστοκονιάματος, γύψου και άμμου [7]. Κονίαμα εν γένει ονομάζεται ένα μείγμα το οποίο χρησιμοποιείται στις οικοδομές για την σύνδεση των οικοδομικών υλικών, όπως είναι τα τούβλα ή οι πέτρες. Ο ρόλος του είναι να καλύπτει τα κενά ανάμεσα στα οικοδομικά υλικά. Τα περισσότερα κονιάματα αποτελούνται από άμμο, νερό και κάποιο συνδετικό υλικό (όπως είναι για παράδειγμα το τσιμέντο ή ο ασβέστης).

Το επίχρισμα μπορεί είτε να ληφθεί έτοιμο σε σάκους με κατάλληλες αναλογίες των τεσσάρων υλικών του, είτε να ληφθούν ξεχωριστά τα επιμέρους υλικά και να

αναμειχθεί ανάλογα. Σε κάθε περίπτωση, παράγεται με μίξη των τεσσάρων προαναφερθέντων υλικών με νερό σε κατάλληλη αναλογία και στην συνέχεια τοποθετείται στην επιθυμητή επιφάνεια. Εν γένει τα επιχρίσματα χρησιμοποιούνται προς στήριξη του σκελετού του κτιρίου και προς προστασία της τουβλοδομής.

Η οπτοπλινθοδομή αλλιώς ονομάζεται τουβλοδομή και προφανώς πρόκειται για το γνωστό τούβλο (πλίνθος) που αποτελεί το συνηθέστερο πληρωτικό υλικό παντός είδους τοίχων. Κατά βάση, τα τούβλα κατασκευάζονται από άργιλο, αλλά και άλλα υλικά και κατά την κατασκευή τους αρχικά η πρώτη ύλη ζυμώνεται κατάλληλα, έπειτα μέσα σε καλούπια μορφοποιείται στο επιθυμητό σχήμα και τέλος ψήνεται είτε στον ήλιο ή σε καμίνια [7].

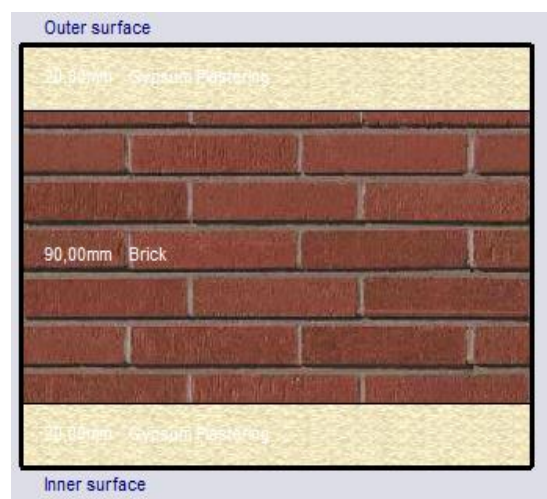
2.2.2 Εσωτερικοί τοίχοι

Οι εσωτερικοί τοίχοι του κτιρίου έχουν μονό στρώμα οπτοπλινθοδομής, οπότε αποτελούνται από τρία στρώματα (layers) τα οποία με σειρά από το εξωτερικό προς το εσωτερικό στρώμα είναι:

- Εξωτερικό επίχρισμα (σοβάς) με πάχος 2cm
- Οπτοπλινθοδομή (τούβλο) με πάχος 9cm
- Εσωτερικός επίχρισμα (σοβάς) με πάχος 2cm

Παρακάτω φαίνεται η μοντελοποίηση των εσωτερικών τοίχων στο λογισμικό DesignBuilder καθώς και οι απαραίτητες θερμικές ιδιότητες:

Constructions						
Layers	Surface properties	Image	Calculated	Cost	Internal source	Condensation analysis
Inner surface						
Convective heat transfer coefficient (W/m2-K)			2,152			
Radiative heat transfer coefficient (W/m2-K)			5,540			
Surface resistance (m2-K/W)			0,130			
Outer surface						
Convective heat transfer coefficient (W/m2-K)			2,152			
Radiative heat transfer coefficient (W/m2-K)			5,540			
Surface resistance (m2-K/W)			0,130			
No Bridging						
U-Value surface to surface (W/m2-K)			4,444			
R-Value (m2-K/W)			0,485			
U-Value (W/m2-K)			2,062			
With Bridging (BS EN ISO 6946)						
Thickness (m)			0,1300			
Km - Internal heat capacity (KJ/m2-K)			149,0240			
Upper resistance limit (m2-K/W)			0,485			
Lower resistance limit (m2-K/W)			0,485			
U-Value surface to surface (W/m2-K)			4,444			
R-Value (m2-K/W)			0,485			
U-Value (W/m2-K)			2,062			



Εικόνα 2.8: Χαρακτηριστικά εσωτερικής τοιχοποιίας

2.2.3 Δάπεδα

Το δάπεδο του κτιρίου (δάπεδο ισόγειου και δάπεδο πρώτου ορόφου) αποτελούνται από τρία στρώματα (layers) τα οποία με σειρά από το εξωτερικό προς το εσωτερικό στρώμα είναι:

- Οπλισμένο σκυρόδεμα με πάχος 15 cm
- Τσιμεντοκονία δαπέδου με πάχος 7cm
- Κεραμικά πλακάκια με πάχος 1cm

Παρακάτω φαίνεται η μοντελοποίηση των δαπέδων στο λογισμικό DesignBuilder καθώς και οι απαραίτητες θερμικές ιδιότητες:

Constructions	
Layers	Surface properties
Calculated	
Cost	
Internal source	
Condensation analysis	
Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	0,342
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,540
Surface resistance (m ² -K/W)	0,170
Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	19,870
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,130
Surface resistance (m ² -K/W)	0,040
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	3,165
R-Value (m ² -K/W)	0,526
U-Value (W/m²-K)	1,901
With Bridging (BS EN ISO 6946)	
Thickness (m)	0,2300
Km - Internal heat capacity (KJ/m ² -K)	125,0100
Upper resistance limit (m ² -K/W)	0,526
Lower resistance limit (m ² -K/W)	0,526
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	3,165
R-Value (m ² -K/W)	0,526
U-Value (W/m²-K)	1,901



Εικόνα 2.9: Χαρακτηριστικά δαπέδων

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή του κάθε υλικού κατασκευής.

Το τσιμέντο είναι βιομηχανικό υλικό που παράγεται με την έψηση σε ειδικούς κλιβάνους μίγματος από αλεσμένο ασβεστόλιθο και άργιλο, σε θερμοκρασίες της τάξης των 1450°C [7]. Το προϊόν που προκύπτει στις συνθήκες αυτές από τον ορυκτολογικό μετασχηματισμό των πρώτων υλών ονομάζεται κλίνκερ και στην συνέχεια αλέθεται σε σκόνη για να προκύψει το τσιμέντο.

Εν συνεχεία, το σκυρόδεμα είναι ένα τεχνητό υλικό (κατά βάση είναι ένας τεχνητός λίθος) ο οποίος στην βασική του μορφή αποτελείται από ένα ομογενοποιημένο μείγμα ελεγχόμενων αναλογιών από τσιμέντο, σκόνη, νερό, άμμο και σκύρα (χαλίκια), φυσικής ή τεχνητής προέλευσης. Αρχικά έχει ρευστή σύσταση και με την

πάροδο του χρόνου, μέσα από εξωθερμικές χημικές διεργασίες, στερεοποιείται με αποτέλεσμα να αποκτά φέρουσα ικανότητα. Οι ιδιότητες του σκυροδέματος στο χρόνο (αρχική ανάμιξη, διακίνηση, διάστρωση, συντήρηση και μακροχρόνια ανθεκτικότητα) ελέγχονται, ανάλογα με την εφαρμογή, μέσω προσθήκης στο μείγμα χημικών προσθέτων που αποδίδουν στο τελικό προϊόν συγκεκριμένες ιδιότητες [8].

Το σκυρόδεμα είναι το πλέον διαδεδομένο δομικό υλικό παγκοσμίως. Η ευρεία εφαρμογή του σε κάθε είδους κτίρια και έργα υποδομής οφείλεται στις βασικές του ιδιότητες. Καταρχάς διαθέτει μεγάλη θλιπτική αντοχή καθώς και αντοχή στον χρόνο, σε βαθμό που δεν παρέχεται από άλλα δομικά υλικά. Παρέχει υψηλή ευελιξία στην εφαρμογή (μεταφορά, διακίνηση και διάστρωση), ενώ έχει την δυνατότητα να μορφώνεται σε οποιοδήποτε επιθυμητό σχήμα. Επίσης είναι ένα ιδιαίτερα φθινό δομικό υλικό που είναι εύκολο να παραχθεί και να διαμορφωθεί επί τόπου, κάτω από οποιοδήποτε συνθήκες και σε οποιοδήποτε περιβάλλον δόμησης. Έχει μεγάλη θερμική αδράνεια, γεγονός που το καθιστά αποδοτικότερο από άλλα δομικά υλικά σε ό,τι αφορά το ενεργειακό κόστος της λειτουργίας των κατασκευών. Επιπλέον, οι ιδιότητές του το καθιστούν το βέλτιστο υλικό σε συνθήκες πυρκαγιάς [8]. Το βασικότερο μειονέκτημα του σκυροδέματος είναι η πολύ μικρή αντοχή του σε εφελκυσμό .

Σιδηροπαγές ή οπλισμένο σκυρόδεμα ονομάζεται αυτό που συνδυάζεται με χαλύβδινες ράβδους οπλισμού. Συχνά χρησιμοποιείται και ο όρος «μπετόν αρμέ» από τον αντίστοιχο γαλλικό (béton armé). Ουσιαστικά πρόκειται για τσιμέντο ενισχυμένο 2% κατά βάρος με χαλύβδινες βέργες [8].

Τσιμεντοκονία ονομάζεται το υλικό στρώσης (ένα κονίαμα που έχει ως βασικό υλικό το τσιμέντο) με το οποίο γεμίζονται συγκεκριμένες επιφάνειες (δάπεδα, ταράτσες κ.λπ.). Χρησιμοποιείται προς λείανση των επιφανειών και για πρόσδοση κλίσης σε αυτές. Η τσιμεντοκονία γενικά είναι υλικό πλήρωσης, που μπαίνει ως γέμισμα πάνω από μπετόν με σκοπό να δημιουργηθεί μια επίπεδη επιφάνεια, η οποία στην συνέχεια θα υποδεχθεί την τελική επίστρωση. Η τελική επίστρωση της επιφάνειας συνήθως είναι πλακίδια (πλακάκια) όπως στον εν λόγω κτίριο γραφείων, ή βιομηχανικό δάπεδο.

Τα κεραμικά πλακίδια είναι κατασκευασμένα με βάση τον πηλό, που δημιουργείται από διάφορα υλικά (όπως άργιλος, ασβέστης, άμμος, χαλαζίας) και νερό. Αυτό το μείγμα στην συνέχεια διαμορφώνεται στο επιθυμητό σχήμα και μπορεί να προστεθεί χρώμα, γυαλί ή άλλο φινίρισμα με σκοπό την διακόσμηση και την ελαστικότητά του. Στη συνέχεια, ψήνεται σε κλίβανο υψηλής θερμοκρασίας, για να αφαιρεθούν τυχόν υπολείμματα νερού κι έτσι να ομογενοποιηθούν όλα τα υλικά [7]. Διαφορετικά μείγματα των πρώτων υλών και της αντίστοιχης επεξεργασίας τους, οδηγούν σε ένα ευρύ φάσμα σχεδίων και τύπων χρήσης.

2.2.4 Οροφή - Στέγη

Η στέγη του κτιρίου είναι μια τυπική επικλινή (pitched) στέγη και αποτελείται από τρία στρώματα (layers) που με σειρά από το εξωτερικό προς το εσωτερικό είναι:

- Κεραμίδια με πάχος 2,5cm
- Κενό αέρα με πάχος 2cm
- Πίλημα στέγης με πάχος 5cm

Παρακάτω φαίνεται η μοντελοποίηση της οροφής στο λογισμικό DesignBuilder καθώς και οι απαραίτητες θερμικές ιδιότητες:

Constructions						
Layers	Surface properties	Image	Calculated	Cost	Internal source	Condensation analysis
Inner surface						
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	4,460					
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,540					
Surface resistance (m ² -K/W)	0,100					
Outer surface						
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	19,870					
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,130					
Surface resistance (m ² -K/W)	0,040					
No Bridging						
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	4,967					
R-Value (m ² -K/W)	0,341					
U-Value (W/m²-K)	2,930					
With Bridging (BS EN ISO 6946)						
Thickness (m)	0,0500					
Km - Internal heat capacity (KJ/m ² -K)	4,0176					
Upper resistance limit (m ² -K/W)	0,341					
Lower resistance limit (m ² -K/W)	0,341					
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	4,967					
R-Value (m ² -K/W)	0,341					
U-Value (W/m²-K)	2,930					



Εικόνα 2.10: Χαρακτηριστικά στέγης

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή του κάθε υλικού κατασκευής.

Σε μία κεκλιμένη στέγη με κεραμίδια, λόγω της ασυνέχειας των κεραμιδιών και προς προστασία του κτιρίου, αναγκαία καθίσταται η στεγανοποίηση, η οποία επιτυγχάνεται με ειδικές μεμβράνες κεραμοσκεπής. Οι μεμβράνες αυτές έρχονται να εγγυηθούν την στεγανότητα της στέγης. Χαρακτηριστικά που πρέπει να διαθέτουν είναι πλήρης στεγανότητα, ατμοδιαπερατότητα, αντιολισθηρότητα (για ασφάλεια του τεχνίτη) και αντοχή στην διάτρηση [9]. Όσον αφορά την ατμοδιαπερατότητα, είναι γνωστό ότι οι χώροι συνήθως συγκεντρώνουν υδρατμούς οι οποίοι πρέπει να εκτονώνονται και να απομακρύνονται από το κτίριο. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των μεμβρανών είναι το χαμηλό τους βάρος περίπου 500 gr/m^2 [9].

Έτσι λοιπόν, προς στεγανοποίηση χρησιμοποιείται το λεγόμενο πύλημα στέγης το οποίο επί της ουσίας έχει την μορφή τσόχας στέγης και χρησιμοποιείται κατά την κατασκευή της στέγης. Η τσόχα στέγης (παρόμοια με το λεγόμενο ασφαλτόπανο) είναι ένα βασικό υλικό που χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες ως αδιάβροχο κάλυμμα σε στέγες κατοικιών και επαγγελματικών χώρων [9]. Κατασκευάζεται σε μορφή ρολού και αποτελείται ουσιαστικά από μεμβράνες σύνθεσης ασφάλτου που ενσωματώνουν δύο στρώσεις. Η ασφαλτος (άσφαλτος ή λιθανθρακόπισσα) είναι μια μικτή ουσία που αποτελείται από οργανικά υγρά που είναι εξαιρετικά κολλώδη, παχύρρευστα και αδιάβροχα [7].

Η πρώτη μεμβράνη πολυμερούς κάτω πλευράς χρησιμοποιείται ως συμπαγές φόντο, συχνά ενισχυμένη με ίνες γυαλιού. Οι κόκκοι ορυκτών συνθέτουν το αυτοπροστατευτικό ανώτερο στρώμα, με ένα τελικό ασφαλτικό μείγμα που τα ενθυλακώνει και τα δύο [9]. Τυπικές χρήσεις του χαρτιού από τσόχα είναι ως υπόστρωμα κάτω από άλλα δομικά υλικά, ιδιαίτερα υλικά στέγης και επένδυσης, ενώ επίσης είναι ένας τύπος μεμβράνης που χρησιμοποιείται σε ασφαλτοστρωμένες στέγες (Built-Up Roof (BUR)). Η ταχεία εφαρμογή του υποστρώματος στέγης προστατεύει το κατάστρωμα οροφής κατά την κατασκευή έως ότου εφαρμοστεί το υλικό στέγης.

Το οργανικό χαρτί τσόχας έχει ένα υλικό βάσης κατασκευασμένο από υλικά όπως ίνες κουρελιού, λινάτσα ή ίνες κυτταρίνης (ξύλο ή γιούτα). Τα οργανικά χαρτιά από τσόχα θεωρούνται πλέον απαρχαιωμένα και τα ανόργανα είναι αυτά που προτιμώνται. Τα ανόργανα προϊόντα είναι πολυεστέρας και ίνες γυαλιού και συγκεντρώνουν πολλά πλεονεκτήματα καθώς είναι ελαφρύτερα, πιο ανθεκτικά στο σχίσσιμο, πιο ανθεκτικά στην φωτιά και δεν απορροφούν νερό. Το χαρτί από τσόχα διατίθεται σε διάφορες ποιότητες και κατά βάση το βαρύτερο υλικό χρησιμοποιείται συνήθως για την επικάλυψη μακρόβιων υλικών στέγης, προκειμένου να ταιριάζει με την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής τους. Επίσης, βαρύτερο χαρτί τσόχας χρησιμοποιείται σε στέγες με μικρότερη κλίση, οι οποίες είναι πιο επιρρεπείς σε διαρροές [9].

Το κεραμίδι, όπως είναι γνωστό, είναι μικρή, συνήθως πήλινη, καμπυλωτή ή επίπεδη πλάκα, που χρησιμοποιείται για την επικάλυψη της στέγης ενός κτιρίου. Τα κεραμίδια συνήθως κατασκευάζονται από άργιλο και είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να κρατούν την βροχή [7].

2.2.5 Πόρτες

Το κτίριο διαθέτει 12 εσωτερικές πόρτες και μία κεντρική εξωτερική. Η εξωτερική πόρτα είναι πόρτα αλουμινίου, ενώ οι εσωτερικές είναι ξύλινες (κόντρα-πλακέ).

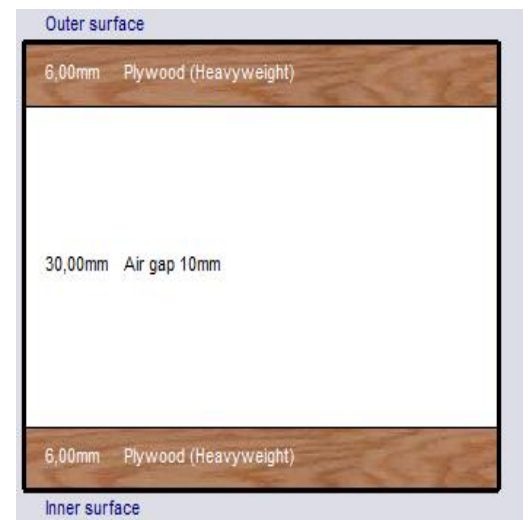
Παρακάτω φαίνεται η μοντελοποίηση για τις πόρτες στο λογισμικό DesignBuilder καθώς και οι απαραίτητες θερμικές ιδιότητες:

Constructions						
Layers	Surface properties	Image	Calculated	Cost	Internal source	Condensation analysis
Inner surface						
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,846					
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	1,847					
Surface resistance (m ² -K/W)	0,130					
Outer surface						
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	23,153					
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	1,847					
Surface resistance (m ² -K/W)	0,040					
No Bridging						
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	6,665					
R-Value (m ² -K/W)	0,320					
U-Value (W/m²-K)	3,125					
With Bridging (BS EN ISO 6946)						
Thickness (m)	0,0160					
Km - Internal heat capacity (KJ/m ² -K)	7,3920					
Upper resistance limit (m ² -K/W)	0,320					
Lower resistance limit (m ² -K/W)	0,320					
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	6,665					
R-Value (m ² -K/W)	0,320					
U-Value (W/m²-K)	3,125					



Εικόνα 2.11: Χαρακτηριστικά εξωτερικής πόρτας

Constructions						
Layers	Surface properties	Image	Calculated	Cost	Internal source	Condensation analysis
Inner surface						
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	2,152					
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,540					
Surface resistance (m ² -K/W)	0,130					
Outer surface						
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	19,460					
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,540					
Surface resistance (m ² -K/W)	0,040					
No Bridging						
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	4,348					
R-Value (m ² -K/W)	0,400					
U-Value (W/m²-K)	2,500					
With Bridging (BS EN ISO 6946)						
Thickness (m)	0,0420					
Km - Internal heat capacity (KJ/m ² -K)	5,9640					
Upper resistance limit (m ² -K/W)	0,400					
Lower resistance limit (m ² -K/W)	0,400					
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	4,348					
R-Value (m ² -K/W)	0,400					
U-Value (W/m²-K)	2,500					

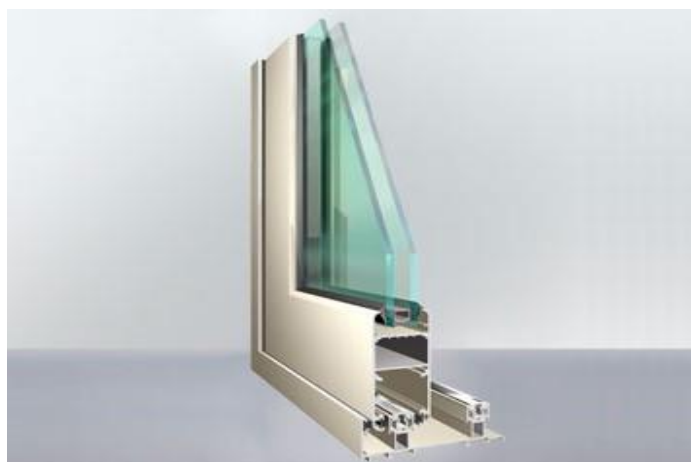


Εικόνα 2.12: Χαρακτηριστικά εσωτερικών πορτών

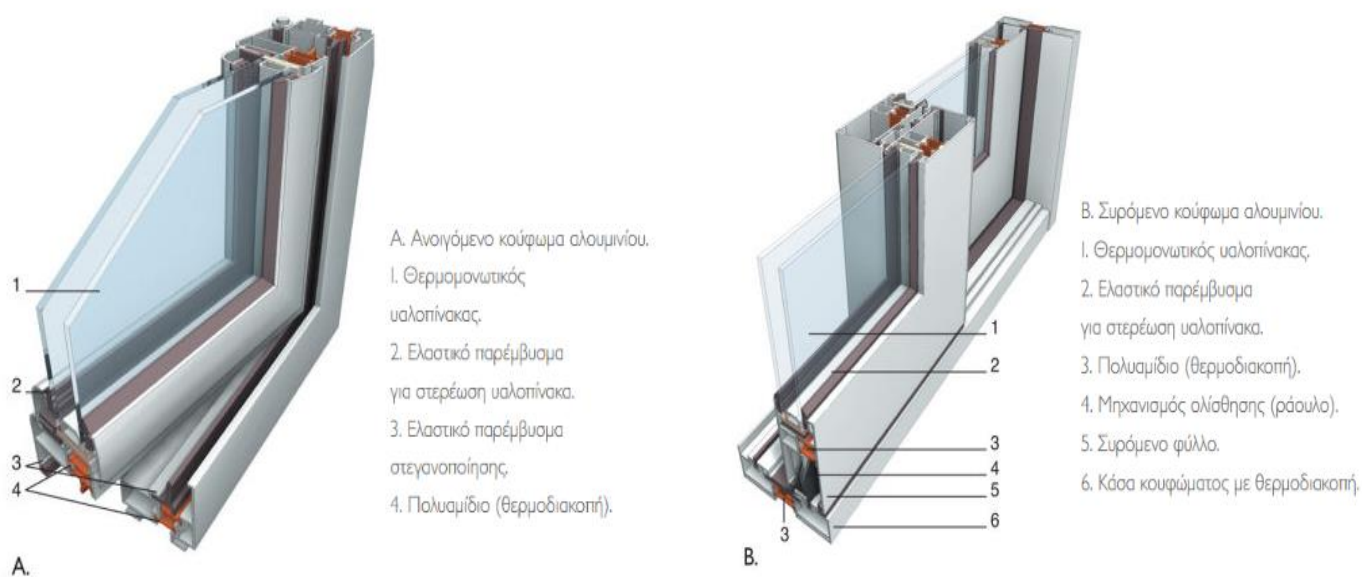
2.2.6 Υαλοπίνακες

Το κτίριο διαθέτει υαλοπίνακες σε όλους τους εξωτερικούς και σε κανέναν εσωτερικό, επομένως όλα τα παράθυρά του είναι εξωτερικά. Οι υαλοπίνακες του κτιρίου είναι 30 στον αριθμό και είναι κατασκευαστικά όλοι όμοιοι ανεξάρτητα από το σημείο του κτιρίου στο οποίο βρίσκονται. Σε όλο το κτίριο, λοιπόν, τοποθετήθηκαν διπλά κρύσταλλα πάχους 3mm με 10mm κενό αέρα ενδιάμεσα (double glazing clear 3mm / 10mm air). Όλα τα πλαίσια (κουφώματα) είναι αλουμινένια με πάχος 5mm και χωρίς θερμοδιακοπή (thermal break).

Στις **Εικόνες 2.13 και 2.14** παρακάτω φαίνονται υαλοπίνακες χωρίς θερμοδιακοπή καθώς και με θερμοδιακοπή στο κούφωμα.



Εικόνα 2.13: Διπλός υαλοπίνακας και κούφωμα χωρίς θερμοδιακοπή σε τομή [10]



Εικόνα 2.14: Διπλός υαλοπίνακας και κούφωμα με θερμοδιακοπή (ανοιγόμενο αριστερά και συρόμενο δεξιά) σε τομή [11]

Παρακάτω φαίνεται η μοντελοποίηση των υαλοπινάκων και των κουφωμάτων τους στο λογισμικό DesignBuilder καθώς και οι απαραίτητες θερμικές ιδιότητες:

Glazing		
Layers	Calculated	Cost
Calculated Values		
Total solar transmission (SHGC)	0,691	
Direct solar transmission	0,624	
Light transmission	0,744	
U-value (ISO 10292/ EN 673) (W/m2-K)	2,161	
U-Value (W/m2-K)	2,080	

Εικόνα 2.15: Χαρακτηριστικά υαλοπινάκων

Constructions						
Layers	Surface properties	Image	Calculated	Cost	Internal source	Condensation analysis
Inner surface						
Convective heat transfer coefficient (W/m2-K)			5,846			
Radiative heat transfer coefficient (W/m2-K)			1,847			
Surface resistance (m2-K/W)			0,130			
Outer surface						
Convective heat transfer coefficient (W/m2-K)			23,290			
Radiative heat transfer coefficient (W/m2-K)			1,710			
Surface resistance (m2-K/W)			0,040			
No Bridging						
U-Value surface to surface (W/m2-K)			32000,002			
R-Value (m2-K/W)			0,170			
U-Value (W/m2-K)			5,881			
With Bridging (BS EN ISO 6946)						
Thickness (m)			0,0050			
Km - Internal heat capacity (KJ/m2-K)			6,1600			
Upper resistance limit (m2-K/W)			0,170			
Lower resistance limit (m2-K/W)			0,170			
U-Value surface to surface (W/m2-K)			31999,999			
R-Value (m2-K/W)			0,170			
U-Value (W/m2-K)			5,881			



Εικόνα 2.16: Χαρακτηριστικά κουφωμάτων υαλοπινάκων

Τα συνθετικά και τα ξύλινα κουφώματα είναι από μόνα τους θερμοδιακοπτόμενα, διότι τα υλικά κατασκευής τους είναι κακοί αγωγοί θερμότητας. Η ανάγκη για θερμοδιακοπή στα κουφώματα προκύπτει από το γεγονός πως το αλουμίνιο σαν υλικό από την φύση του έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα, δηλαδή είναι καλός αγωγός της θερμότητας, επομένως μεταφέρει την θερμοκρασία στην οποία εκτίθεται σε όλη του την επιφάνεια. Τα κοινά κουφώματα, επονομαζόμενα και ψυχρά, δεν έχουν κάποιο υλικό που να σταματάει την εξωτερική θερμοκρασία από το να μεταφερθεί στην εσωτερική επιφάνεια του κουφώματος και συνεπώς μέσα στο

κτίριο. Έτσι, επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου και απαιτείται παραπάνω ενέργεια για την διατήρηση μιας σταθερής θερμοκρασίας σε αυτόν, τόσο τον χειμώνα όσο και το καλοκαίρι. Επίσης πολλές φορές στο προφίλ του κουφώματος δημιουργούνται υδρατμοί και υγρασία εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας του εσωτερικού από το εξωτερικό περιβάλλον. Σε αυτήν την περίπτωση, η συσσώρευση και υγροποίηση των υδρατμών συχνά οδηγεί στην δημιουργία μούχλας στους τοίχους.

Λύση στο πρόβλημα δίνει η θερμοδιακοπή, η οποία συνίσταται στον διαχωρισμό της εξωτερικής και της εσωτερικής πλευράς του κουφώματος με κατάλληλο υλικό, με στόχο την σχεδόν ολοκληρωτική μείωση της μεταφοράς ενέργειας από την εσωτερική στην εξωτερική πλευρά του κουφώματος ή το αντίστροφο. Εν συντομία, λοιπόν, η θερμοδιακοπή είναι η παρεμβολή ενός υλικού μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού προφίλ ενός κουφώματος. Συνήθως χρησιμοποιείται ως υλικό το πολυαμίδιο, το οποίο είναι ένα είδος πολυβυνιλοχλωριδίου (πολυμερές υλικό - PVC) που αφενός είναι πολύ κακός αγωγός της θερμότητας και αφετέρου απορροφά την υγρασία [12].

Έτσι χάρη στην θερμοδιακοπή, παρουσιάζεται σημαντική μείωση στην απώλεια ενέργειας από τον χώρο και παράλληλα δεν εμφανίζεται η ανεπιθύμητη υγρασία στα τζάμια. Επίσης με την τοποθέτηση της θερμοδιακοπής, εκτός από τις θερμομονωτικές, βελτιώνονται αισθητά και οι ηχομονωτικές ιδιότητες των κουφωμάτων. Η διαφορά τιμής μεταξύ απλών και θερμοδιακοπτόμενων κουφωμάτων αλουμινίου κυμαίνεται περίπου στο 15%, ωστόσο επέρχεται άμεσα απόσβεση λόγω της αντιμετώπισης των απωλειών ενέργειας και έτσι της εξοικονόμησης πόρων για θέρμανση και κλιματισμό του χώρου [12].

Για τους υαλοπίνακες του κτιρίου, εφόσον δεν έχουν θερμοδιακοπή, αναμένονται υψηλές τιμές θερμοπερατότητας (U_w factor). Εν γένει η μέτρηση της «αντίστασης» ενός κουφώματος στην μεταφορά της θερμοκρασίας γίνεται με τον συντελεστή θερμοπερατότητας U_w . Κουφώματα με U_w μεγαλύτερο από 3,2 θεωρούνται συμβατικά (ψυχρά), κουφώματα με συντελεστή μεταξύ 2,6 και 3,2 θεωρούνται ενεργειακά (θερμομονωτικά), ενώ κουφώματα με συντελεστή μικρότερο από 2,6 θεωρούνται ενεργειακά υψηλών επιδόσεων [6]. Καλύτερη θερμομόνωση και έτσι εξοικονόμηση ενέργειας στο κτίριο επιτυγχάνεται όσο η τιμή U_w πλησιάζει το μηδέν.

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας με διπλό (ή και μονό) τζάμι υπολογίζεται βάσει της **σχέσης (2.1)** [6]:

$$U_w = \frac{A_f \cdot U_f + A_g \cdot U_g + l_g \cdot \Psi_g}{A_f + A_g} \quad (2.1)$$

Όπου:

U_w $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ ο συντελεστής θερμοπερατότητας όλου του κουφώματος

U_f $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ ο συντελεστής θερμοπερατότητας πλαισίου του κουφώματος

$U_g \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ ο συντελεστής θερμοπερατότητας του υαλοπίνακα του κουφώματος

$A_f [m^2]$ το εμβαδό επιφανείας του πλαισίου του κουφώματος

$A_g [m^2]$ το εμβαδό επιφανείας του υαλοπίνακα του κουφώματος

$l_g [m]$ το μήκος της θερμογέφυρας του υαλοπίνακα του κουφώματος (το μήκος συναρμογής πλαισίου-υαλοπίνακα, δηλαδή η περίμετρος του υαλοπίνακα)

$\Psi_g \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας υαλοπίνακα του κουφώματος

Στους Πίνακες 2.3, 2.4 και 2.5 παρακάτω δίνονται οι τιμές των συντελεστών θερμοπερατότητας U_f, U_g και Ψ_g ανάλογα με τον τύπο του υαλοπίνακα και του πλαισίου, βάσει των προτύπων του ΤΕΕ.

Πίνακας 2.3: Τυπικές τιμές συντελεστών θερμοπερατότητας υαλοπινάκων [6]

Υάλωση			$U_g [W/(m^2 \cdot K)]$ για διαφορετικούς τύπους αερίων στο διάκενο των υαλοπινάκων			
Τύπος υάλωσης	Υαλοπίνακας	Συντελεστής εκπομπής	Διαστάσεις [mm]	Αέρας	Αργό	Κρυπτό
Διπλή	Χωρίς επίστρωση χαμηλής εκπομπής. Συνήθεις υαλοπίνακες	0,89	4-6-4	3,3	3,0	2,8
			4-8-4	3,1	2,9	2,7
			4-12-4	2,8	2,7	2,6
			4-16-4	2,7	2,6	2,6
			4-20-4	2,7	2,6	2,6
	Με επίστρωση χαμηλής εκπομπής ενός φύλλου	$\leq 0,10$	4-6-4	2,6	2,2	1,7
			4-8-4	2,2	1,9	1,4
			4-12-4	1,8	1,5	1,3
			4-16-4	1,6	1,4	1,3
			4-20-4	1,6	1,4	1,4
	Με επίστρωση χαμηλής εκπομπής ενός φύλλου	$\leq 0,05$	4-6-4	2,5	2,1	1,5
			4-8-4	2,1	1,7	1,3
			4-12-4	1,7	1,3	1,1
			4-16-4	1,4	1,2	1,2
			4-20-4	1,5	1,2	1,2
Τριπλή	Χωρίς επίστρωση χαμηλής εκπομπής. Συνήθεις υαλοπίνακες	0,89	4-6-4-6-4	2,3	2,1	1,8
			4-8-4-8-4	2,1	1,9	1,7
			4-12-4-12-4	1,9	1,8	1,6
	Με επίστρωση χαμηλής εκπομπής δύο φύλλων	$\leq 0,10$	4-6-4-6-4	1,7	1,3	1,0
			4-8-4-8-4	1,4	1,1	0,8
			4-12-4-12-4	1,1	0,9	0,6
	Με επίστρωση χαμηλής εκπομπής δύο φύλλων	$\leq 0,05$	4-6-4-6-4	1,6	1,2	0,9
			4-8-4-8-4	1,3	1,0	0,7
			4-12-4-12-4	1,0	0,8	0,5

Πίνακας 2.4: Τυπικές τιμές συντελεστών θερμοπερατότητας πλαισίου [6]

Υλικό πλαισίου	Χαρακτηριστικό πλαισίου	Συντελεστής θερμοπερατότητας πλαισίου U_f [$W/(m^2 \cdot K)$]
Μεταλλικό πλαίσιο	Χωρίς θερμοδιακοπή	7,0
	Με θερμοδιακοπή	1,0 - 4,0
Συνθετικό πλαίσιο	Πολυουρεθάνη	2,8
	PVC με δύο θαλάμους	2,2
	PVC με τρεις θαλάμους	2,0
	PVC πολυθαλαμικό	1,0 - 2,0
Ξύλινο πλαίσιο	Σκληρής ξυλείας μέσου πάχους πλαισίου - κάσας 5 cm	2,4
	Μαλακής ξυλείας μέσου πάχους πλαισίου - κάσας 5 cm	2,0
	Σκληρής ξυλείας μέσου πάχους πλαισίου - κάσας 10 cm	1,7
	Μαλακής ξυλείας μέσου πάχους πλαισίου - κάσας 10 cm	1,5

Πίνακας 2.5: Τυπικές τιμές γραμμικής θερμοπερατότητας Ψ_g στην συναρμογή πλαισίου - υαλοπίνακα για συνήθεις τύπους αποστάτη [6]

Τύπος πλαισίου	Γραμμική θερμοπερατότητα για διάφορους τύπους υαλοπινάκων Ψ_g [$W/(m \cdot K)$]	
	Διπλή ή τριπλή υάλωση	Διπλή με επίστρωση χαμηλής εκπομπής ενός φύλλου
	Χωρίς επίστρωση χαμηλής εκπομπής	Τριπλή υάλωση με επίστρωση χαμηλής εκπομπής δύο φύλλων
Μεταλλικό πλαίσιο χωρίς θερμοδιακοπή	0,02	0,05
Μεταλλικό πλαίσιο με θερμοδιακοπή	0,08	0,11
Συνθετικό πλαίσιο	0,06	0,08
Ξύλινο πλαίσιο	0,06	0,08

2.3 Χαρακτηριστικά δεδομένα λειτουργίας του κτιρίου (Activity tab DesignBuilder)

Τα χαρακτηριστικά δεδομένα λειτουργίας του κτιρίου που εισάγονται σε κάθε ζώνη επιλέγονται βάσει των σχετικών πινάκων της πιο πρόσφατης οδηγίας του TEE συνδυαστικά με κάποιες προεπιλογές του DesignBuilder οι οποίες επίσης ακολουθούν έγκυρα διεθνή πρότυπα (BS EN ISO).

Το δεδομένο λειτουργίας που εισάγεται αρχικά είναι η πληρότητα (occupancy) $\left[\frac{\text{άτομα}}{\text{m}^2}\right]$ κάθε χώρου, η οποία ουσιαστικά ορίζει πόσα άτομα εργάζονται στο κτίριο. Είναι ζωτικής σημασίας μιας και το φορτίο που προέρχεται από ανθρώπους είναι ουσιώδες τόσο για την θέρμανση όσο και για την ψύξη του χώρου. Στην περίπτωση του συγκεκριμένου κτιρίου γραφείων, επιλέγεται η τιμή $0,111 \frac{\text{άτομα}}{\text{m}^2}$. Μαζί με την πληρότητα, επιλέγεται και το ωράριο λειτουργίας κάθε ζώνης, δηλαδή πόσες και ποιες ώρες της ημέρας θα χρησιμοποιείται το κτίριο.

Στην συνέχεια, επιλέχθηκαν οι θερμοκρασίες [$^{\circ}\text{C}$] οι οποίες είναι επιθυμητό να διατηρούνται στον χώρο, ώστε να επιτυγχάνεται η θερμική άνεση των ατόμων στο κτίριο. Συγκεκριμένα, τόσο για την θέρμανση όσο και για την ψύξη του χώρου, ορίζονται οι setpoint θερμοκρασίες και οι setback θερμοκρασίες. Οι setpoint θερμοκρασίες είναι επί της ουσίας είναι οι θερμοκρασίες των θερμοστατών, δηλαδή οι ιδανικές θερμοκρασίες στις οποίες πρέπει να βρίσκεται ο χώρος. Από την άλλη, οι setback θερμοκρασίες σχετίζονται με το κατώτερο επίπεδο θέρμανσης (και αντίστοιχα ψύξης) που απαιτείται να διατηρείται στο κτίριο, ακόμη και σε περιόδους κατά τις οποίες δεν λειτουργεί ο χώρος, όπως για παράδειγμα κατά την διάρκεια την νύχτας. Αυτό επιλέγεται με στόχο να μην απαιτείται πολύ υψηλή θερμική ισχύς (και αντίστοιχα ψυκτική) όταν το κτίριο αρχίσει ξανά να λειτουργεί και να είναι πλήρες ατόμων, για παράδειγμα νωρίς το πρωί ή μετά από Σαββατοκύριακο.

Ορίστηκε επίσης το ελάχιστο επίπεδο του απαιτούμενου νωπού αέρα (minimum fresh air) $\left[\frac{\text{lt}}{\text{s}\cdot\text{άτομο}}\right]$ καθώς και η επιθυμητή ένταση φωτισμού (target illuminance) [lux], η οποία είναι της τάξης των 400 ως 500 lux για χώρους γραφείων. Τέλος, στην ίδια καρτέλα εισήχθη και η θερμική ισχύς του εξοπλισμού ανά μονάδα επιφάνειας του κτιρίου γραφείων (power density) $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right]$. Όλα τα παραπάνω μεγέθη ορίζονται ανάλογα με την χρήση της κάθε ζώνης του κτιρίου.

Στις παρακάτω **Εικόνες 2.17 και 2.18** παρατίθενται οι επιλεγμένες τιμές πρώτον για τις ζώνες που αφορούν χώρους γραφείων του κτιρίου και δεύτερον για τα μπάνια του κτιρίου:

Environmental Control	
Heating Setpoint Temperatures	
Heating (°C)	20,0
Heating set back (°C)	12,0
Cooling Setpoint Temperatures	
Cooling (°C)	25,0
Cooling set back (°C)	28,0
Heating Comfort PMV Setpoints	
Cooling Comfort PMV Setpoints	
Humidity Control	
Ventilation Setpoint Temperatures	
Minimum Fresh Air	
Fresh air (l/s-person)	10,000
Mech vent per area (l/s-m2)	0,000
CO2/Contaminant Setpoints	
Lighting	
Target Illuminance (lux)	400
Default display lighting density (W/m2)	0
Computers	
Office Equipment	
<input checked="" type="checkbox"/> On	
Power density (W/m2)	10,77
Schedule	Office_OpenOff_Equip
Radiant fraction	0,200

Εικόνα 2.17: Χαρακτηριστικά μεγέθη λειτουργίας για τις ζώνες γραφείων

Environmental Control	
Heating Setpoint Temperatures	
Heating (°C)	19,0
Heating set back (°C)	12,0
Cooling Setpoint Temperatures	
Cooling (°C)	26,0
Cooling set back (°C)	28,0
Heating Comfort PMV Setpoints	
Cooling Comfort PMV Setpoints	
Humidity Control	
Ventilation Setpoint Temperatures	
Minimum Fresh Air	
Fresh air (l/s-person)	12,000
Mech vent per area (l/s-m2)	0,000
CO2/Contaminant Setpoints	
Lighting	
Target Illuminance (lux)	200
Default display lighting density (W/m2)	0
Computers	
Office Equipment	
<input checked="" type="checkbox"/> On	
Power density (W/m2)	4,48
Schedule	Office_Toilet_Equip
Radiant fraction	0,200

Εικόνα 2.18: Χαρακτηριστικά μεγέθη λειτουργίας για τις ζώνες μπάνιων

2.4 Σύστημα Θέρμανσης και Ψύξης (HVAC tab DesignBuilder)

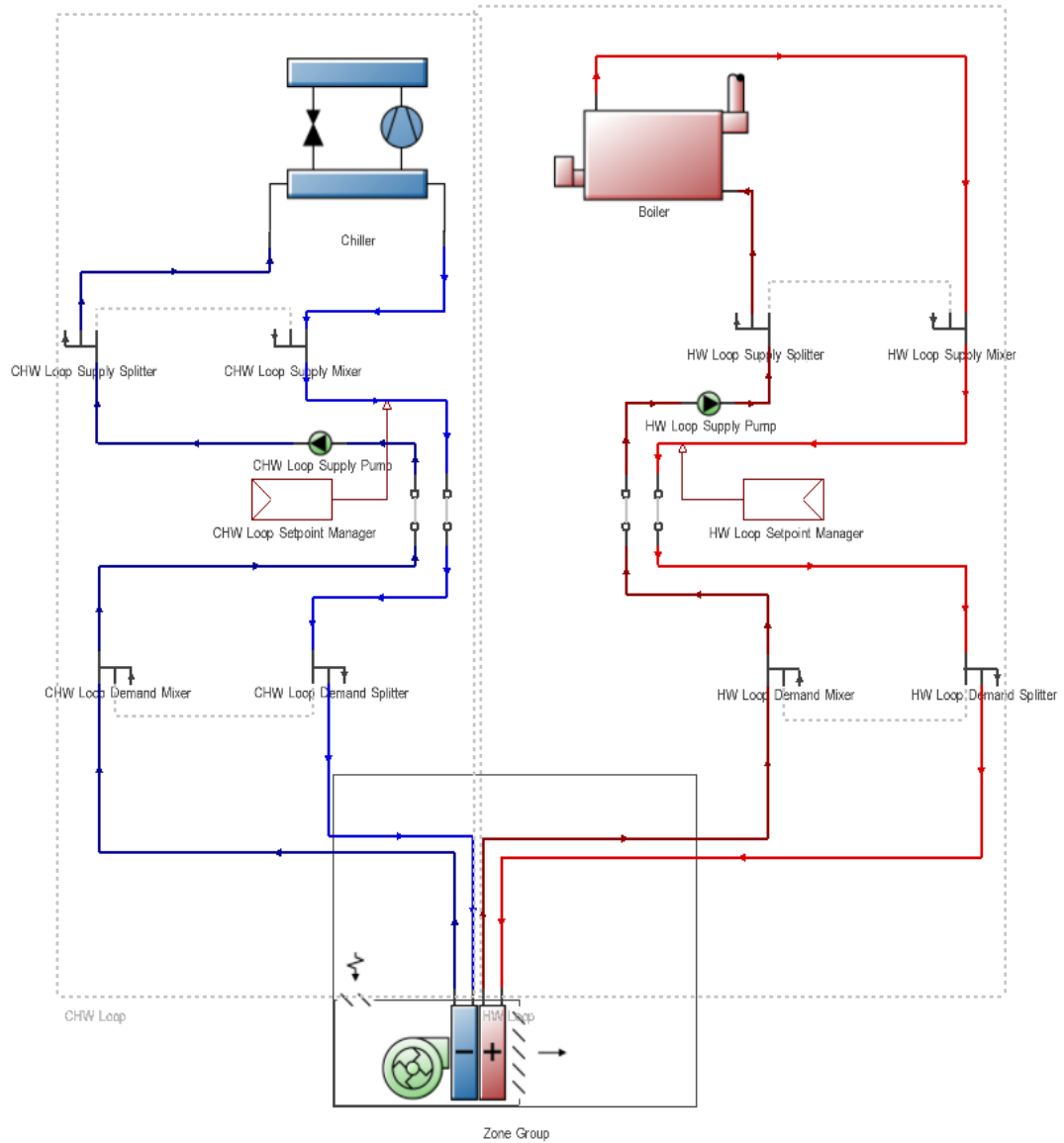
Στην παρούσα παράγραφο γίνεται αναφορά στα ενεργειακά συστήματα που χρησιμοποιούνται για την θέρμανση και την ψύξη του κτιρίου γραφείων. Όσον αναφορά την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, χρησιμοποιείται ένα ηλεκτρικό boiler του οποίου το ωράριο λειτουργίας δεν είναι σταθερό και κυμαίνεται από καθόλου έως μία ώρα μερικές μέρες του χειμώνα, μιας και στην πράξη λόγω του ότι το κτίριο αποτελεί επαγγελματικό και όχι οικιακό χώρο, οι απαιτήσεις για ζεστό νερό είναι ιδιαίτερα χαμηλές.

Καταδεικνύεται ο τρόπος με τον οποίον μοντελοποιήθηκε το HVAC (Heating, Ventilation And Air Conditioning) σύστημα του κτιρίου χρησιμοποιώντας τις εξειδικευμένες δυνατότητες της Detailed HVAC ρύθμισης του DesignBuilder.

Όπως αναφέρθηκε και εισαγωγικά, η συνολική επιφάνεια του κτιρίου είναι $700,16 \text{ m}^2$ όμως η συνολική επιφάνεια που θερμαίνεται/ψύχεται είναι $625,04 \text{ m}^2$ ($312,52 \text{ m}^2$ σε κάθε όροφο) καθώς ο χώρος που βρίσκεται το ασανσέρ και οι σκάλες είναι μην θερμαινόμενος – μη κλιματιζόμενος. Για αυτού του μεγέθους τον χώρο λοιπόν, το υπό μελέτη κτίριο γραφείων διαθέτει λέβητα (boiler) φυσικού αερίου και αερόψυκτο chiller για την θέρμανση και ψύξη αντίστοιχα, ενώ το δίκτυο διανομής αποτελούν διατάξεις ανεμιστήρα-στοιχείου (fan coils). Καθένα από αυτά τα μέρη θα αναλυθεί σε υποκεφάλαια ακολούθως.

2.4.1 Σύστημα Detailed HVAC για την υφιστάμενη κατάσταση του υπό μελέτη κτιρίου

Στην **Εικόνα 2.19** φαίνεται διαγραμματικά το σύστημα θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου, όπως αυτό προέκυψε κατά την Detailed HVAC σχεδίαση στο DesignBuilder.



Εικόνα 2.19: Μοντελοποίηση detailed HVAC για το υπό μελέτη κτίριο (Chilled Water Loop αριστερά και Hot Water Loop δεξιά)

Τα επιμέρους χαρακτηριστικά των δύο κύκλων του συστήματος παρατίθενται στις **Εικόνες 2.20 και 2.21** παρακάτω, οι οποίες ελήφθησαν από το περιβάλλον του DesignBuilder.

Plant loop

General | Plant Equipment Operation

General

Name: HW Loop

Fluid type: 1-Water

Plant loop volume (m3): Autocalculate

Flow Type

Plant loop flow type: 2-Variable flow

Temperature

Maximum loop temperature (°C): 100,00

Minimum loop temperature (°C): 10,00

Flow Rate

Maximum loop flow rate (m3/s): Autosize

Minimum loop flow rate (m3/s): 0,000000

Load distribution scheme: 1-Sequential

Plant loop demand calculation scheme: 1-SingleSetPoint

Sizing

Design loop exit temperature (°C): 80,00

Loop design temperature difference (deltaC): 10,00

Operation

Availability schedule: On 24/7

Outside Temperature Operation

Outside temperature operation

Εικόνα 2.20: Χαρακτηριστικά συστήματος θέρμανσης (Hot Water Loop) από Detailed HVAC

Plant loop

General | Plant Equipment Operation

General

Name: CHW Loop

Fluid type: 2-EthyleneGlycol

Glycol concentration: 0,250

Plant loop volume (m3): Autocalculate

Flow Type

Plant loop flow type: 2-Variable flow

Temperature

Maximum loop temperature (°C): 80,00

Minimum loop temperature (°C): 0,00

Flow Rate

Maximum loop flow rate (m3/s): Autosize

Minimum loop flow rate (m3/s): 0,000000

Load distribution scheme: 1-Sequential

Plant loop demand calculation scheme: 1-SingleSetPoint

Sizing

Design loop exit temperature (°C): 6,00

Loop design temperature difference (deltaC): 4,00

Operation

Availability schedule: On 24/7

Outside Temperature Operation

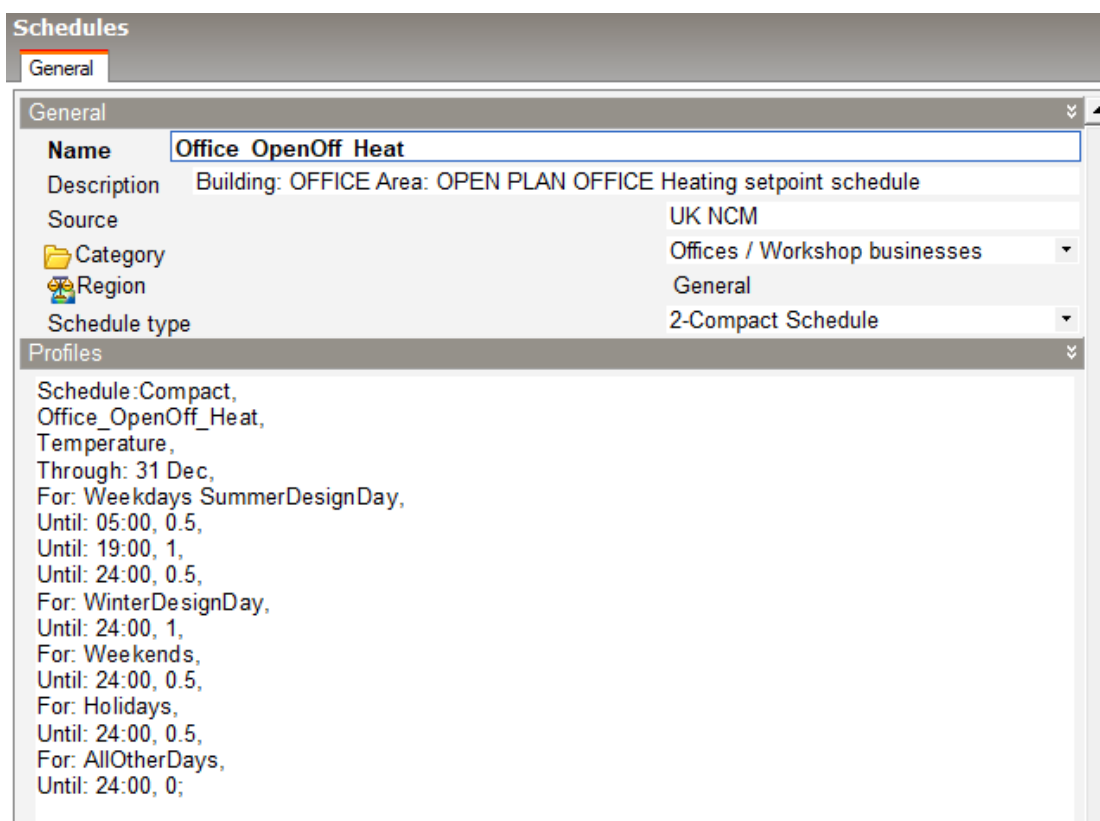
Outside temperature operation

Εικόνα 2.21: Χαρακτηριστικά συστήματος ψύξης (Chilled Water Loop) από Detailed HVAC

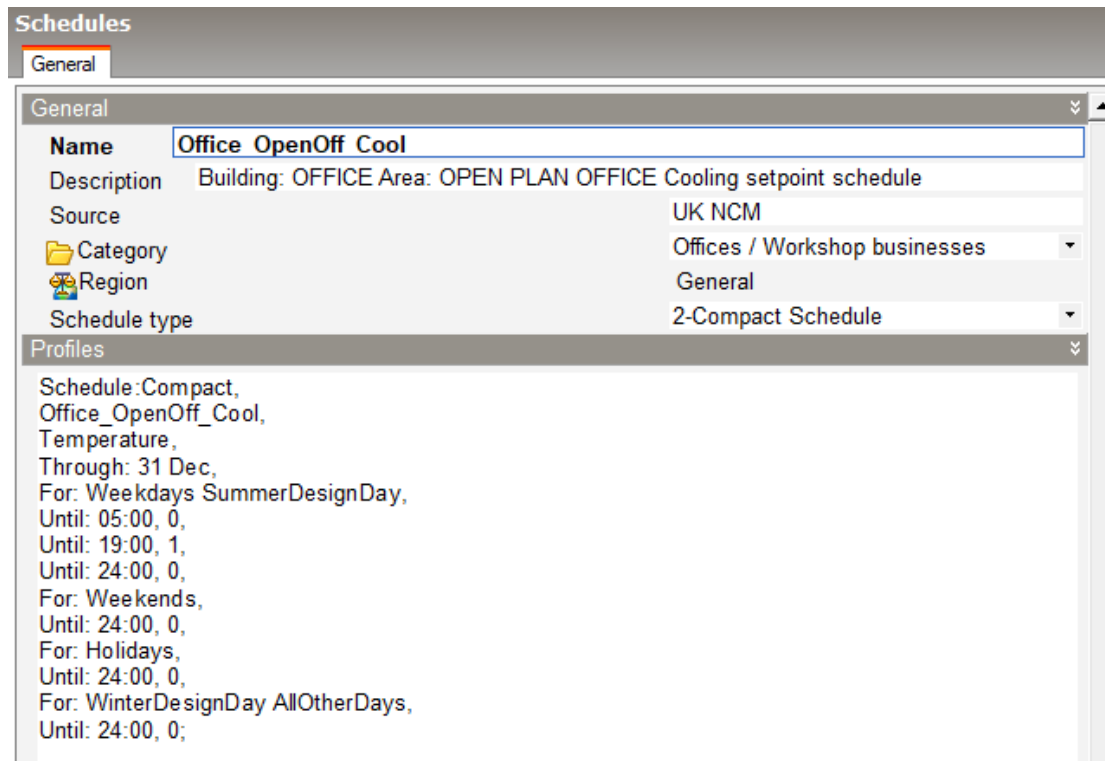
2.4.2 Πρόγραμμα λειτουργίας συστημάτων

Οι ακόλουθες **Εικόνες 2.22 και 2.23** αναπαριστούν τα προγράμματα λειτουργίας όπως αυτά εμφανίζονται στο περιβάλλον του DesignBuilder. Γενικά στις ρυθμίσεις του DesignBuilder ως προς τα προγράμματα λειτουργίας, οι δεκαδικές τιμές (από 0 έως 1) που λαμβάνονται μέσα στα schedules, ρυθμίζουν την διαθεσιμότητα των εκάστοτε συστημάτων στις προσομοιώσεις.

Στην προκειμένη περίπτωση αναφέρονται στα συστήματα θέρμανσης και ψύξης. Τιμές πάνω από 0 και μέχρι 0,5 υποδεικνύουν ότι το σύστημα είναι σε setback mode, δηλαδή ο εκάστοτε χώρος ρυθμίζεται στο κατώτερο ανεκτό επίπεδο θέρμανσης και ψύξης. Τιμές πάνω από 0,5 και έως 1 δείχνουν ότι το σύστημα είναι σε setpoint mode, δηλαδή σε πλήρη λειτουργία με τρόπο που οι θερμοκρασίες οι οποίες επιτυγχάνονται στους χώρους να είναι οι «ιδανικές» που έχουν οριστεί. Προφανώς η τιμή 0 καταδεικνύει πως το σύστημα δεν βρίσκεται σε λειτουργία για το συγκεκριμένο χρονικό εύρος στο οποίο η τιμή αυτή αντιστοιχεί. Αντίστοιχα λειτουργούν οι τιμές των schedules και για τις υπόλοιπες κατηγορίες, όπως ο φωτισμός και ο μηχανικός αερισμός.



Εικόνα 2.22: Πρόγραμμα λειτουργίας συστήματος θέρμανσης



Εικόνα 2.23: Πρόγραμμα λειτουργίας συστήματος ψύξης

2.4.3 Λέβητας

Λέβητας εν γένει ονομάζεται ένας σύνθετος εναλλάκτης μέσα στον οποίον η χημική ενέργεια του καυσίμου (υγρό, αέριο ή στερεό), μέσω της διαδικασίας της καύσης εντός του θαλάμου καύσης μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία παραλαμβάνεται κατά το δυνατόν από το εργαζόμενο μέσο (νερό) που ανακυκλοφορεί στο κλειστό δίκτυο που διαμορφώνει το σύστημα λέβητα-σωληνώσεων-θερμαντικών σωμάτων και εναλλάκτη [13]. Έτσι, οι λέβητες χρησιμοποιούνται σε συστήματα για την θέρμανση των χώρων και για την θέρμανση νερού χρήσης ή την παραγωγή ατμού.

Οι λέβητες διακρίνονται σε μαντεμένιους και χαλύβδινους όσον αφορά το υλικό κατασκευής τους και σε επιτοίχιους ή επιδαπέδιους όσον αφορά τον τρόπο σύνδεσης, ενώ τα τελευταία χρόνια έχει αναδειχθεί και μια νέα κατηγορία, οι λέβητες συμπύκνωσης, στους οποίους επιτυγχάνεται ανάκτηση θερμότητας από την συμπύκνωση των υδρατμών στα καυσαέρια [13]. Ειδικότερα, εδώ και επτά χρόνια, στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν τεθεί νομοθετικά ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης και εκπομπών ρύπων για τους λέβητες που έχουν οδηγήσει στην επικράτηση των λεβήτων με τεχνολογία συμπύκνωσης των καυσαερίων.

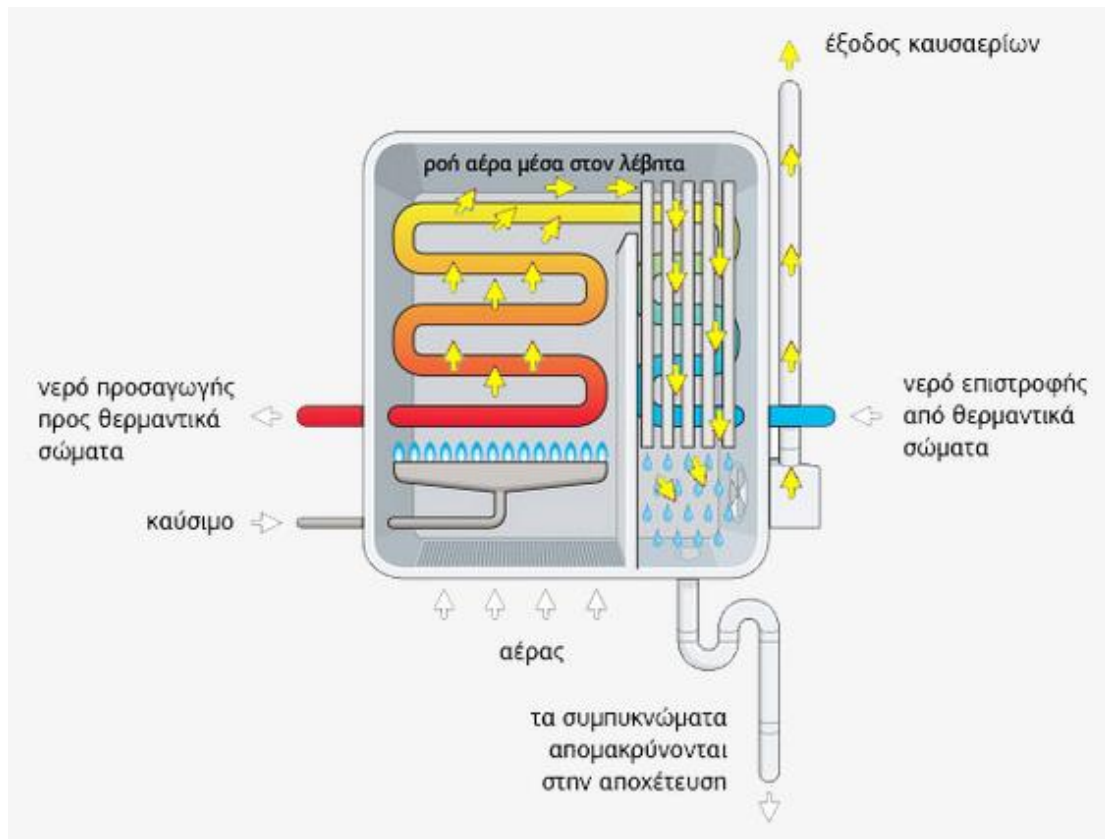
Οι μαντεμένιοι λέβητες είναι ιδιαίτερα ανθεκτικοί στην διάβρωση, επομένως έχουν πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής. Η μεταφορά τους είναι εύκολη καθώς γίνεται τμηματικά, ενώ η συναρμολόγησή τους γίνεται επί τόπου στο λεβητοστάσιο. Ταυτόχρονα όμως παρουσιάζουν υψηλή ευαισθησία στις απότομες αλλαγές της θερμοκρασίας. Από την

άλλη, οι χαλύβδινοι λέβητες είναι πιο ανθεκτικοί στις απότομες αλλαγές της θερμοκρασίας, πολύ ελαφρύτεροι και πολύ οικονομικότεροι σε σχέση με τους μαντεμένιους, ενώ η διάρκεια ζωής τους μπορεί να φτάσει έως και τα 30 χρόνια.

Οι επιδαπέδιοι λέβητες εφαρμόζονται σε όλα τα είδη κτιριακών εγκαταστάσεων καθώς απαιτούν ελάχιστη συντήρηση και ιδιαίτερα εύκολη εγκατάσταση. Διατίθενται δε, τόσο σε συμβατική μορφή, όσο και σε συμπύκνωσης. Από την άλλη, οι επιτοίχιοι λέβητες ενδείκνυνται περισσότερο για αυτόνομη θέρμανση σε πολυκατοικίες, αφού τοποθετούνται εύκολα στο μπαλκόνι (συχνότερα) με στόχο την ανεξαρτησία από τα έξοδα παγίου κεντρικής θέρμανσης.

Σε έναν κοινό λέβητα, το 10% της ισχύος από την καύση αποβάλλεται στο περιβάλλον μέσω της καμινάδας. Οι λέβητες συμπύκνωσης ωστόσο, αξιοποιούν ακριβώς αυτήν την ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη στους υδρατμούς των καυσαερίων, η οποία σε έναν κοινό λέβητα, θα αποβαλλόταν στο περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα οι λέβητες συμπύκνωσης (ή αλλιώς λέβητες συμπυκνωμάτων) είναι λέβητες υψηλής απόδοσης, οι οποίοι εκμεταλλεύονται έως και το 80% των καυσαερίων και την υψηλή θερμοκρασία τους [13]. Τα καυσαέρια αυτά συλλέγονται, ψύχονται και συμπυκνώνονται εντός του λέβητα μέσω ενός ειδικά σχεδιασμένου εναλλάκτη. Η βασική, λοιπόν, αρχή λειτουργίας των λεβήτων συμπύκνωσης είναι ότι τα καυσαέρια δεν οδηγούνται κατευθείαν στους καπναγωγούς αλλά περνούν μέσα από εναλλάκτη θερμότητας μέσα στον οποίον τα ζεστά καυσαέρια ανταλλάσσουν ενέργεια με το νερό που επιστρέφει από τα σώματα και κρυσταλλώνουν πριν οδηγηθούν στους καπναγωγούς [13]. Οι υγροποιήσεις των καυσαερίων συλλέγονται σε μια συνήθως ανοξείδωτη λεκάνη συλλογής και οδηγούνται στην αποχέτευση χωρίς να διαβρώνουν το λέβητα.

Στην παρακάτω **Εικόνα 2.23** καταδεικνύεται εποπτικά η λειτουργία ενός λέβητα συμπύκνωσης.



Εικόνα 2.24: Λέβητας συμπύκνωσης καυσαερίων [14]

Έτσι, με χρήση λέβητα συμπύκνωσης επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας από 15% έως 30% [14] σε σχέση με ένα συμβατικό λέβητα, ενώ παράλληλα τα καυσαέρια αποβάλλονται σε αισθητά χαμηλότερες θερμοκρασίες, συγκεκριμένα 80°C αντί για 150°C που ισχύει για έναν συμβατικό λέβητα [13]. Ταυτόχρονα εξασφαλίζεται χαμηλότερη κατανάλωση και μειωμένος ρυθμός εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Ακόμα ένα πλεονέκτημα της χρήσης της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι ο ηλεκτρονικά ελεγχόμενος ανεμιστήρας που διαθέτει, ο οποίος δίνει την δυνατότητα μεταβολής των στροφών και τροφοδότησης του λέβητα με την ακριβώς απαιτούμενη ποσότητα αέρα για την τέλεια καύση και την μεγαλύτερη απόδοση του. Σε κάθε περίπτωση η παροχή του αέρα είναι ιδιαίτερα σημαντική κατά την καύση του φυσικού αερίου. Ο αέρας είναι αναγκαίο να βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές 4% με 15%, ειδάλλως η φλόγα κιτρινίζει και ενδέχεται να γίνει τοξική [13].

Στο υπό μελέτη κτίριο έχει επιλεγεί λέβητας συμπύκνωσης που λειτουργεί με φυσικό αέριο και ο βαθμός απόδοσης του λέβητα λαμβάνεται ίσος με 0,89. Για την ονομαστική ισχύ του λέβητα, όπως και σε αντίστοιχα μηχανολογικά συστήματα στην συνέχεια της μελέτης, γίνεται χρήση της αυτόματης διαστασιολόγησης (Autosize) ώστε να ορισθεί η ονομαστική ισχύς άμεσα από το λογισμικό DesignBuilder.

Ακολούθως στην **Εικόνα 2.25** φαίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά του λέβητα.

Boiler	
Hot Water Boiler	
General	
Name	Boiler
🔥 Boiler template	Gas-fired condensing boiler
Fuel type	1-Natural gas
Nominal capacity (W)	Autosize
Boiler flow mode	3-Not modulated
Parasitic electric load (W)	25,000
Sizing factor	1,000
Efficiency	
Nominal thermal efficiency	0,890
Efficiency curve temperature evaluation variable	1-Leaving boiler
<input checked="" type="checkbox"/> Normalized boiler efficiency curve	CondensingBoilerEff
Water Outlet	
Design water flow rate (m3/s)	Autosize
Part Load Ratios	
Minimum part load ratio	0,000
Maximum part load ratio	1,000
Optimum part load ratio	1,000

Εικόνα 2.25: Χαρακτηριστικά λέβητα φυσικού αερίου στο detailed HVAC

2.4.4 Δίκτυο διανομής και τερματικά

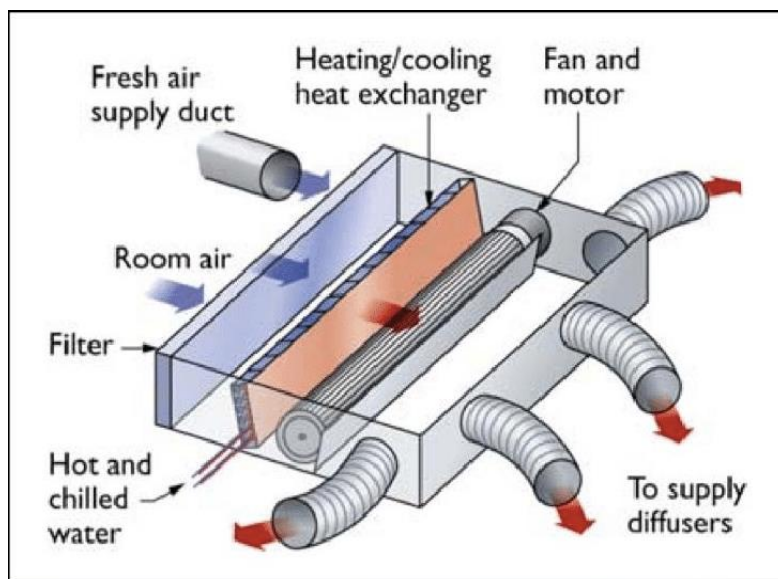
Όσον αφορά τα τερματικά του δικτύου διανομής, το εν λόγω κτίριο γραφείων είναι εξοπλισμένο στους θερμαινόμενους χώρους με διατάξεις ανεμιστήρα-στοιχείου ή αλλιώς fan coils. Οι μονάδες fan coil (Fan Coil Units, FCU) είναι εσωτερικές κλιματιστικές μονάδες θέρμανσης και ψύξης που έχουν στόχο να διατηρούν την βέλτιστη θερμοκρασία στον χώρο. Τα fan coils αλλιώς αναφέρονται ως σώματα βεβιασμένης κυκλοφορίας και μεταφέρουν την θερμότητα ή την ψύξη στους διάφορους χώρους μέσω της τροφοδοσίας τους με νερό, κατάλληλης θερμοκρασίας. Ονομάζονται έτσι, ακριβώς επειδή η λειτουργία τους βασίζεται στην εξαναγκασμένη κυκλοφορία του αέρα που δημιουργείται από τον ανεμιστήρα που διαθέτουν.

Αναλυτικότερα, κατά την λειτουργία ενός fan coil, αέρας από τον χώρο εισέρχεται με την βοήθεια του ανεμιστήρα μέσα στην συσκευή του fan coil και περνά από την περιοχή του θερμαντικού στοιχείου (στην περίπτωση θέρμανσης). Η περιοχή αυτή δρα ως ένας εναλλάκτης θερμότητας που στο ένα ρεύμα του διαθέτει το θερμό νερό που έρχεται από τον λέβητα και στο άλλο τον «ψυχρό» αέρα που έρχεται από τον προς θέρμανση χώρο [15]. Θερμότητα προσδίδεται στον αέρα και ύστερα αυτός εισέρχεται στον χώρο με στόχο την θέρμανση του κτιρίου. Αντίστοιχα στην περίπτωση ψύξης η διαδικασία είναι όμοια, με την διαφορά ότι ο αέρας του χώρου

περνά στο ψυκτικό στοιχείο του fan coil και έτσι εξερχόμενος από αυτό, ψύχει το κτίριο.

Ένας τρόπος καθορισμού του ρυθμού θέρμανσης ενός χώρου είναι η ρύθμιση μέσω της ταχύτητας περιστροφής του ανεμιστήρα του fan coil, η οποία με έναν τρόπο δρα σαν ένας τοπικός θερμοστάτης του εκάστοτε χώρου. Ουσιαστικά αυτό σημαίνει ότι ο ανεμιστήρας αναρροφά μεγαλύτερη παροχή μάζας όσο ταχύτερα στρέφεται και ως εκ τούτου η αύξηση της θερμοκρασίας του χώρου επιτυγχάνεται ταχύτερα.

Στην παρακάτω **Εικόνα 2.26** φαίνεται εποπτικά η λειτουργία ενός fan coil.



Εικόνα 2.26: Λειτουργία fan coil [15]

Εκτός από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα fan coils που χρησιμοποιούν ανεμιστήρες για την λειτουργία τους (για να επιβάλλουν την κυκλοφορία του αέρα), υπάρχουν και fan coils που δεν διαθέτουν ανεμιστήρα, αλλά χρησιμοποιούν την δύναμη της επαγωγής του εξωτερικού αέρα. Ομοίως, ο αέρας αναρροφάται, οδηγείται στον εναλλάκτη, θερμαίνεται/ψύχεται και στην συνέχεια διοχετεύεται στον χώρο.

Οι μονάδες fan coils κατηγοριοποιούνται σε διάφορους τύπους. Πρωτίστως ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής, όπου χωρίζονται σε δισωλήνια συστήματα (2-ripe) ή τετρασωλήνια συστήματα (4-ripe). Ένα fan coil δύο σωλήνων έχει μόνο έναν εναλλάκτη θερμότητας/ψύξης, οπότε ανάλογα με τις ανάγκες και την εποχή είτε θερμαίνει είτε ψύχει (απαιτεί εναλλαγή από ψύξη σε θέρμανση και από θέρμανση σε ψύξη) [16]. Από την άλλη, ένα fan coil τεσσάρων σωλήνων είναι μια μονάδα με δύο εναλλάκτες (ξεχωριστούς για θέρμανση και ψύξη) και μπορεί να λειτουργεί και με τις δύο λειτουργίες ταυτόχρονα. Τα τετρασωλήνια λοιπόν συστήματα επιτρέπουν την ταυτόχρονη ψύξη και θέρμανση διαφορετικών θερμικών ζωνών ενός κτιρίου, πράγμα που δεν είναι εφικτό στα δισωλήνια συστήματα [16].

Δευτερευόντως τα fan coils διακρίνονται ανάλογα με το αν έχουν κάλυμμα ή όχι, δηλαδή αν είναι εμφανή ή αν είναι κρυφού τύπου. Αυτό σχετίζεται άμεσα και με την τρίτη κατηγοριοποίηση, η οποία αφορά την εγκατάσταση των fan coils. Είναι δυνατή η επιτοίχια/επιδαπέδια εγκατάσταση (πάνω σε τοίχο ή στο έδαφος), όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.27**, έπειτα η ενδοδαπέδια εγκατάσταση όπου το fan coil είναι ενσωματωμένο σε ειδικό περίβλημα στο εσωτερικό του δαπέδου, κατόπιν η εγκατάσταση στην οροφή και τέλος η εγκατάσταση fan coil κρυφού τύπου, όπου γίνεται χρήση γυμνών μονάδων (χωρίς κάλυμμα) οι οποίες είτε κρύβονται σε ψευδοροφές είτε εγκιβωτίζονται [16]. Επιπλέον ως τέταρτη κατηγοριοποίηση, διακρίνονται ανάλογα και με την στατική πίεση, μιας και οι μονάδες κρυφής τοποθέτησης χωρίζονται σε χαμηλής, μεσαίας και υψηλής στατικής πίεσης [16]. Εφόσον κρύβονται σε ψευδοροφές, συνδέονται με αεραγωγούς για την καλύτερη κατανομή του θερμού ή ψυχρού αέρα στους χώρους. Έτσι λοιπόν, ανάλογα με τις διαστάσεις του αεραγωγού κρίνεται και η επιλογή της ανάλογης στατικής πίεσης της μονάδας.



Εικόνα 2.27: Επιδαπέδια διάταξη ανεμιστήρα-στοιχείου (fan coil) [17]

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης ενός τέτοιου συστήματος είναι ποικίλα, μιας και προσφέρει ευελιξία και εύκολο χειρισμό τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη. Η χαμηλή θερμική αδράνεια επιτρέπει την γρήγορη ρύθμιση της θερμοκρασίας του αέρα στις τρέχουσες ανάγκες, εξασφαλίζοντας θερμική άνεση όλο τον χρόνο. Επίσης, σε σχέση με τα συμβατικά θερμαντικά σώματα, με την χρήση fan coils εξοικονομείται χώρος χάρη στις μικρές τους διαστάσεις, ενώ ταυτόχρονα τα fan coils «διανέμουν» την θερμότητα στον χώρο μέσω του θερμού αέρα, σε αντίθεση με τα θερμαντικά σώματα που μεταφέρουν θερμότητα μόνο δια συναγωγής (μέσω των επιφανειών των σωμάτων).

Παράλληλα παρέχεται τόσο θέρμανση όσο και ψύξη στον χώρο με την χρήση του ίδιου θερμαντικού, ενώ είναι φιλικότερα και προς το περιβάλλον σε σύγκριση με ένα

κλιματιστικό, καθώς θερμαίνουν και ψύχουν τον αέρα χρησιμοποιώντας νερό και όχι ψυκτικά υγρά. Ζωτικής σημασίας είναι και η θερμοκρασιακή αυτονομία που προσφέρουν τα fan coils για τον κάθε χώρο ξεχωριστά, με την χρήση του θερμοστάτη και της τρίοδης βάννας που υπάρχουν σε κάθε ένα fan coil [16]. Το πιο σημαντικό θετικό στοιχείο όσον αφορά την χρήση fan coils είναι το ότι εργάζονται επαρκώς ακόμα και με νερό χαμηλότερης θερμοκρασίας (μεταξύ 35°C και 50°C), κι έτσι επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου στον λέβητα. Θέμα θορύβου δεν υφίσταται καθώς όλα τα νέα fan coils στην μικρή ταχύτητα παράγουν ελάχιστο θόρυβο (decibel) [17].

2.4.5 Αερόψυκτος ψύκτης (chiller)

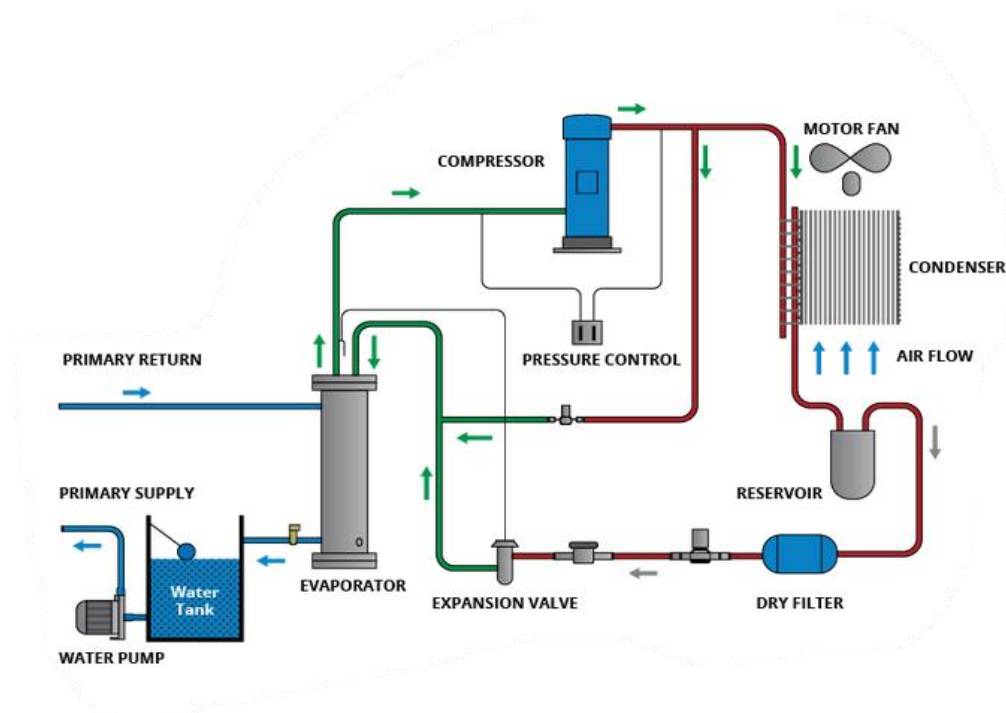
Οι ψύκτες είναι συσκευές που αναλαμβάνουν την απόρριψη της θερμότητας από έναν χώρο που χρειάζεται κλιματισμό. Υπάρχουν δύο βασικά είδη ψυκτών: οι υδρόψυκτοι και οι αερόψυκτοι. Δουλεύουν με παρόμοιο τρόπο για το μεγαλύτερο μέρος της διαδικασίας μέχρι το ψυκτικό ρευστό να φτάσει στον συμπυκνωτή. Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικά η λειτουργία ενός αερόψυκτου ψύκτη, όπως είναι αυτός που χρησιμοποιείται στο υπό μελέτη κτίριο.

Οι αερόψυκτοι ψύκτες χρησιμοποιούνται ευρέως σε μικρούς και μεσαίους εμπορικούς χώρους ή χώρους γραφείων και συνήθως είναι τοποθετημένοι εξωτερικά, είτε στην στέγη, είτε στο επίπεδο του εδάφους [18]. Αυτό συμβαίνει διότι οι ψύκτες αυτοί δεν χρησιμοποιούν πύργους ψύξης, αλλά αντ' αυτού απορρίπτουν την θερμότητα στον περιβάλλοντα αέρα, επομένως απαιτούν πρόσβαση σε μεγάλη ποσότητα νωπού αέρα, ούτως ώστε να διοχετεύουν εκεί την απορριπτόμενη θερμότητα από το κτίριο.

Ένα τέτοιο chiller παράγει νερό χαμηλής θερμοκρασίας το οποίο διοχετεύεται στο κτίριο μέσω των μονάδων διαχείρισης αέρα (Air Handling Units – AHU) και των fan coils. Το ψυχρό νερό εισέρχεται στα fan coils σε θερμοκρασία περίπου 6°C, μέσα στον εναλλάκτη θερμότητας εντός του fan coil φτάνει περίπου του 12°C και κατόπιν οδηγείται ξανά στο chiller όπου απορρίπτει στην θερμότητα στον ατμοσφαιρικό αέρα [18]. Ο ίδιος κύκλος επαναλαμβάνεται διαρκώς.

Το chiller διαθέτει τέσσερα κύρια τμήματα: τον ατμοποιητή (evaporator), τον συμπιεστή (compressor), τον συμπυκνωτή (condenser) και την εκτονωτική βαλβίδα (expansion valve). Το «θερμό» νερό που επιστρέφει στο chiller εισέρχεται μόνο στον ατμοποιητή, όπου διανέμεται ανάμεσα σε σωλήνες που περιέχουν το ψυκτικό ρευστό και γίνεται συναλλαγή θερμότητας μεταξύ των δύο ρευστών σε μορφή εναλλάκτη αντιρροής. Το μόνο ρευστό που μετακινείται στα υπόλοιπα επιμέρους τμήματα του chiller είναι το ψυκτικό υγρό, το οποίο καθώς μετακινείται αλλάζει πίεση, θερμοκρασία, ενθαλπία και εντροπία και μεταφέρει την μη χρήσιμη θερμότητα από το νερό του ατμοποιητή. [18]

Στην **Εικόνα 2.28** φαίνονται τα μέρη και η λειτουργία ενός αερόψυκτου chiller.



Εικόνα 2.28: Λειτουργία air cooled chiller [19]

Αναλυτικότερα, η ψυκτική διαδικασία ξεκινάει όταν το «θερμό» νερό εισέρχεται στον ατμοποιητή όπου θερμότητα μεταφέρεται από το νερό στο ψυκτικό. Το, μειωμένης πλέον θερμοκρασίας, «κρύο» νερό στέλνεται στην δεξαμενή νερού (μέσω primary supply) όπου και κατανέμεται στους διαφόρους κλιματιζόμενους χώρους από την αντλία νερού. Το νερό χαμηλής θερμοκρασίας αυτό, απορροφά την θερμότητα του αέρα περιβάλλοντος του κλιματιζόμενου χώρου και στην συνέχεια ένας ανεμιστήρας διοχετεύει τον κρύο αέρα στον χώρο μέσω του δικτύου αεραγωγών. Το «θερμό» νερό στην πορεία επιστρέφει στον ατμοποιητή (μέσω primary return) για να επαναληφθεί η διαδικασία και ψυχθεί εκ νέου [19].

Ως προς την διαδρομή του ψυκτικού ρευστού, αυτό αρχικά εισέρχεται στον ατμοποιητή σε μεταλλικούς σωλήνες οι οποίοι περιβάλλονται από κρύο νερό. Όταν εξέλθει από τον ατμοποιητή, έχει λάβει την θερμότητα από το νερό και βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμένου ατμού με χαμηλή πίεση και θερμοκρασία. Στην συνέχεια, το ψυκτικό ρευστό εισέρχεται στον συμπιεστή από τον οποίον, κατόπιν της συμπίεσης, εξέρχεται με υψηλή πίεση και θερμοκρασία στην μορφή υπέρθερμου ατμού. Έπειτα εισέρχεται στον συμπυκνωτή σε μεταλλικούς σωλήνες, όπου υγροποιείται αποβάλλοντας την θερμότητά του στον περιβάλλοντα εξωτερικό αέρα, ο οποίος είναι το μέσο συμπύκνωσης και διοχετεύεται μέσα στον συμπυκνωτή από ανεμιστήρα. Όταν εξέλθει από τον συμπυκνωτή, το ψυκτικό έχει υψηλή πίεση και θερμοκρασία και είναι πλέον κορεσμένο υγρό. Τέλος, το ψυκτικό εισέρχεται εντός της εκτονωτικής

βαλβίδας, η οποία επί της ουσίας ρυθμίζει την παροχή του ψυκτικού στο όλο σύστημα. Εκεί εκτονώνεται, γίνεται μείγμα υγρού-ατμού και εξέρχεται με χαμηλότερη πίεση και θερμοκρασία. Έτσι το ψυκτικό, με την θερμοκρασία και την πίεση που έχει αποκτήσει μετά την εκτόνωσή του, εισέρχεται ξανά στον ατμοποιητή, από όπου η όλη διαδικασία ξεκινά εκ νέου. [18] [19]

Όσον αφορά, λοιπόν, την ψύξη του κτιρίου, τα fan coils συνδέονται με ένα σύστημα αερόψυκτου ψύκτη νερού (air cooled chiller). Το Coefficient of Performance (COP) του chiller λαμβάνεται ίσο με 5,5 .

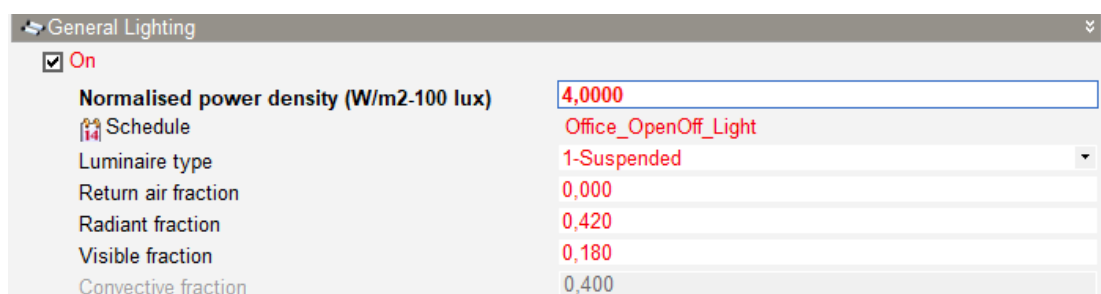
Ακολούθως στην **Εικόνα 2.29** φαίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά του chiller.

Chiller	
Chiller	
General	
Name	Chiller
Chiller template	Air Cooled Default
Chiller type	2-Electric EIR
Reference capacity (W)	Autosize
Reference COP (-)	5,500
Compressor motor efficiency	1,000
Chiller flow mode	3-Not modulated
Sizing factor	1,000
Condenser	
Condenser type	1-Air cooled
Condenser fan power ratio	0,035
Temperatures	
Reference leaving chilled water temperature (°C)	6,670
Reference entering condenser fluid temperature (°C)	29,400
Leaving chilled water temperature limit (°C)	5,000
Flow Rates	
Reference chilled water flow rate (m3/s)	Autosize
Performance Curves	
<input checked="" type="checkbox"/> Cooling capacity function of temperature curve	Air cooled CentCapFT
<input checked="" type="checkbox"/> Electric input to cooling output ratio function of temperature curve	Air cooled CentEIRFT
<input checked="" type="checkbox"/> Electric input to cooling output ratio function of part load ratio c...	Air cooled CentEIRFPLR
Part Load Settings	
Minimum part load ratio	0,100
Maximum part load ratio	1,000
Optimum part load ratio	1,000
Minimum unloading ratio	0,100

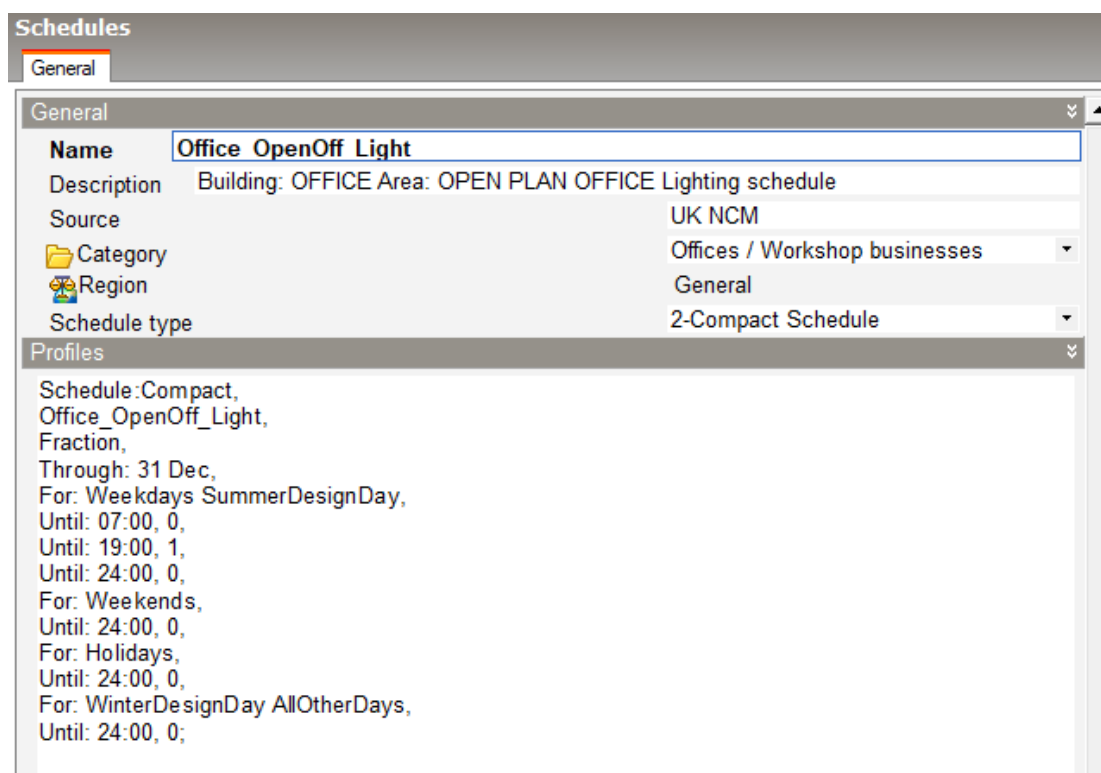
Εικόνα 2.29: Χαρακτηριστικά chiller στο detailed HVAC

2.5 Φωτισμός (Lighting tab DesignBuilder)

Εν συνεχεία, ορίστηκαν οι παράμετροι που σχετίζονται με τον φωτισμό του κτιρίου, ο οποίος δίνει αρκετά σημαντικά θερμικά φορτία. Το κτίριο διαθέτει λαμπτήρες τύπου CFL (Compact Fluorescent Lamp), δηλαδή συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού. Οι λαμπτήρες CFL, σε αντίθεση με τον γραμμικό σχεδιασμό των απλών λαμπτήρων φθορισμού, έχουν συνήθως σπειροειδές σχήμα και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής [20]. Βάσει του τύπου του κτιρίου καθώς και της χρήσης της εκάστοτε ζώνης επιλέχθηκε η πυκνότητα ισχύος φωτισμού ανά μονάδα επιφάνειας (normalised power density) σε $\left[\frac{W}{m^2 \cdot 100lux}\right]$. Η πυκνότητα ισχύος αυτή για κάθε ζώνη πολλαπλασιάζεται με την επιθυμητή ένταση φωτισμού και έτσι προκύπτει η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος για φωτισμό σε $\left[\frac{W}{m^2}\right]$. Στις παρακάτω **Εικόνες 2.30 και 2.31** καταδεικνύονται οι ρυθμίσεις φωτισμού για το υπό μελέτη κτίριο:



Εικόνα 2.30: Χαρακτηριστικά μεγέθη για τον φωτισμό με λαμπτήρες CFL



Εικόνα 2.31: Πρόγραμμα λειτουργίας φωτισμού κτιρίου

Όπως καταδεικνύεται παραπάνω στην **Εικόνα 2.30**, τα φώτα το κτιρίου είναι ανοιχτά κάθε μέρα, πλην Σαββατοκύριακων και διακοπών, από τις 7 το πρωί ως τις 7 το απόγευμα. Μοντελοποιούνται κατ' αυτόν τον τρόπο για ασφάλεια, ωστόσο στην πράξη οι ώρες λειτουργίας τους είναι ελαφρώς λιγότερες, γιατί δεν γίνεται χρήση τους αν τα επίπεδα φυσικού φωτισμού είναι πάνω από τα αποδεκτά επίπεδα άνεσης.

Μετά την προσομοίωση του κτιρίου, όπου αξιολογούνται οι ενεργειακές καταναλώσεις που σχετίζονται με τον φωτισμό, κρίνεται σκόπιμο να αντικατασταθούν οι λαμπτήρες με ενεργειακά πιο αποδοτικό τύπο και συγκεκριμένα με LED (Light-Emitting Diode).

2.6 Αεροστεγανότητα (Airtightness)

Αεροστεγανότητα ονομάζεται ο βαθμός διαφυγής ή διείσδυσης αέρα που έχει ένα κτίριο. Οι τιμές αεροστεγανότητας αναφέρονται συνολικά στο κτίριο και συμπεριλαμβάνουν τις διαφυγές αέρα τόσο από τα κουφώματα (θέσεις συναρμογής με τα περιμετρικά δομικά στοιχεία και θέσεις επαφής των σταθερών πλαισίων με τα κινητά φύλλα), όσο και από άλλες διόδους του κτιρίου (π.χ. αρμούς). Η αεροστεγανότητα τυπικά μετριέται σε εναλλαγές αέρα ανά ώρα $\left[\frac{ac}{h}\right]$ και κατά κανόνα όσο μικρότερη είναι η αεροστεγανότητα, τόσο καλύτερα για την ενεργειακή κατάσταση του κτιρίου [5]. Στην προκειμένη περίπτωση, η αεροστεγανότητα του κτιρίου ορίζεται στις $0,7 \frac{\text{εναλλαγές}}{h}$.

Ο συνολικός στόχος όσον αφορά την κατασκευή ενός αεροστεγούς κτιρίου, σχετίζεται με την εξάλειψη της ανεξέλεγκτης ροής αέρα από ανεπιθύμητες ή αόρατες χαραμάδες, μέσω των ειδικά σχεδιασμένων συστημάτων μηχανικού αερισμού.

Η ελάχιστη αναγκαία ποσότητα νωπού αέρα για τον άνθρωπο ανέρχεται σε $1,8 \frac{m^3}{h}$. Για να απομακρυνθούν επιβλαβείς ουσίες και οσμές οι ανάγκες τελικά ανέρχονται σε $30 \frac{m^3}{h}$ για κάθε άτομο [5]. Σαφώς, αναλόγως με την περίπτωση, για την απομάκρυνση της υγρασίας, απαιτούνται ακόμα μεγαλύτερες ποσότητες.

2.7 Μηχανικός Αερισμός (Mechanical Ventilation)

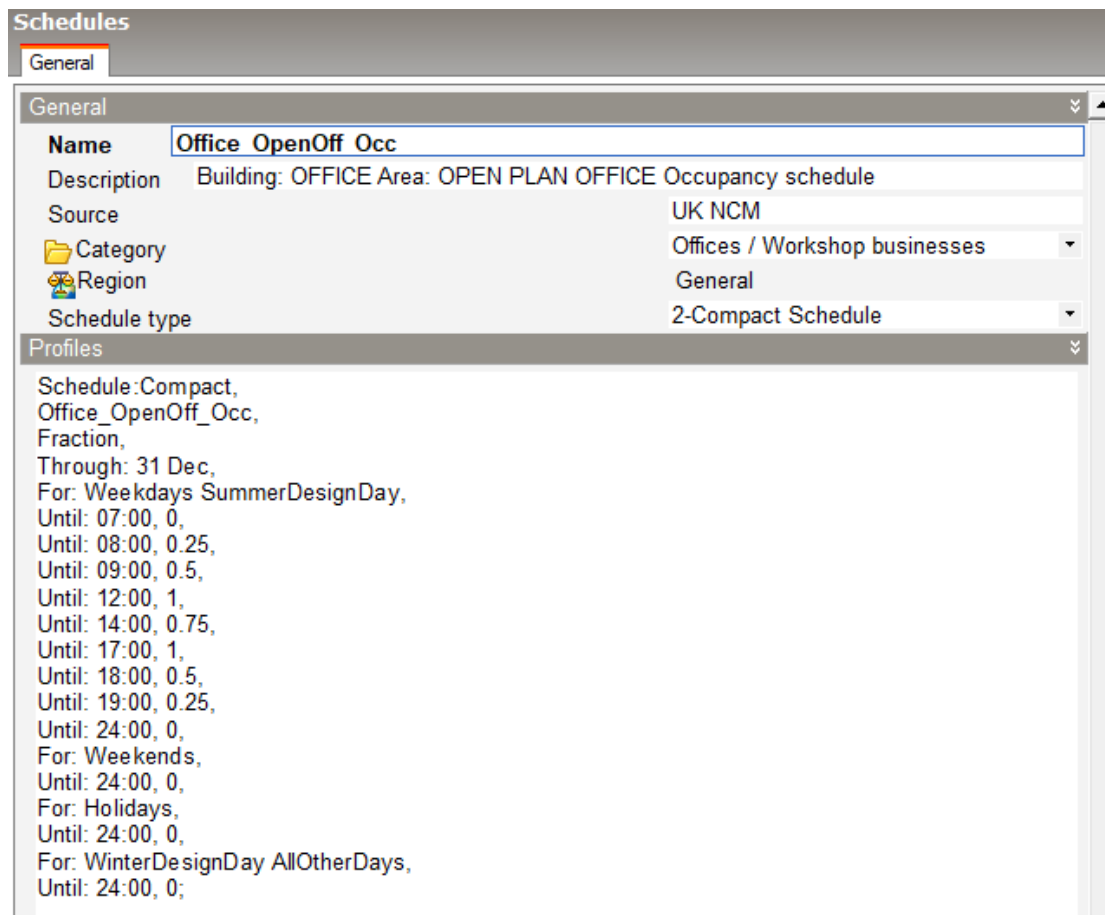
Στο υπό μελέτη κτίριο γραφείων υφίσταται μηχανικός αερισμός (mechanical ventilation) με ανάκτηση θερμότητας, ο οποίος ορίζεται βάσει της πληρότητας του κάθε χώρου συνδυαστικά με την ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα νωπού αέρα. Για τον μηχανικό αερισμό ακολουθείται ένα πρόγραμμα λειτουργίας (schedule) ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τις ανάγκες κάθε ζώνης του κτιρίου.

Ο εξαερισμός στοχεύει στην ρύθμιση του επιπέδου της σχετικής υγρασίας του χώρου και στην διατήρησή της σε ανεκτά πλαίσια για τον άνθρωπο ανάλογα πάντα με την θερμοκρασία που επικρατεί στον χώρο. Σε γενικές γραμμές, κατά την καλοκαιρινή περίοδο η σχετική υγρασία είναι θεμιτό να είναι κοντά στο 45%, ενώ κατά την χειμερινή περίοδο κοντά στο 40%. Τα συστήματα μηχανικού αερισμού ανάκτησης θερμότητας, όπως αυτό του κτιρίου, επιτυγχάνουν βαθμούς απόδοσης που φτάνουν ακόμη και το 90% [21], αποτελώντας την πιο αξιόπιστη ενεργειακή πρόταση για παροχή φρέσκου αέρα στα κτίρια, απαλλαγμένου από ρύπους και για διατήρηση του επιθυμητού επιπέδου σχετικής υγρασίας στους χώρους.

Πιο συγκεκριμένα, στα συμβατικά συστήματα μηχανικού εξαερισμού, μέρος του αέρα του εσωτερικού χώρου που κλιματίζεται απλώς αποβάλλεται στο εξωτερικό περιβάλλον και ο χώρος ανανεώνεται με φρέσκο αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον. Αντιθέτως, στα συστήματα μηχανικού εξαερισμού με ανάκτηση θερμότητας αξιοποιείται κατάλληλα η ενέργεια του ήδη κλιματισμένου αέρα, προτού αυτός απορριφθεί. Ειδικότερα, μια μονάδα αερισμού ανάκτησης θερμότητας αποτελείται από δύο ανεμιστήρες υψηλής ενεργειακής απόδοσης, έναν ειδικό εναλλάκτη αέρα-αέρα, ένα φίλτρο νωπού αέρα και φυσικά έναν ελεγκτή. Το σύστημα απαγάγει τον αέρα και την υγρασία από τους βοηθητικούς χώρους του κτιρίου (π.χ. μπάνια) μέσω δικτύου αεραγωγού και ο αέρας, αφού πρώτα περάσει μέσα από τον ειδικό εναλλάκτη, απορρίπτεται στο περιβάλλον. Παράλληλα, μέσω ενός παράλληλου δικτύου αεραγωγών εισέρχεται νωπός αέρας στον εναλλάκτη, αφού πρώτα φιλτραριστεί και τα δύο ρεύματα αέρα εκεί διασταυρώνονται. Τότε, ο φρέσκος αέρας, χωρίς να έρθει σε επαφή με τον ήδη κλιματισμένο αέρα που επιδιώκεται να απορριφθεί, ανακτά μέρος της ενέργειάς του και εισέρχεται προ-κλιματισμένος στους κύριους εσωτερικούς χώρους (π.χ. δωμάτια). Έμμεσα μέσω ανοιγμάτων ο φρέσκος προ-κλιματισμένος αέρας καταλήγει και στους βοηθητικούς χώρους του κτιρίου. [21]

Τα συστήματα μηχανικού εξαερισμού με ανάκτηση έχουν την δυνατότητα να ρυθμίσουν την θερμοκρασία του αέρα, ενώ πολλά μπορούν να ρυθμίσουν και την υγρασία μέσω κατάλληλων εναλλακτών. Επίσης, διαθέτουν σύστημα bypass όπου επιτρέπεται η εισαγωγή φρέσκου δροσερού αέρα κατά την θερινή περίοδο, τις ώρες που η εξωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από την εσωτερική (πρωί ή βράδυ) [21].

Στην **Εικόνα 2.32** παρατίθεται το πρόγραμμα λειτουργίας του μηχανικού αερισμού του υπό μελέτη κτιρίου.



Εικόνα 2.32: Πρόγραμμα λειτουργίας μηχανικού αερισμού κτιρίου

2.8 Θερμογέφυρες

Ως θερμογέφυρες χαρακτηρίζονται τα επιμέρους τμήματα ή σημεία του εξωτερικού κελύφους του κτιρίου, η θερμική αντίσταση των οποίων υπολείπεται σημαντικά της αντίστασης των δομικών στοιχείων του υπόλοιπου περιβλήματος. Στις θέσεις των θερμογεφυρών, η θερμομονωτική προστασία παρουσιάζεται μειωμένη και οι ροές θερμότητας δυσανάλογα αυξημένες συγκριτικά με τις ροές θερμότητας στο υπόλοιπο κέλυφος, μιας και το δομικό στοιχείο στα συγκεκριμένα σημεία εμφανίζει περιορισμένη θερμική προστασία [9]. Για την ακρίβεια ο συντελεστής θερμοπερατότητας στην θέση της θερμογέφυρας αποκλίνει της τιμής που παρουσιάζεται στο υπόλοιπο δομικό στοιχείο ή στα γειτονικά του. Η δημιουργία θερμογέφυρας μπορεί να προκληθεί από κατασκευαστικές αδυναμίες, αστοχίες υλικών ή κατασκευής, κακοτεχνίες, αμέλεια και παραλείψεις, καθώς και φθορές οφειλόμενες στο πέρασμα του χρόνου. Σε γενικές γραμμές οι συνηθέστερες περιπτώσεις θερμογεφυρών οφείλονται [9]:

- Σε κατασκευαστικούς λόγους που καθιστούν δυσχερή ή πρακτικά αδύνατη την θερμομονωτική προστασία της κατασκευής
- Στην αλλαγή της σύνθεσης ή των στρώσεων ενός φαινομενικά ενιαίου δομικού στοιχείου
- Στην διακοπή της συνέχειας της θερμομονωτικής στρώσης σε κάποια θέση του εξωτερικού περιβλήματος
- Στην απουσία θερμομονωτικής στρώσης ή στην μείωση του πάχους της
- Σε ορισμένα σημεία συνάντησης δύο κάθετων μεταξύ τους δομικών στοιχείων, των οποίων η πλήρης θερμομονωτική προστασία είναι δυσχερής ή πρακτικά ανέφικτη.

Οι θερμογέφυρες ακριβώς επειδή αποτελούν τα ασθενή σημεία του κτιριακού περιβλήματος και λειτουργούν επιβαρυντικά στην θερμική του προστασία, επηρεάζουν την ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου και επιφέρουν μείωση της αίσθησης της θερμικής άνεσης στον εσωτερικό χώρο καθώς και αύξηση των θερμικών απωλειών. Συχνά καταλήγουν να είναι πρόξενοι ποικίλων φθορών, ενίοτε επουσιωδών, κατά το πλείστον όμως επικίνδυνων. Οι περισσότερες φθορές οφείλονται στην επιφανειακή συμπύκνωση των υδρατμών, λόγω της πτώσης της επιφανειακής θερμοκρασίας των δομικών στοιχείων [9]. Η εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία στην θέση μιας θερμογέφυρας είναι χαμηλότερη αυτής των περιμετρικών της θέσεων και τείνει να πλησιάσει την εξωτερική θερμοκρασία.

Ανάλογα με την κατασκευή και λειτουργία του κτιρίου, τις εξωτερικές κλιματολογικές συνθήκες και την γενικότερη έκθεση του κελύφους, οι απώλειες από τις θερμογέφυρες μπορεί να αντιπροσωπεύει το 5 ως και το 30% των συνολικών θερμικών απωλειών του κτιρίου [9]. Ως εκ τούτου, αποτελεί ζωτικής σημασίας ζήτημα η ελαχιστοποίηση των θερμογεφυρών κατά τον σχεδιασμό ή την ανακαίνιση ενός κτιρίου. Στο σημείο αυτό, ωστόσο, αξίζει να διευκρινιστεί ότι πρακτικά είναι από πολύ δύσκολο ως αδύνατο να υπάρξει συμβατική κατασκευή που να μην παρουσιάζει σε κανένα σημείο του κελύφους της θερμογέφυρες. Σε ορισμένες περιπτώσεις, μάλιστα, η αποφυγή τους καθίσταται οικονομικά ασύμφορη, μιας και το όφελος από την εξάλειψή τους είναι δυσανάλογα μικρό σε σχέση με την συνθετότητα και το κόστος των λύσεων για την αντιμετώπισή τους. Έτσι, η πρόληψη και η αντιμετώπισή τους πρέπει να γίνεται στον πλαίσιο του εφικτού με στόχο τον περιορισμό των θερμικών απωλειών στο ελάχιστο.

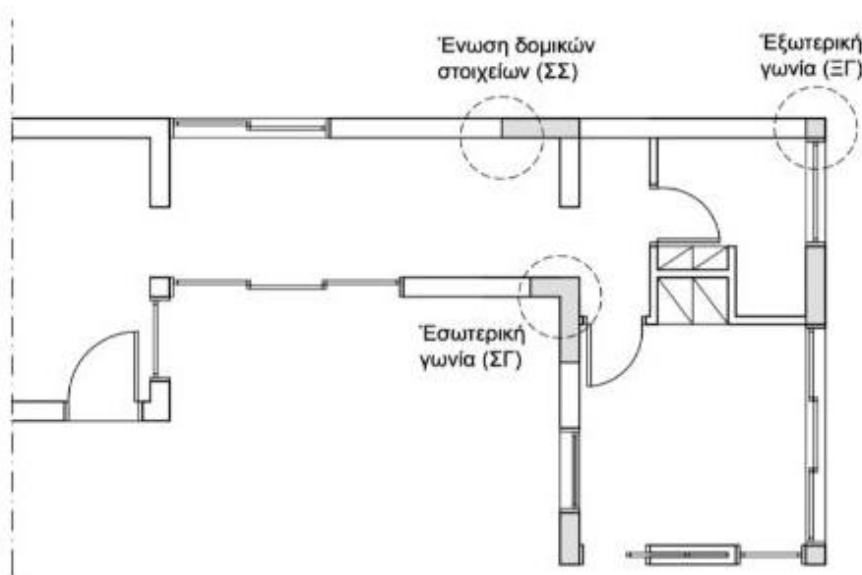
Στην βιβλιογραφία [9] οι θερμογέφυρες διακρίνονται σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες:

- Στις οριζόντιες θερμογέφυρες, οι οποίες εμφανίζονται στην συναρμογή των οριζόντιων δομικών στοιχείων με τα κατακόρυφα και εντοπίζονται στις τομές του κτιρίου. Δεδομένου ότι η κύρια διάστασή τους αναπτύσσεται κατά μήκος των δομικών στοιχείων, το μήκος τους μετράται με βάση τα σχέδια των κατόψεων.

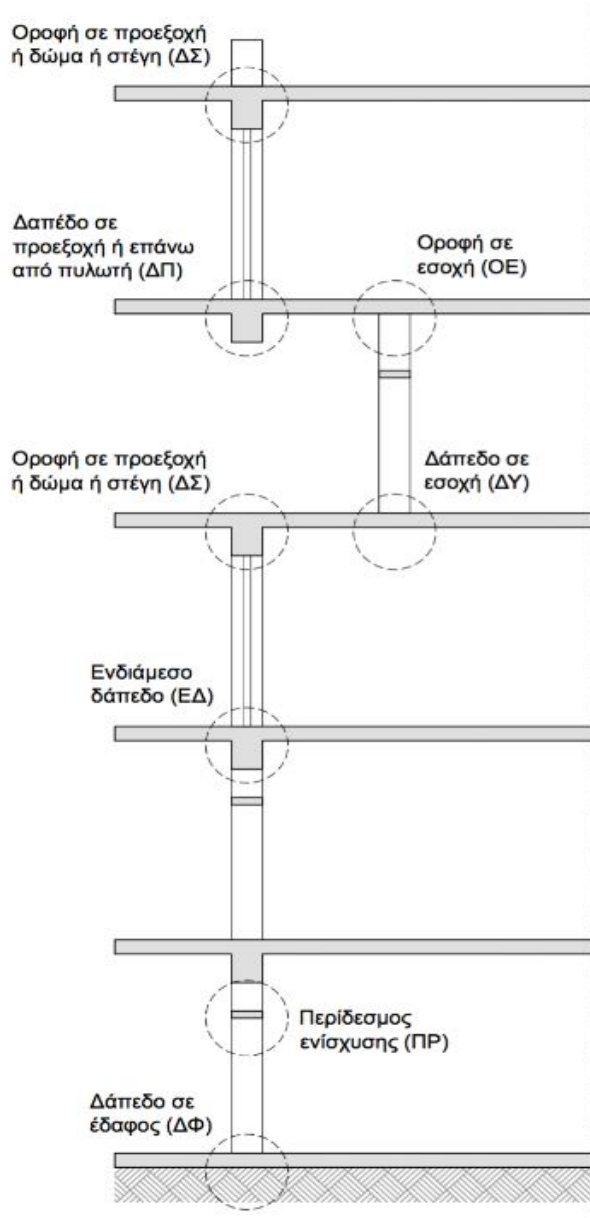
- Στις κατακόρυφες θερμογέφυρες, οι οποίες εμφανίζονται στην συναρμογή των κατακόρυφων δομικών στοιχείων και εντοπίζονται στις κατόψεις του κτιρίου. Δεδομένου ότι η κύρια διάστασή τους αναπτύσσεται καθ' ύψος, το μήκος τους μετράται με βάση τα σχέδια των τομών.
- Στις θερμογέφυρες των κουφωμάτων, οι οποίες εμφανίζονται στην περίμετρο συναρμογής των κουφωμάτων με τα στοιχεία της τοιχοποιίας. Το μήκος τους ισοδυναμεί με το μήκος της περιμέτρου του ανοίγματος.

Επίσης, μια δευτερεύουσα κατάταξη [9] χωρίζει τις θερμογέφυρες σε γραμμικές και σε σημειακές. Οι γραμμικές θερμογέφυρες, εμφανίζονται κατά μήκος μιας επιφάνειας, δηλαδή σε μια διεύθυνση, στην οποία συνενώνονται διάφορα δομικά στοιχεία ή ίδια δομικά στοιχεία διαφορετικού πάχους (διεπιφάνεια). Παραδείγματα τέτοιων θερμογεφυρών αποτελούν οι ενώσεις δαπέδων με κάθετα στοιχεία ή οι ενώσεις δοκών ή υποστυλωμάτων με οπτοπλινθοδομή. Από την άλλη, οι σημειακές θερμογέφυρες, εμφανίζονται τοπικά σε ένα σημείο και δεν υπάρχει ομοιογενής ροή θερμότητας κατά μήκος μιας διεύθυνσης, όπως στις γραμμικές. Σημειακές θερμογέφυρες εμφανίζονται κυρίως σε γωνιακές κατασκευές.

Παρακάτω στις **Εικόνες 2.33 και 2.34** παρατίθενται εποπτικά κάποιες περιπτώσεις θερμογεφυρών για ένα κτίριο.



Εικόνα 2.33: Χαρακτηριστικές περιπτώσεις κατακόρυφων θερμογεφυρών [22]



Εικόνα 2.34: Χαρακτηριστικές περιπτώσεις οριζόντιων θερμογεφυρών [22]

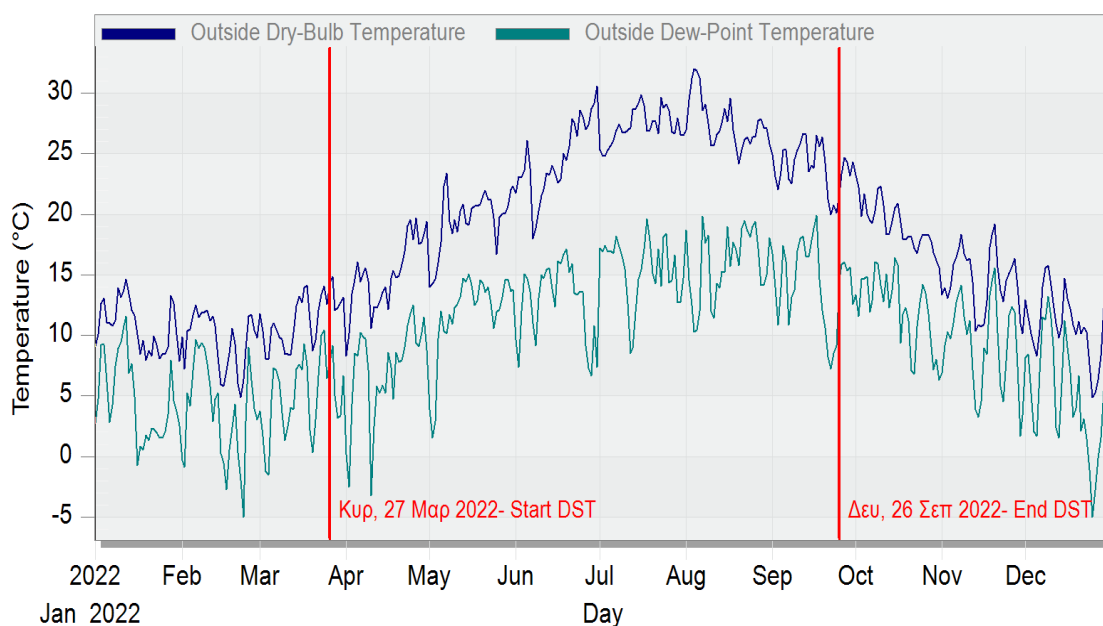
Κεφάλαιο 3: Προσομοίωση υφιστάμενης κατάστασης κτιρίου και αποτελέσματα στο DesignBuilder

Όλα τα στοιχεία που αφορούν την υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου και τα οποία αναλύθηκαν παραπάνω, εισήχθησαν στο λογισμικό και έτσι πραγματοποιήθηκε ενεργειακή προσομοίωση του κτιρίου μέσα από το λογισμικό DesignBuilder. Η προσομοίωση, η οποία γίνεται μέσω του EnergyPlus, χρονικά αφορά διάστημα ενός έτους (συγκεκριμένα για το τρέχον έτος 2022) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο.

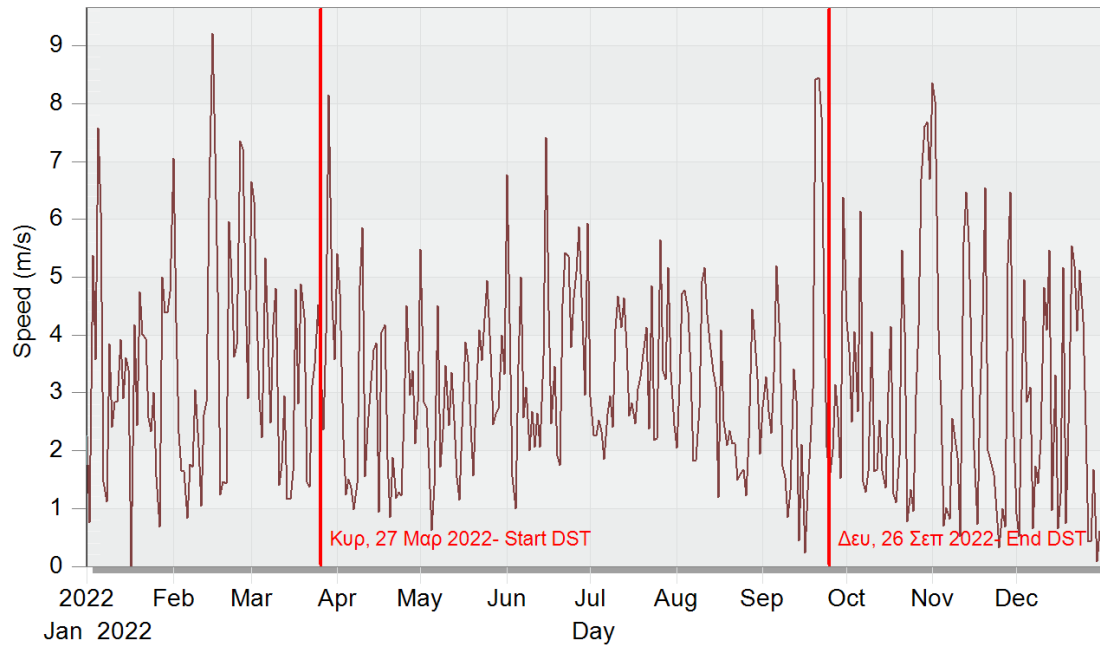
Όπως θα φανεί και από τα παρακάτω αριθμητικά αποτελέσματα, αναγκαία κρίνεται η ενεργειακή αναμόρφωση του υπό μελέτη κτιρίου και η υιοθέτηση παρεμβάσεων με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας, στα πλαίσια της πορείας προς την επίτευξη του θετικού ενεργειακού ισοζυγίου. Κάθε παρέμβαση εξοικονόμησης που προτείνεται και υιοθετείται, αναλύεται ξεχωριστά στο **κεφάλαιο 4**.

3.1 Αποτελέσματα και διαγράμματα προσομοίωσης της υφιστάμενης κατάστασης

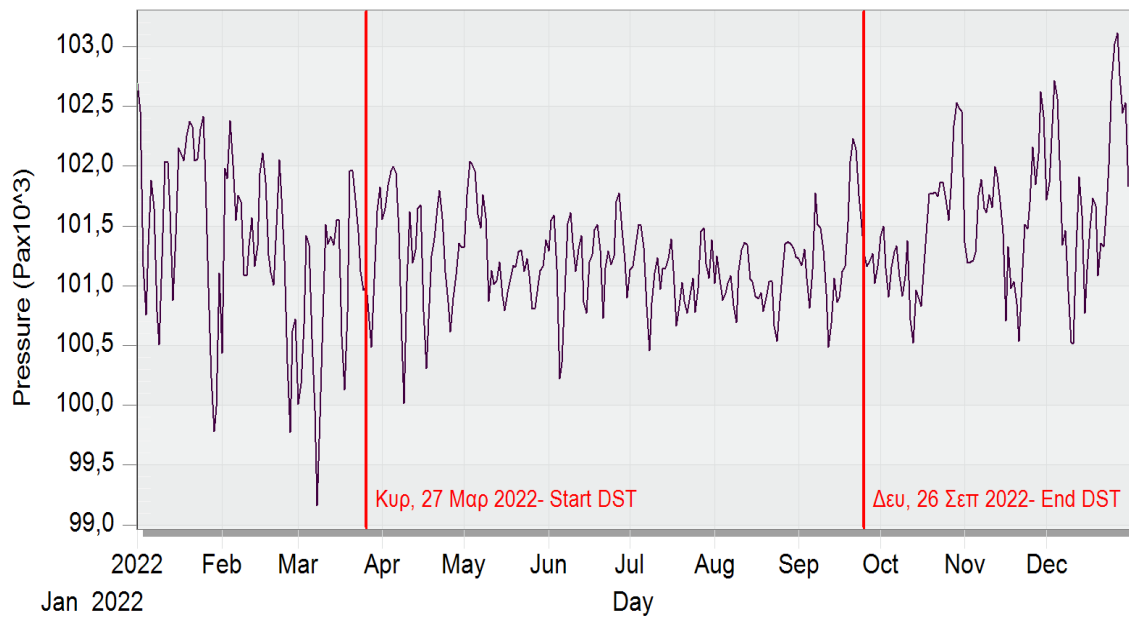
Στο σημείο αυτό, λοιπόν, εκτίθενται κάποια βασικά αποτελέσματα που συλλέχθηκαν κατόπιν της προσομοίωσης. Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται κατά τη σειρά τα μεγέθη που σχετίζονται με την τοποθεσία του κτιρίου και τις εξωτερικές κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή αυτή.



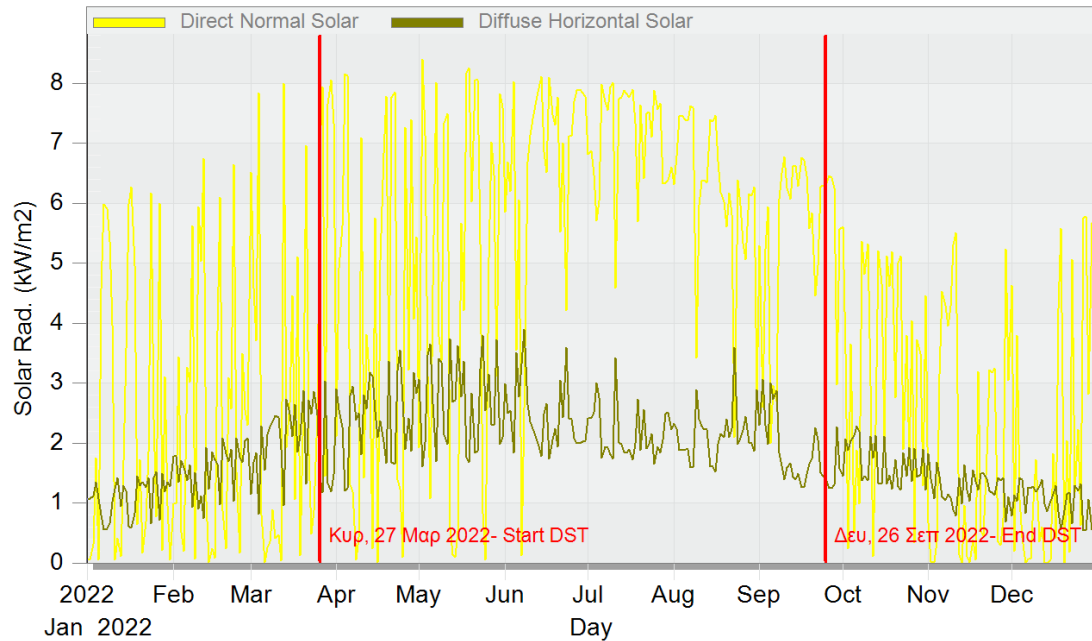
Διάγραμμα 3.1: Εξωτερική Θερμοκρασία Ξηρού Βολβού ανά ημέρα του έτους και Εξωτερική Θερμοκρασία Σημείου Δρόσου ανά ημέρα του έτους



Διάγραμμα 3.2: Ταχύτητα ανέμου ανά ημέρα του έτους

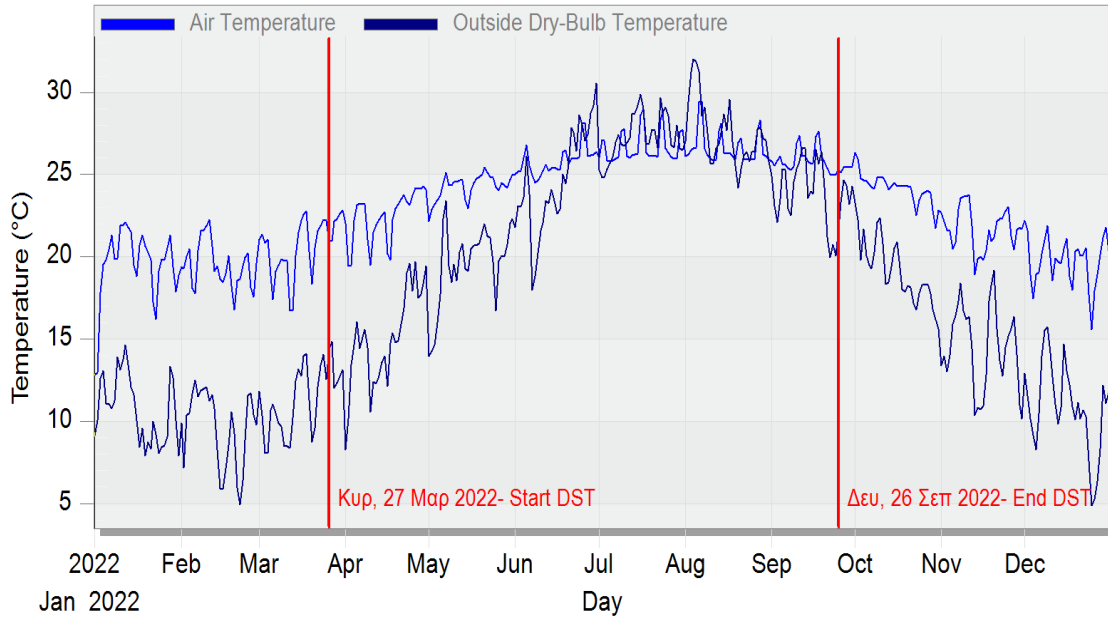


Διάγραμμα 3.3: Ατμοσφαιρική πίεση ανά ημέρα του έτους

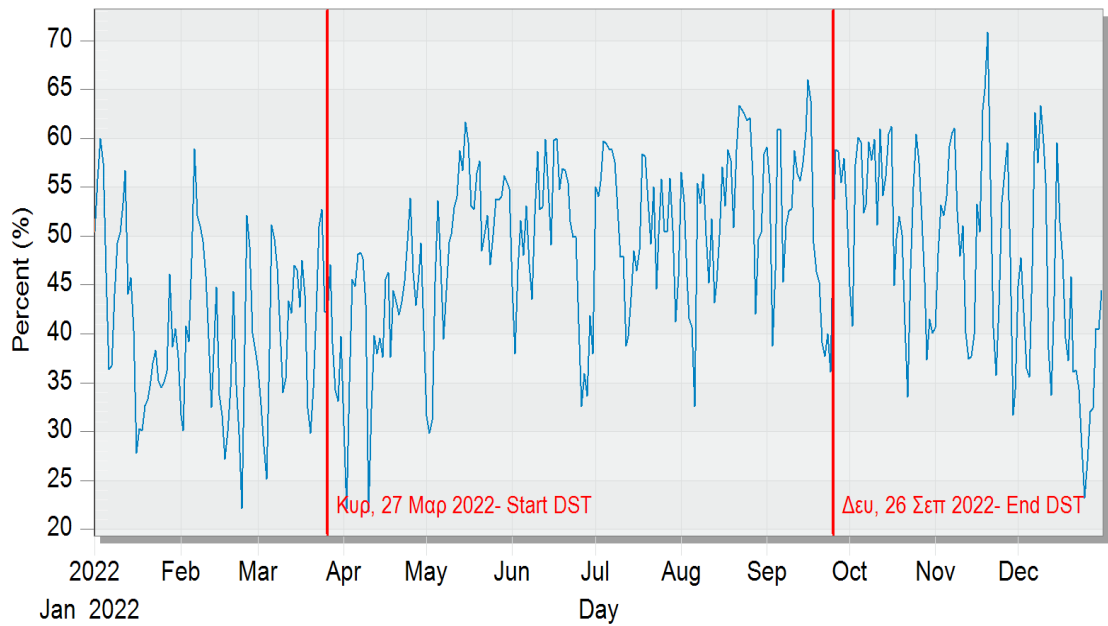


Διάγραμμα 3.4: Άμεση Ηλιακή Ακτινοβολία ανά ημέρα του έτους και Διάχυτη Οριζόντια Ηλιακή Ακτινοβολία ανά ημέρα του έτους

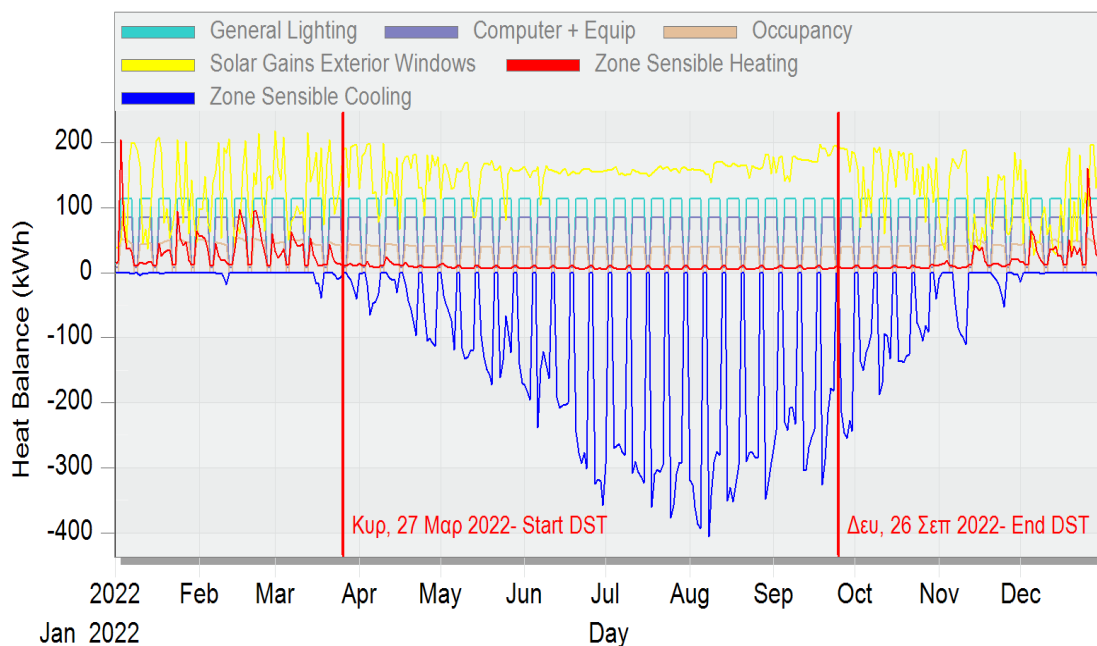
Στην συνέχεια παρατίθενται τα **Διαγράμματα 3.5 και 3.6** που καταδεικνύουν τις εσωτερικές συνθήκες που επικρατούν στο υπό μελέτη κτίριο όσον αφορά την θερμοκρασία και την σχετική υγρασία. Όσον αφορά την εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου, παρατηρείται ότι κυμαίνεται, καθ' όλη την διάρκεια του έτους, μεταξύ των τιμών που ορίστηκαν ως set back temperatures για την θέρμανση και για την ψύξη του κτιρίου αντίστοιχα. Ακολούθως παρουσιάζεται στο **Διάγραμμα 3.7** το ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου, δηλαδή τα θερμικά κέρδη και οι θερμικές απώλειες του κτιρίου ανάλογα με την κάθε ενεργειακή κατηγορία που το αφορά.



Διάγραμμα 3.5: Εσωτερική Θερμοκρασία Κτιρίου ανά ημέρα του έτους σε σύγκριση με την Εξωτερική Θερμοκρασία Περιβάλλοντος ανά ημέρα του έτους

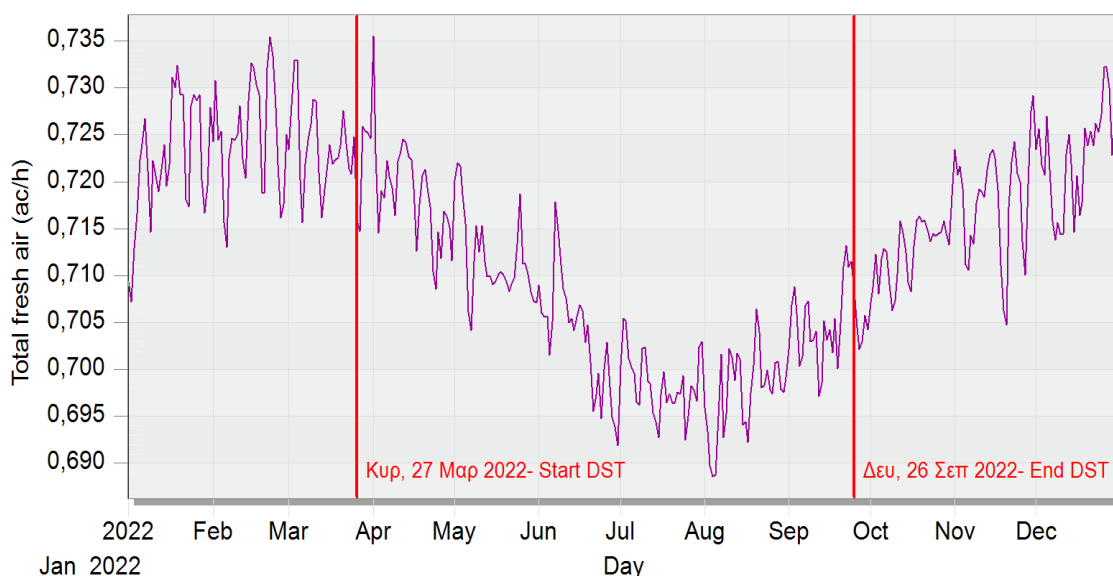


Διάγραμμα 3.6: Σχετική Υγρασία (%) εντός του κτιρίου ανά ημέρα του έτους



Διάγραμμα 3.7: Ενεργειακό Ισοζύγιο του κτιρίου ανά ημέρα του έτους ανάλογα με τις βασικές κατηγορίες που προκαλούν ενεργειακά φορτία

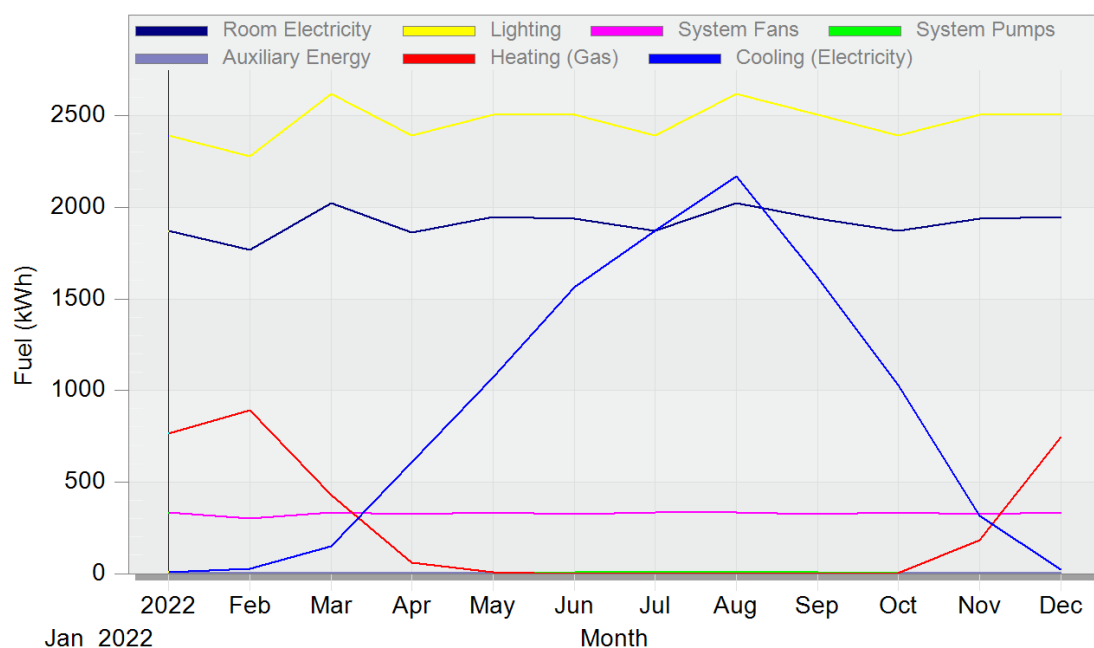
Κατόπιν παρατίθεται το **Διάγραμμα 3.8** που σχετίζεται την αεροστεγανότητα του κελύφους του κτιρίου, στο οποίο φαίνονται οι εναλλαγές αέρα ανά ώρα λόγω φυσικού και μηχανικού αερισμού καθώς και λόγω εξωτερικής διείσδυσης αέρα (infiltration). Παρατηρείται ότι οι εναλλαγές αέρα διατηρούνται καθ' όλη την διάρκεια του έτους στο επίπεδο που ορίστηκε για το μοντέλο, συγκεκριμένα κυμαίνονται από 0,689 μέχρι 0,736 εναλλαγές ανά ώρα.



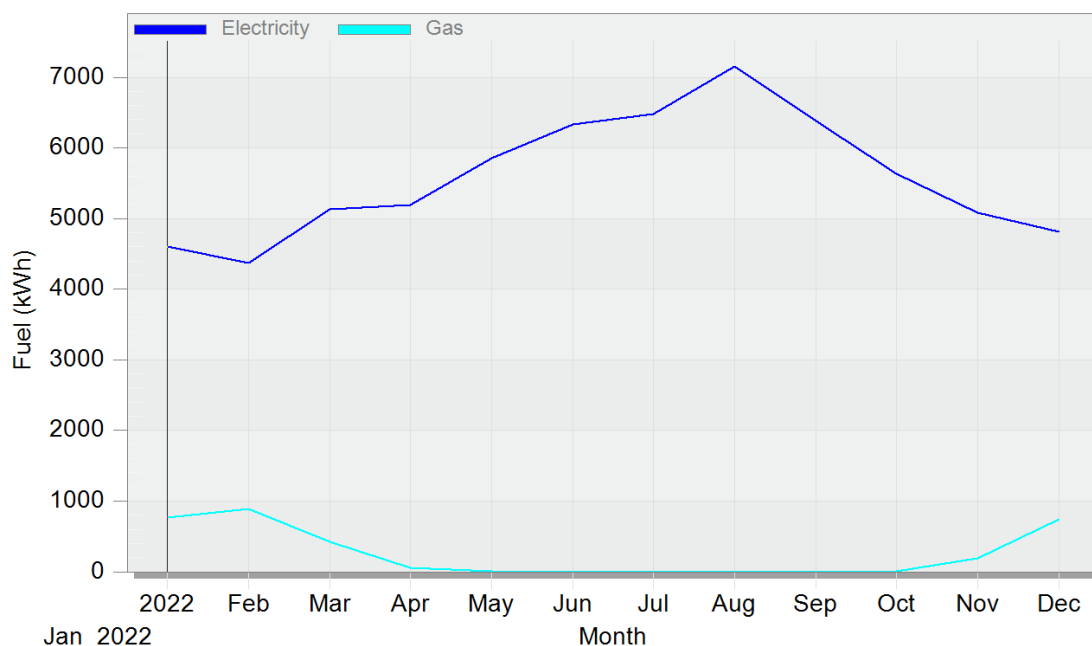
Διάγραμμα 3.8: Εναλλαγές αέρα ανά ώρα για κάθε μέρα του έτους

Τα αποτελέσματα από εδώ και πέρα παρατίθενται όχι σε ημερήσια αλλά σε μηνιαία βάση για το έτος κατά το οποίο έτρεξε η προσομοίωση με στόχο την καλύτερη εποπτεία της συνολικής πορείας των καμπυλών, ασχέτως επιμέρους διακυμάνσεων από μέρα σε μέρα.

Στα παρακάτω **Διάγραμμα 3.9** φαίνονται οι τιμές των καταναλώσεων των εκάστοτε καυσίμων ανά κατηγορία για κάθε μήνα του έτους της προσομοίωσης, ενώ στο αμέσως επόμενο καταδεικνύονται οι συνολικές καταναλώσεις ηλεκτρικού ρεύματος και φυσικού αερίου για το κτίριο. Από παρατήρηση των επιμέρους καμπυλών και σύγκριση μεταξύ των τιμών τους, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι τιμές που αφορούν τον φωτισμό των χώρων (lighting – κίτρινη καμπύλη στο διάγραμμα) είναι ιδιαίτερα υψηλές, επομένως καθίσταται αναγκαία η βελτίωση της ενεργειακής κατάστασης που σχετίζεται με τον φωτισμό του κτιρίου. Στο ζήτημα αυτό θα γίνει εκτενής αναφορά σε επόμενο κεφάλαιο.



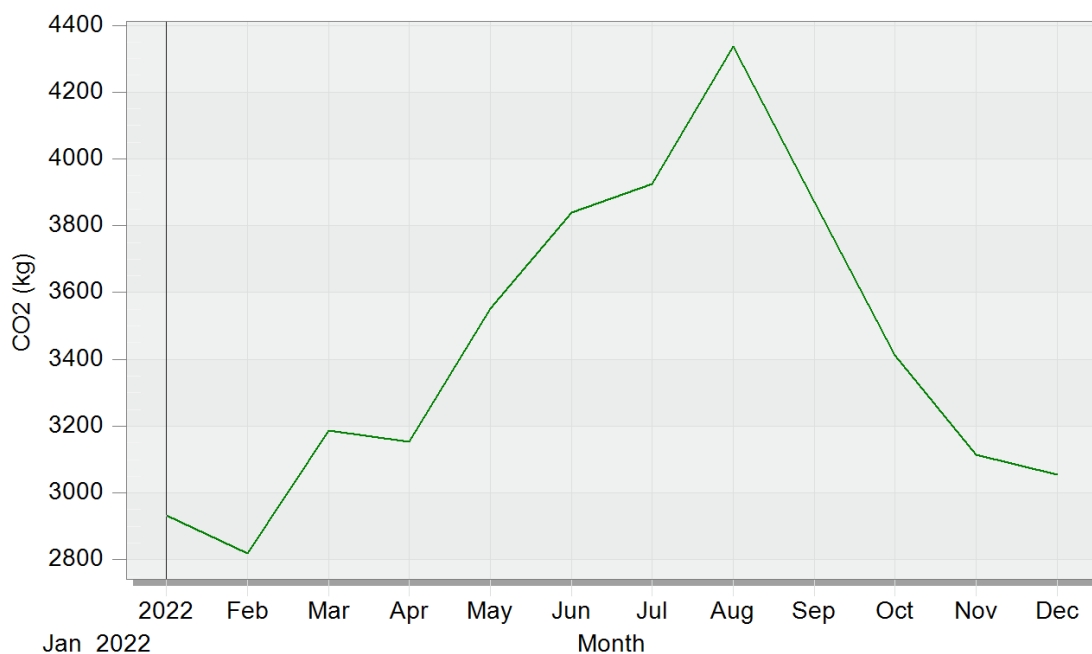
Διάγραμμα 3.9: Ενεργειακές καταναλώσεις ανά μήνα του έτους ανάλογα με τις ενεργειακές κατηγορίες που αφορούν το κτίριο



Διάγραμμα 3.10: Συνολικές καταναλώσεις καυσίμου (ηλεκτρικό ρεύμα και φυσικό αέριο αντίστοιχα) ανά μήνα του έτους για το υπό μελέτη κτίριο

Όπως είναι λογικό, από το παραπάνω **Διάγραμμα 3.10** παρατηρείται χρήση του φυσικού αερίου μόνο κατά την χειμερινή περίοδο κατά την οποία είναι αναγκαία η θέρμανση των χώρων, ενώ κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος συμβαίνει όλους τους μήνες του έτους όσον αφορά τις συσκευές και τον φωτισμό, με την μεγιστοποίηση να σημειώνεται κατά την θερινή περίοδο, όπου στις ανάγκες προστίθεται και η ψύξη του κτιρίου.

Τέλος, χάριν πληρότητας, παρατίθεται το **Διάγραμμα 3.11** που αφορά την παραγωγή CO_2 λόγω της κάλυψης των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου με τις επιλεγμένες τεχνολογίες ηλεκτρικού ρεύματος και φυσικού αερίου. Όπως είναι λογικό, η παραγωγή CO_2 αυξάνεται τους καλοκαιρινούς μήνες κατά τους οποίους οι ενεργειακές απαιτήσεις για ψύξη του κτιρίου αυξάνονται κατακόρυφα, κάνοντας το κτίριο ιδιαίτερα ενεργοβόρο.



Διάγραμμα 3.11: Ποσότητα CO2 που παράγεται λόγω της ενεργειακής κατάστασης του κτιρίου ανά μήνα του έτους

3.2 Χαρακτηριστικοί πίνακες τιμών για την προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης

Στο σημείο αυτό, παρατίθενται χαρακτηριστικοί πίνακες τιμών στους οποίους φαίνονται σημαντικά μεγέθη τόσο για τις εξωτερικές και εσωτερικές συνθήκες που επικρατούν στο υπό μελέτη κτίριο, όσο και για την καταναλισκόμενη ενέργεια ανά κατηγορία σε μηνιαία και σε ετήσια βάση.

Πίνακας 3.1: Μεγέθη εξωτερικού περιβάλλοντος του κτιρίου

Μήνας	Εξωτερική Θερμοκρασία Ξηρού Βολβού [°C]	Εξωτερική Θερμοκρασία Σημείου Δρόσου [°C]	Ταχύτητα Ανέμου [m/s]	Ατμοσφαιρική Πίεση [Pa]	Άμεση Ηλιακή Ακτινοβολία [kWh/m ²]	Διάχυτη Οριζόντια Ηλιακή Ακτινοβολία [kWh/m ²]
Ιανουάριος	10,70	4,66	3,29	101565,3	75,74	33,72
Φεβρουάριος	9,58	3,61	3,75	101376,3	70,46	43,87
Μάρτιος	11,39	5,04	3,55	100967,4	103,93	62,01
Απρίλιος	15,06	7,17	2,67	101271,1	121,34	73,20
Μάιος	19,61	11,88	2,94	101260,8	149,31	82,93
Ιούνιος	24,61	12,83	3,73	101214,0	197,90	73,56
Ιούλιος	27,30	15,46	3,24	101093,6	220,40	66,81
Αύγουστος	27,59	15,92	2,96	101041,3	191,27	65,99
Σεπτέμβριος	23,88	14,34	3,09	101274,5	165,12	54,32
Οκτώβριος	19,15	12,20	3,24	101467,3	101,48	51,62
Νοέμβριος	14,51	9,21	3,12	101529,0	58,95	37,72
Δεκέμβριος	10,86	5,11	2,60	101781,2	63,01	31,85

Πίνακας 3.2: Μεγέθη εσωτερικού περιβάλλοντος του κτιρίου

Μήνας	Εσωτερική Θερμοκρασία κτιρίου [°C]	Σχετική Υγρασία κτιρίου [%]	Εναλλαγές αέρα ανά ώρα [ac/h]
Ιανουάριος	19,52	41,79	0,722
Φεβρουάριος	19,47	39,42	0,725
Μάρτιος	20,65	40,38	0,723
Απρίλιος	22,47	41,68	0,719
Μάιος	24,29	50,37	0,712
Ιούνιος	25,80	49,03	0,703
Ιούλιος	26,71	51,39	0,698
Αύγουστος	26,65	52,49	0,698
Σεπτέμβριος	25,80	52,36	0,705
Οκτώβριος	24,17	51,49	0,713
Νοέμβριος	21,70	49,89	0,718
Δεκέμβριος	19,76	42,72	0,722

Πίνακας 3.3: Εσωτερικά ενεργειακά κέρδη για κάθε κατηγορία που αφορά το κτίριο

Μήνας	Εσωτερικά Ενεργειακά Κέρδη [kWh]					
	Φωτισμός	Ηλεκτρονικός εξοπλισμός	Πληρότητα (άνθρωποι)	Εξωτερικοί υαλοπίνακες (ηλιακή ακτινοβολία)	Αισθητό θερμικό φορτίο	Αισθητό ψυκτικό φορτίο
Ιανουάριος	2390,93	1870,07	1000,36	3563,25	1074,63	-14,74
Φεβρουάριος	2277,07	1768,62	983,21	3528,24	1165,51	-30,58
Μάρτιος	2618,63	2024,15	1048,00	4429,48	739,10	-176,73
Απρίλιος	2390,93	1861,93	880,33	4528,72	335,73	-1042,20
Μάιος	2504,78	1947,11	886,26	4546,53	264,32	-2541,73
Ιούνιος	2504,78	1938,97	875,32	4629,06	221,15	-5084,19
Ιούλιος	2390,93	1870,07	833,58	4863,44	224,75	-6403,10
Αύγουστος	2618,63	2024,15	912,98	5028,78	212,79	-7418,40
Σεπτέμβριος	2504,78	1938,97	874,98	5299,33	219,13	-5386,37
Οκτώβριος	2390,93	1870,07	846,35	4614,68	262,65	-2449,62
Νοέμβριος	2504,78	1938,97	967,19	3189,38	485,16	-570,71
Δεκέμβριος	2504,78	1947,11	1062,22	3170,31	1059,15	-28,78
Σύνολο ετησίως	29601,95	23000,18	11170,76	51391,21	6264,08	-31147,14

Πίνακας 3.4: Καταναλισκόμενη ενέργεια για κάθε κατηγορία που αφορά το κτίριο

Μήνας	Καταναλισκόμενη Ενέργεια [kWh]						
	Ηλεκτρονικός εξοπλισμός	Φωτισμός	Ανεμιστήρες συστήματος	Αντλίες συστήματος	Βοηθητικά συστήματα	Θέρμανση (φυσικό αέριο)	Ψύξη (ηλεκτρικό ρεύμα)
Ιανουάριος	1870,07	2390,93	334,73	0,21	0,58	764,87	8,83
Φεβρουάριος	1768,62	2277,07	302,34	0,23	0,67	890,88	26,58
Μάρτιος	2024,15	2618,63	334,73	0,24	0,32	426,76	146,99
Απρίλιος	1861,93	2390,93	323,93	0,84	0,05	60,18	608,23
Μάιος	1947,11	2504,78	334,73	1,88	0,01	7,76	1071,02
Ιούνιος	1938,97	2504,78	323,93	4,83	0,00	0,00	1563,79
Ιούλιος	1870,07	2390,93	334,73	6,64	0,00	0,00	1872,83
Αύγουστος	2024,15	2618,63	334,73	8,16	0,00	0,00	2171,45
Σεπτέμβριος	1938,97	2504,78	323,93	4,99	0,00	0,00	1614,36
Οκτώβριος	1870,07	2390,93	334,73	1,85	0,00	3,04	1031,58
Νοέμβριος	1938,97	2504,78	323,93	0,46	0,14	184,16	315,32
Δεκέμβριος	1947,11	2504,78	334,73	0,21	0,56	744,96	23,46
Σύνολο Ετησίως	23000,18	29601,95	3941,20	30,53	2,34	3082,60	10454,44

Πίνακας 3.5: Συνολικές καταναλώσεις ενέργειας/καυσίμων για το κτίριο στην υφιστάμενη κατάσταση

Μήνας	Συνολική κατανάλωση φυσικού αερίου [kWh]	Συνολική κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος [kWh]	Συνολική Καταναλισκόμενη Ενέργεια [kWh]
Ιανουάριος	764,87	4605,35	5370,22
Φεβρουάριος	890,88	4375,51	5266,38
Μάρτιος	426,76	5125,07	5551,83
Απρίλιος	60,18	5185,90	5246,08
Μάιος	7,76	5859,53	5867,29
Ιούνιος	0,0	6336,30	6336,30
Ιούλιος	0,0	6475,19	6475,19
Αύγουστος	0,0	7157,12	7157,12
Σεπτέμβριος	0,0	6387,04	6387,04
Οκτώβριος	3,04	5629,16	5632,20
Νοέμβριος	184,16	5083,61	5267,76
Δεκέμβριος	744,96	4810,86	5555,82
Σύνολο Ετησίως	3082,60	67030,63	70113,23

Επομένως, παρατηρείται πως για την υπάρχουσα κατάσταση του κτιρίου, η συνολική κατανάλωση ενέργειας ανέρχεται στις 70113,23 kWh, με τις 67030,63 kWh εξ αυτών να αφορούν το ηλεκτρικό ρεύμα και τις υπόλοιπες 3082,6 kWh το φυσικό αέριο. Η τιμή αυτή της κατανάλωσης είναι σχετικά υψηλή, επομένως απαιτούνται παρεμβάσεις με στόχο την ενεργειακή βελτίωση του κτιρίου και την κατάληξη σε θετικό ισοζύγιο ενέργειας.

Κεφάλαιο 4: Βελτιωτικές παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας για το κτίριο

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται, με χρήση των δυνατοτήτων του λογισμικού DesignBuilder, ανάλυση με στόχο την εύρεση των βέλτιστων επιλογών εξοικονόμησης ενέργειας για το υπό μελέτη κτίριο. Στις κάτωθι εξεταζόμενες ενεργειακές παρεμβάσεις προτείνονται διαφορετικές αλλαγές για τους βασικούς τομείς στους οποίους μπορεί παρεμβατικά να επέλθει εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα υφιστάμενο κτίριο. Ειδικότερα, οι τομείς που εξετάζονται είναι οι εξής: οι υαλοπίνακες και τα κουφώματα, ο φωτισμός, το εξωτερικό κτιριακό κέλυφος αλλά και το σύστημα θέρμανσης και ψύξης. Για κάθε προτεινόμενη αλλαγή ορίζονται οι επιθυμητές ρυθμίσεις και εκτελούνται προσομοιώσεις για χρονική διάρκεια ενός έτους (2022). Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό, πριν την παρουσίαση της μοντελοποίησης και των αποτελεσμάτων που επιφέρει κάθε αλλαγή, για κάθε τομέα ενδιαφέροντος δίνεται ως υπόβαθρο μια στοιχειώδης ανάλυση και διερεύνηση της τεχνολογίας που αφορά την εκάστοτε προτεινόμενη παρέμβαση. Όλες οι προτεινόμενες βελτιωτικές αλλαγές θα αξιολογηθούν και οικονομικά σε επόμενο κεφάλαιο.

4.1 Υαλοπίνακες και κουφώματα: Τοποθέτηση κουφωμάτων με θερμοδιακοπή

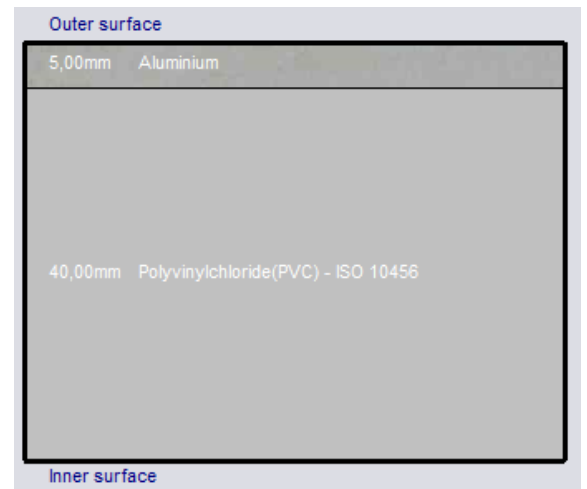
Η αιτιολόγηση της επιλογής και η θεωρητική ανάλυση της τεχνολογίας που αφορά την πρώτη προτεινόμενη παρέμβαση έχει ήδη γίνει στο **υποκεφάλαιο 2.2.6**. Βάσει όσων αναφέρθηκαν λοιπόν εκεί, εντοπίζεται η έλλειψη θερμοδιακοπής στα αλουμινένια κουφώματα του κτιρίου και έτσι η τοποθέτηση θερμοδιακοπής αποτελεί μια βασική ενεργειακή βελτίωση που επιδέχεται το υπό μελέτη κτίριο με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας.

4.1.1 Μοντελοποίηση στο DesignBuilder και αποτελέσματα προσομοίωσης για την 1^η παρέμβαση εξοικονόμησης ενέργειας

Ως πρώτη ενεργειακή παρέμβαση, λοιπόν, τοποθετούνται κουφώματα αλουμινίου με θερμοδιακοπή και διπλά τζάμια. Τα υπόλοιπα ενεργειακά συστήματα παραμένουν τα ίδια, ενώ ούτε στο κέλυφος γίνεται κάποια άλλη αλλαγή, όπως μόνωση. Αυτό επιλέγεται με στόχο να καταδειχθεί η αλλαγή που επιφέρει στις ενεργειακές καταναλώσεις αποκλειστικά και μόνο η ύπαρξη θερμοδιακοπής.

Παρακάτω φαίνεται η μοντελοποίηση των νέων κουφωμάτων στο λογισμικό DesignBuilder καθώς και οι απαραίτητες θερμικές ιδιότητες:

Constructions	
Layers	Surface properties
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> Image Calculated Cost Internal source Condensation analysis </div>	
Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	2,152
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5,540
Surface resistance (m ² -K/W)	0,130
Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	23,290
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	1,710
Surface resistance (m ² -K/W)	0,040
No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	2,428
R-Value (m ² -K/W)	0,582
U-Value (W/m²-K)	1,719
With Bridging (BS EN ISO 6946)	
Thickness (m)	0,0750
Km - Internal heat capacity (KJ/m ² -K)	46,9125
Upper resistance limit (m ² -K/W)	0,582
Lower resistance limit (m ² -K/W)	0,582
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	2,428
R-Value (m ² -K/W)	0,582
U-Value (W/m²-K)	1,719



Εικόνα 4.1: Χαρακτηριστικά θερμοδιακοπόμενων κουφωμάτων υαλοπινάκων

Μετά το τρέξιμο της προσομοίωσης, συλλέγονται τα σχετικά αποτελέσματα. Στον παρακάτω **Πίνακα 4.1** παρουσιάζονται οι μηνιαίες καταναλώσεις του κτιρίου για την παρέμβαση αυτή, καθώς και η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας η οποία ανέρχεται σε 70050,29 kWh. Στην συνέχεια στον **Πίνακα 4.2** παρατίθεται η ετησίως καταναλισκόμενη ενέργεια για κάθε κατηγορία που αφορά το κτίριο.

Παρατηρείται, λοιπόν, μία μικρή μείωση της συνολικής ετήσιας κατανάλωσης, χάρη στην τοποθέτηση κουφωμάτων αλουμινίου με θερμοδιακοπή. Στην κατανάλωση φυσικού αερίου για την θέρμανση του κτιρίου, μετά την θερμοδιακοπή, παρατηρείται μείωση της τάξης του 2,5% σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Η υπολογίσιμη αλλά μικρή αυτή μείωση στις ανάγκες θέρμανσης σχετίζεται με το γεγονός ότι ως προς το εμβαδόν, η αναλογία υαλοπινάκων και εξωτερικής τοιχοποιίας είναι 30%, επομένως στην συνολική κατανάλωση δεν επιφέρει ιδιαίτερα σημαντική επίδραση η αλλαγή των κουφωμάτων. Επίσης αξίζει να αναφερθεί πως στην υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου, ιδιαίτερα μεγάλο ποσοστό της μηνιαίας αλλά και της ετήσιας κατανάλωσης σχετίζονται με τον φωτισμό (42,22%) και τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό (32,8%), όμως οι δύο αυτές κατηγορίες δεν επηρεάζονται από την τοποθέτηση κουφωμάτων με θερμοδιακοπή.

Πίνακας 4.1: Συνολικές μηνιαίες καταναλώσεις ενέργειας/καυσίμων για το κτίριο

Μήνας	Συνολική κατανάλωση φυσικού αερίου [kWh]	Συνολική κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος [kWh]	Συνολική Καταναλισκόμενη Ενέργεια [kWh]
Ιανουάριος	738,27	4606,07	5344,33
Φεβρουάριος	871,57	4376,35	5247,92
Μάρτιος	416,81	5129,31	5546,12
Απρίλιος	58,46	5190,15	5248,61
Μάιος	7,55	5860,76	5868,31
Ιούνιος	0,0	6335,58	6335,58
Ιούλιος	0,0	6473,69	6473,69
Αύγουστος	0,0	7155,01	7155,01
Σεπτέμβριος	0,0	6387,16	6387,16
Οκτώβριος	2,92	5630,10	5633,01
Νοέμβριος	180,41	5086,51	5266,92
Δεκέμβριος	732,09	4811,53	5543,62
Σύνολο Ετησίως	3008,08	67042,21	70050,29

Πίνακας 4.2: Ετησίως καταναλισκόμενη ενέργεια για κάθε κατηγορία που αφορά το κτίριο

	Ετησίως Καταναλισκόμενη Ενέργεια [kWh]
Θέρμανση	3008,08
Ψύξη	10470,91
Φωτισμός	29601,95
Ηλεκτρονικός εξοπλισμός	23000,18
Λοιπές καταναλώσεις	3969,17
Συνολική κατανάλωση	70050,29

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι ως «Λοιπές καταναλώσεις» λογίζεται το σύνολο των καταναλώσεων που αφορούν τους ανεμιστήρες συστήματος, τις αντλίες συστήματος και τα βοηθητικά συστήματα. Από εδώ και πέρα αναφέρονται συνολικά ως «Λοιπές καταναλώσεις» για συντομία, μιας και δεν υπάρχει ουσιώδης λόγος να αναγράφονται κάθε φορά ξεχωριστά, όπως έγινε για την υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου.

4.2 Φωτισμός κτιρίου: Αλλαγή λαμπτήρων σε LED

Όπως αναφέρθηκε και στο **κεφάλαιο 3** κατά την παράθεση των αποτελεσμάτων της υφιστάμενης κατάστασης του κτιρίου, η καταναλισκόμενη ενέργεια τόσο σε μηναία όσο και σε ετήσια βάση λόγω του φωτισμού κυμαίνεται σε αρκετά υψηλές τιμές. Έτσι, αναγκαία κρίνεται η αλλαγή του τύπου των λαμπτήρων του κτιρίου και συγκεκριμένα η αλλαγή από CFL σε LED, ούτως ώστε να επιτευχθεί μια σημαντική ενεργειακή εξοικονόμηση στον τομέα του φωτισμού.

4.2.1 Βασικά πλεονεκτήματα λαμπτήρων LED

Το LED (Light Emitting Diode) είναι ένας ημιαγωγός ο οποίος έχει την ιδιότητα, όταν πολωθεί σε συνεχόμενη ηλεκτρική τάση, να εκπέμπει ένα συγκεκριμένο εύρος φωτεινής ακτινοβολίας. Το μήκος κύματος (ή χρώμα) του φωτός που εκπέμπεται εξαρτάται από τα υλικά κατασκευής του LED. Τα LED είναι διαθέσιμα σε πολλά χρώματα, όπως κόκκινο, μπλε, πορτοκαλί, πράσινο αλλά και σε χρώματα που προσεγγίζουν τις υπεριώδεις ακτινοβολίες. Έτσι, μπορούν να εκπέμψουν συγκεκριμένης χρωματικής απόδοσης φως, χωρίς παρεμβολή εξωτερικών φίλτρων, δηλαδή χωρίς μείωση της φωτεινής ροής [23].

Ένα βασικό πλεονέκτημα της χρήσης λαμπτήρων LED είναι η σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας που επιτυγχάνεται σε σχέση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως ή φθορισμού, καθώς παράγεται μεγαλύτερη φωτεινή ροή (lumens) ανά μονάδα ηλεκτρικής ισχύος (Watt). Η φωτεινή ροή που παράγει ένας λαμπτήρας ανά μονάδα καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος ονομάζεται φωτεινή απόδοση και μετριέται σε lm/W. Η μέγιστη θεωρητική φωτεινή απόδοση που μπορεί να επιτευχθεί, μετατρέποντας όλη την ενέργεια σε ορατό φως, είναι 683 lm/W [23]. Ωστόσο, στην πράξη επιτυγχάνονται πολύ μικρότερες τιμές, συνήθως μεταξύ 10 και 150 lm/W. Οι λαμπτήρες LED παρουσιάζουν φωτεινή απόδοση από 80 lm/W έως και 150 lm/W, τιμές σαφώς υψηλότερες σε σχέση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως (12 ως 25 lm/W) και τους λαμπτήρες φθορισμού (50 ως 70 lm/W) [23]. Οι μόνοι λαμπτήρες που παρουσιάζουν υψηλότερη φωτεινή απόδοση από τους LED (και από όλα τα είδη λαμπτήρων) είναι οι λαμπτήρες νατρίου (Na) χαμηλής πίεσεως, οι οποίοι έχουν φωτεινή απόδοση μέχρι και 200 lm/W [23]. Όμως η χρήση τους συνιστάται κυρίως σε περιπτώσεις φωτισμού δρόμων, λιμανιών και αμαξοστασίων και όχι σε κτιριακές εφαρμογές.

Στην πράξη, στους λαμπτήρες LED η θερμοκρασία που αναπτύσσεται είναι πολύ χαμηλή σε σχέση με την παραγόμενη φωτεινότητα. Έτσι, συνολικά τα LED καταναλώνουν από 50% ως 90% λιγότερη ενέργεια σε σχέση με άλλα είδη λαμπτήρων [24]. Αναλυτικότερα, για να παράγει φως ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως, πρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα να περάσει από το νήμα του και να το θερμάνει σε πολύ υψηλή θερμοκρασία. Κατ'αυτόν τον τρόπο, πάνω από 90% της ηλεκτρικής ενέργειας χάνεται στο περιβάλλον ως θερμότητα και έτσι η απόδοση είναι ιδιαίτερα χαμηλή.

Από την άλλη, σε έναν λαμπτήρα φθορισμού, υπεριώδης ακτινοβολία παράγεται από ατμούς υδραργύρου στο εσωτερικό του. Εν συνεχεία, το υπεριώδες φως απορροφάται από την φωσφορούχο επίστρωση και έτσι παράγεται ορατό φως. Αν και η θερμική ενέργεια που παράγεται στους λαμπτήρες φθορισμού είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τους λαμπτήρες πυρακτώσεως, εξακολουθεί να χάνεται σημαντικό ποσό ενέργειας στην μετατροπή του υπεριώδους φωτός σε ορατό. Στον αντίποδα όλων αυτών, οι διόδοι εκπομπής φωτός (LED) μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια κατά 80% έως 90% σε σχεδόν μονοχρωματικό φως με τρόπο άμεσο, που δεν συνοδεύεται από σημαντική εκπομπή θερμότητας προς το περιβάλλον (μόλις 20% με 10% απώλειες θερμότητας) [24].

Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα των λαμπτήρων LED είναι η πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής τους. Σαν διάρκεια ζωής ορίζεται το διάστημα μέχρι να φτάσουν στο 70% της αρχικής τους φωτεινής ροής. Οι λαμπτήρες LED συνήθως δεν καίγονται, αλλά τείνουν να μειώνουν σταδιακά το φως τους. Η διάρκεια ζωής, λοιπόν, ενός λαμπτήρα LED κυμαίνεται από 30000-100000 ώρες, μέγεθος που αντιστοιχεί σε πάνω από 10 έτη, αριθμός τεράστιος συγκριτικά με αυτόν των λαμπτήρων πυράκτωσης που κυμαίνεται από 1.000 έως 2.000 ώρες και των λαμπτήρων φθορισμού που κυμαίνεται από 10.000 έως 15.000 ώρες [24].

Ως προς την αντοχή, οι λαμπτήρες LED δεν σπάνε εύκολα, διότι δεν περιέχουν γυαλί και έτσι γίνονται εξαιρετικά ανθεκτικοί σε κραδασμούς, δονήσεις και χτυπήματα. Καθώς οι λάμπες LED ανάβουν με την κίνηση των ηλεκτρονίων σε ένα υλικό ημιαγωγού, δεν καίγονται, δεν ζεσταίνονται και δεν περιλαμβάνουν καμία επικίνδυνη ουσία. Στον αντίποδα, σημειώνεται ότι οι λαμπτήρες φθορισμού (CFL) περιέχουν μικρή ποσότητα υδραργύρου σε υγρή μορφή, επομένως υπάρχει ο κίνδυνος μόλυνσης του περιβάλλοντος και πρόκλησης σοβαρών βλαβών στην υγεία των ανθρώπων στην περίπτωση που έρθουν σε επαφή με τον υδράργυρο.

Ταυτόχρονα, όσον αφορά την ποιότητα φωτός, οι λαμπτήρες LED παράγουν σταθερό λευκό φως που παρέχει μεγαλύτερη φωτεινότητα και καλύτερη απόδοση των χρωμάτων και προσιδιάζει περισσότερο σε φυσικό φωτισμό, εν αντιθέσει με τους παραδοσιακούς λαμπτήρες. Επίσης, το φως των LED δεν αυξομειώνεται σε εναλλαγές της τάσης του δικτύου καθώς οι λάμπες LED είναι εφοδιασμένες με ειδικές ηλεκτρονικές διατάξεις σταθεροποίησης, που εξασφαλίζουν σταθερή ροή ρεύματος. Παράλληλα, οι λαμπτήρες LED έχουν πολύ γρήγορη απόκριση (της τάξης των microsecond), σε αντίθεση με τους λαμπτήρες φθορισμού που χρειάζονται χρόνο για να φτάσουν στην μέγιστη φωτεινότητα και η συχνή ενεργοποίηση/απενεργοποίηση μειώνει δραστικά το προσδόκιμο της λειτουργικής ζωής τους [24]. Τέλος, τα LED μπορούν και εστιάζουν το φως σε ένα συγκεκριμένο σημείο ή περιοχή, σε αντίθεση με τις λάμπες πυράκτωσης και φθορισμού οι οποίες απαιτούν έναν εξωτερικό ανακλαστήρα για να συλλέγει το φως και να το κατευθύνει αποτελεσματικά στην επιθυμητή θέση.

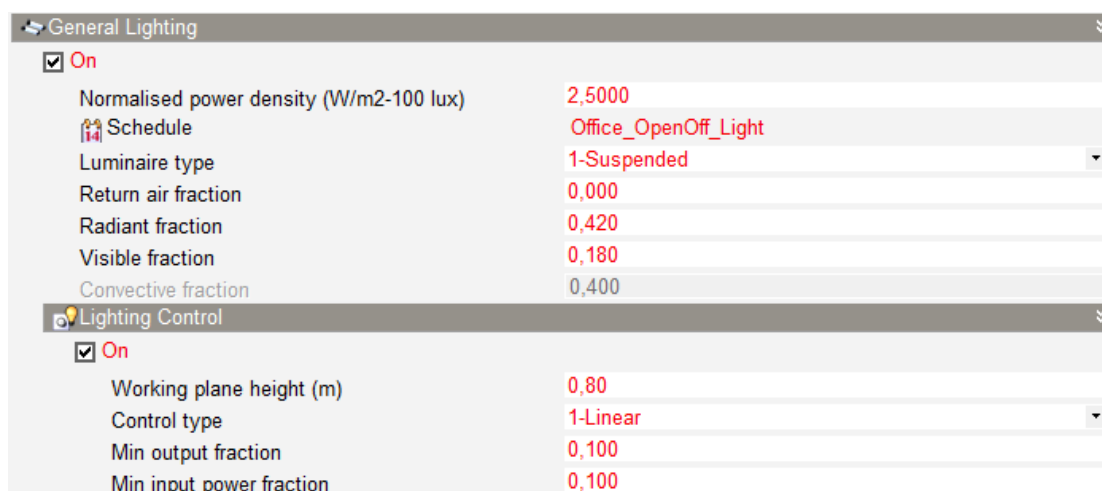
Σαφώς, οι λαμπτήρες LED παρουσιάζουν και μειονεκτήματα, το βασικότερο εκ των οποίων είναι το υψηλό κόστος αγοράς. Ωστόσο με την πάροδο του χρόνου και την

εξέλιξη της τεχνολογίας, το κόστος αγοράς τους γίνεται ολοένα και πιο προσιτό. Επίσης συνυπολογίζοντας το μειωμένο κόστος συντήρησης, λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας ζωής, το κόστος αγοράς και λειτουργίας μειώνεται περαιτέρω.

4.2.2 Μοντελοποίηση στο DesignBuilder και αποτελέσματα προσομοίωσης για την 2^η παρέμβαση εξοικονόμησης ενέργειας

Για τον συγκεκριμένη ενεργειακή παρέμβαση, δηλαδή για την αλλαγή σε λαμπτήρες LED, εισήχθησαν τα κατάλληλα δεδομένα στην καρτέλα Lighting του DesignBuilder και σύμφωνα με την οδηγία TOTEE επιλέχθηκε η τιμή της πυκνότητας ισχύος φωτισμού ανά μονάδα επιφάνειας (normalised power density), συγκεκριμένα σε $2,5 \frac{W}{m^2 \cdot 100lux}$. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά και ενεργειακά συστήματα του κτιρίου παραμένουν τα ίδια όπως στην υφιστάμενη κατάσταση.

Στις παρακάτω **Εικόνα 4.2** καταδεικνύονται οι νέες ρυθμίσεις φωτισμού για το υπό μελέτη κτίριο:



Εικόνα 4.2: Χαρακτηριστικά μεγέθη για τον φωτισμό με λαμπτήρες LED

Με αυτά τα δεδομένα λοιπόν έτρεξε η προσομοίωση στο πρόγραμμα και στο σημείο αυτό παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Στον παρακάτω **Πίνακα 4.3** παρατίθενται οι μηνιαίες καταναλώσεις του κτιρίου για την παρέμβαση αυτή, καθώς και η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας η οποία ανέρχεται σε 42848,99 kWh. Παρατηρείται λοιπόν μία σημαντική μείωση των καταναλώσεων σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου, συγκεκριμένα της τάξης του 38,89%, χάρη στην χρήση λαμπτήρων LED.

Στην συνέχεια στον **Πίνακα 4.4** παρατίθεται η ετησίως καταναλισκόμενη ενέργεια για κάθε κατηγορία που αφορά το κτίριο. Όπως φαίνεται από τα νούμερα, σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση, έχει επέλθει μείωση στην καταναλισκόμενη ενέργεια για τον φωτισμό κατά 86,15%. Αναλυτικότερα, από 29601,95 kWh που

καταναλώνονταν ετησίως στην υφιστάμενη κατάσταση, πλέον η καταναλισκόμενη ενέργεια για τον φωτισμό ανέρχεται σε 4100,37 kWh ετησίως. Αντιστοίχως, ως προς την συνολική ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος, η αλλαγή σε λαμπτήρες LED επιφέρει μείωση κατά 43,92%. Η θεαματική αυτή μείωση στις καταναλώσεις αποδεικνύει εμπράκτως την σημαντικά βελτιωμένη ενεργειακά εικόνα που προσφέρει η χρήση λαμπτήρων LED για το υπό μελέτη κτίριο.

Πίνακας 4.3: Συνολικές μηνιαίες καταναλώσεις ενέργειας/καυσίμων για το κτίριο

Μήνας	Συνολική κατανάλωση φυσικού αερίου [kWh]	Συνολική κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος [kWh]	Συνολική Καταναλισκόμενη Ενέργεια [kWh]
Ιανουάριος	1197,81	2693,33	3891,15
Φεβρουάριος	1555,43	2443,18	3998,61
Μάρτιος	791,58	2637,32	3428,90
Απρίλιος	116,70	2531,69	2648,39
Μάιος	12,50	3046,18	3058,68
Ιούνιος	0,0	3544,80	3544,80
Ιούλιος	0,0	3759,37	3759,37
Αύγουστος	0,0	4217,56	4217,56
Σεπτέμβριος	0,0	3719,32	3719,32
Οκτώβριος	4,10	3242,72	3246,82
Νοέμβριος	316,26	2896,28	3212,54
Δεκέμβριος	1263,15	2859,72	4122,87
Σύνολο Ετησίως	5257,52	37591,47	42848,99

Πίνακας 4.4: Ετησίως καταναλισκόμενη ενέργεια για κάθε κατηγορία που αφορά το κτίριο

	Ετησίως Καταναλισκόμενη Ενέργεια [kWh]
Θέρμανση	5257,52
Ψύξη	7255,85
Φωτισμός	4100,37
Ηλεκτρονικός εξοπλισμός	23000,18
Λοιπές καταναλώσεις	3235,08
Συνολική κατανάλωση	42848,99

4.3 Κτιριακό κέλυφος: Τοποθέτηση θερμομόνωσης

Με στόχο την αποδοτική ανταπόκριση του κτιρίου στις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες, απαραίτητη καθίσταται η σωστή θερμομόνωση του κελύφους του, η οποία αποτελεί μία από τις βασικότερες παραμέτρους του σύγχρονου αρχιτεκτονικού σχεδιασμού. Ως εκ τούτου, επιλέγεται ως ενεργειακή παρέμβαση για το υπό μελέτη κτίριο.

4.3.1 Βασικά στοιχεία για την θερμομόνωση

Με την θερμομόνωση, επιδιώκεται η μείωση του ρυθμού ροής θερμότητας μέσα από τοιχώματα που χωρίζουν χώρους με διαφορετική θερμοκρασία [25]. Κατ' αυτόν τον τρόπο περιορίζονται στο ελάχιστο οι συναλλαγές θερμότητας μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού περιβάλλοντος, δηλαδή παρεμποδίζεται η διαφυγή της θερμικής ενέργειας από έναν χώρο προς την ατμόσφαιρα ή προς έναν άλλο ψυχρότερο γειτονικό χώρο. Στην πράξη εμποδίζονται οι θερμικές απώλειες κατά την διάρκεια του χειμώνα και αποτρέπεται η είσοδος της ηλιακής ακτινοβολίας κατά την διάρκεια του θέρους. Λόγω της μείωσης των θερμικών διαφυγών από και προς το εσωτερικό ενός κτιρίου, μειώνεται σημαντικά και η κατανάλωση ενέργειας με την οποία τροφοδοτούνται τα διάφορα τεχνητά συστήματα θέρμανσης και ψύξης. Έτσι, λοιπόν, επιτυγχάνεται αίσθημα θερμικής άνεσης και διατήρηση των επιθυμητών θερμοκρασιακών συνθηκών στον χώρο με την κατά το δυνατόν μικρότερη κατανάλωση ενέργειας και συνεπώς με μειωμένο κόστος. Γενικότερα, η θερμομόνωση συνδέεται άμεσα με το κόστος κατασκευής και λειτουργίας του κτιρίου και βασίζεται στον βέλτιστο συνδυασμό των μεθόδων και υλικών κατασκευής.

Το μέτρο της θερμομονωτικής ικανότητας ενός δομικού στοιχείου είναι ο συντελεστής θερμοπερατότητας $U \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$, ο οποίος υποδηλώνει πόση ενέργεια διαπερνάει $1 m^2$ του δομικού στοιχείου, στην μονάδα του χρόνου, όταν η διαφορά θερμοκρασίας του αέρα εκατέρωθεν του ισούται με $1 ^\circ C$ [26]. Προφανώς όσο χαμηλότερος είναι ο συντελεστής U , τόσο περισσότερο θερμομονωμένο είναι ένα δομικό στοιχείο. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας υπολογίζεται από την επόμενη σχέση (4.1) [26]:

$$U = \left(R_{si} + \sum \frac{d}{\lambda} + R_g + R_{se} \right)^{-1} \quad (4.1)$$

Όπου:

$U \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ ο συντελεστής θερμοπερατότητας του στοιχείου

$R_{si} \left[\left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)^{-1} \right]$ η θερμική αντίσταση του στρώματος του αέρα από την εσωτερική πλευρά του δομικού στοιχείου

$\sum \frac{d}{\lambda} \left[\left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)^{-1} \right]$ το άθροισμα των θερμικών αντιστάσεων των n στρώσεων του δομικού στοιχείου, πάχους d [m] και συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ η κάθε μία

$R_g \left[\left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)^{-1} \right]$ η θερμική αντίσταση ακίνητου στρώματος αέρα εντός κλειστού διακένου, εάν υπάρχει, που δεν είναι σε απευθείας επαφή με τον εξωτερικό αέρα

$R_{se} \left[\left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)^{-1} \right]$ η θερμική αντίσταση του στρώματος του αέρα από την εξωτερική πλευρά του δομικού στοιχείου

Η ροή θερμότητας διαμέσου δομικού στοιχείου για χρονική περίοδο t μπορεί να υπολογιστεί απλοποιητικά με χρήση της παρακάτω **σχέσης (4.2)** [26]:

$$q_{tr} = U \cdot (T_{in} - T_{ex}) \cdot t \quad (4.2)$$

Όπου:

$q_{tr} \left[\frac{kWh}{m^2} \right]$ η ροή θερμότητας διαμέσου δομικού στοιχείου για περίοδο t

$U \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ ο συντελεστής θερμοπερατότητας του δομικού στοιχείου

$T_{in} [^{\circ}C]$ η μέση θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα για την περίοδο υπολογισμού t

$T_{ex} [^{\circ}C]$ η μέση θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα για την περίοδο υπολογισμού t

t [h] η χρονική διάρκεια της περιόδου υπολογισμού

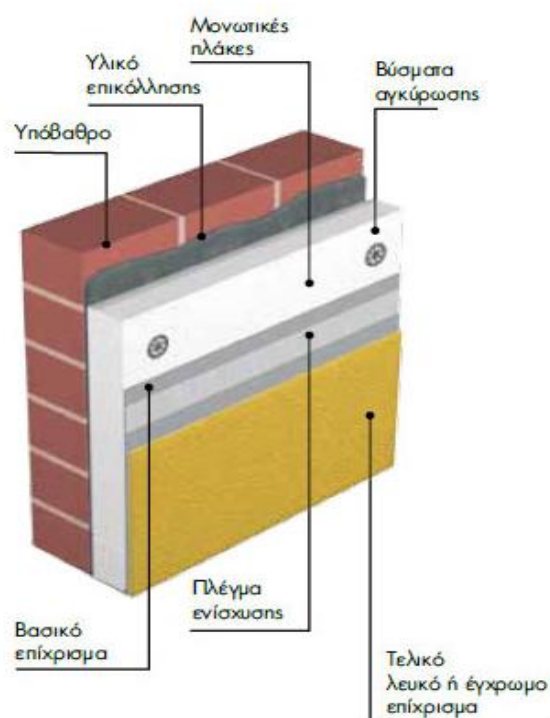
Στο σημείο αυτό αναφέρονται συνοπτικά τα πιο ευάλωτα στοιχεία ενός κτιρίου, που συνήθως χρήζουν θερμικής προστασίας. Αρχικά, θερμομόνωση απαιτείται για την στέγη ενός κτιρίου, η οποία κατά βάση παρουσιάζει μεγάλες θερμικές απώλειες, μιας και δέχεται άμεσα όλες τις καιρικές επιδράσεις καθ' όλη την διάρκεια του έτους. Κατόπιν, πολύ σημαντικός είναι ο έλεγχος των θερμικών απωλειών από τα εξωτερικά τοιχώματα ενός κτιρίου, από τα οποία συνήθως προκύπτουν μεγάλες θερμικές διαφυγές. Έπειτα, τα ανοίγματα απαιτείται να διαθέτουν αρμούς συναρμογής των πλαισίων απόλυτα αδιαπέραστους από τον αέρα και τα υαλοστάσια των ανοιγμάτων θα πρέπει να έχουν χαμηλό συντελεστή θερμοπερατότητας με στόχο την αποτελεσματική θερμομόνωση. Τέλος, ένα ακόμη ευάλωτο σημείο είναι το κατώτερο δάπεδο ενός κτιρίου, το οποίο όμως δεν χρειάζεται πάντα θερμική προστασία, εκτός εάν χρησιμοποιείται ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης (δάπεδο ισογείου σε επαφή με το έδαφος). Σε κάθε περίπτωση απαιτείται θερμική προστασία στις περιπτώσεις δαπέδου εκτεθειμένου προς το εξωτερικό περιβάλλον, όπως για παράδειγμα συμβαίνει σε κτίρια σε πυλωτή. [25]

4.3.2 Θερμομόνωση εξωτερικής τοιχοποιίας

Ως προς την θερμομόνωση της εξωτερικής τοιχοποιίας, δοκών και υποστυλωμάτων, ανάλογα με την χρήση των χώρων που προστατεύουν και το βασικό μέρος της δομής τους, οι βασικοί τρόποι είναι οι ακόλουθοι:

- Θερμομόνωση στην εξωτερική επιφάνεια

Σε αυτήν την περίπτωση, το μονωτικό υλικό τοποθετείται με κόλλα στην εξωτερική πλευρά του τοίχου, πάνω του τοποθετείται με κόλλα ένα πλέγμα οπλισμού και ακολουθεί η κάλυψη του πλέγματος με ειδικό επίχρισμα. [25]
Στην παρακάτω **Εικόνα 4.3** φαίνεται εποπτικά η θερμομόνωση στην εξωτερική επιφάνεια ενός τοίχου.



Εικόνα 4.3: Τομή θερμομόνωσης εξωτερικής τοιχοποιίας [27]

Χάρη στην εξωτερική θερμομόνωση, η επιθυμητή θερμοκρασία διατηρείται στον χώρο και μετά την διακοπή της θέρμανσης, λόγω της θερμοχωρητικότητας των δομικών στοιχείων. Κυρίως στα νότια δομικά στοιχεία αποθηκεύεται ενέργεια από τον ήλιο και έχοντας εξασφαλίσει απαιτούμενη θερμοχωρητικότητα με την κατασκευή τοιχοποιίας, δοκών και υποστυλωμάτων επαρκούς πάχους, επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας λόγω της μικρότερης χρήσης του συστήματος θέρμανσης και ψύξης. Η πρακτική αυτή παραπέμπει συχνά σε κατοικίες μόνιμης διαμονής όπου ο χώρος χρησιμοποιείται όλο το 24ωρο.

Η τοποθέτηση εξωτερικής θερμομόνωσης οδηγεί επίσης στην προστασία εξωτερικών επιφανειών τοίχων από συστολές και διαστολές λόγω εξωτερικών

θερμοκρασιακών μεταβολών και στην ελαχιστοποίηση των θερμογεφυρών. Εκτός των άλλων, η εξωτερική θερμομόνωση μπορεί να ανακαινίσει εξωτερικά τις όψεις του κτιρίου, ιδίως όταν υπάρχουν φθορές λόγω παλαιότητας ή άλλου είδους ατέλειες, ενώ παράλληλα προσφέρει περισσότερη στεγάνωση και προστασία από καιρικές συνθήκες, αυξάνοντας την λειτουργική ζωή του κτιρίου.

Πολύ συνηθισμένη είναι η εφαρμογή εξωτερικής θερμομόνωσης σε υφιστάμενα κτίρια, καθώς αφενός μεν δεν παρεμποδίζεται η λειτουργία του εσωτερικού χώρου κατά την κατασκευή και αφετέρου δεν μειώνεται το ωφέλιμο εμβαδόν του. Στο σημείο αυτό σημειώνεται πως η εξωτερική θερμομόνωση κοστίζει περισσότερο από την εσωτερική, λόγω των ακριβότερων υλικών τα οποία πρέπει να αντέχουν στις ποικίλες καιρικές συνθήκες.

- Θερμομόνωση στην εσωτερική επιφάνεια

Όταν η θερμομόνωση γίνεται στην εσωτερική επιφάνεια, το μονωτικό υλικό τοποθετείται στην εσωτερική πλευρά του τοίχου και προστατεύεται από κάποιο στέρεο δομικό υλικό (π.χ. γυψοσανίδα), που λειτουργεί όπως το εσωτερικό επίχρισμα. [25]

Το βασικότερο πλεονέκτημα της εσωτερικής θερμομόνωσης έγκειται στην απλούστερη, ταχύτερη και πολύ οικονομικότερη κατασκευή σε σχέση με την εξωτερική θερμομόνωση. Ταυτόχρονα, για τα μονωτικά υλικά δεν απαιτείται προστασία από εξωτερικές επιδράσεις όπως άνεμοι, υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία κ.λπ.

Ωστόσο, συγκεντρώνει και κάποια μειονεκτήματα με κυριότερα την ανάπτυξη θερμογεφυρών (κυρίως στα σημεία όπου υπάρχουν συναρμογές εξωτερικών και εσωτερικών τοίχων) και την γρήγορη ψύξη του χώρου μετά την διακοπή της λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης [25]. Παράλληλα στην περίπτωση που εφαρμοστεί σε υφιστάμενα κτίρια, η τοποθέτηση εσωτερικής θερμομόνωσης μειώνει το ωφέλιμο εμβαδόν του εσωτερικού χώρου και εμποδίζει την ομαλή λειτουργία του κατά την κατασκευή (π.χ. πλαίσια κουφωμάτων, σώματα θέρμανσης και άλλα προσαρτήματα απαιτείται να μετακινηθούν κατά την τοποθέτηση θερμομόνωσης και να επανατοποθετηθούν μετά). Για αυτό και επιλέγεται κυρίως όταν το κτίριο είναι στο στάδιο κατασκευής και σπανίως ως προσθήκη σε υπαρκτά κτίρια. Επίσης η τοποθέτηση μόνωσης εσωτερικά προτιμάται στις περιπτώσεις διατηρητέων προσόψεων (παραδοσιακός οικισμός) δηλαδή όταν τα χαρακτηριστικά διαμόρφωσης της πρόσοψης πρέπει να διατηρηθούν ως έχουν ή σε περιπτώσεις κατά τις οποίες τα χωρικά όρια είναι περιορισμένα, π.χ. εξαιτίας παρακείμενου κτίσματος και δεν είναι δυνατή η εξωτερική τοποθέτηση.

Η εσωτερική θερμομόνωση από ενεργειακής άποψης συνήθως επιλέγεται για κτίρια με περιοδική χρήση και απαίτηση γρήγορης θέρμανσης, δηλαδή τοποθετείται σε κτίρια στα οποία επιδιώκεται η άμεση απόδοση του συστήματος θέρμανσης/ψύξης χωρίς χρονική καθυστέρηση και δεν

αναμένεται απόδοση θερμότητας από τα δομικά στοιχεία μετά την διακοπή του κλιματισμού.

- Θερμομόνωση στον πυρήνα

Η τοποθέτηση της θερμομόνωσης στον πυρήνα του τοίχου επιλέγεται μόνο στην περίπτωση που η κατασκευή είναι νέα και το θερμομονωτικό υλικό τοποθετείται ενδιάμεσα της διπλής τοιχοποιίας (πυρήνας) [25]. Αυτό σημαίνει πως η εξωτερική τοιχοποιία αποτελείται από δύο επιμέρους τοίχους που ενώνονται μεταξύ τους και τοποθετείται μόνωση στο διάκενο μεταξύ τους.

Στην περίπτωση αυτή, προκειμένου να αποφευχθεί το πέρασμα της υγρασίας από τον εξωτερικό τοίχο στο θερμομονωτικό υλικό, θα πρέπει να υπάρχει ένα σαφές διάκενο μεταξύ του εξωτερικού τοίχου και των θερμομονωτικών πλακών. Η ύπαρξη του διακένου αυτού καθίσταται αναγκαία, μιας και οι τοίχοι από τούβλα είναι πορώδεις, δηλαδή σε περιπτώσεις βροχοπτώσεων το νερό μπορεί να διεισδύσει και να προκαλέσει ζημιά στο θερμομονωτικό υλικό.

- Χρήση θερμομονωτικών τούβλων

Τα θερμομονωτικά τούβλα έχουν ειδικό σχεδιασμό ούτως ώστε να εμφανίζουν θερμομονωτικές ιδιότητες, όπως τούβλα από κυψελωτό σκυρόδεμα ή τούβλα που εκ κατασκευής έχουν πλήρωση των οπών τους με κατάλληλο θερμομονωτικό υλικό [28]. Έτσι, προσδίδουν πολύ μεγάλη ευστάθεια και δημιουργούν ένα θερμοσυσσωρευτικό κέλυφος, δηλαδή ένα καλό παθητικό σύστημα εναλλαγής θερμότητας και υγρασίας, το οποίο επιτρέπει την βέλτιστη αξιοποίηση της εξωτερικής θερμοκρασίας και του φυσικού αερισμού, διατηρώντας έτσι την θερμική άνεση στο εσωτερικό του κτιρίου με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Σαφώς, τα τούβλα αυτά αφορούν μόνο υπό κατασκευή και όχι υφιστάμενα κτίρια και, παρά τις καλές τους επιδόσεις, δεν φτάνουν την ενεργειακή απόδοση και εξοικονόμηση που προσφέρει μια θερμοπρόσοψη σε ένα κτίριο.

Σε κάθε περίπτωση απαιτείται το θερμομονωτικό υλικό να τοποθετείται σε τέτοια θέση στον τοίχο ούτως ώστε να παρέχεται επαρκής θερμική αντίσταση για να πληρούνται οι ελάχιστες απαιτήσεις θερμομόνωσης. Επίσης αναγκαίο κρίνεται να αποφεύγεται, λόγω κατάλληλου συνεχούς στρώματος θερμομονωτικού υλικού, η εμφάνιση θερμογεφυρών, οι οποίες δημιουργούν θερμικές τάσεις στα επιμέρους υλικά. Τέλος χρειάζεται να παρεμποδίζεται η διείσδυση νερών βροχής στο θερμομονωτικό υλικό, καθώς η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ του υλικού αυξάνει σημαντικά με την συμύκνωση υδρατμών μέσα στην μάζα του και επομένως αν διαβραχεί όλη η μάζα του, τότε το υλικό χάνει την θερμομονωτική του δράση [9].

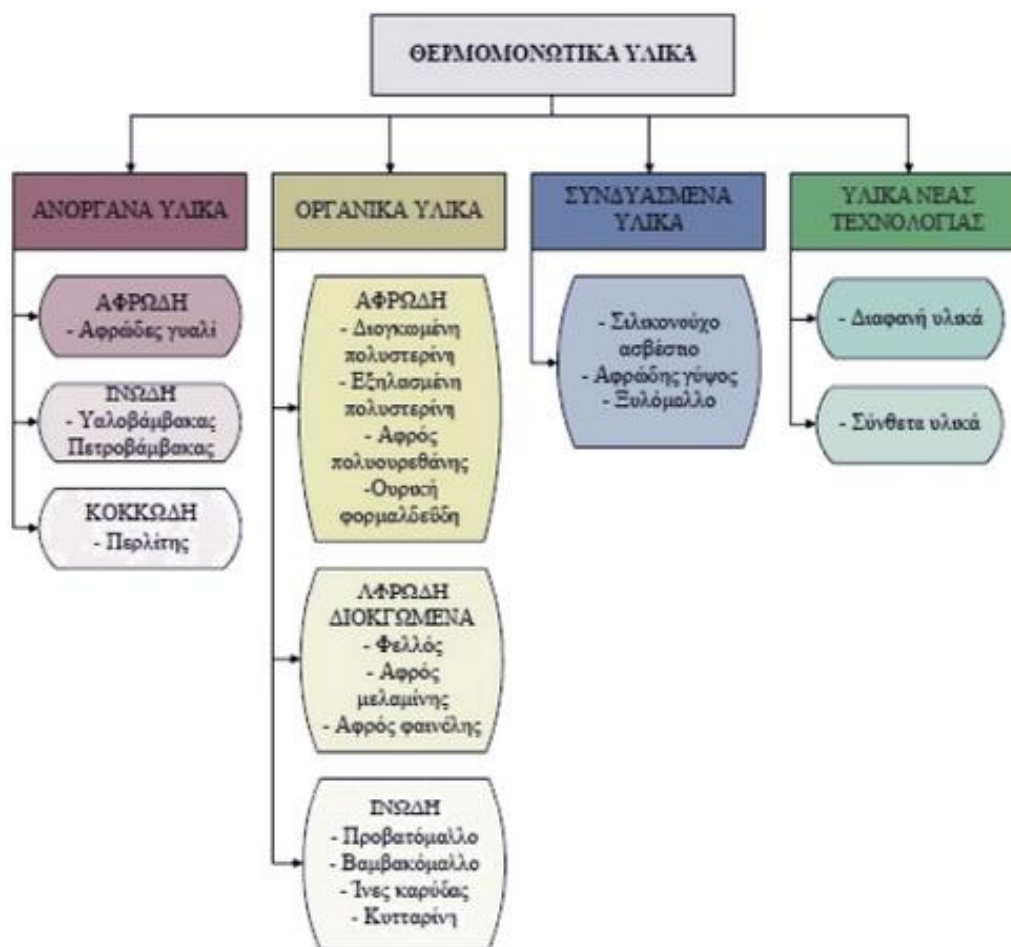
4.3.3 Θερμομόνωση στέγης

Στέγη θεωρείται η κατασκευή η οποία συνδυάζει κεκλιμένη και οριζόντια οροφή. Δύο βασικές κατηγορίες για τις στέγες είναι οι θερμές και οι ψυχρές. Θερμές θεωρούνται οι στέγες κάτω από τις οποίες συνήθως κατοικούν ή εργάζονται άτομα. Σε αυτήν την περίπτωση η θερμομόνωση τοποθετείται εξωτερικά ή εσωτερικά στην κεκλιμένη επιφάνεια της στέγης. Η πρώτη περίπτωση προτιμάται κυρίως κατασκευαστικά ενώ η δεύτερη επισκευαστικά, δηλαδή στην εκ των υστέρων τοποθέτηση θερμομόνωσης σε ήδη υπάρχον κτίριο [25]. Και στις δύο περιπτώσεις ουσιώδης είναι η ύπαρξη αερισμού με στόχο την αποφυγή συμπύκνωσης υδρατμών. Από την άλλη, ψυχρές ονομάζονται οι στέγες στις οποίες ο χώρος μεταξύ της κεκλιμένης και οριζόντιας οροφής έχει περιορισμένη επισκεψιμότητα. Σε αυτή την περίπτωση η θερμομόνωση συνήθως τοποθετείται επί της οριζόντιας πλάκας.

4.3.4 Θερμομονωτικά Υλικά

Γενικά ως προς την επιλογή του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί για την θερμομόνωση ενός κτιρίου, πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη οι διάφορες καταπονήσεις που υφίστανται τα υλικά στο συγκεκριμένο έργο, μιας και αυτές επηρεάζουν την θερμική τους απόδοση. Τα βασικότερα κριτήρια επιλογής είναι αρχικά θερμοτεχνικά, με κυριότερο την τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ και την εξάρτηση του λ από την θερμοκρασία και την υγρασία. Επιθυμητή είναι η επιλογή υλικού που να διαθέτει χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ για να χρησιμοποιείται το μικρότερο δυνατό πάχος υλικού και επίσης να διαθέτει αντίσταση στην διαπερατότητα υδρατμών [9]. Κατόπιν τα κριτήρια επιλογής αφορούν τις μηχανικές ιδιότητες του θερμομονωτικού, όπως η πυκνότητα, η ελαστικότητα και η αντοχή του σε θλίψη, κάμψη και δονήσεις. Ταυτόχρονα σαφώς εξετάζεται και το κόστος προμήθειας και εγκατάστασης του υλικού το οποίο κόστος σχετίζεται άμεσα με τον χρόνο απόσβεσης της δαπάνης.

Σήμερα στην αγορά υπάρχει μεγάλη ποικιλία θερμομονωτικών υλικών. Τα πιο συνηθισμένα είναι τα εξής: εξηλασμένη πολυστερίνη, διογκωμένη πολυστερίνη, υαλοβάμβακας, πολυουρεθάνη, αφρώδες γυαλί, περλιτοειδή, πετροβάμβακας, φελλός και PVC. Η βασική κατηγοριοποίηση που γίνεται όσον αφορά τα θερμομονωτικά υλικά φαίνεται στην **Εικόνα 4.4** παρακάτω.



Εικόνα 4.4: Κατηγορίες ταξινόμησης των θερμομονωτικών υλικών [29]

4.3.5 Μοντελοποίηση θερμομόνωσης στο DesignBuilder για την 3^η παρέμβαση εξοικονόμησης ενέργειας

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, τόσο για τους εξωτερικούς τοίχους, όσο και για την στέγη, επιλέγονται τα εξής τρία θερμομονωτικά υλικά και προσομοιώνεται η ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου με καθένα από αυτά, με στόχο την κατάληξη στην βέλτιστη επιλογή:

- 1) Εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS – Extruded Polystyrene)
- 2) Διογκωμένη πολυστερίνη (EPS - Expanded Polystyrene)
- 3) Πετροβάμβακας (Rockwool)

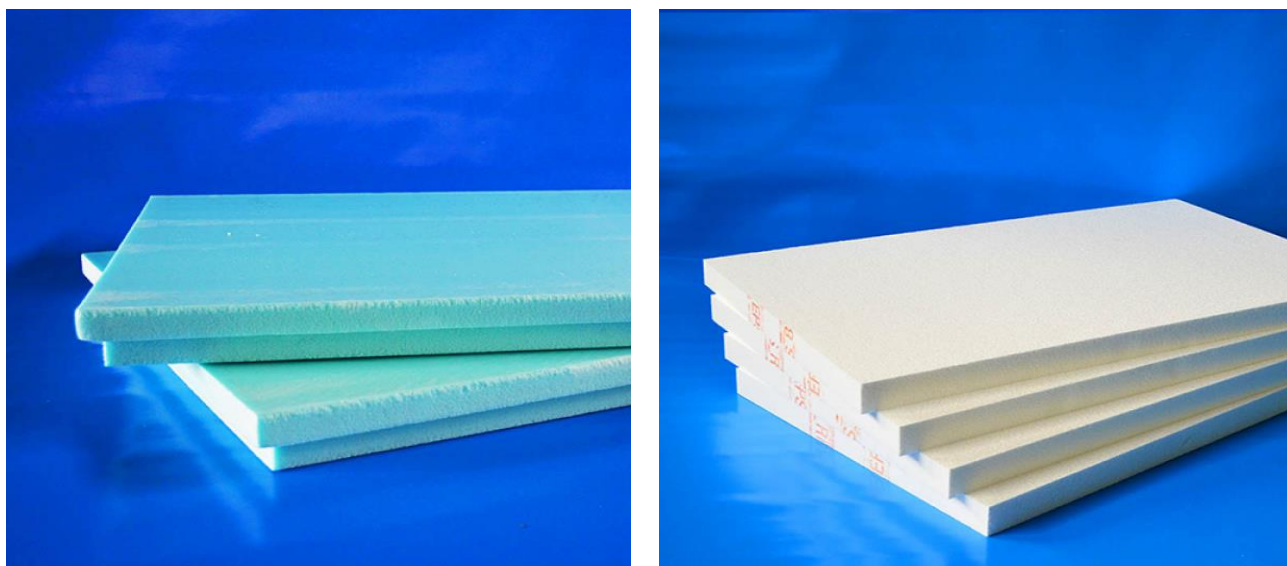
Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των επιλεχθέντων υλικών της θερμομόνωσης παρατίθενται στον ακόλουθο Πίνακα 4.5 [6]:

Πίνακας 4.5: Θερμοφυσικές ιδιότητες θερμομονωτικών υλικών

Υλικό	Πυκνότητα $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας $\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	Ειδική θερμοχωρητικότητα $C_p \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$	Συντελεστής αντίστασης σε διάχυση υδρατμών μ
Εξηλασμένη Πολυστερίνη	30 - 40	0,031 – 0,038	1450	80 - 250
Διογκωμένη Πολυστερίνη	15 - 30	0,032 – 0,041	1450	25 - 70
Πετροβάμβακας	50 - 180	0,033 – 0,041	840	1,0 – 1,5

Στο σημείο αυτό, αναφέρονται κάποιες βασικές πληροφορίες για καθένα από τα επιλεχθέντα θερμομονωτικά υλικά.

Τόσο η εξηλασμένη όσο και η διογκωμένη πολυστερίνη είναι οργανικά υλικά που παράγονται με βάση την πολυστερίνη, δηλαδή με πρώτη ύλη παραγόμενη από το πετρέλαιο. Εντοπίζονται ωστόσο διαφορές στον τρόπο παραγωγής τους, οι οποίες οδηγούν στην διαμόρφωση διαφορετικών χαρακτηριστικών. Αρχικά, ως προς το χρώμα τους, η διογκωμένη πολυστερίνη είναι συνήθως λευκή, ενώ η εξηλασμένη είναι συνήθως μπλε ή και πράσινη. Στην παρακάτω **Εικόνα 4.5** φαίνονται σε αντιπαραβολή πλάκες XPS και EPS.



Εικόνα 4.5: Πλάκες εξηλασμένης πολυστερίνης (XPS) (αριστερά) [30] και πλάκες διογκωμένης πολυστερίνης (EPS) (δεξιά) [31]

Ειδικότερα, η εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS) παράγεται με την διαδικασία της εξέλασης κατά την διάρκεια της οποίας γίνεται πολυμερισμός της θερμοπλαστικής πολυστερίνης με προωθητικό αέριο τον υδροχλωροφθοράνθρακα [9]. Έχει μονωτικές

ιδιότητες λόγω παγίδευσης αερίου σε κλειστές κυψελίδες. Είναι ακριβώς αυτή η κλειστή κυψελωτή δομή που προσδίδει στην εξηλασμένη πολυστερίνη πλεονέκτημα έναντι της διογκωμένης πολυστερίνης, μιας και έχει υψηλότερο θερμομονωτικό συντελεστή, σχεδόν μηδενική απορροφητικότητα σε υγρασία και πολύ μεγάλη αντοχή σε συμπίεση [9]. Από την άλλη, αξίζει να σημειωθεί πως η εξηλασμένη πολυστερίνη δεν αναπνέει με αποτέλεσμα να δημιουργούνται συμπυκνώσεις υδρατμών, ενώ είναι καιόμενη, σε αντίθεση με την αυτοσβενόμενη διογκωμένη πολυστερίνη, η οποία δεν αναφλέγεται ούτε μεταδίδει την φωτιά.

Αντίστοιχα, η διογκωμένη πολυστερίνη (EPS) αποτελείται από θερμοπλαστικές κυψελίδες πολυστυρολίου, δηλαδή ουσιαστικά κόκκους. Αυτοί οι κόκκοι διογκώνονται και γίνονται σφαιρίδια, τα οποία κολλούν μεταξύ τους σε καλούπι με υψηλή πίεση ατμού, διαμορφώνοντας έτσι μια ανοιχτή κυψελωτή δομή με τριχοειδή. Στο τελικό προϊόν το 98% κατόγκον είναι αέρας και 2% είναι τα τοιχώματα των κλειστών κυψελών από διογκωμένο πολυστυρένιο [9]. Ως προς την σύγκριση με την εξηλασμένη πολυστερίνη, η διογκωμένη πολυστερίνη διαθέτει μεγαλύτερη ελαστικότητα και επομένως απορροφά ευκολότερα τα κρουστικά σοκ, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο εμφάνισης ρωγμών στα επιχρίσματα. Επιπλέον, η διογκωμένη πολυστερίνη έχει μικρότερο συντελεστή αντίστασης στην διάχυση υδρατμών και έτσι το κτίριο αναπνέει καλύτερα, ενώ ταυτόχρονα πιθανή υγρασία που μπορεί να βρεθεί πίσω από το σύστημα εξωτερικής θερμομόνωσης μπορεί εξαιτίας της αυξημένης διαπνοής να εξατμιστεί. Η υδατοαπορρόφηση αυτή βέβαια, έχει ως συνέπεια την μείωση της θερμομονωτικής της ικανότητας με την πάροδο του χρόνου. Τέλος αναφέρεται πως η διογκωμένη πολυστερίνη κοστίζει κατά μέσο όρο 20% λιγότερο σε σχέση με την εξηλασμένη [9].

Το τρίτο μονωτικό υλικό που επιλέγεται, δηλαδή ο πετροβάμβακας, ανήκει στην κατηγορία των ανόργανων ινωδών μονωτικών υλικών. Παράγεται με την τήξη σε κλίβανο πετρωμάτων όπως ο διαβάσης και ο δολομίτης σε θερμοκρασία πάνω από 1400°C [9]. Στην συνέχεια, η μάζα που παράγεται από την διαδικασία τήξης καταλήγει σε διάταξη που δημιουργεί τις ίνες με μηχανισμό φυγοκέντρισης. Ο μηχανισμός διαλύει την μάζα σε σταγόνες και διερχόμενος αέρας διασπά τις σταγόνες σε ίνες. Οι ίνες περνάνε μέσα σε ένα θάλαμο συγκέντρωσης και έτσι επιτυγχάνεται η δημιουργία ενός αρχικού στρώματος μονωτικού υλικού από πετροβάμβακα σε μορφή ινών με διάμετρο 6 έως 20 μm [9]. Οι κύριες χημικές ενώσεις που περιλαμβάνονται στην σύνθεση των προαναφερθέντων ακατέργαστων υλικών είναι τα οξειδία του πυρίτιου, αλουμινίου, ασβεστίου, μαγνησίου και σιδήρου.

Ο πετροβάμβακας ως υλικό είναι ανθεκτικό στην υγρασία, δηλαδή διατηρεί τις μονωτικές του ιδιότητες ακόμα και όταν βραχεί, ενώ παράλληλα είναι άκαυστος μέχρι και στους 1000°C [9], ιδιότητα που πολλές φορές λειτουργεί σαν πυροφραγή. Επίσης έχει και θερμομονωτικές και ηχομονωτικές ιδιότητες, μάλιστα καλύτερες ηχομονωτικές ιδιότητες σε σχέση με άλλα θερμομονωτικά υλικά, όπως τα προαναφερθέντα XPS και EPS.

Στην ακόλουθη **Εικόνα 4.6** φαίνεται εποπτικά το θερμομονωτικό υλικό αυτό:



Εικόνα 4.6: Πλάκα πετροβάμβακα [32]

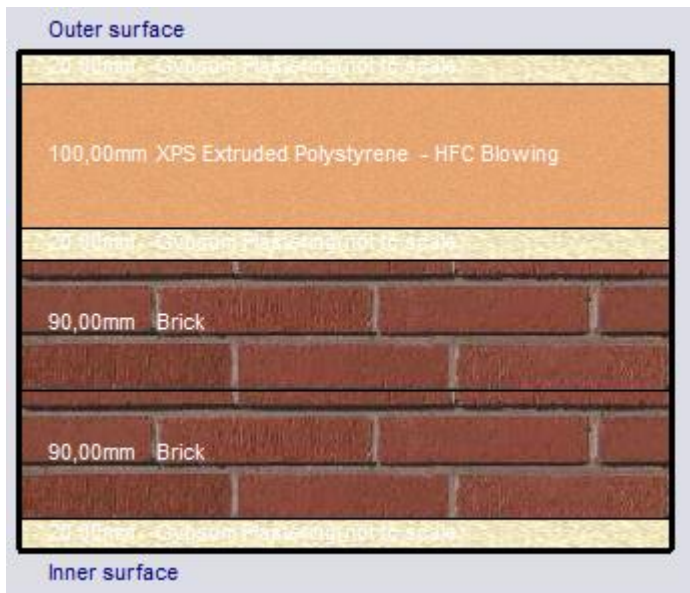
Προφανώς, η επιλογή λοιπόν του ενός ή του άλλου υλικού είναι σχετική και γενικός κανόνας δεν μπορεί να υπάρξει. Για αυτό και εκτελείται προσομοίωση για το καθένα υλικό με στόχο την επιλογή του βέλτιστου. Για το υπό μελέτη κτίριο, η θερμομόνωση τοποθετείται στην εξωτερική επιφάνεια των τοίχων και εσωτερικά στην κεκλιμένη επιφάνεια της στέγης. Επίσης σημειώνεται πως, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, εξετάζεται η τοποθέτηση θερμομόνωσης μόνο στις εξωτερικές τοιχοποιίες και στην στέγη, καθώς τα δάπεδα γειτνιάζουν με θερμαινόμενους χώρους και έτσι δεν έχει κάποιο νόημα η θερμομόνωση σε αυτά.

Όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 4.3** του **υποκεφαλαίου 4.3.2** η θερμομόνωση έχει τα εξής διαδοχικά στρώματα με σειρά από το εσωτερικό προς το εξωτερικό στρώμα:

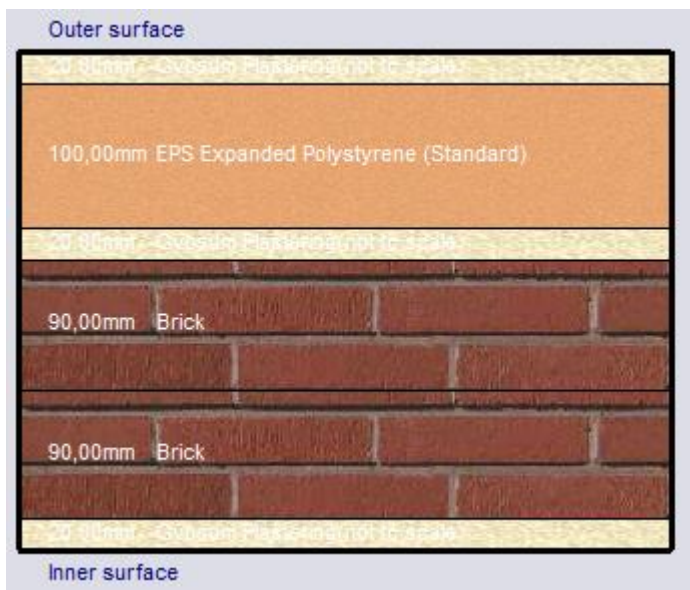
- Κόλλα θερμομονωτικών πλακών (υλικό επικόλλησης)
- Θερμομόνωση (ένα εκ των τριών προαναφερθέντων υλικών)
- Βύσματα για μηχανική στερέωση
- Βασικό επίχρισμα
- Πλέγμα συγκράτησης - ενίσχυσης (π.χ. υαλόπλεγμα)
- Τελικό επίχρισμα (σοβάς)

Ως προς το πάχος του θερμομονωτικού στρώματος, βάσει συνήθων πρακτικών στις κατασκευές ενεργειακά αποδοτικών κτιρίων, επιλέγεται η τιμή 100mm, δηλαδή 10 εκατοστά. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά και ενεργειακά συστήματα του κτιρίου παραμένουν τα ίδια όπως στην υφιστάμενη κατάσταση.

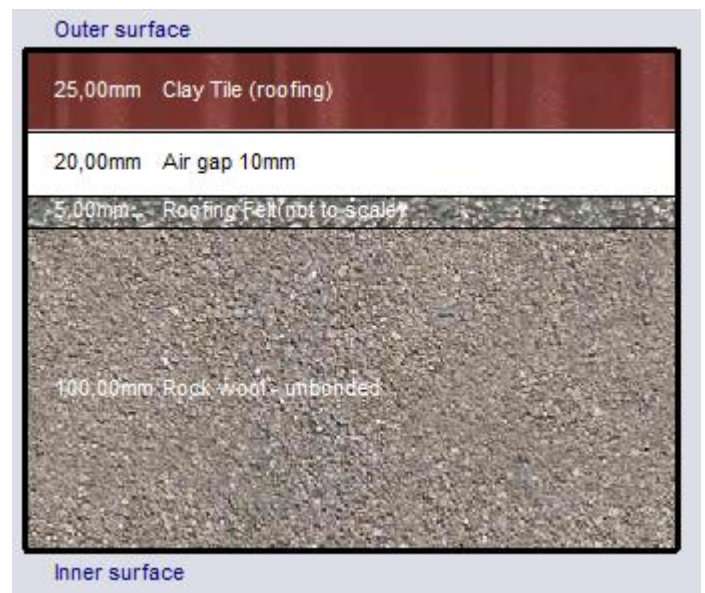
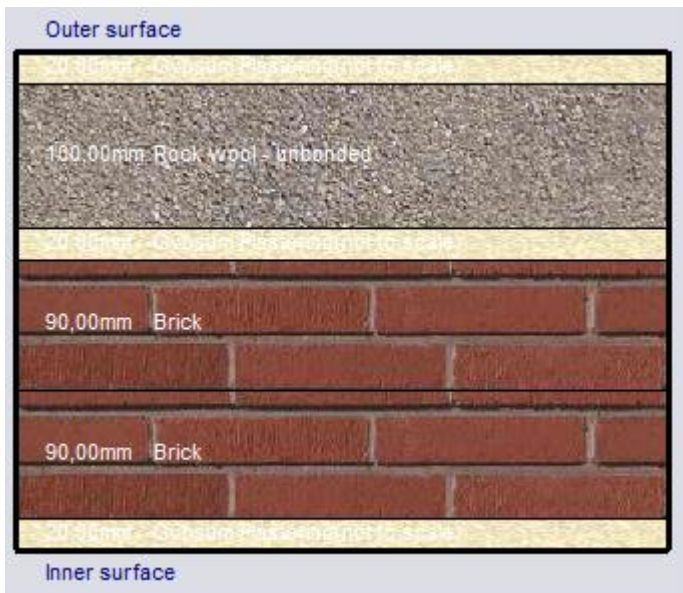
Παρακάτω φαίνεται η μοντελοποίηση της τοποθέτησης θερμομόνωσης στο λογισμικό DesignBuilder για καθένα από τα επιλεχθέντα θερμομονωτικά υλικά, τόσο για την εξωτερική τοιχοποιία όσο και για την στέγη του κτιρίου:



Εικόνα 4.7: Τοποθέτηση θερμομόνωσης XPS στην εξωτερική τοιχοποιία (αριστερά) και στην στέγη (δεξιά)



Εικόνα 4.8: Τοποθέτηση θερμομόνωσης EPS στην εξωτερική τοιχοποιία (αριστερά) και στην στέγη (δεξιά)



Εικόνα 4.9: Τοποθέτηση θερμομόνωσης πετροβάμβακα στην εξωτερική τοιχοποιία (αριστερά) και στην στέγη (δεξιά)

Στον παρακάτω **Πίνακα 4.6** συγκεντρώνονται οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας $U \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ των δομικών στοιχείων μετά την τοποθέτηση του κάθε θερμομονωτικού υλικού:

Πίνακας 4.6: Τιμές συντελεστή θερμοπερατότητας $U \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ κάθε δομικού στοιχείου μετά την τοποθέτηση της αντίστοιχης θερμομόνωσης

Συντελεστής θερμοπερατότητας $U \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$		
Δομικό στοιχείο	Εξωτερική τοιχοποιία	Στέγη
Θερμομονωτικό υλικό		
Εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS)	0,256	0,272
Διογκωμένη πολυστερίνη (EPS)	0,326	0,352
Πετροβάμβακας	0,371	0,405

4.3.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης για την 3^η παρέμβαση εξοικονόμησης ενέργειας

Με τα παραπάνω δεδομένα, λοιπόν, έτρεξε η προσομοίωση στο πρόγραμμα για κάθε μία περίπτωση μονωτικού υλικού και στο σημείο αυτό παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Στον παρακάτω **Πίνακα 4.7** παρατίθεται συγκριτικά, για κάθε περίπτωση θερμομονωτικού υλικού, η ετησίως καταναλισκόμενη ενέργεια για κάθε κατηγορία που αφορά το κτίριο.

Πίνακας 4.7: Ετησίως καταναλισκόμενη ενέργεια για κάθε κατηγορία που αφορά το κτίριο ανάλογα με το θερμομονωτικό υλικό που επιλέγεται

Κατηγορία	Ετησίως Καταναλισκόμενη Ενέργεια [<i>kWh</i>]			
	Θερμομονωτικό υλικό	Εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS)	Διογκωμένη πολυστερίνη (EPS)	Πετροβάμβακας
Θέρμανση		741,36	809,82	854,23
Ψύξη		11412,40	11404,34	11395,73
Φωτισμός		28846,06	28846,06	28846,06
Ηλεκτρονικός εξοπλισμός		22409,51	22409,51	22409,51
Λοιπές καταναλώσεις		3416,86	3438,69	3450,98
Συνολική κατανάλωση		66826,19	66908,43	66956,51

Όπως είναι αναμενόμενο, δεν υπάρχει αλλαγή όσον αφορά τις κατηγορίες του φωτισμού και του ηλεκτρονικού εξοπλισμού, όμως σημαντική είναι η διαφορά που παρατηρείται στην κατανάλωση για την θέρμανση του κτιρίου. Συγκεκριμένα, σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση, με την τοποθέτηση θερμομόνωσης εξηλασμένης πολυστερίνης επέρχεται μείωση 75,95% στην κατανάλωση για θέρμανση, με την τοποθέτηση θερμομόνωσης διογκωμένης πολυστερίνης επέρχεται μείωση 73,73%, ενώ με την τοποθέτηση πετροβάμβακα επέρχεται μείωση 72,29%.

Βέβαια, η μεμονωμένη αυτή μείωση στην κατανάλωση για την θέρμανση δεν αντικατοπτρίζεται στα ίδια επίπεδα και στην συνολική κατανάλωση. Ειδικότερα, σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση, στην συνολική ετήσια κατανάλωση λόγω της τοποθέτησης θερμομόνωσης εξηλασμένης πολυστερίνης επέρχεται μείωση 4,69%, λόγω της τοποθέτησης θερμομόνωσης διογκωμένης πολυστερίνης επέρχεται μείωση 4,57%, ενώ λόγω της τοποθέτησης πετροβάμβακα επέρχεται μείωση 4,5%. Οι διαφοροποιήσεις αυτές μεταξύ κατανάλωσης για θέρμανση και συνολικής κατανάλωσης, σχετίζονται άμεσα με το γεγονός ότι στην υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου, μεγάλο ποσοστό της συνολικής ετήσιας κατανάλωσης αντιστοιχεί στον φωτισμό (42,22%) και στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό (32,8%) για τους οποίους οι καταναλώσεις μένουν αμετάβλητες, παρά την τοποθέτηση θερμομόνωσης. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί λόγω της ύπαρξης παραθύρων σε όλους τους εξωτερικούς τοίχους του κτιρίου, είναι λογικό η κατανάλωση για ψύξη να μην παρουσιάζει αντίστοιχη μείωση όπως η κατανάλωση για θέρμανση μετά την τοποθέτηση της θερμομόνωσης.

Εμφανώς, το θερμομονωτικό υλικό που επιφέρει τα καλύτερα αποτελέσματα εξοικονόμησης ενέργειας είναι η εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS), για αυτό και τελικώς επιλέγεται προς χρήση έναντι των άλλων δύο υλικών. Στον ακόλουθο **Πίνακα 4.8**, λοιπόν, παρατίθενται οι μηνιαίες καταναλώσεις του κτιρίου, καθώς και η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας η οποία ανέρχεται σε 66826,19 *kWh* για το επιλεγμένο θερμομονωτικό υλικό, δηλαδή για την εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS).

Πίνακας 4.8: Συνολικές μηνιαίες καταναλώσεις ενέργειας/καυσίμων για το κτίριο με την χρήση εξηλασμένης πολυστερίνης (XPS)

Μήνας	Συνολική κατανάλωση φυσικού αερίου [kWh]	Συνολική κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος [kWh]	Συνολική Καταναλισκόμενη Ενέργεια [kWh]
Ιανουάριος	270,36	4685,82	4956,18
Φεβρουάριος	192,15	4380,06	4572,21
Μάρτιος	78,82	5335,62	5414,44
Απρίλιος	7,40	5243,75	5251,15
Μάιος	0,95	5708,79	5709,74
Ιούνιος	0,0	6075,61	6075,61
Ιούλιος	0,0	6152,46	6152,46
Αύγουστος	0,0	6791,98	6791,98
Σεπτέμβριος	0,0	6148,82	6148,82
Οκτώβριος	0,0	5480,65	5480,65
Νοέμβριος	32,42	5232,89	5265,32
Δεκέμβριος	159,25	4848,39	5007,63
Σύνολο Ετησίως	741,36	66084,83	66826,19

4.4 Σύστημα HVAC: Επιλογή γεωθερμικής αντλίας θερμότητας

Στο υποκεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται αναλυτικά το σύστημα HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) που προορίζεται για αντικατάσταση του υπάρχοντος συστήματος του υπό μελέτη κτιρίου γραφείων. Ακολουθώντας παρουσιάζεται η προσομοίωση στο λογισμικό DesignBuilder και τα αποτελέσματα της προτεινόμενης αυτής αλλαγής.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα κατά κανόνα χρησιμοποιούμενα HVAC συστήματα για κτιριακές εφαρμογές, επιλέγεται η χρήση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας για θέρμανση και ψύξη στο υπό μελέτη κτίριο, διότι αποτελεί την πλέον συμφέρουσα λύση από άποψης εξοικονόμησης ενέργειας και είναι το κατεξοχήν σύστημα που αξιοποιείται σε εφαρμογές κτιρίων χαμηλής κατανάλωσης.

Στο σημείο αυτό θεωρείται σκόπιμο να αναφερθούν κάποια βασικά στοιχεία για τις αντλίες θερμότητας, τις κατηγορίες τους καθώς και η επεξήγηση του τρόπου λειτουργίας τους, ενώ εν συνεχεία εκτενέστερη αναφορά γίνεται στις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, όπως αυτή που χρησιμοποιείται στο υπό μελέτη κτίριο γραφείων.

4.4.1 Βασικά στοιχεία για τις αντλίες θερμότητας

Αντλία θερμότητας ονομάζεται η μηχανολογική διάταξη υψηλής απόδοσης που επιτρέπει την μεταφορά θερμικής ενέργειας από ένα χώρο χαμηλής θερμοκρασίας σε ένα χώρο υψηλότερης θερμοκρασίας [33]. Εξ ορισμού λοιπόν στις αντλίες θερμότητας η μεταφορά της θερμικής ενέργειας συμβαίνει αντίθετα από την φυσική της ροή, η οποία είναι πάντα από τα σώματα με υψηλότερη θερμοκρασία προς τα σώματα με χαμηλότερη θερμοκρασία βάσει του 2ου θερμοδυναμικού αξιώματος. Η αντίθετη αυτή πορεία της θερμικής ενέργειας, επιτυγχάνεται με την κατανάλωση έργου, το οποίο είναι ηλεκτρική ενέργεια, μέσω ενός κύκλου εξάτμισης και συμπύκνωσης κατάλληλου εργαζόμενου μέσου. Με την βοήθεια λοιπόν μιας πηγής ηλεκτρικού ρεύματος, η λειτουργία της αντλίας βασίζεται στον ψυκτικό κύκλο, που είναι ένας διαρκής κύκλος εκτόνωσης και συμπίεσης ενός ρευστού χάρη στον οποίον μεταφέρεται θερμική ενέργεια μεταξύ δύο θερμοδοχείων [33]. Η θερμική ενέργεια διατίθεται με την μορφή θερμού αέρα ή θερμού νερού.

Οι αντλίες θερμότητας αποτελούν μηχανήματα υψηλής απόδοσης, διότι η θερμική ενέργεια που μεταφέρεται είναι πολλαπλάσια της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς η ίδια η θερμική ενέργεια δεν παράγεται με την κατανάλωση έργου αλλά αποσπάται από έναν χώρο που αποτελεί «δεξαμενή θερμότητας» και μεταφέρεται σε κάποιον άλλον χώρο. Για αυτό και η αντλία θερμότητας ως επιλογή για τον κλιματισμό ενός χώρου είναι εξαιρετικά συμφέρουσα, μιας και με κατανάλωση ενός σχετικά μικρού ποσού ηλεκτρικής ενέργειας, μεταφέρει στον αποδέκτη πολλαπλάσια ενέργεια προς χρήση για θέρμανση και ψύξη.

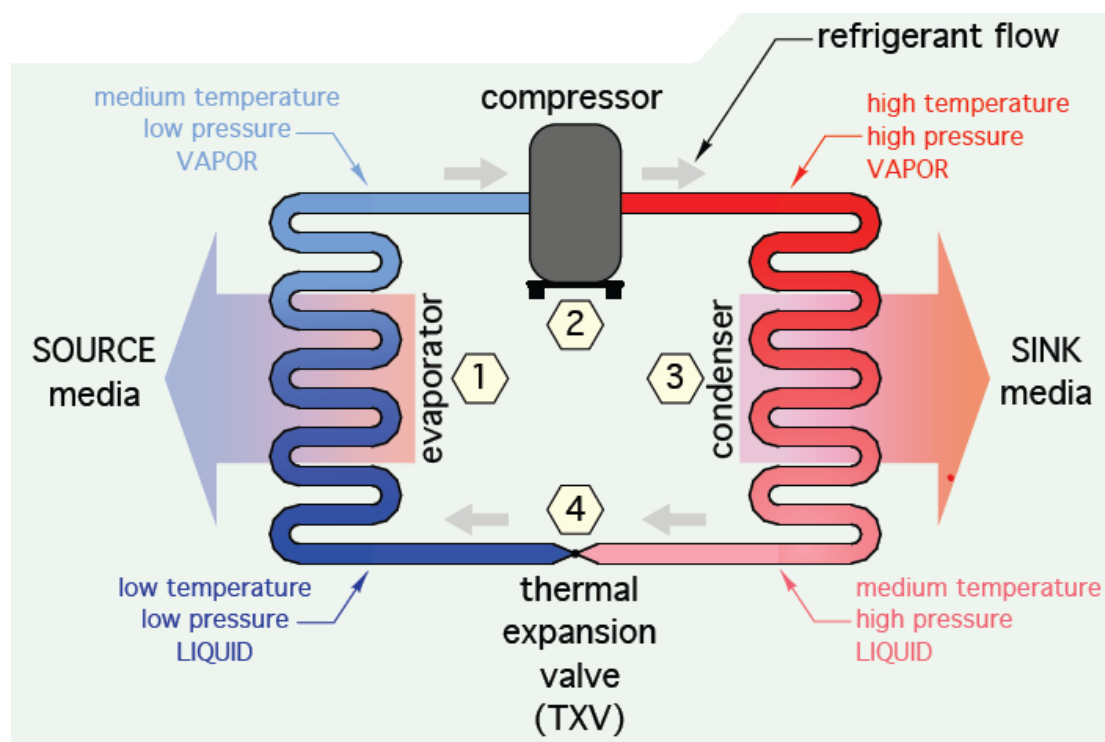
Μια αντλία θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε εφαρμογές θέρμανσης όσο και σε εφαρμογές ψύξης, ακριβώς διότι ο κύκλος λειτουργίας της είναι πλήρως αναστρέψιμος [33]. Αναλυτικότερα, για την περίπτωση της θέρμανσης ενός χώρου σε θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του περιβάλλοντος, η αντλία θερμότητας απορροφά θερμική ενέργεια από το περιβάλλον το οποίο ορίζεται ως το σύστημα χαμηλής θερμοκρασίας και την μεταφέρει στον «προς θέρμανση» χώρο που ορίζεται ως σύστημα υψηλής θερμοκρασίας. Κατ' αντιστοιχίαν, για την περίπτωση της ψύξης ενός χώρου σε θερμοκρασία χαμηλότερη αυτής του περιβάλλοντος, η αντλία θερμότητας απορροφά θερμότητα από τον «προς ψύξη» χώρο, ο οποίος ορίζεται ως το σύστημα χαμηλής θερμοκρασίας και την μεταφέρει στο περιβάλλον που ορίζεται ως το σύστημα υψηλής θερμοκρασίας.

Πρακτικά, μια συνήθης αντλία θερμότητας αποτελείται από ένα εσωτερικό τμήμα το οποίο βρίσκεται στον κλιματιζόμενο χώρο, καθώς και από μια εξωτερική μονάδα η οποία βρίσκεται στο εξωτερικό περιβάλλον, όπου υπάρχει η χρησιμοποιούμενη διαθέσιμη ενεργειακή πηγή. Μάλιστα, ένα βασικό κριτήριο κατηγοριοποίησης των αντλιών θερμότητας είναι η πηγή που χρησιμοποιούν για να αντλήσουν ενέργεια από το περιβάλλον, η οποία μπορεί για παράδειγμα να είναι ο αέρας, το νερό (ποτάμια, λίμνες) ή το έδαφος. Απαραίτητη προϋπόθεση για την δυνατότητα ψύξης είναι η αντλία θερμότητας να είναι συνδεδεμένη είτε με ενδοδαπέδιο σύστημα

(ενδοδαπέδιος δροσισμός) είτε με μονάδες ανεμιστήρα στοιχείου (fan coils) μιας και δεν είναι δυνατή η λειτουργία ψύξης με κλασικά θερμαντικά σώματα.

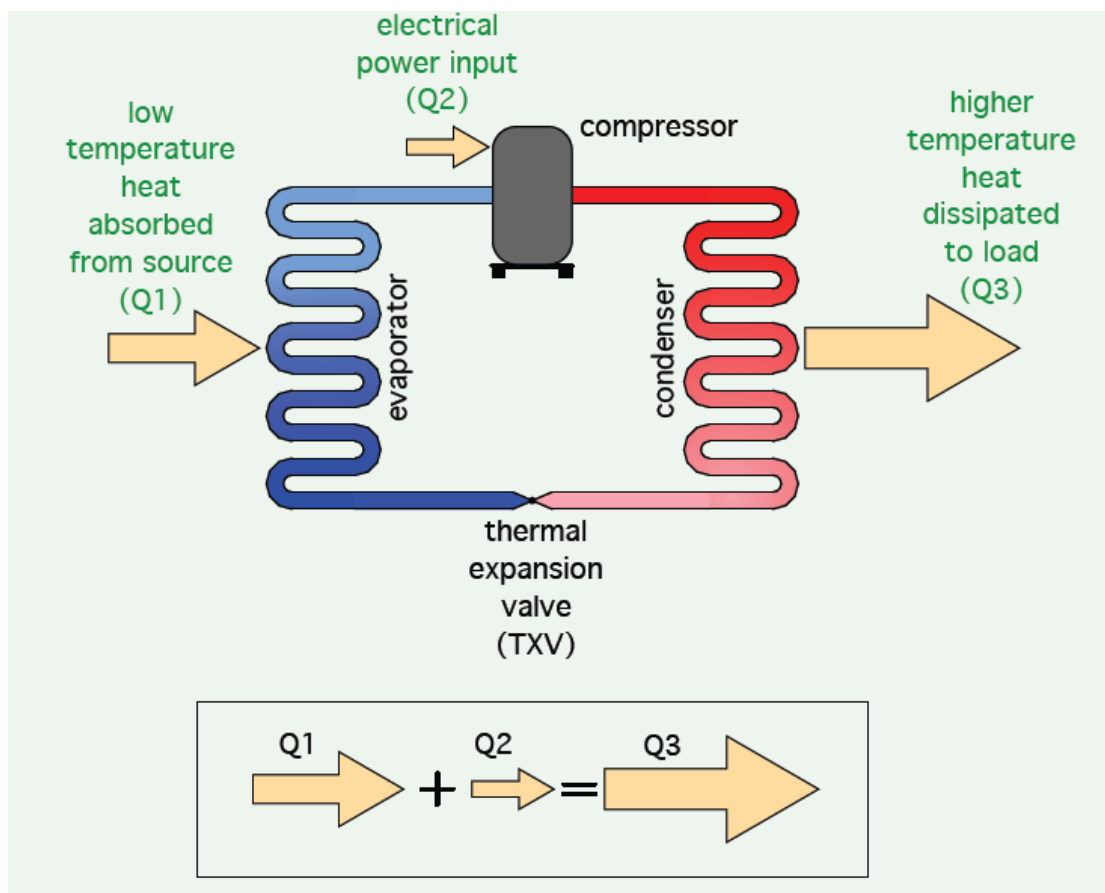
Όσον αφορά στα δομικά στοιχεία μιας αντλίας θερμότητας, τα βασικά τμήματα από τα οποία αυτή συντίθεται είναι ο συμπιεστής (compressor), η βαλβίδα εκτόνωσης (expansion valve) και οι δύο εναλλάκτες: συμπυκνωτής (condenser) και ατμοποιητής (evaporator). Το τμήμα συμπιεστή – συμπυκνωτή είναι αυτό που απορρίπτει θερμότητα στο περιβάλλον (ή κατά την αντίστροφη λειτουργία απορροφά θερμότητα από το περιβάλλον). Από την άλλη, ο ατμοποιητής συνδυαστικά και με κατάλληλο ανεμιστήρα απορροφά θερμότητα από τον εσωτερικό χώρο (ή κατά την αντίστροφη λειτουργία προσδίδει θερμότητα). Ο μηχανισμός αντιστροφής της λειτουργίας της αντλίας θερμότητας ανάλογα με τις ανάγκες του κλιματιζόμενου χώρου είναι μια τετράοδη βαλβίδα. Στο σύστημα προστίθεται και μια συμπληρωματική ηλεκτρική αντίσταση με στόχο την θερμική απόδοση του συστήματος σε περίπτωση που η εξωτερική θερμοκρασία είναι ιδιαίτερα χαμηλή. [33]

Στην παρακάτω **Εικόνα 4.10** φαίνονται εποπτικά τα προαναφερθέντα βασικά τμήματα μιας αντλίας θερμότητας καθώς και οι καταστάσεις πίεσης και θερμοκρασίας των κυκλοφορούντων ρευστών.



Εικόνα 4.10: Βασικά τμήματα αντλίας θερμότητας και πορεία ψυκτικού ρευστού [34]

Επίσης στην ακόλουθη **Εικόνα 4.11** παρατίθεται η βασική ροή ενέργειας που σχετίζεται με τον ψυκτικό κύκλο μιας αντλίας θερμότητας. Το Q_1 είναι η θερμική ενέργεια από την πηγή που απορροφάται από το ψυκτικό ρευστό μέσα στον ατμοποιητή (για την περίπτωση της θέρμανσης ενός χώρου). Το Q_2 είναι η ηλεκτρική ενέργεια που κινεί τον συμπιεστή όταν αυτός λειτουργεί, ενώ το Q_3 είναι η θερμική ενέργεια που διοχετεύεται στον κλιματιζόμενο χώρο από το ψυκτικό υγρό μέσα στον συμπυκνωτή. Σύμφωνα με τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο, το άθροισμα των Q_1 και Q_2 ισούται με το Q_3 .



Εικόνα 4.11: Ενεργειακό ισοζύγιο σε μια αντλία θερμότητας [34]

4.4.2 Κύκλος ψύξης και κύκλος θέρμανσης στις αντλίες θερμότητας

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μια αντλία θερμότητα έχει την δυνατότητα παραγωγής τόσο θέρμανσης όσο και ψύξης για έναν χώρο. Στο σημείο αυτό αναλύονται οι κύκλοι για κάθε περίπτωση.

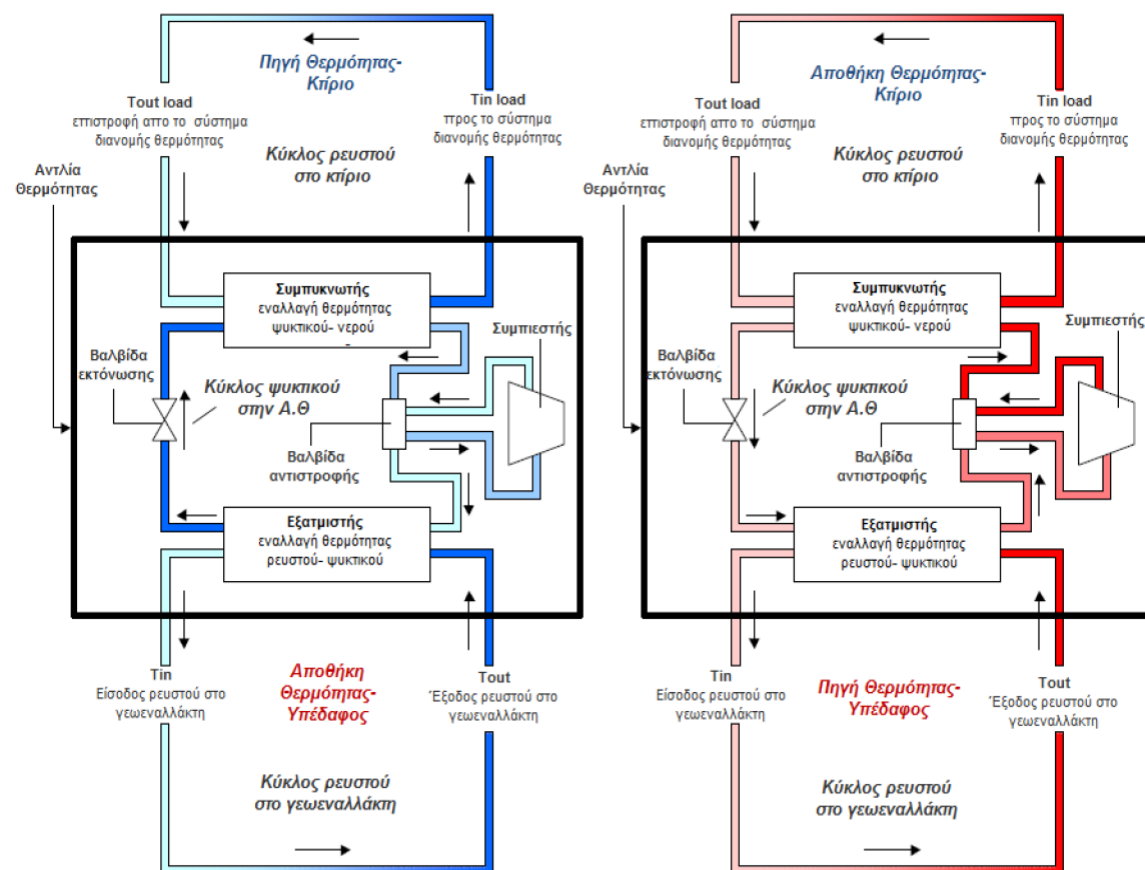
Αξίζει να τονιστεί ότι μια αντλία θερμότητας εκτελεί πάντα ψυκτικό κύκλο, εξάλλου δεν υφίσταται θερμικός κύκλος. Το κείμενο σημείο που επιτρέπει την αντιστροφή της λειτουργίας μιας αντλίας θερμότητας είναι η αντιστροφή του ρόλου του συμπυκνωτή με τον ρόλο του ατμοποιητή. Ο εναλλάκτης του εσωτερικού στοιχείου της αντλίας κατά τις θερμές περιόδους (π.χ. καλοκαίρι) λειτουργεί ως ατμοποιητής ψύχοντας τον χώρο, ενώ κατά τις ψυχρές περιόδους (π.χ. χειμώνας) λειτουργεί ως συμπυκνωτής θερμαίνοντας τον χώρο. Αυτή η αλλαγή της λειτουργίας επιτυγχάνεται χάρη στην χρήση της τετράοδης βαλβίδας η οποία αντιστρέφει την ροή του ψυκτικού μέσου διατηρώντας φυσικά τον ψυκτικό κύκλο, στον οποίον συνεχίζει κανονικά η προσφορά του μηχανικού έργου [33].

Κατά τον κύκλο για την παραγωγή ψύξης, το ψυκτικό μέσο εισέρχεται σε αέρια κατάσταση και χαμηλή πίεση στον συμπιεστή, τον οποίο κινεί ένας κινητήρας. Κατόπιν της συμπίεσης, το ψυκτικό μέσο εξέρχεται από τον συμπιεστή σε αέρια κατάσταση έχοντας πλέον υψηλή πίεση και θερμοκρασία. Στην συνέχεια, περνάει μέσα από τον συμπυκνωτή όπου και αποβάλλει θερμότητα προς το μέσο συμπύκνωσης (αέρας περιβάλλοντος ή νερό) υπό σχεδόν σταθερή θερμοκρασία. Λόγω της αποβολής αυτής της θερμικής ενέργειας, το ψυκτικό μέσο αλλάζει φάση και μετατρέπεται από αέριο σε υγρό, διατηρώντας την υψηλή πίεση που έχει αποκτήσει από τον συμπιεστή. Εξέρχεται λοιπόν από τον συμπυκνωτή ως υγρό υψηλής πίεσης και κατόπιν διέρχεται μέσα από την εκτονωτική βαλβίδα, όπου η πίεση και η θερμοκρασία του μειώνονται σημαντικά και έτσι μετατρέπεται σε μείγμα υγρού και ατμού χαμηλής πίεσης. Τέλος, το ψυκτικό μέσο εισέρχεται στον ατμοποιητή, ο οποίος είναι ο εναλλάκτης που βρίσκεται στον εσωτερικό προς ψύξη χώρο. Εκεί, προσδίδεται θερμική ενέργεια στο ψυκτικό μέσο από τον αέρα του εσωτερικού χώρου και κατ'αυτόν τον τρόπο παράγεται η απαιτούμενη ψυκτική ισχύς, μιας και το ψυκτικό μέσο μετατρέπεται σε αέρια κατάσταση και έχει χαμηλή πίεση και θερμοκρασία. Για να επαναληφθεί η διαδικασία, το ψυκτικό μέσο έπειτα οδηγείται και πάλι στον συμπιεστή, από όπου ξεκινά εκ νέου ο ψυκτικός κύκλος. Για έναν κλιματιζόμενο χώρο, ως προς την πρόσδοση θερμότητας στον συμπυκνωτή και την αποβολή θερμότητας στον ατμοποιητή αντίστοιχα, σημαντική είναι η βοήθεια κατάλληλων ανεμιστήρων οι οποίοι εξασφαλίζουν την ταχύτερη κυκλοφορία του αέρα. [33]

Κατά τον κύκλο για την παραγωγή θέρμανσης επί της ουσίας επιτελούνται οι ίδιες διεργασίες, ωστόσο η φορά του ψυκτικού μέσου είναι αντίστροφη. Ο κύκλος θέρμανσης περιλαμβάνει τα ίδια στάδια με τον κύκλο ψύξης. Όμως, οι δύο εναλλάκτες, συμπυκνωτής και ατμοποιητής, αλλάζουν ρόλους, δηλαδή το στοιχείο που στην περίπτωση της ψύξης εκτελούσε ατμοποίηση, τώρα εκτελεί συμπύκνωση και το αντίθετο. Επομένως στην περίπτωση της θέρμανσης, ο συμπυκνωτής είναι το

σημείο θέρμανσης του ψυκτικού κύκλου, καθώς το ψυκτικό μέσο σε κατάσταση ατμού υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας διέρχεται από τον συμπυκνωτή, υγροποιείται και εξέρχεται σε κατάσταση υγρού υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Με την υγροποίηση αυτή αφαιρείται από το ψυκτικό θερμική ενέργεια, η οποία αποδίδεται στον «προς θέρμανση» χώρο. Έτσι έχουμε πρόσληψη θερμότητας από το εξωτερικό περιβάλλον και αποβολή θερμότητας στον εσωτερικό χώρο. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η αντιστροφή του κύκλου λειτουργίας μιας αντλίας θερμότητας, οφείλεται στην ύπαρξη μιας τετράοδης βαλβίδας, που οδηγεί το ψυκτικό ρευστό, μετά την έξοδό του από το συμπιεστή και την εκτονωτική διάταξη, στους εναλλάκτες θερμότητας ψυκτικού μέσου – αέρα (ή νερού), ανάλογα με την επιλογή των απαιτήσεων μέσω κατάλληλου διακόπτη. Συνολικά σε κάθε περίπτωση, η απορρόφηση και απόδοση θερμότητας γίνονται με εναλλαγή φάσεων, από υγρό σε αέριο και από αέριο σε υγρό, του ψυκτικού μέσου. [33]

Η συνολική διαδικασία τόσο για την περίπτωση της ψύξης όσο και για την περίπτωση της θέρμανσης ενός χώρου με αντλία θερμότητας φαίνεται παρακάτω στην **Εικόνα 4.12**. Ο εναλλάκτης μιας αντλίας θερμότητας ο οποίος μέχρι στιγμή αναφέρθηκε ως ατμοποιητής, στην εικόνα έχει γραφεί ως εξατμιστής, μιας και τα δύο αποτελούν ονομασίες που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του.



Εικόνα 4.12: Λειτουργία ψύξης (αριστερά) και λειτουργία θέρμανσης (δεξιά) μιας αντλίας θερμότητας εδαφικής πηγής [35]

4.4.3 Βασικές κατηγορίες αντλιών θερμότητας

Όσον αφορά τις αντλίες θερμότητας, υπάρχουν ποικίλες ταξινομήσεις. Οι κυριότερες γίνονται με βάση την πηγή θερμότητας και το εργαζόμενο μέσο που χρησιμοποιούν. Ωστόσο, υπάρχουν κατηγορίες και βάσει του θερμοδυναμικού κύκλου που υλοποιούν, του μεγέθους και της διαμόρφωσής τους. Παρακάτω παρατίθενται οι βασικοί τύποι αντλιών θερμότητας, δηλαδή οι τύποι ανάλογα με το μέσο που χρησιμοποιείται για την άντληση της θερμότητας και το μέσο στο οποίο αποβάλλεται η θερμότητα. Οι κατηγορίες είναι οι εξής [36]:

- Αέρα – Αέρα
- Αέρα – Νερού
- Νερού – Νερού
- Νερού – Αέρα
- Εδάφους – Αέρα
- Εδάφους – Νερού

Οι αντλίες θερμότητας αέρα - αέρα αντλούν θερμότητα από τον αέρα περιβάλλοντος και αποδίδουν θερμό αέρα στον κλιματιζόμενο χώρο, ενώ οι αντλίες αέρα - νερού αντλούν θερμότητα από τον αέρα περιβάλλοντος και αποδίδουν θερμό νερό, το οποίο μετά μπορεί να κυκλοφορεί σε ένα σύστημα θέρμανσης για να ζεστάνει κάποια θερμαντικά σώματα. Οι δύο αυτές κατηγορίες είναι οι πλέον διαδεδομένες σήμερα και κατασκευάζονται σχεδόν αποκλειστικά σε αναστρέψιμα μοντέλα, ούτως ώστε να μπορούν να παρέχουν τόσο θέρμανση όσο και ψύξη σε έναν χώρο. Στο σημείο αυτό σημειώνεται πως μια αντλία θερμότητας αέρα – αέρα είναι το γνωστό κλιματιστικό που βρίσκει συχνή εφαρμογή στην ψύξη κτιρίων.

Οι αντλίες θερμότητας νερού -νερού αντλούν θερμότητα από νερό και την αποδίδουν σε νερό εσωτερικού δικτύου, ενώ οι νερού – αέρα ομοίως αντλούν θερμότητα από νερό αλλά την αποδίδουν σε εσωτερικό δίκτυο με αεραγωγούς. Το νερό ως πηγή μπορεί να είναι νερό από πύργο ψύξης, από ποτάμι, θάλασσα ή ακόμα και νερό από γεώτρηση ή πηγάδι. Στην τελευταία περίπτωση γίνεται τοποθέτηση και γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, οι οποίες αλλιώς καλούνται αντλίες θερμότητας εδάφους – αέρα ή εδάφους – νερού. Στις αντλίες εδάφους – αέρα και εδάφους – νερού, η άντληση της θερμότητας γίνεται μέσα στο έδαφος, δηλαδή ο ατμοποιητής ή συμπυκνωτής αντίστοιχα είναι τοποθετημένος εντός του εδάφους. Και τα δίκτυα στον εσωτερικό κλιματιζόμενο χώρο είναι είτε δίκτυα αέρα (στις εδάφους – αέρα) είτε δίκτυα νερού (στις εδάφους – νερού). Στις γεωθερμικές αντλίες καθώς και στα πολλά πλεονεκτήματα χρήσης τους σε κτιριακές εφαρμογές αναφέρεται το επόμενο **υποκεφάλαιο 4.4.4.**

Στις αντλίες θερμότητας αέρα – αέρα γίνεται και μια επιπλέον ταξινόμηση ανάλογα με την θέση του επιμέρους εξοπλισμού από τον οποίον αυτές συγκροτούνται. Οι σχετικές κατηγορίες είναι οι εξής [37]:

- Αυτόνομες (τύπου compact & τύπου monoblock)
Σε αυτές όλος ο εξοπλισμός (εξατμιστής, συμπιεστής, συμπυκνωτής κλπ.) βρίσκεται μέσα σε ένα ενιαίο κοινό κέλυφος και είναι κατά βάση κατασκευασμένες για τοποθέτηση σε εξωτερικό χώρο. Στις αντλίες monoblock συνδέονται απ' ευθείας οι σωλήνες νερού που κυκλοφορούν το νερό στα θερμαντικά σώματα, τα fan coils ή το δίκτυο της ενδοδαπέδιας θέρμανσης, χωρίς να παρεμβάλλεται άλλο στοιχείο. Ως τεχνολογία δεν επιλέγεται συχνά προς χρήση πλέον κυρίως λόγω προβλημάτων θορύβου.
- Διαιρούμενες (τύπου split)
Είναι οι πιο διαδεδομένες τύπος αντλίας θερμότητα και αποτελείται από δύο συσκευές, μία εσωτερική μονάδα η οποία τοποθετείται στον κλιματιζόμενο χώρο και μία εξωτερική μονάδα η οποία τοποθετείται στο εξωτερικό περιβάλλον. Η σύνδεση μεταξύ τους γίνεται με ψυκτικό δίκτυο από ειδικές σωληνώσεις ανάλογης διαμέτρου. Στα μοντέλα split, η εσωτερική μονάδα ονομάζεται «υδραυλική μονάδα» (hydraulic unit) και εκεί είναι που συνδέονται οι σωλήνες σύνδεσης με τα θερμαντικά σώματα, τα fan coils ή την ενδοδαπέδια θέρμανση. Σε αυτά τα μοντέλα ο συμπιεστής βρίσκεται στην εξωτερική μονάδα, ενώ ο εναλλάκτης στην εσωτερική.
- Πολυδιαιρούμενες (τύπου multi, VRV ή VRF)
Αποτελούνται από δύο ή περισσότερες εσωτερικές μονάδες, που τοποθετούνται σε διάφορους κλιματιζόμενους χώρους και την εξωτερική μονάδα που τοποθετείται στο εξωτερικό περιβάλλον. Η σύνδεση μεταξύ τους γίνεται με ψυκτικά δίκτυα από ειδικές σωληνώσεις ανάλογης διαμέτρου.

Έπειτα, οι αντλίες θερμότητας κατατάσσονται ανάλογα με τον τρόπο αναστροφής της λειτουργίας τους σε δύο κατηγορίες, οι οποίες είναι οι εξής [37]:

- Σταθερού κυκλώματος ψυκτικού μέσου
Σε αυτήν την κατηγορία η ροή του ψυκτικού μέσου διατηρείται σταθερή και απλώς αλλάζει η θέση των μέσων προσαγωγής ή απαγωγής της θερμότητας. Πλέον χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές, κυρίως σε μεγάλες μονάδες με εγκαταστάσεις νερού.
- Μεταβλητού κυκλώματος ψυκτικού μέσου
Σε αυτήν την κατηγορία, η οποία είναι η πλέον διαδεδομένη στις μικρού και μεσαίου μεγέθους μονάδες, η αναστροφή της ροής του ψυκτικού μέσου γίνεται με χρήση τετράοδης βαλβίδας όπως αναλύθηκε και στο **υποκεφάλαιο 4.4.2.**

Τέλος, μια άλλη διάκριση των αντλιών θερμότητας είναι σε [37]:

- Αντλίες θερμότητας με τεχνολογία DC inverter
Οι αντλίες θερμότητας αυτές διαθέτουν έναν μηχανισμό που επιτρέπει την αυτοπροσαρμογή στις απαιτήσεις του χώρου θέρμανσης ή ψύξης κάθε χρονική στιγμή, καθώς αυξομειώνουν τις στροφές του συμπιεστή τους δηλαδή προσαρμόζουν την ισχύ τους στις ανάγκες του χώρου. Κατ' αυτόν τον

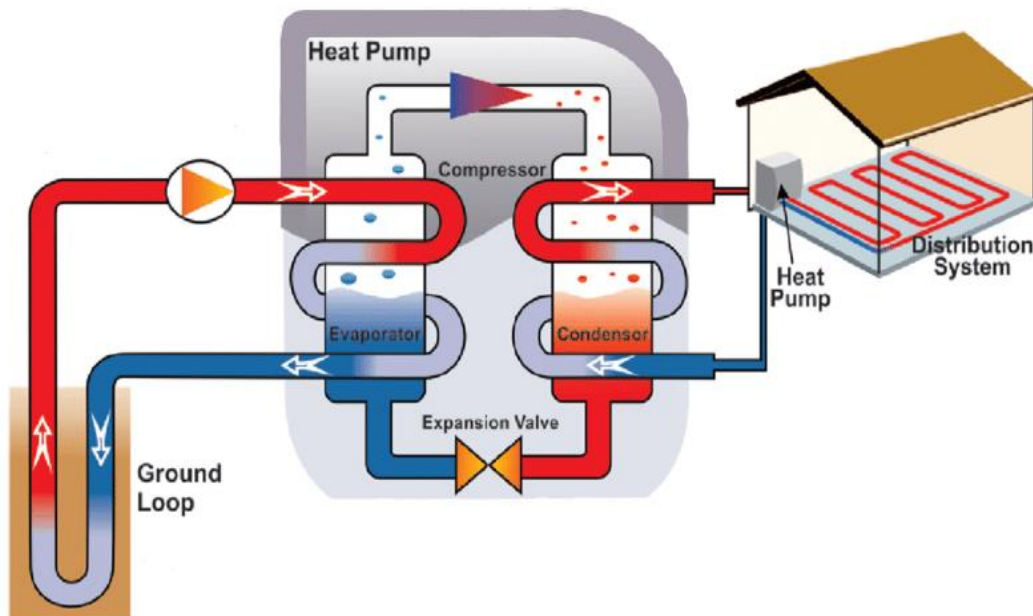
τρόπο, έχουν καλύτερο βαθμό απόδοσης, δηλαδή επιτυγχάνεται ιδιαίτερα χαμηλή κατανάλωση κατά την λειτουργία τους.

- Αντλίες θερμότητας on/off

Οι αντλίες θερμότητας on/off δεν διαθέτουν αντίστοιχο μηχανισμό και έτσι λειτουργούν σε πλήρη ισχύ μέχρις ότου επιτευχθεί ο στόχος (η θέρμανση ή η ψύξη του χώρου), όπου και σταματούν (off), ενώ επανεκκινούν (on) όταν η θερμοκρασία του χώρου αποκλίνει ξανά από την επιθυμητή τιμή.

4.4.4 Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας

Η γεωθερμική αντλία θερμότητας (Ground Source Heat Pump, GSHP), όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μεταφέρει θερμότητα από και προς το έδαφος με στόχο την θέρμανση και ψύξη ενός χώρου. Για την ακρίβεια αξιοποιείται η ενέργεια που περιέχεται στις εδαφικές μάζες του άμεσου περιβάλλοντος ενός κτιρίου. Ένα γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από το σύστημα εναλλάκτη θερμότητας εντός του εδάφους, την γεωθερμική αντλία θερμότητας και το σύστημα θέρμανσης-ψύξης εντός του κτιρίου. Για την λειτουργία ενός γεωθερμικού συστήματος απαιτείται υποχρεωτικά η ύπαρξη γεωθερμικού εναλλάκτη (λέγεται και γεωεναλλάκτης), δηλαδή ενός εκτεταμένου δικτύου θαμμένων στο έδαφος σωληνώσεων, εντός των οποίων κυκλοφορεί νερό ή αντιψυκτικό διάλυμα [33]. Η διάταξη σχηματικά φαίνεται στην παρακάτω **Εικόνα 4.13**:



Εικόνα 4.13: Γεωθερμικό σύστημα με αντλία θερμότητας σε λειτουργία θέρμανσης[38]

Αναλυτικότερα, σε ένα γεωθερμικό σύστημα, κατά τους χειμερινούς μήνες ο γεωθερμικός εναλλάκτης, μέσω ενός ρευστού που κυκλοφορεί εντός του, απορροφά την θερμότητα του εδάφους και μέσω της αντλίας την αποδίδει στο κτίριο. Αντίστοιχα, κατά τους θερινούς μήνες το σύστημα λειτουργεί αντίστροφα, δηλαδή η αντλία απάγει την θερμότητα από το κτίριο και μέσω του γεωθερμικού εναλλάκτη την αποδίδει στο έδαφος. Ακριβώς επειδή το έδαφος έχει πρακτικά σχεδόν σταθερή θερμοκρασία και δεν παρουσιάζει τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του αέρα, οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας έχουν πολύ υψηλότερο βαθμό απόδοσης σε σχέση με τις υπόλοιπες αντλίες θερμότητας. Επομένως με την χρήση τους σε κτιριακές εφαρμογές, επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας και πόρων και έτσι προκύπτουν σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

Μια γεωθερμική αντλία θερμότητας αποτελείται από τρεις βρόχους, οι οποίοι λειτουργούν κατά την διάρκεια των θερμοδυναμικών κύκλων της, τόσο στην λειτουργία θέρμανσης όσο και στην λειτουργία ψύξης και είναι οι εξής [36]:

- Βρόχος αέρα ή βρόχος νερού
Ο βρόχος αέρα στις αντλίες θερμότητας εδάφους – αέρα χρησιμεύει για την μεταφορά του αέρα (θερμού ή ψυχρού) από την αντλία θερμότητας στους χώρους που πρόκειται να θερμανθούν ή να κλιματιστούν, ενώ ο βρόχος νερού στις αντλίες θερμότητας εδάφους - νερού δρα κατά τον ίδιο τρόπο με την διαφορά ότι μεταφέρει νερό (θερμό ή ψυχρό).
- Βρόχος ψυκτικού μέσου
Αποτελεί έναν κλειστό, ψυκτικό βρόχο όπου το ψυκτικό μέσο αναρροφάται από έναν συμπιεστή και περνά από τις απαιτούμενες καταστάσεις, πιέσεις και θερμοκρασίες με στόχο την παραγωγή θέρμανσης και ψύξης για τον χώρο. Η διαδικασία είναι όμοια με αυτήν που συμβαίνει σε όλες τις αντλίες θερμότητας και που επεξηγήθηκε αναλυτικά στο **υποκεφάλαιο 4.4.2**.
- Βρόχος γεωεναλλάκτη
Ο βρόχος γεωεναλλάκτη είναι ένας κλειστός υπό πίεση βρόχος νερού ή αντιψυκτικού διαλύματος. Περιλαμβάνει έναν εναλλάκτη θερμότητας (ατμοποιητή – συμπυκνωτή) ψυκτικού μέσου – νερού, έναν κυκλοφορητή νερού και ένα δίκτυο σωληνώσεων θαμμένων στην γη (γεωεναλλάκτης). Εντός των σωληνώσεων κυκλοφορεί νερό ή αντιψυκτικό διάλυμα, το οποίο απορροφά θερμότητα από την γη όταν η εγκατάσταση βρίσκεται σε λειτουργία θέρμανσης και απορρίπτει θερμότητα σε αυτή όταν η εγκατάσταση είναι σε λειτουργία ψύξης.

Συχνά στις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας υπάρχει και ένας τέταρτος προαιρετικός βρόχος που λειτουργεί για την προθέρμανση του νερού χρήσης μιας εγκατάστασης. Είναι ένας κλειστός υπό πίεση βρόχος στον οποίον κυκλοφορεί το νερό από την γεωθερμική αντλία θερμότητας προς ένα θερμαντήρα νερού (μπόιλερ).

Ως προς το σύστημα εναλλαγής θερμότητας εντός εδάφους (γεωεναλλάκτης) και την μέθοδο εγκατάστασής του, γίνεται μια βασική ταξινόμηση σε κλειστού κυκλώματος, όπου τοποθετούνται δίκτυα σωληνώσεων και υπάρχει ανακυκλοφορία του ψυκτικού μέσου, καθώς και ανοιχτού κυκλώματος, όπου το νερό αντλείται από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα από την παραγωγική γεώτρηση και επανεισάγεται στην γεώτρηση επανεισαγωγής. Για κάθε κατηγορία αναφέρονται κάποια βασικά στοιχεία ακολούθως.

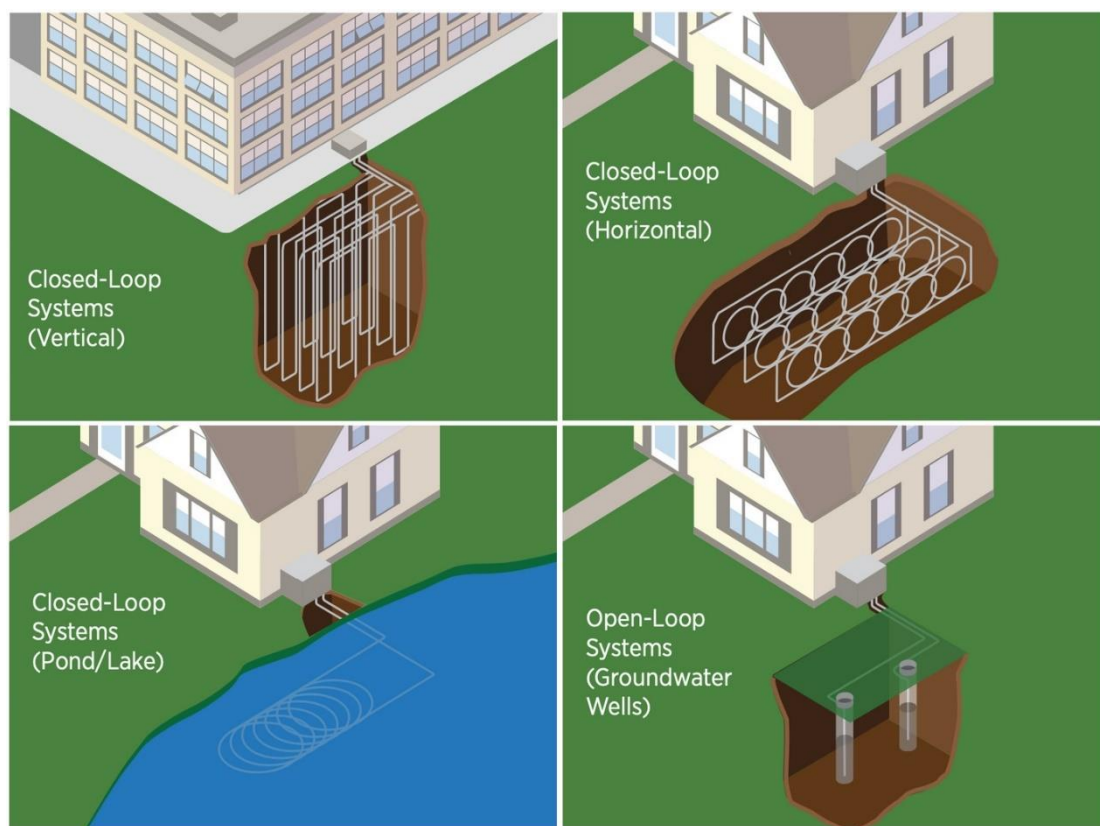
Τα συστήματα κλειστού κυκλώματος [33] περιλαμβάνουν υπόγειο δίκτυο με πλαστικούς σωλήνες υψηλής αντοχής, που λειτουργεί ως εναλλάκτης θερμότητας. Οι σωλήνες συνδέονται με την αντλία θερμότητας όπου και ολοκληρώνεται κύκλωμα στο οποίο κυκλοφορεί διάλυμα νερού με φιλικό προς το περιβάλλον αντιψυκτικό. Σε ένα κλειστό κύκλωμα συνεχώς ανακυκλοφορεί, υπό πίεση, το ψυκτικό μέσο που μεταφέρει την θερμότητα και δεν παρουσιάζονται επικαθίσεις αλάτων, με αποτέλεσμα οι απαιτήσεις για συντήρηση του συστήματος να είναι μικρές. Για την ομαλή τροφοδοσία της αντλίας θερμότητας είναι απαραίτητος κυκλοφορητής σε αυτές τις περιπτώσεις. Ανάλογα με την τοποθέτηση των σωληνώσεων, τα συστήματα κλειστού κυκλώματος κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες [33] [39]:

- Κλειστό κύκλωμα με οριζόντιους βρόχους (closed-loop system, horizontal)
Στο σύστημα αυτό τοποθετείται σε οριζόντια διάταξη δίκτυο παράλληλων βρόχων σωληνώσεων πολυαιθυλενίου με συγκολλητές συνδέσεις μέσα σε χαντάκια στο υπέδαφος σε βάθος περίπου 2 μέτρων. Ως μέθοδος εγκατάστασης χρησιμοποιείται σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα όταν επαρκεί ο περιβάλλον χώρος του οικοπέδου, μιας και αποτελεί την πιο συμφέρουσα οικονομικά λύση.
- Κλειστό κύκλωμα με κατακόρυφους βρόχους (closed-loop system, vertical)
Στο σύστημα αυτό τοποθετείται σε κατακόρυφη διάταξη δίκτυο παράλληλων βρόχων σωληνώσεων πολυαιθυλενίου με συγκολλητές συνδέσεις σε γεωτρήσεις βάθους από 45 μέχρι και 100 μέτρων. Ως επιλογή προτιμάται στις περιπτώσεις όπου ο ελεύθερος χώρος γύρω από το κτίριο είναι περιορισμένος, δηλαδή εκεί που δεν είναι εφικτή η εφαρμογή της πρώτης μεθόδου, του οριζοντίου γεωεναλλάκτη.
- Κλειστό κύκλωμα με βρόχους σε υδάτινη πηγή (closed-loop system, pond/lake)
Το σύστημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν υπάρχει κοντά στο κτίριο διαθέσιμο πηγάδι, λίμνη ή θάλασσα με βάθος κατ' ελάχιστον 2,5 μέτρα. Ομοίως με τους προηγούμενους τρόπους θα τοποθετηθεί δίκτυο σωληνώσεων, απλά αυτήν την φορά όχι στο υπέδαφος αλλά εντός της υδάτινης πηγής.

Στα συστήματα ανοιχτού κυκλώματος (open-loop systems) [33] το νερό αντλείται από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα από την παραγωγική γεώτρηση και επανεισάγεται στην γεώτρηση επανεισαγωγής. Αυτό σημαίνει πως αντλείται διαρκώς νερό από έναν επιφανειακό ή υπόγειο υδροφορέα το οποίο απορροφά ή αποδίδει θερμότητα και κατόπιν επιστρέφεται στον υδροφορέα ή σε άλλον όμοιο υδροφορέα, σε κατάλληλη απόσταση. Βασικό πλεονέκτημα των συστημάτων ανοιχτού κυκλώματος είναι οι μικρότερες απαιτήσεις σε χώρο οικοπέδου. Ενδείκνυνται σε περιοχές με ρηχό βάθος υδροφόρου ορίζοντα και επί της ουσίας αξιοποιείται η ιδιότητα της σχεδόν σταθερής θερμοκρασίας του νερού του εκάστοτε υδροφορέα/ταμιευτήρα καθ' όλο τον χρόνο ανεξάρτητα από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν. Μπορούν να υλοποιηθούν με ποικίλες υδάτινες πηγές όπως [33] [39]:

- Υπόγεια ύδατα με γεώτρηση
Στο σύστημα αυτό, αντλείται νερό από υπόγεια γεώτρηση μέσω κατάλληλης αντλίας. Στην συνέχεια μεταφέρεται μέσω κατάλληλου δικτύου σωληνώσεων στην γεωθερμική αντλία θερμότητας και αφού διέλθει από αυτήν, μετά την συναλλαγή θερμότητας, επανέρχεται σε δεύτερη γεώτρηση που βρίσκεται σε ικανή απόσταση από την πρώτη. Ενδείκνυται για εφαρμογή σε περιοχές όπου υπάρχουν ή πρόκειται να κατασκευασθούν μόνιμες γεωτρήσεις.
- Υφιστάμενα πηγάδια
Στο σύστημα αυτό, μέσω κατάλληλης αντλίας, αντλείται νερό από υφιστάμενα πηγάδια και μεταφέρεται μέσω κατάλληλου δικτύου σωληνώσεων στην γεωθερμική αντλία θερμότητας. Τελικώς, έχοντας απορροφήσει ή προσδώσει θερμότητα, επανέρχεται σε δεύτερο πηγάδι που είτε υφίσταται είτε κατασκευάζεται σε ικανή απόσταση από το πρώτο.
- Λίμνες ή θάλασσα
Στο σύστημα αυτό, μέσω κατάλληλων αντλιών, αντλείται νερό από λίμνη ή θάλασσα που πιθανόν υπάρχει πλησίον του κτιρίου. Το νερό μεταφέρεται μέσω κατάλληλου δικτύου σωληνώσεων (πρωτεύον κύκλωμα) σε έναν εναλλάκτη θερμότητας νερού – νερού και αφού διέλθει από αυτόν, απορροφώντας ή προσδίδοντας θερμότητα, επανέρχεται πάλι στην λίμνη ή στην θάλασσα. Ο εναλλάκτης νερού- νερού συνδέεται μέσω ενός κλειστού βρόχου σωληνώσεων (δευτερεύον κύκλωμα) με την γεωθερμική αντλία θερμότητας ανταλλάσσοντας με αυτήν θερμότητα. Ως επιλογή μπορεί να εφαρμοστεί μόνο όπου υπάρχει σε κοντινή απόσταση λίμνη ή θάλασσα, και φυσικά αν και εφόσον επιτρέπεται νομικά μια τέτοια παρέμβαση.

Στην παρακάτω **Εικόνα 4.14** φαίνονται εποπτικά οι βασικές μέθοδοι εγκατάστασης γεωεναλλάκτη για αξιοποίηση γεωθερμίας σε κτιριακές εφαρμογές .



Εικόνα 4.14: Βασικές μέθοδοι εγκατάστασης γεωθερμικού εναλλάκτη για κτιριακή εφαρμογή [39]

Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας δύναται να εγκατασταθούν σε οποιοδήποτε νέο ή υφιστάμενο κτίριο και μπορούν να συνδυαστούν και να λειτουργήσουν με τους παρακάτω τύπους εγκαταστάσεων θέρμανσης και κλιματισμού εσωτερικού χώρου [39]:

- Εγκαταστάσεις ενδοδαπέδιας θέρμανσης και δροσισμού (αντλίες θερμότητας νερού – εδάφους)
- Εγκαταστάσεις θέρμανσης/κλιματισμού με υπάρχοντα θερμαντικά σώματα (αντλίες θερμότητας νερού – εδάφους)
- Εγκαταστάσεις θέρμανσης/κλιματισμού με νερό και fancoil ή και κεντρικές κλιματιστικές μονάδες αέρα – νερού (αντλίες θερμότητας νερού – εδάφους)
- Εγκαταστάσεις θέρμανσης/κλιματισμού με αέρα και αεραγωγούς (αντλίες θερμότητας αέρα – εδάφους)
- Εγκαταστάσεις παθητικής ψύξης (αντλίες θερμότητας νερού – εδάφους)
- Εγκαταστάσεις παραγωγής θερμού νερού χρήσης (κυρίως αντλίες θερμότητας νερού – εδάφους, αλλά και αντλίες θερμότητας αέρα-εδάφους)

Με στόχο την ορθή λειτουργία μιας γεωθερμικής αντλίας θερμότητας, ζωτική σημασία έχει η επιλογή του ψυκτικού μέσου, η οποία εξαρτάται από την θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας της αντλίας. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά που χρειάζεται να έχει το ψυκτικό μέσο είναι να μην είναι εύφλεκτο και τοξικό, καθώς και να είναι σταθερό στις θερμοκρασίες της εφαρμογής. Τα ευρέως χρησιμοποιούμενα ψυκτικά μέσα σήμερα στις γεωθερμικές αντλίες είναι τα R134a, R410a και R407c [39].

4.4.5 Πλεονεκτήματα και απόδοση αντλιών θερμότητας

Ως προς την απόδοση των αντλιών θερμότητας, ο συντελεστής COP (Coefficient Of Performance) ορίζεται ως ο λόγος της αποδιδόμενης από την αντλία ενέργειας προς την ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται για να λειτουργήσει, δηλαδή την ηλεκτρική κατανάλωση, και αφορά σε μια συγκεκριμένη στιγμή ή συνθήκες. Όσο υψηλότερος είναι ο COP, τόσο πιο αποδοτική είναι η αντλία θερμότητας. Σε μια αντλία θερμότητας, η ωφέλιμη ισχύς είναι ουσιαστικά η θερμική ισχύς του συμπυκνωτή (Q_H), ενώ η ισχύς που καταναλώνεται είναι η ηλεκτρική ισχύς του συμπιεστή (W). Η αποδιδόμενη ισχύς (Q_H) ισούται και με το άθροισμα της θερμικής ισχύος του ατμοποιητή (Q_C) και της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ισχύος του συμπιεστή (W), επομένως ο COP μπορεί να γραφεί ως εξής [33]:

$$COP = \frac{Q_H}{W} = \frac{Q_C}{W} + 1 \quad (4.3)$$

Κατόπιν ορίζεται και ο εποχιακός συντελεστής απόδοσης SPF (Seasonal Performance Factor) ο οποίος είναι το ολοκλήρωμα του COP κατά την περίοδο θέρμανσης και ψύξης και λαμβάνει υπόψη τόσο την κατανάλωση ενέργειας του συστήματος αντλίας θερμότητας όσο και την κατανάλωση του περιφερειακού εξοπλισμού καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης και ψύξης. Επί της ουσίας για τον υπολογισμό του SPF, οι ισχύες εισόδου και εξόδου της αντλίας θερμότητας συσσωρεύονται για την εποχή, για αυτό και είναι ένας σημαντικός δείκτης σύγκρισης της απόδοσης αντλιών θερμότητας, καθώς δίνει ακριβή εκτίμηση του κόστους λειτουργίας σε μια ολόκληρη περίοδο. Προφανώς και ο COP αλλά και ο SPF είναι πάντοτε μεγαλύτεροι της μονάδας.

Ως προς την απόδοση της αντλίας θερμότητας στην λειτουργία ψύξης, ο δείκτης που σχετίζεται με αυτήν είναι ο λόγος ενεργειακής απόδοσης EER (Energy Efficiency Rating – EER). Συγκεκριμένα, ορίζεται διαιρώντας την ψυκτική ικανότητα της αντλίας σε BTU ανά ώρα, προς την ηλεκτρική ισχύ που εισάγεται σε Watt σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Όσο υψηλότερος είναι ο EER, τόσο αποδοτικότερη είναι η αντλία θερμότητας. Η ψυκτική ισχύς είναι ουσιαστικά η ψυκτική ισχύς του ατμοποιητή (Q_C), ενώ η καταναλισκόμενη ισχύς είναι η ηλεκτρική ισχύς του συμπιεστή (W), επομένως ο EER μπορεί να γραφεί ως εξής [33]:

$$EER = \frac{Q_C}{W} \quad (4.4)$$

Είναι γνωστό πως οι αντλίες θερμότητας εμφανίζουν πολύ υψηλότερους δείκτες COP σε σχέση με άλλες ενεργειακές συσκευές για θέρμανση και ψύξη, για αυτό και έχουν μεγαλύτερη απόδοση συγκριτικά με τα υπόλοιπα συστήματα θέρμανσης που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα. Ανήκουν στα ασφαλέστερα συστήματα θέρμανσης, διότι προσφέρουν ανεξάρτηση από τροφοδοσία καυσίμου και έτσι δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον με καυσαέρια. Σημαντικό, επίσης, πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα παραγωγής και θέρμανσης και ψύξης για έναν χώρο με την ίδια εγκατάσταση, καθώς και η απρόσκοπτη λειτουργία τους σε ακραίες θερμοκρασίες (από -10C ως 40C) [39]. Επίσης, στην περίπτωση υφιστάμενων κτιρίων, μπορούν εύκολα να συνδυαστούν με το ήδη υπάρχον σύστημα θέρμανσης με λέβητα ή και με άλλες ανανεώσιμες πηγές, όπως για παράδειγμα τα ηλιοθερμικά συστήματα ή τους λέβητες βιομάζας. Κατόπιν δεσμεύουν λιγότερο χώρο σε σχέση με συμβατικά συστήματα θέρμανσης και έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και χαμηλό κόστος συντήρησης του εξοπλισμού.

Βασικό ζήτημα αποτελεί το ότι το κόστος αγοράς για τις αντλίες θερμότητας είναι αρκετά υψηλότερο συγκριτικά με άλλα συστήματα θέρμανσης. Ωστόσο, παρότι αποτελούν σχετικά ακριβές συσκευές, είναι πολύ οικονομικές κατά την λειτουργία τους γεγονός που αντισταθμίζει σε μεγάλο βαθμό το υψηλό κόστος αγοράς. Επομένως, μετά την πάροδο του χρόνου απόσβεσης, ο καταναλωτής απολαμβάνει θέρμανση και ψύξη με πολύ μικρή οικονομική επιβάρυνση, γεγονός που καθιστά την επιλογή της αντλίας θερμότητας ιδιαίτερα συμφέρουσα και δελεαστική.

Συγκεκριμένα όσον αφορά τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, ο συντελεστής απόδοσης COP είναι πολύ υψηλός και μπορεί να λάβει τις παρακάτω τιμές που παρατίθενται στον παρακάτω **Πίνακα 4.9** [33]:

Πίνακας 4.9: COP γεωθερμικής αντλίας θερμότητας ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας και το είδος του γεωεναλλάκτη

	Κατακόρυφος γεωεναλλάκτης	Οριζόντιος γεωεναλλάκτης
COP σε λειτουργία ψύξης	4 έως 4,5	3 έως 3,5
COP σε λειτουργία θέρμανσης	5 έως 6	4,5 έως 5

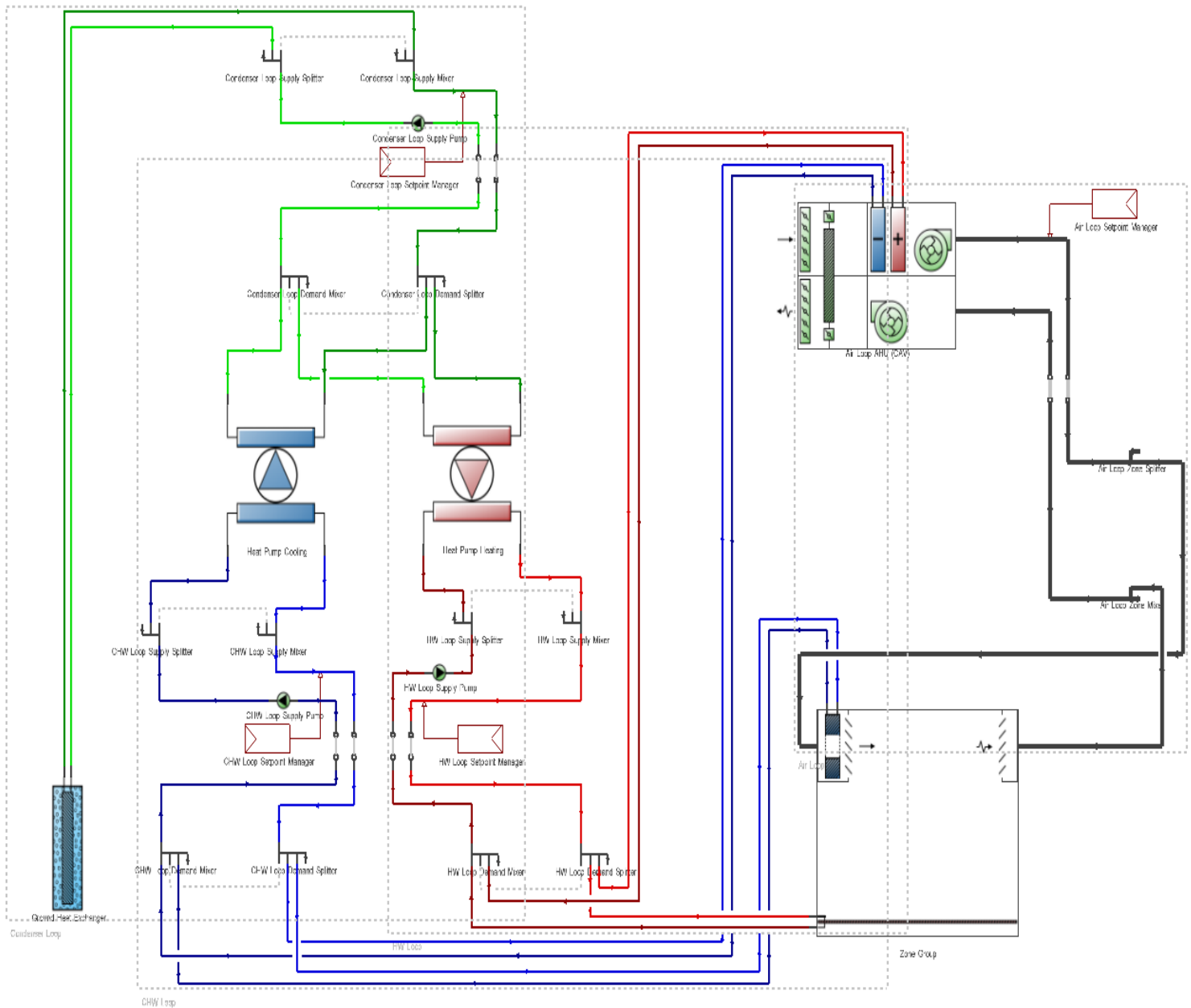
Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, λοιπόν, συγκριτικά με άλλες ενεργειακές συσκευές, όπως ο λέβητας, που έχει συντελεστή απόδοσης 0,8 έως 0,9 [13] και οι αντλίες θερμότητας αέρα-αέρα και αέρα-νερού, που έχουν συντελεστή απόδοσης περίπου 2,5 [34], διαπιστώνεται εύκολα ότι καταναλώνουν την λιγότερη ενέργεια και κατά συνέπεια επιφέρουν το χαμηλότερο λειτουργικό κόστος για ένα κτίριο. Ταυτόχρονα αντλείται δωρεάν ενέργεια από το υπέδαφος διαθέσιμη 365 μέρες τον χρόνο, καθιστώντας το σύστημα εξαιρετικά αξιόπιστο ανεξαρτήτως των καιρικών συνθηκών. Συνολικά, ιδίως αν συγκριθούν με άλλους τύπους αντλιών θερμότητας, οι

γεωθερμικές πλεονεκτούν έναντι των άλλων, πέραν της απόδοσης και του κόστους λειτουργίας, και όσον αφορά την διάρκεια ζωής, τον παραγόμενο θόρυβο (dB) και τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Για αυτό, στα πλαίσια της παρούσας μελέτης επιλέχθηκε η χρήση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας για το κτίριο γραφείων.

4.4.6 Μοντελοποίηση στο DesignBuilder για την 4^η παρέμβαση εξοικονόμησης ενέργειας

Για την παρέμβαση αυτή, λοιπόν, εξετάζεται η αντικατάσταση του λέβητα του κτιρίου γραφείων από ένα γεωθερμικό σύστημα με αντλία θερμότητας, καθώς με αυτόν τον τρόπο αναμένεται σημαντική μείωση στην ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου. Τα θερματικά των θερμαινόμενων/κλιματιζόμενων χώρων παραμένουν τα fan coils, ενώ τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά και ενεργειακά συστήματα του κτιρίου παραμένουν τα ίδια όπως στην υφιστάμενη κατάσταση.

Για την αλλαγή αυτή, εισήχθησαν τα κατάλληλα δεδομένα στο DesignBuilder και στην παρακάτω **Εικόνα 4.15** φαίνεται διαγραμματικά το σύστημα θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου με γεωθερμική αντλία θερμότητας, όπως αυτό προέκυψε κατά την Detailed HVAC σχεδίαση στο λογισμικό.



Εικόνα 4.15: Μοντελοποίηση detailed HVAC για το υπό μελέτη κτίριο με χρήση γεωθερμικού συστήματος (Chilled Water Loop αριστερά και Hot Water Loop δεξιά)

Η διαστασιολόγηση της γεωθερμική αντλίας θερμότητας βασίζεται στον προσδιορισμό των μέγιστων θερμικών και ψυκτικών αναγκών του έτους για το κτίριο. Τα χαρακτηριστικά της τόσο σε λειτουργία ψύξης όσο και σε λειτουργία θέρμανσης του χώρου γραφείων, που αφορούν την παροχή, την ισχύ και την απόδοσή της, παρατίθενται στην παρακάτω **Εικόνα 4.16** η οποία ελήφθη από το περιβάλλον του DesignBuilder.

Water-to-water heat pump cooling	
General	
Name	Heat Pump Cooling
Template	ClimateMaster TMW120 - cooling
Type	1-Equation Fit
Rated flow rate and capacity	
Rated load side flow rate (m3/s)	0,001890
Rated source side flow rate (m3/s)	0,001890
Rated cooling capacity (W)	60000,0
Rated cooling power consumption (W)	11000,0
Cooling Capacity Coefficients	
Cooling capacity coefficient 1	-1,43901039
Cooling capacity coefficient 2	2,89887474
Cooling capacity coefficient 3	-0,85278125
Cooling capacity coefficient 4	0,09310105
Cooling capacity coefficient 5	0,07631436
Cooling Compressor Power Coefficients	
Cooling compressor power coefficient 1	-4,24936781
Cooling compressor power coefficient 2	0,52562938
Cooling compressor power coefficient 3	4,04645035
Cooling compressor power coefficient 4	0,02707522
Cooling compressor power coefficient 5	0,02707522
Advanced	
Cycle time (hr)	0,01610

Water-to-water heat pump heating	
General	
Name	Heat Pump Heating
Template	ClimateMaster TMW120 - heating
Type	1-Equation Fit
Rated flow rate and capacity	
Rated load side flow rate (m3/s)	0,001890
Rated source side flow rate (m3/s)	0,001890
Rated heating capacity (W)	48000,0
Rated heating power consumption (W)	12500,0
Heating Capacity Coefficients	
Heating capacity coefficient 1	-2,57150680
Heating capacity coefficient 2	-0,36694576
Heating capacity coefficient 3	3,61708952
Heating capacity coefficient 4	0,00565893
Heating capacity coefficient 5	0,10565682
Heating Compressor Power Coefficients	
Heating compressor power coefficient 1	-4,23090275
Heating compressor power coefficient 2	3,90180199
Heating compressor power coefficient 3	0,67438427
Heating compressor power coefficient 4	-0,05100495
Heating compressor power coefficient 5	0,03422067
Advanced	
Cycle time (hr)	0,01610

Εικόνα 4.16: Χαρακτηριστικά γεωθερμικής αντλίας θερμότητας στο *detailed HVAC* για λειτουργία ψύξης (αριστερά) και για λειτουργία θέρμανσης (δεξιά)

Στην ακόλουθη **Εικόνα 4.17** παρατίθενται τα χαρακτηριστικά του γεωθερμικού εναλλάκτη για την άντληση και απόρριψη θερμότητας στο υπέδαφος. Επιλέχθηκε η μέθοδος εγκατάστασης κλειστού κυκλώματος με κατακόρυφους βρόχους σωληνώσεων, διότι, παρά το μεγαλύτερο κόστος που επιφέρει, ως επιλογή διαθέτει συγκριτικό πλεονέκτημα, λόγω της μικρότερης απαίτησης σε χώρο οικοπέδου αλλά και λόγω της ύπαρξης σταθερής θερμοκρασίας σε μεγάλα βάθη στο υπέδαφος, η οποία εξασφαλίζει μεγαλύτερο και πιο σταθερό βαθμό απόδοσης, ειδικά σε περιπτώσεις ακραίων θερμοκρασιών.

Ground heat exchanger	
General	G Function Data
General	
Name	Ground Heat Exchanger
Ground Heat Exchanger Template	
Template	Vertical U-tube 76m 24-boreholes
Ground Heat Exchanger Type	
Type	1-Vertical
Ground Properties	
Ground thermal conductivity (W/m-K)	0,692626
Ground thermal heat capacity (J/m3-K)	2347000,00
Ground temperature (°C)	13,375
Flow rate	
Design flow rate (m3/s)	0,00663
Borehole and Pipe Geometry	
Number of boreholes	24
Depth of top of borehole (m)	1,0
Borehole length (m)	76,0
Borehole diameter (m)	0,127016
Pipe outer diameter (m)	0,0266667
Pipe thickness (m)	0,00241285
U-tube distance (m)	0,0253977
Grout and Pipe Properties	
Grout thermal conductivity (W/m-K)	0,692626
Grout thermal heat capacity (J/m3-K)	3900000,00
Pipe thermal conductivity (W/m-K)	0,391312
Pipe thermal heat capacity (J/m3-K)	1770000,00
Others	
G-function reference ratio	0,000836

Εικόνα 4.17: Χαρακτηριστικά γεωθερμικού εναλλάκτη στο detailed HVAC

4.4.7 Αποτελέσματα προσομοίωσης για την 4^η παρέμβαση εξοικονόμησης ενέργειας

Με αυτά τα δεδομένα λοιπόν έτρεξε η προσομοίωση στο πρόγραμμα και στο σημείο αυτό παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Στον **Πίνακα 4.10** παρατίθενται οι μηνιαίες καταναλώσεις του κτιρίου για την παρέμβαση αυτή, καθώς και η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας. Όπως φαίνεται από τις τιμές του πίνακα, πλέον υπάρχει μηδενική κατανάλωση ορυκτού καυσίμου και όλη η ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου σχετίζεται με το ηλεκτρικό ρεύμα, καθώς λόγω του γεωθερμικού συστήματος που επιλέχθηκε, τόσο και για την θέρμανση όσο και για την ψύξη του κτιρίου, απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια.

Στην συνέχεια, στον **Πίνακα 4.11** παρατίθεται η ετησίως καταναλισκόμενη ενέργεια για κάθε κατηγορία που αφορά το κτίριο. Όπως φαίνεται από τα νούμερα, σε σχέση

με την υφιστάμενη κατάσταση, έχει επέλθει μείωση στην καταναλισκόμενη ενέργεια για την θέρμανση κατά 53,62%. Αναλυτικότερα, από 3082,6 kWh που καταναλώνονταν ετησίως στην υφιστάμενη κατάσταση, πλέον η καταναλισκόμενη ενέργεια για την θέρμανση ανέρχεται σε 1429,84 kWh ετησίως. Αντιστοίχως, ως προς την καταναλισκόμενη ενέργεια για την ψύξη του κτιρίου, στην υφιστάμενη κατάσταση προέκυψαν 10454,44 kWh, ενώ πλέον απαιτούνται 6249,76 kWh, δηλαδή επέρχεται μείωση στην κατανάλωση της τάξης του 40,22%. Οι θεαματικές αυτές μειώσεις στις καταναλώσεις θέρμανσης και ψύξης καταδεικνύουν την θετική επίδραση της επιλογής του γεωθερμικού συστήματος για το κτίριο γραφείων.

Η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας, δηλαδή ηλεκτρικού ρεύματος, ανέρχεται σε 65351,91 kWh, επομένως η αλλαγή σε γεωθερμικό σύστημα θέρμανσης και ψύξης επιφέρει μείωση κατά 6,79 % συγκριτικά με την υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου. Η τιμή αυτή, ωστόσο, δεν είναι απολύτως ενδεικτική, λόγω του ποσοστιαίου συσχετισμού των καταναλώσεων των επιμέρους ενεργειακών κατηγοριών του κτιρίου, όπως έχει καταδειχθεί και σε προηγούμενες προτεινόμενες αλλαγές. Ειδικότερα, στο υπό μελέτη κτίριο γραφείων στην υφιστάμενη κατάσταση, η οποία παρουσιάστηκε στο **κεφάλαιο 3**, το 42,22% της ενεργειακής κατανάλωσης αφορά τις ανάγκες φωτισμού και το 32,8% της κατανάλωσης αφορά τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Οι δύο αυτές ενεργειακές κατηγορίες δεν επηρεάζονται από την αλλαγή του συστήματος θέρμανσης και ψύξης και εξακολουθούν να βρίσκονται στις αρχικές του τιμές, μειώνοντας κατά πολύ την επίδραση που επιφέρει η αλλαγή του συστήματος HVAC στην συνολική ετήσια κατανάλωση. Μάλιστα, στο παρόν σενάριο λόγω της μείωσης της συνολικής ετήσιας καταναλισκόμενης ενέργειας μετά την αλλαγή του συστήματος HVAC, τα ποσοστά επί της συνολικής κατανάλωσης που αντιστοιχούν σε φωτισμό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό αυξάνονται περαιτέρω, φτάνοντας το 45,3% και το 35,19% αντίστοιχα.

Στην υφιστάμενη κατάσταση του υπό μελέτη κτιρίου, λοιπόν, το ποσοστό της συνολικής ετήσιας κατανάλωσης που σχετίζεται με θέρμανση, ψύξη και λοιπές καταναλώσεις (καταναλώσεις συστημάτων αντλιών και ανεμιστήρων) είναι 24,98%, δηλαδή 17514,28 kWh. Μετά την αλλαγή του συστήματος HVAC, το ποσοστό της συνολικής ετήσιας κατανάλωσης που σχετίζεται με θέρμανση, ψύξη και λοιπές καταναλώσεις είναι περίπου 19,51%, όμως πλέον έχει πέσει στις 12750,16 kWh. Επομένως, αθροιστικά στις ενεργειακές κατηγορίες θέρμανσης και ψύξης, στις οποίες είναι εφικτό να έχει επίδραση η αλλαγή του συστήματος HVAC, υπάρχει ποσοστιαία μείωση κατά 27,2% λόγω της τοποθέτησης γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. Συμπερασματικά, λοιπόν, οι μεταβολές κατανάλωσης στις επιμέρους κατηγορίες της θέρμανσης και της ψύξης, καθώς και αθροιστικά στο σύνολο καταναλώσεων θέρμανσης και ψύξης είναι ικανοποιητικές και δίνουν βελτιωμένη ενεργειακή εικόνα του κτιρίου.

Πίνακας 4.10: Συνολικές μηνιαίες καταναλώσεις ενέργειας για το κτίριο

Μήνας	Συνολική κατανάλωση φυσικού αερίου [kWh]	Συνολική κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος [kWh]	Συνολική Καταναλισκόμενη Ενέργεια [kWh]
Ιανουάριος	0	4963,96	4963,96
Φεβρουάριος	0	4710,62	4710,62
Μάρτιος	0	5311,28	5311,28
Απρίλιος	0	4831,19	4831,19
Μάιος	0	5200,09	5200,09
Ιούνιος	0	5918,25	5918,25
Ιούλιος	0	6419,30	6419,30
Αύγουστος	0	7089,01	7089,01
Σεπτέμβριος	0	6118,89	6118,89
Οκτώβριος	0	4658,25	4658,25
Νοέμβριος	0	4986,29	4986,29
Δεκέμβριος	0	5144,79	5144,79
Σύνολο Ετησίως	0	65351,91	65351,91

Πίνακας 4.11: Ετησίως καταναλισκόμενη ενέργεια για κάθε κατηγορία που αφορά το κτίριο

	Ετησίως Καταναλισκόμενη Ενέργεια [kWh]
Θέρμανση	1429,84
Ψύξη	6249,76
Φωτισμός	29601,95
Ηλεκτρονικός εξοπλισμός	23000,18
Λοιπές καταναλώσεις	5070,18
Συνολική κατανάλωση	65351,91

Κεφάλαιο 5: Βέλτιστη ενεργειακά επιλογή για το κτίριο και τοποθέτηση φωτοβολταϊκού συστήματος στην στέγη

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσεται η βέλτιστη ενεργειακά επιλογή που συνολικά προτείνεται για το υπό μελέτη κτίριο, όπως αυτή προκύπτει βάσει των προηγούμενων παρεμβάσεων που προτάθηκαν και αναλύθηκαν στο **κεφάλαιο 4**. Κατόπιν, παρουσιάζεται η ολοκληρωμένη μελέτη τοποθέτησης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος στην στέγη του κτιρίου με στόχο την αυτοπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την μετατροπή του ενεργειακού ισοζυγίου σε θετικό. Ιδίως όσον αφορά τα φωτοβολταϊκά, παρουσιάζονται επίσης βασικά στοιχεία της τεχνολογίας τους και των διαθέσιμων επιλογών που υπάρχουν για την εγκατάστασή τους σε κτίρια.

5.1 Βέλτιστη ενεργειακά επιλογή για το κτίριο γραφείων

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, ακριβώς επειδή ο στόχος είναι η κατάληξη σε κτίριο θετικού ενεργειακού ισοζυγίου, ο βασικός παράγοντας για την απόφαση υιοθέτησης μιας ενεργειακής αλλαγής σε οποιονδήποτε τομέα του κτιρίου είναι η επίδραση της εκάστοτε αλλαγής στην ενεργειακή κατανάλωση. Με κριτήριο λοιπόν την εξοικονόμηση ενέργειας, δηλαδή την κατάληξη στις κατά το δυνατόν μικρότερες απαιτούμενες kWh ενέργειας ετησίως, επιλέγεται να υιοθετηθούν συνδυαστικά όλες οι ενεργειακές παρεμβάσεις εξοικονόμησης που αναπτύχθηκαν στο **κεφάλαιο 4**, δηλαδή επιλέγονται οι εξής αλλαγές για το υπό μελέτη κτίριο: τοποθέτηση κουφωμάτων με θερμοδιακοπή, αλλαγή λαμπτήρων σε LED, τοποθέτηση θερμομόνωσης και αλλαγή του συστήματος θέρμανσης και ψύξης με χρήση γεωθερμικής αντλίας θερμότητας.

Προφανώς, εφόσον η τοποθέτηση γεωθερμικού συστήματος πλέον συνδυάζεται με τρεις ακόμα ενεργειακά ωφέλιμες αλλαγές, απαιτείται εκ νέου διαστασιολόγηση της επιλεχθείσας αντλίας θερμότητας, ούτως ώστε να καλύπτει τα νέα θερμικά και ψυκτικά φορτία που προκύπτουν για τον χώρο μετά την τοποθέτηση θερμοδιακοπής, την αλλαγή των λαμπτήρων και την τοποθέτηση θερμομόνωσης στην εξωτερική τοιχοποιία και στην στέγη. Έχοντας μοντελοποιήσει όλες τις παραπάνω αλλαγές εξοικονόμησης μαζί, έτρεξαν οι υπολογισμοί στην οθόνη Heating design και Cooling design του DesignBuilder βάσει των αποτελεσμάτων των οποίων επιλέχθηκε η ισχύς της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας. Ειδικότερα, από τους υπολογισμούς προσδιορίστηκε η μέγιστη τιμή των θερμικών φορτίων (zone sensible heating) και η μέγιστη τιμή των ψυκτικών φορτίων (total cooling) για το έτος και οι τιμές αυτές καθορίζουν την ελάχιστη απαιτούμενη ονομαστική θερμική και ονομαστική ψυκτική ισχύ της αντλίας αντίστοιχα.

Έτσι, με κριτήριο να ικανοποιείται αυτή η συνθήκη, ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες για θέρμανση και ψύξη του κτιρίου, επιλέχθηκε η τοποθέτηση της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας Logatherm WPS 33R της εταιρείας Buderus του ομίλου Bosch Thermoteknik. Η επιλεγθείσα αντλία [40] έχει ονομαστική θερμική ισχύ 33,3kW και ονομαστική ψυκτική ισχύς 44,8kW, ενώ διαθέτει COP ίσο με 4,56 και ERR ίσο με 5,09. Στο επίπεδο του detailed HVAC σχεδιασμού στο DesignBuilder, εισήχθησαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης αντλίας και εν συνεχεία και τα χαρακτηριστικά του γεωεναλλάκτη που επιλέχθηκε για εγκατάσταση στο οικόπεδο του κτιρίου και για σύνδεση με την αντλία αυτή. Όπως αναφέρθηκε και στο **υποκεφάλαιο 4.4.6**, επιλέχθηκε η μέθοδος εγκατάστασης κλειστού κυκλώματος με κατακόρυφους βρόχους σωληνώσεων για τον γεωεναλλάκτη.

Τα χαρακτηριστικά της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας σε λειτουργία ψύξης και σε λειτουργία θέρμανσης του χώρου γραφείων, καθώς και τα χαρακτηριστικά του γεωεναλλάκτη παρατίθενται στις παρακάτω **Εικόνες 5.1 και 5.2** οι οποίες ελήφθησαν από το περιβάλλον του DesignBuilder.

Water-to-water heat pump cooling		Water-to-water heat pump heating	
General		General	
Name	Heat Pump Cooling	Name	Heat Pump Heating
Template	Logatherm WPS 33R - cooling	Template	Logatherm WPS 33R - heating
Type	1-Equation Fit	Type	1-Equation Fit
Rated flow rate and capacity		Rated flow rate and capacity	
Rated load side flow rate (m3/s)	0,002210	Rated load side flow rate (m3/s)	0,002100
Rated source side flow rate (m3/s)	0,002210	Rated source side flow rate (m3/s)	0,002100
Rated cooling capacity (W)	44800,0	Rated heating capacity (W)	33300,0
Rated cooling power consumption (W)	10200,0	Rated heating power consumption (W)	6500,0
Cooling Capacity Coefficients		Heating Capacity Coefficients	
Cooling capacity coefficient 1	-1,33727414	Heating capacity coefficient 1	-2,62074788
Cooling capacity coefficient 2	3,21065452	Heating capacity coefficient 2	-0,75619580
Cooling capacity coefficient 3	-1,19534467	Heating capacity coefficient 3	3,94588080
Cooling capacity coefficient 4	0,09656874	Heating capacity coefficient 4	0,01139064
Cooling capacity coefficient 5	0,05109369	Heating capacity coefficient 5	0,10544651
Cooling Compressor Power Coefficients		Heating Compressor Power Coefficients	
Cooling compressor power coefficient 1	-2,90465307	Heating compressor power coefficient 1	-4,16023184
Cooling compressor power coefficient 2	0,26945159	Heating compressor power coefficient 2	4,28697190
Cooling compressor power coefficient 3	3,24610398	Heating compressor power coefficient 3	0,24387255
Cooling compressor power coefficient 4	0,00873136	Heating compressor power coefficient 4	-0,06723382
Cooling compressor power coefficient 5	-0,13385715	Heating compressor power coefficient 5	0,00158351
Advanced		Advanced	
Cycle time (hr)	0,01610	Cycle time (hr)	0,01610

Εικόνα 5.1: Χαρακτηριστικά επιλεγθείσας γεωθερμικής αντλίας θερμότητας στο detailed HVAC για λειτουργία ψύξης (αριστερά) και για λειτουργία θέρμανσης (δεξιά)

Ground heat exchanger	
General	G Function Data
General	
Name	Ground Heat Exchanger
Ground Heat Exchanger Template	
Template	Vertical U-tube 76m 16-boreholes
Ground Heat Exchanger Type	
Type	1-Vertical
Ground Properties	
Ground thermal conductivity (W/m-K)	0,692626
Ground thermal heat capacity (J/m3-K)	2347000,00
Ground temperature (°C)	13,375
Flow rate	
Design flow rate (m3/s)	0,00442
Borehole and Pipe Geometry	
Number of boreholes	16
Depth of top of borehole (m)	1,0
Borehole length (m)	76,0
Borehole diameter (m)	0,127016
Pipe outer diameter (m)	0,0266667
Pipe thickness (m)	0,00241285
U-tube distance (m)	0,0253977
Grout and Pipe Properties	
Grout thermal conductivity (W/m-K)	0,692626
Grout thermal heat capacity (J/m3-K)	3900000,00
Pipe thermal conductivity (W/m-K)	0,391312
Pipe thermal heat capacity (J/m3-K)	1770000,00
Others	
G-function reference ratio	0,000836

Εικόνα 5.2: Χαρακτηριστικά επιλεγθέντος γεωθερμικού εναλλάκτη στο *detailed HVAC*

Συνολικά, λοιπόν, με κατάλληλη ρύθμιση όλων των σχετικών καρτελών του DesignBuilder και μοντελοποίηση όλων των αλλαγών συνδυαστικά, έτρεξε η τελική προσομοίωση για το κτίριο για το έτος 2022 και στο σημείο αυτό παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα στους Πίνακες 5.1 και 5.2.

Πίνακας 5.1: Καταναλισκόμενη ενέργεια για κάθε κατηγορία που αφορά το κτίριο μετά το σύνολο των παρεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας

Μήνας	Καταναλισκόμενη Ενέργεια [kWh]					
	Ηλεκτρονικός εξοπλισμός	Φωτισμός	Ανεμιστήρες συστήματος	Αντλίες συστήματος	Θέρμανση (ηλεκτρικό ρεύμα)	Ψύξη (ηλεκτρικό ρεύμα)
Ιανουάριος	1822,04	540,77	352,74	53,00	245,99	0,0
Φεβρουάριος	1723,20	419,92	318,60	48,22	237,13	0,0
Μάρτιος	1972,17	335,15	352,74	51,96	212,00	0,0
Απρίλιος	1814,12	210,14	341,36	61,33	100,25	41,90
Μάιος	1897,10	168,79	352,74	83,50	18,92	215,06
Ιούνιος	1889,18	154,56	341,36	92,98	1,86	755,69
Ιούλιος	1822,04	146,76	352,74	100,24	0,0	1251,36
Αύγουστος	1972,17	199,06	352,74	101,56	0,0	1455,56
Σεπτέμβριος	1889,18	271,23	341,36	94,99	0,62	928,79
Οκτώβριος	1822,04	401,16	352,74	14,93	17,72	0,0
Νοέμβριος	1889,18	561,05	341,36	38,75	120,90	0,0
Δεκέμβριος	1897,10	629,70	352,74	51,88	228,88	0,0
Σύνολο Ετησίως	22409,51	4038,29	4153,22	793,35	1184,28	4648,36

Πίνακας 5.2: Συνολικές καταναλώσεις ενέργειας για το κτίριο μετά το σύνολο των παρεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας

Μήνας	Συνολική κατανάλωση φυσικού αερίου [kWh]	Συνολική κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος [kWh]	Συνολική Καταναλισκόμενη Ενέργεια [kWh]
Ιανουάριος	0	3014,55	3014,55
Φεβρουάριος	0	2747,08	2747,08
Μάρτιος	0	2924,01	2924,01
Απρίλιος	0	2569,11	2569,11
Μάιος	0	2736,12	2736,12
Ιούνιος	0	3235,62	3235,62
Ιούλιος	0	3673,14	3673,14
Αύγουστος	0	4081,09	4081,09
Σεπτέμβριος	0	3526,17	3526,17
Οκτώβριος	0	2608,59	2608,59
Νοέμβριος	0	2951,24	2951,24
Δεκέμβριος	0	3160,30	3160,30
Σύνολο Ετησίως	0	37227,00	37227,00

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω τιμές, η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας του υπό μελέτη κτιρίου μετά τις παρεμβάσεις εξοικονόμησης ανέρχεται στις 37227,0 kWh. Στην υφιστάμενη κατάσταση του κτιρίου που αναλύθηκε στο **κεφάλαιο 3**, η συνολική κατανάλωση ενέργεια ετησίως είναι 70113,23 kWh, επομένως καθίσταται σαφές πως, λόγω των παρεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας που επιλέχθηκαν, επέρχεται μείωση στην κατανάλωση κατά 46,9%, ποσοστό ιδιαίτερα ικανοποιητικό.

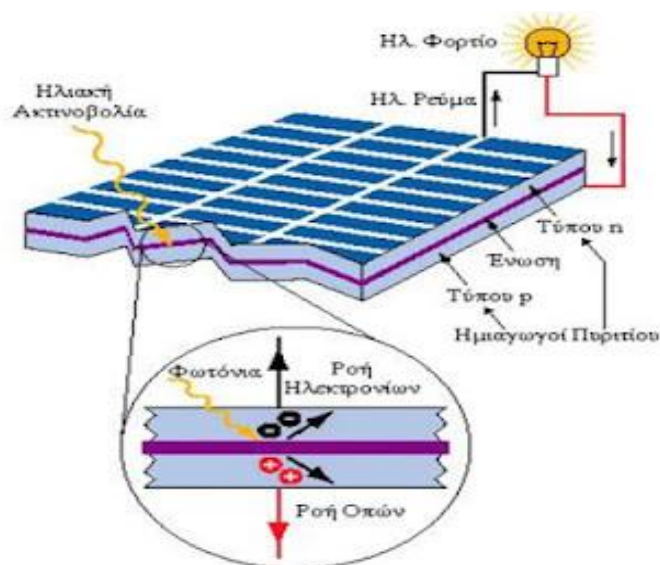
Στο σημείο αυτό παρατίθενται τα ποσοστά μεταβολής κατανάλωσης στην περίπτωση που εξαιρέσουμε από το σύνολο των καταναλώσεων την κατηγορία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού, για την οποία δεν είναι εφικτό να συμβεί κάποια παρέμβαση εξοικονόμησης, μιας και αποτελεί την ακριβή μοντελοποίηση των αναγκών των υπολογιστών και των συσκευών που χρησιμοποιούν οι εργαζόμενοι στο εν λόγω κτίριο γραφείων. Μάλιστα, η κατηγορία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού στην βελτιωμένη κατάσταση αποτελεί τεράστιο ποσοστό επί της συνολικής κατανάλωσης, διότι η συνολική κατανάλωση, λόγω των ποικίλων παρεμβάσεων, μειώνεται κατά το δυνατόν, αλλά οι kWh που σχετίζονται με τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό παραμένουν περίπου στην ίδια τιμή που είχαν και στην αρχικά υφιστάμενη κατάσταση. Ειδικότερα, η κατανάλωση για τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό αποτελεί το 32,8% επί της συνολικής κατανάλωσης για την υφιστάμενη κατάσταση αλλά το 60,2% επί της συνολικής κατανάλωσης για την βελτιωμένη κατάσταση. Εξαιρώντας, λοιπόν, τις kWh του ηλεκτρονικού εξοπλισμού, στην υφιστάμενη κατάσταση η συνολική κατανάλωση ετησίως για όλες τις άλλες κατηγορίες πλην του ηλεκτρονικού εξοπλισμού είναι 47113,04 kWh, ενώ στην βελτιωμένη κατάσταση μετά τις παρεμβάσεις εξοικονόμησης είναι 14817,49 kWh. Κατά συνέπεια, η μείωση μεταξύ των δύο ενεργειακών καταστάσεων του κτιρίου, στο σύνολο των κατηγοριών πλην του ηλεκτρονικού εξοπλισμού, ανέρχεται σε ποσοστό 68,55%. Το ποσοστό αυτό καταδεικνύει σαφώς πως, όσον αφορά τους τομείς στους οποίους ήταν δυνατόν να συμβούν ενεργειακές παρεμβάσεις εξοικονόμησης, οι παρεμβάσεις που επιλέχθηκαν ήταν επιτυχημένες και αποτελεσματικές.

5.2 Φωτοβολταϊκό σύστημα στην στέγη του κτιρίου

Με στόχο την μετατροπή του υπό μελέτη κτιρίου γραφείων σε κτίριο θετικού ενεργειακού ισοζυγίου, δηλαδή σε κτίριο που παράγει ποσό ενέργειας μεγαλύτερο από την ενεργειακή του κατανάλωση, επιλέγεται η τοποθέτηση φωτοβολταϊκών για ηλεκτροπαραγωγή στην στέγη του κτιρίου. Γίνεται χρήση του net-metering, δηλαδή του εικονικού συμψηφισμού της παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και της καταναλισκόμενης ενέργειας από το κτίριο.

5.2.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο και κατηγορίες φωτοβολταϊκών στοιχείων

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος στηρίζονται στις βασικές ιδιότητες των ημιαγωγών υλικών σε ατομικό επίπεδο. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο ονομάζεται η πόλωση των ηλεκτρικών φορτίων η οποία συμβαίνει σε συγκεκριμένα υλικά όταν αυτά εκτεθούν σε φωτεινή ακτινοβολία. Αφορά την απορρόφηση μέρους της ενέργειας του φωτός, δηλαδή απορρόφηση κάποιων φωτονίων (τα υπόλοιπα είτε ανακλώνται, είτε διαπερνούν το φωτοβολταϊκό στοιχείο) από τα ηλεκτρόνια των ατόμων των φωτοβολταϊκών στοιχείων και ως εκ τούτου την απόδραση των ηλεκτρονίων αυτών από τις κανονικές τους θέσεις, με αποτέλεσμα την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος. Παρατηρείται στα φυσικά στοιχεία που ανήκουν στην ομάδα των ημιαγωγών καθώς και στις τεχνητές ημιαγώγιμες διατάξεις. Η πόλωση των ηλεκτρικών φορτίων είναι επί της ουσίας η εμφάνιση διαφοράς δυναμικού στα άκρα μιας διόδου p-n, η οποία ακτινοβολείται με ηλιακή ενέργεια [41]. Για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η ακτινοβολία, παράγεται συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα από την διόδο, το οποίο μπορεί να τροφοδοτήσει ένα οποιοδήποτε φορτίο συνεχούς ρεύματος. Η διαδικασία φαίνεται σχηματικά στην παρακάτω **Εικόνα 5.3**:



Εικόνα 5.3: Φωτοβολταϊκό φαινόμενο [42]

Φωτοβολταϊκό στοιχείο (PV cell) ή αλλιώς φωτοβολταϊκό κύτταρο ή φωτοβολταϊκή κυψέλη, ονομάζεται, λοιπόν, η ηλεκτρονική διάταξη που παράγει ηλεκτρική ενέργεια όταν δέχεται ακτινοβολία [43]. Η συντριπτική πλειοψηφία των φωτοβολταϊκών στοιχείων κατασκευάζονται με βάση το πυρίτιο (Si), το οποίο έχει τις επιθυμητές ηλεκτρικές ιδιότητες ούτως ώστε τα φωτοβολταϊκά να είναι σε θέση να ανταπεξέρχονται σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Σημαντική παράμετρο επίσης αποτελεί και η αφθονία πυριτίου στον πλανήτη η οποία ευνοεί την χρήση του ως πρώτη ύλη, καθώς και η ύπαρξη πλήρως αναπτυγμένης τεχνολογίας επεξεργασίας του πυριτίου.

Από ένα σύνολο φωτοβολταϊκών στοιχείων που είναι ηλεκτρονικά συνδεδεμένα, απαρτίζεται ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο (PV module), το οποίο αποτελεί την βασική δομική μονάδα της φωτοβολταϊκής γεννήτριας, δηλαδή του τμήματος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης που παράγει συνεχές ρεύμα [43]. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι αναγκαίο να προστατεύονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, για αυτό και, στα πλαίσια, περικλείονται συνήθως από ένα φύλλο γυαλιού που αντανάκλα την θερμότητα και ένα φύλλο συμπυκνωμένου πολυμερούς υλικού που εμφανίζει καλή ηλεκτρική μόνωση και μεγάλη διαπερατότητα στο φως. Ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια, που έχουν προκατασκευαστεί και συναρμολογηθεί σε ενιαία κατασκευή, έτοιμη για να εγκατασταθεί σε φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, ονομάζεται φωτοβολταϊκό πάνελ [43].

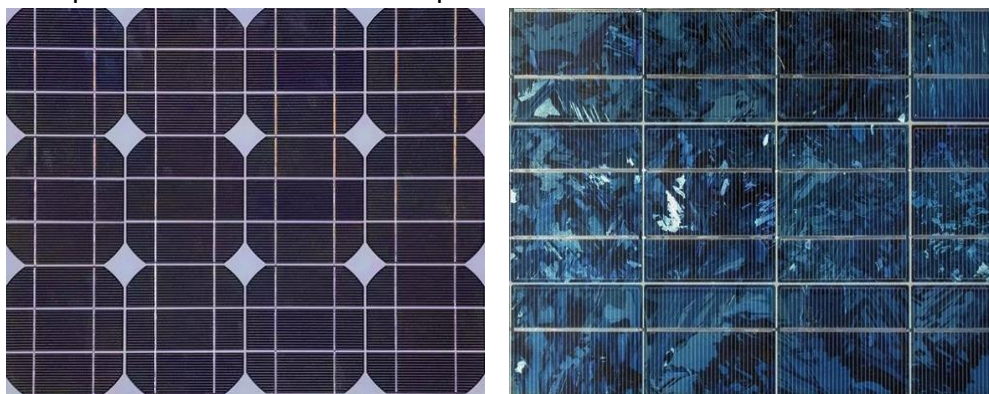
Τα φωτοβολταϊκά (ΦΒ) στοιχεία μπορούν να χωριστούν σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με το υλικό κατασκευής, την δομή του βασικού υλικού καθώς και τον τρόπο κατασκευής. Οι τρεις βασικές κατηγορίες τους σήμερα είναι οι εξής [41] [44]:

- ΦΒ στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (SingleCrystalline Silicon, sc-Si)
Ένα ΦΒ στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζεται, με την μέθοδο ανάπτυξης ράβδου πυριτίου, από έναν μεγάλο κρύσταλλο πυριτίου ο οποίος κόβεται σε κρυσταλλικούς δίσκους (wafers) που έχουν μάλιστα κατάλληλα στρογγυλεμένες άκρες. Τα μονοκρυσταλλικά ΦΒ πλαίσια περιέχουν σειρές και στήλες από τα στοιχεία αυτά. Το χρώμα τους είναι σχετικά ομοιόμορφο βαθύ μπλε ως μαύρο. Λόγω της ομοιόμορφης μοριακής δομής του πυριτίου, τα μονοκρυσταλλικά ΦΒ στοιχεία διαθέτουν υψηλότερο, σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες, βαθμό απόδοσης, της τάξης του 15% ως 20%, ενώ εργαστηριακά έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ως και 25%. Ο βαθμός απόδοσης επί της ουσίας εκφράζει την αναλογία της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από το ηλιακό στοιχείο προς την διαθέσιμη από την ηλιακή ακτινοβολία ισχύ. Έτσι, καταδεικνύεται πως τα μονοκρυσταλλικά ΦΒ αποτελούν προτιμότερη επιλογή σε περιπτώσεις περιορισμένου χώρου εγκατάστασης μιας και επιτυγχάνουν μια συγκεκριμένη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος απαιτώντας μικρότερο εμβαδόν χώρου σε σχέση με τα άλλα είδη, ωστόσο αξίζει να σημειωθεί πως ταυτόχρονα είναι τα ακριβότερα ΦΒ.

- ΦΒ στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, mc-Si)**

Ένα ΦΒ στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζεται από διάφορα κρυσταλλικά αποκόμματα πυριτίου (για παράδειγμα μπορεί να είναι περισσεύματα πυριτίου από την παραγωγή των μονοκρυσταλλικών ΦΒ στοιχείων) τα οποία μέσω της μεθόδου της χύτευσης διαμορφώνουν ένα ενιαίο μπλοκ, το οποίο με την σειρά του κόβεται σε δίσκους πυριτίου (wafers). Η μέθοδος κατασκευής τους απαιτεί πολύ μικρότερη ακρίβεια και κόστος συγκριτικά με αυτήν των μονοκρυσταλλικών ΦΒ στοιχείων, για αυτό και τα πολυκρυσταλλικά ΦΒ είναι φθηνότερα σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά. Ταυτόχρονα, όμως, διαθέτουν χαμηλότερο βαθμό απόδοσης, της τάξης του 13% ως 17%, λόγω της ανομοιόμορφης κατανομής και της χαμηλότερης καθαρότητας του πυριτίου. Το χρώμα τους είναι σχετικά πιο ανομοιόμορφο σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά και τείνει περισσότερο προς το μπλε παρά προς το μαύρο, μάλιστα οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μικρές μονοκρυσταλλικές (πιο σκουρόχρωμες) περιοχές στα πολυκρυσταλλικά στοιχεία.

Στην παρακάτω **Εικόνα 5.4** φαίνεται και οπτικά η διαφορά μεταξύ των μονοκρυσταλλικών και των πολυκρυσταλλικών ΦΒ πλαισίων.



Εικόνα 5.4: Μονοκρυσταλλικό ΦΒ πλαίσιο (αριστερά) [45] και Πολυκρυσταλλικό ΦΒ πλαίσιο (δεξιά) [46]

- ΦΒ στοιχεία λεπτού φιλμ (Thin Film)**

Τα ΦΒ στοιχεία λεπτού φιλμ ονομάζονται ΦΒ στοιχεία δεύτερης γενιάς και κατασκευάζονται από ποικίλα υλικά όπως:

 - Άμορφο πυρίτιο (Amorphous Silicon, A-Si)
 - Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)
 - Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CuInSe₂ ή CIS) με προσθήκη γαλλίου (CIGS)
 - Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)

Τα συγκεκριμένα ΦΒ στοιχεία είναι ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση του εκάστοτε ημιαγωγικού υλικού πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης χαμηλού κόστους, όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Έχουν πολύ μικρότερο πάχος σε σχέση με τις προηγούμενες δύο κατηγορίες, μιας και τα στοιχεία μέσα στα πλαίσια αποτελούνται μεν από πολλές στρώσεις του

εκάστοτε υλικού, όμως καθεμία στρώση έχει περίπου 1μm πάχος. Στον αντίποδα, κάθε στρώση υλικού στα μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά ΦΒ στοιχεία έχει πάχος περίπου 300μm. Επίσης τα ΦΒ στοιχεία λεπτού φιλμ είναι ελαφριά και εύκαμπτα, επομένως μπορούν να τοποθετηθούν εύκολα και ευέλικτα σε διάφορες επιφάνειες χωρίς πρόβλημα, διευρύνοντας έτσι το φάσμα εφαρμογών της ηλεκτροπαραγωγής από ΦΒ. Λόγω μικρότερων απαιτήσεων σε υλικό, είναι κατά βάση φθηνότερη η παραγωγή τέτοιων ΦΒ στοιχείων, επομένως μικρότερο και το κόστος αγοράς τους. Ωστόσο, έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής και διάρκεια κατασκευαστικής εγγύησης από τα μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά και παράλληλα εμφανίζουν βαθμούς απόδοσης που κυμαίνονται από 7% ως 13%, δηλαδή σημαντικά μικρότερους σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες, επομένως απαιτούν πολύ μεγαλύτερο διαθέσιμο χώρο για την παραγωγή την ίδιας ηλεκτρικής ενέργειας.

5.2.2 Σύνδεση φωτοβολταϊκών πλαισίων και Αντιστροφείς τάσης (inverters)

Στις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, πολλά ΦΒ στοιχεία συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους σε ένα πλαίσιο με κοινή ηλεκτρική έξοδο και έτσι προκύπτει μεγαλύτερη ισχύς λειτουργίας. Τα στοιχεία μπορούν να συνδεθούν είτε παράλληλα (όπου η ένταση του ρεύματος ισούται με το άθροισμα των επιμέρους εντάσεων και η τάση στα άκρα του συνδυασμού παραμένει ίδια με την τάση του κάθε στοιχείου) είτε σε σειρά (όπου η ένταση του ρεύματος παραμένει ίδια αλλά η τάση του συνδυασμού είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων των επιμέρους στοιχείων). Η αύξηση της τάσης είναι άκρως επιθυμητή, καθώς οι απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνονται με την μείωση της τάσης. Ταυτόχρονα, όσο αυξάνεται η ένταση του ρεύματος, τόσο αυξάνεται και η απαίτηση για μεγάλες διατομές αγωγών. Ως εκ τούτου, η σύνδεση σε σειρά είναι αυτή που προτιμάται για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Προφανώς με στόχο την ομαλή λειτουργία του πλαισίου, τα ΦΒ στοιχεία πρέπει να είναι όμοια μεταξύ τους για να εμφανίζουν όμοια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.

Με στόχο την μεγάλη ηλεκτροπαραγωγή, τα ΦΒ πλαίσια ομαδοποιούνται και συνδέονται καταλλήλως σχηματίζοντας φωτοβολταϊκές συστοιχίες (strings). Οι τρόποι με τους οποίους μπορούν να συνδεθούν τα πλαίσια είναι σε σειρά, παράλληλα καθώς και μικτά. Η σύνδεση σε σειρά χρησιμοποιείται με στόχο την επίτευξη μεγαλύτερης τάσης από την τάση που παρέχει το κάθε πλαίσιο ξεχωριστά. Κατά την σύνδεση αυτή, ο θετικός πόλος του ενός πλαισίου συνδέεται με τον αρνητικό πόλο του επομένου και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου συνδεθούν όλα μεταξύ τους και έτσι προκύπτει μια συστοιχία φωτοβολταϊκών σε

σειρά. Τα συνδεδεμένα σε σειρά πλαίσια έχουν το ίδιο ρεύμα βραχυκύκλωσης και το ίδιο ρεύμα μέγιστης ισχύος, ενώ η συνολική τάση της συστοιχίας είναι ίση με το άθροισμα των επιμέρους τάσεων των πλαισίων που συνδέθηκαν. [47]

Από την άλλη, η παράλληλη σύνδεση χρησιμοποιείται με στόχο την επίτευξη έντασης ρεύματος μεγαλύτερης από την ένταση ρεύματος του κάθε πλαισίου. Κατά την σύνδεση αυτή, ο θετικός πόλος του ενός πλαισίου συνδέεται με τον θετικό πόλο του άλλου και αντίστοιχα ο αρνητικός πόλος του ενός με τον αρνητικό του άλλου. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου να συνδεθούν όλα μεταξύ τους και έτσι προκύπτει μια συστοιχία φωτοβολταϊκών συνδεδεμένων παράλληλα. Τα παράλληλα συνδεδεμένα πλαίσια έχουν την ίδια τάση ανοιχτού κυκλώματος, ενώ η συνολική ένταση του ρεύματος της συστοιχίας είναι ίση με το άθροισμα των επιμέρους εντάσεων ρεύματος των πλαισίων που συνδέθηκαν. [47]

Κρίνεται σωστό οι συνδέσεις ανάμεσα στα στοιχεία αλλά και ανάμεσα στα πλαίσια να μην είναι μόνο σε σειρά αλλά κάποιες να είναι και παράλληλες, ούτως ώστε να αποφευχθεί ο μηδενισμός της ισχύος του συστήματος σε περίπτωση βλάβης σε ένα στοιχείο ή ένα πλαίσιο. Με την μικτή αυτή σύνδεση για την συστοιχία, το ΦΒ σύστημα καθίσταται πιο ανθεκτικό σε επιμέρους βλάβες και κατ' επέκταση πιο αξιόπιστο. Σε αυτή την περίπτωση, η τάση εξόδου της συστοιχίας καθορίζεται από τα στοιχεία και πλαίσια που είναι συνδεδεμένα σε σειρά, ενώ το συνολικό ρεύμα από τις παράλληλες ομάδες. Ουσιαστικά βάσει της επιθυμητής τάσης εξόδου, γίνεται και η σύνδεση των πλαισίων.

Μια συστοιχία ΦΒ παράγει συνεχές ρεύμα (DC), το οποίο για να μπορέσει να αξιοποιηθεί από το δίκτυο πρέπει να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο (AC). Αυτός ακριβώς είναι ο ρόλος του αντιστροφέα τάσης, συχνά αποκαλούμενου και ως inverter, ο οποίος είναι μια διάταξη ισχύος που μετατρέπει την συνεχή τάση των Φ/Β πάνελ σε εναλλασσόμενη 230 Volt, είτε προς χρήση από τον καταναλωτή, είτε προς έγχυση στο δημόσιο δίκτυο [47]. Οι αντιστροφείς αποτελούν κομβικό σημείο μιας ΦΒ εγκατάστασης, για αυτό και απαραίτητη κρίνεται η υψηλή τους απόδοση και αξιοπιστία. Ο (συνολικός) βαθμός απόδοσης ενός αντιστροφέα, σε συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης ορίζεται ως το πηλίκο της (AC) ισχύος εξόδου προς την (DC) ισχύ εισόδου και προφανώς αποδίδει το ποσό της ισχύος που χάνεται ως απώλειες κατά την διέλευση από τον αντιστροφέα. Οι τυπικοί βαθμοί απόδοσης των αντιστροφέων κυμαίνονται από 94% ως 98% [47], ενώ συνήθως η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει πτώση στην απόδοση και την ικανότητα μέγιστης ισχύος τους.

Οι αντιστροφείς των διασυνδεδεμένων συστημάτων, τα οποία αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο, διαχωρίζονται ανάλογα με το είδος της τάσης που παράγουν σε [48]:

- Μονοφασικούς, δηλαδή αυτούς που παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα μίας φάσης και έχουν τυπικά μεγέθη ισχύος έως 10-11kW
- Τριφασικούς, δηλαδή αυτούς που παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα τριών φάσεων και έχουν τυπικά μεγέθη ισχύος από 6-7kW έως και 1MW

Αξίζει να σημειωθεί πως η ΔΕΗ για το δίκτυο Χαμηλής Τάσης, επιβάλλει την σύνδεση των αντιστροφέων σε τριφασικό σύστημα για εγκαταστάσεις άνω των 5kW, ενώ εγκαταστάσεις άνω των 250kW συνδέονται υποχρεωτικά στο δίκτυο Μέσης Τάσης της ΔΕΗ. [48]

Εν συνεχεία, ιδιαίτερης σημασίας ζήτημα αποτελεί και η στήριξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων με στόχο την στατική τους επάρκεια και την επίτευξη της μέγιστης δυνατής ηλιακής απολαβής. Κατά βάση τα ΦΒ πάνελ εδράζονται στο έδαφος με δύο τρόπους. Πρωτίστως, με βάσεις σταθερής κλίσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο, οι οποίες τοποθετούνται με προσανατολισμό στον Νότο και, κατόπιν σχετικής μελέτης, στην γωνία κλίσης εκείνη που μεγιστοποιεί την παραγωγή των φωτοβολταϊκών. Για τα ελληνικά δεδομένα κλίματος και ηλιοφάνειας, συνήθως συνιστάται τα φωτοβολταϊκά να τοποθετούνται σε γωνία κλίσης περίπου 30 μοιρών. Οι σταθερές βάσεις κατασκευάζονται συνήθως από αλουμίνιο ή ανοξείδωτο χάλυβα και αποτελούν τον απλούστερο και οικονομικότερο τρόπο έδρασης ΦΒ πάνελ. Χρησιμοποιούνται και στην περίπτωση ενσωμάτωσης ΦΒ πάνελ σε στέγες ή σε προσόψεις κτιρίων και πάλι με κατάλληλη επιλογή της κλίσης. Δευτερευόντως, επιλέγεται και έδραση των ΦΒ πάνελ σε βάσεις διατάξεων παρακολούθησης της πορείας του ήλιου ή τράκερς (trackers). Ο στόχος των συστημάτων ιχνηλάτησης της πορείας του ήλιου είναι η επίτευξη συνεχώς κάθετης πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στα πάνελ μέσω της κατάλληλης κίνησης των βάσεων κατά την διάρκεια της μέρας. Ο προσανατολισμός της βάσης ομοίως είναι Νότιος και η πορεία της κινούμενης βάσης γίνεται από Ανατολικά προς Δυτικά. Με την επιλογή των trackers επιτυγχάνεται αύξηση της παραγόμενης από τα ΦΒ πάνελ ηλεκτρικής ενέργειας από 25% μέχρι 30% [47] κατά μέσο όρο τον χρόνο, σε σχέση με τις σταθερές βάσεις. Τα συστήματα αυτά, ωστόσο, λόγω της ύπαρξης κινητών μερών, είναι πιο πολύπλοκα και ακριβότερα σε σχέση με τις σταθερές βάσεις. Ταυτόχρονα, έχουν πολύ μεγαλύτερες απαιτήσεις σε χώρο εγκατάστασης σε σχέση με τα σταθερά συστήματα, συγκεκριμένα χρειάζονται έως και 2,5 φορές περισσότερο χώρο [47].

5.2.3 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Διασυνδεδεμένα συστήματα (net-metering)
- Αυτόνομα συστήματα (με χρήση μπαταριών)
- Υβριδικά συστήματα

5.2.3.1 Διασυνδεδεμένα συστήματα (net-metering)

Τα διαδυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι αυτά που συνδέονται με το δίκτυο παροχής ηλεκτρισμού. Υπάρχει η δυνατότητα τόσο πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο της ΔΕΗ με σύναψη κατάλληλης σύμβασης (η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα ΦΒ να διοχετεύεται εξ' ολοκλήρου στο ηλεκτρικό δίκτυο), όσο και ιδιοκατανάλωσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτοντας τυχόν επιπλέον ανάγκες από το βασικό δίκτυο ηλεκτρισμού. Ακριβώς επειδή στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, επιχειρείται η επίτευξη θετικού ενεργειακού ισοζυγίου για το κτίριο γραφείων, προφανώς το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην δεύτερη υποκατηγορία των διασυνδεδεμένων συστημάτων, στην οποία ανήκει και ο φωτοβολταϊκός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που επιλέγεται να εγκατασταθεί στην στέγη του υπό μελέτη κτιρίου.

Η περίπτωση της εγκατάστασης διαδυνδεδεμένου συστήματος φωτοβολταϊκών με στόχο την ιδιοκατανάλωση διέπεται από το νομικό πλαίσιο του net-metering, το οποίο στα ελληνικά αποδίδεται ως ενεργειακός συμψηφισμός. Στα πλαίσια του net-metering, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σύστημα, συμψηφίζεται με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το κτίριο στο τέλος κάθε έτους. Αν η παραγωγή είναι μεγαλύτερη της κατανάλωσης, η περίσσεια ενέργειας (η οποία εκχέεται κάθε χρονική στιγμή στο δίκτυο της ΔΕΗ) δεν αποζημιώνεται, ενώ αν η κατανάλωση είναι μεγαλύτερη της παραγωγής, η υπολειπόμενη ενέργεια (η οποία καλύπτεται κάθε χρονική στιγμή από το δίκτυο) χρεώνεται στον λογαριασμό ρεύματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην γενική περίπτωση η σύμβαση συμψηφισμού που υπογράφεται μεταξύ του προμηθευτή και του αυτοπαραγωγού έχει χρονική διάρκεια 25 έτη, με έναρξη ισχύος την ημερομηνία ενεργοποίησης της σύνδεσης του φωτοβολταϊκού συστήματος [48].

Στην πράξη, όταν η παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά ενέργεια δεν επαρκεί για την τροφοδότηση της κατανάλωσης ενός κτιρίου, απορροφάται ενέργεια από το δίκτυο της ΔΕΗ, δηλαδή η επιπλέον ζητούμενη από το κτίριο ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτεται από το δίκτυο. Αντίστοιχα, όταν η παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά είναι μεγαλύτερη από την ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου, η περίσσεια ενέργεια καταγράφεται από τον αμφίδρομο μετρητή και εκχέεται στο δίκτυο της ΔΕΗ [49]. Κατ' αυτόν τον τρόπο αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά το

φαινόμενο της στοχαστικότητας των φωτοβολταϊκών, δηλαδή το γεγονός ότι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν παρουσιάζει απρόβλεπτες διακυμάνσεις και δεν μπορεί να αυξομειωθεί έτσι ώστε να μπορεί να καλύπτει την ζήτηση ανά πάσα ώρα και στιγμή του 24ώρου. Κατά βάση, όπως είναι λογικό, λόγω της υπάρχουσας ηλιοφάνειας ανά εποχή, παρατηρείται μειωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά κατά τους χειμερινούς μήνες του χρόνου και, αντίστοιχα, αυξημένη παραγωγή κατά τους θερινούς μήνες. Ωστόσο, με το net-metering, το πρόβλημα αυτό επιλύεται χωρίς την ανάγκη χρήσης μπαταριών για αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι ΦΒ σταθμοί στα πλαίσια του net-metering πρέπει να εγκαθίστανται στον ίδιο χώρο με τις εγκαταστάσεις κατανάλωσης που τροφοδοτούν ή σε όμορο αυτού χώρο. Σε κάθε περίπτωση, ο ενδιαφερόμενος πρέπει να έχει την νόμιμη χρήση του χώρου εγκατάστασης του σταθμού. Οι βασικοί όροι για την εγκατάσταση σταθμών παραγωγής με net-metering είναι να υπάρχει ενεργή μόνιμη παροχή ρεύματος στο όνομα του αυτοπαραγωγού μέσω της οποίας τροφοδοτείται η εγκατάσταση κατανάλωσής του και επίσης ο ενδιαφερόμενος να έχει εξοφλήσει πλήρως τους λογαριασμούς ηλεκτρικής ενέργειας του προμηθευτή, ή έχει ενταχθεί σε καθεστώς ρύθμισης οφειλών [48]. Ανάλογα με το τυποποιημένο μέγεθος παροχής και την συμφωνημένη ισχύ κατανάλωσης [kVA], προκύπτουν τα όρια ισχύος εγκατάστασης για το φωτοβολταϊκό σύστημα, τα οποία φαίνονται στην **Εικόνα 5.5** ακολούθως.

Διασυνδεδεμένο Σύστημα (συμπεριλαμβανομένης της Κρήτης)

Επίπεδο τάσης	Τυποποιημένο μέγεθος παροχής	Συμφωνημένη Ισχύς (Σ.Ι.) παροχής (kVA)	Μέγιστη επιτρεπτή ισχύς φωτοβολταϊκού σταθμού (kW _p)
Χαμηλή Τάση	03	8	5
	05	12	5
	1	15	15
	2	25	25
	3	35	35
	4	55	55
	5	85	85
	6	135	135
7	250	250	
Μέση Τάση	-	-	100% της Συμφωνημένης Ισχύος και μέχρι 3.000 kW _p *

Εικόνα 5.5: Μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς φωτοβολταϊκού σταθμού ανάλογα με τα kVA της συμφωνημένης παροχής ισχύος [48]

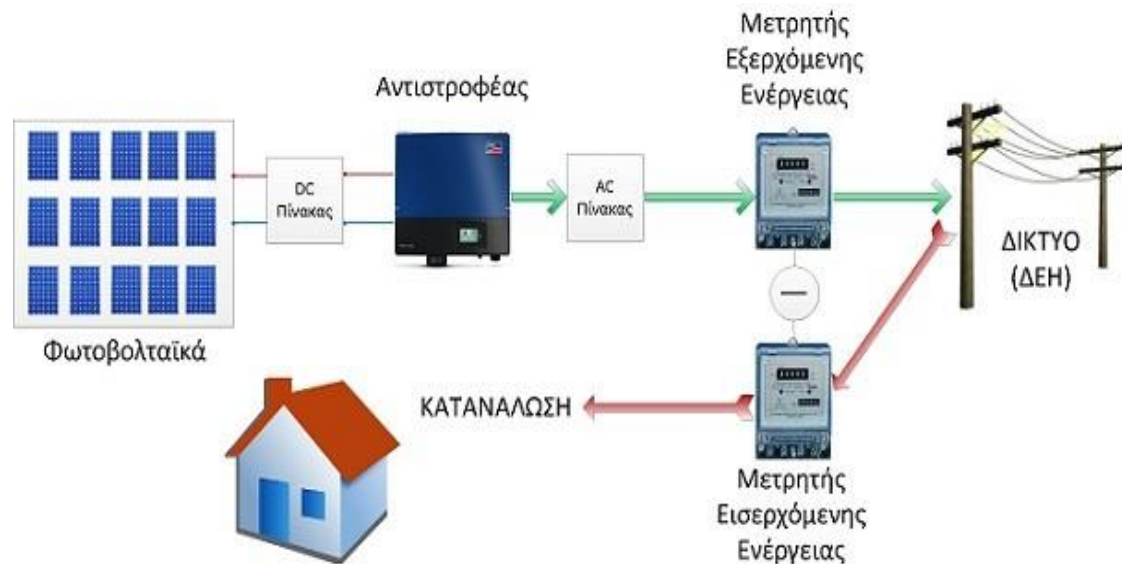
Συγκεκριμένα για το Διασυνδεδεμένο Σύστημα (ηπειρωτική χώρα και διασυνδεδεμένα με αυτήν νησιά) στην περίπτωση του net-metering, η ισχύς κάθε σταθμού παραγωγής μπορεί να ανέρχεται μέχρι και το εκατό τοις εκατό (100%) της συμφωνημένης ισχύος κατανάλωσης (Ισχύς σταθμού παραγωγής [kW_p] ≤ Συμφωνημένη Ισχύ Κατανάλωσης [kVA]) όταν η συμφωνημένη ισχύς κατανάλωσης είναι από 15kVA και πάνω, δηλαδή όταν η σύνδεση είναι τριφασική [48]. Για

παράδειγμα, για συμφωνημένη ισχύ κατανάλωσης 25 kVA (τυποποιημένη παροχή Νο2), η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς για εγκατάσταση ΦΒ συστήματος είναι 25 kWp. Επισημαίνεται επίσης ότι η μέγιστη αποδεκτή εγκατεστημένη ισχύς μονοφασικών ΦΒ συστημάτων παραγωγής ανέρχεται σε 5 kWp, επομένως σε εγκαταστάσεις κατανάλωσης με μονοφασική σύνδεση η ισχύς του ΦΒ συστήματος περιορίζεται σε 5 kWp.

Ένα διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από [47]:

- 1) Τις ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- 2) Τον αντιστροφέα, χαμηλής τάσης, μονοφασικό (230V, 50Hz) ή τριφασικό (3 x 400V, 50Hz) για την μετατροπή του συνεχούς ρεύματος (DC) που παράγουν τα ΦΒ σε εναλλασσόμενο (AC)
- 3) Τον πίνακα ελέγχου και λειτουργίας για την σύνδεση με το βασικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας
- 4) Τον αμφίδρομο μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας
- 5) Τον πίνακα ελέγχου και λειτουργίας των καταναλώσεων

Σχηματικά ένας σταθμός net-metering παρατίθεται στην παρακάτω **Εικόνα 5.6**:



Εικόνα 5.6: Σχηματική αποτύπωση των επιμέρους τμημάτων και της λειτουργίας ενός ΦΒ σταθμού net-metering [50]

Για την αδειοδότηση [51] ενός τέτοιου φωτοβολταϊκού σταθμού για συστήματα με ισχύ ως 500kWp, όπως αυτό που τοποθετείται στο υπό μελέτη κτίριο γραφείων, αρχικά απαιτείται η βεβαίωση απαλλαγής από Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων (ΕΠΟ) (με την επιφύλαξη συγκεκριμένων εξαιρέσεων όπου απαιτείται ΕΠΟ), η οποία χορηγείται από την αρμόδια Περιφέρεια. Από την υποχρέωση αυτή εξαιρούνται τα έργα επί κτιρίων ή εντός οργανωμένων υποδοχέων βιομηχανικών δραστηριοτήτων. Κατόπιν, απαιτείται η έγκριση μικρών εργασιών από την Πολεοδομία, η οποία ωστόσο σημειώνεται πως δεν χρειάζεται για συστήματα επί στεγών με ισχύ έως 100 kWp, όπως είναι η περίπτωση της παρούσας μελέτης. Εν συνεχεία, υποβάλλεται η αίτηση σύνδεσης στην αρμόδια τοπική μονάδα του ΔΕΔΔΗΕ (Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας) και κατόπιν η αρμόδια μονάδα προβαίνει, εφόσον πληρούνται οι προϋποθέσεις, στην έγγραφη διατύπωση οριστικής προσφοράς σύνδεσης προς τον αιτούντα. Η προσφορά περιλαμβάνει την περιγραφή των έργων και εργασιών που θα εκτελέσει ο ΔΕΔΔΗΕ για την σύνδεση και την συνολική σχετική δαπάνη, καθώς και τις εργασίες και ενέργειες στις οποίες θα πρέπει να προβεί ο ενδιαφερόμενος για την υλοποίηση της σύνδεσης. Τέλος, μετά την αποδοχή της προσφοράς σύνδεσης εκ μέρους του ενδιαφερόμενου εντός ορισμένου χρονικού διαστήματος από την χορήγησή της, υπογράφεται η σύμβαση σύνδεσης μεταξύ του αυτοπαραγωγού και του ΔΑΠΕΕΠ (Διαχειριστής ΑΠΕ & Εγγυήσεων Προέλευσης) και καταβάλλεται η σχετική δαπάνη. Η κατασκευή των έργων σύνδεσης ολοκληρώνεται από τον διαχειριστή του δικτύου εντός ενός μήνα από την υπογραφή της σύμβασης σύνδεσης, εφόσον δεν απαιτούνται νέα έργα δικτύου διανομής, αλλιώς η κατασκευή των έργων σύνδεσης ολοκληρώνεται εντός τεσσάρων μηνών [51], για σταθμούς που συνδέονται στη χαμηλή τάση.

5.2.3.2 Αυτόνομα και υβριδικά συστήματα

Στην περίπτωση ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού σταθμού, το σύστημα είναι εντελώς ανεξάρτητο, δηλαδή δεν συνδέεται στο δίκτυο παροχής ηλεκτρισμού και έτσι προκύπτει η ανάγκη χρήσης τεχνολογιών αποθήκευσης της παραγόμενης από τα ΦΒ ηλεκτρικής ενέργειας και συγκεκριμένα χρήσης κατάλληλων μπαταριών. Ο στόχος ενός τέτοιου συστήματος είναι να παράγει ηλεκτρική ενέργεια αποκλειστικά για ιδιοκατανάλωση για ένα κτίριο και όχι προς πώληση στο δίκτυο. Σε ένα αυτόνομο σύστημα, κατά τις ώρες τις ημέρας που υπάρχει ηλιοφάνεια, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση των καταναλώσεων αλλά και για την φόρτιση των μπαταριών. Ενώ κατά τις ώρες που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια, η απαιτούμενη ενέργεια για την κάλυψη των αναγκών του κτιρίου προκύπτει από την αποφόρτιση των μπαταριών. Τα πιο συνηθισμένα τέτοια συστήματα είναι μικρής εγκατεστημένης ισχύος, έως 5kWp και επιλέγονται σε απομακρυσμένες περιοχές όπου δεν υπάρχει δίκτυο ή όπου η διασύνδεση στο δίκτυο κοστίζει ακριβότερα από την εγκατάσταση ενός εναλλακτικού συστήματος παροχής ενέργειας [52].

Ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από [47]:

- 1) Τις ομάδες φωτοβολταϊκών πλαισίων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- 2) Την διάταξη λειτουργίας MPPT (Maximum Power Point Tracking) η οποία προσαρμόζει την λειτουργία γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος
- 3) Τον μετατροπέα DC/DC ο οποίος προσαρμόζει την τάση εξόδου από τις ομάδες των ΦΒ πλαισίων στην επιθυμητή τάση εισόδου του ρυθμιστή -φορτιστή
- 4) Τον αυτόνομο ρυθμιστή φόρτισης των συσσωρευτών αποθήκευσης, ο οποίος συνδέεται με την συστοιχία συσσωρευτών και ελέγχει και ρυθμίζει την διαδικασία φόρτισης και αποφόρτισής τους
- 5) Τους συσσωρευτές αποθήκευσης (μπαταρίες) όπου αποθηκεύεται η ηλεκτρική ενέργεια
- 6) Τον αντιστροφέα για την μετατροπή του συνεχούς ρεύματος (DC) που παράγουν τα ΦΒ σε εναλλασσόμενο (AC), ο οποίος συνδέεται από την DC πλευρά με τις μπαταρίες και από την AC πλευρά με τον ηλεκτρικό πίνακα AC και συνεπώς με τις ηλεκτρικές καταναλώσεις
- 7) Τον πίνακα ελέγχου και λειτουργίας των καταναλώσεων του κτιρίου

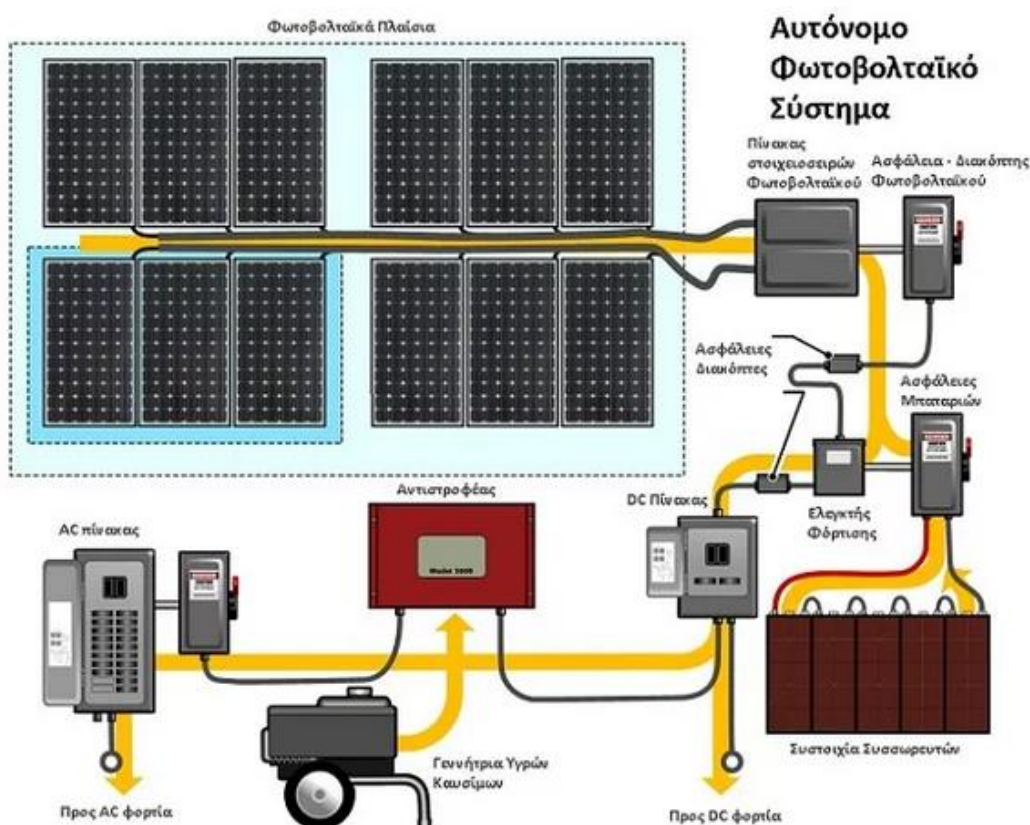
Στο εμπόριο κυκλοφορούν ενιαίες (compact) ηλεκτρονικές διατάξεις που περιλαμβάνουν την διάταξη MPPT, τον μετατροπέα DC/DC, τον inverter καθώς και τον ρυθμιστή φόρτισης. Ο ρυθμιστής φόρτισης αποτελεί τμήμα ζωτικής σημασίας για την διάταξη, γιατί ως στόχο έχει την εξασφάλιση της μεγάλης διάρκειας ζωής και της υψηλής απόδοσης των συσσωρευτών. Ειδικότερα, προστατεύει τους συσσωρευτές τόσο από υπερ-φόρτιση περιορίζοντας την τάση φόρτισης (HVD: high voltage disconnect, αποσύνδεση σε υψηλή τάση), όσο και από υπερ-εκφόρτιση αποσυνδέοντάς τους από το φορτίο (LVD: low voltage disconnect, αποσύνδεση σε χαμηλή τάση) όταν φτάσουν ένα συγκεκριμένο βάθος εκφόρτισης (depth of discharge, DOD). Παράλληλα αποτρέπει την ροή ρεύματος από τους συσσωρευτές προς τα φωτοβολταϊκά πλαίσια κατά την διάρκεια της νύχτας. [52]

Οι συσσωρευτές αποθήκευσης (μπαταρίες φωτοβολταϊκών) που επιλέγονται στα αυτόνομα συστήματα είναι οι λεγόμενοι συσσωρευτές βαθείας εκφόρτισης, δηλαδή αυτοί που μπορούν να αντέξουν πολλές εκατοντάδες διαδοχικές φορτίσεις. Η αποθήκευση της ενέργειας στους συσσωρευτές γίνεται σε κατάλληλα διαλύματα ηλεκτρολύτη (για παράδειγμα μολύβδου - θειϊκού οξέος) μέσω ηλεκτροδίων και συνοδεύεται από συγκεκριμένες χημικές αντιδράσεις. Η ενέργεια αποδίδεται στο σύστημα μέσω των ηλεκτροδίων με αντιστροφή της χημικής διεργασίας. [53]

Βασικό χαρακτηριστικό των συσσωρευτών είναι η χωρητικότητά τους, η οποία μετράται σε αμπερώρια [Ah] και είναι το γινόμενο του ρεύματος που μπορεί να αποδώσει ο συσσωρευτής (σε αμπέρ) επί τον χρόνο για τον οποίον μπορεί να το αποδώσει (σε ώρες). Για παράδειγμα ένας συσσωρευτής 100Ah θεωρητικά μπορεί να αποδώσει ρεύμα έντασης 100A για μία ώρα ή ρεύμα έντασης 50A για 2 ώρες κ.ο.κ.

Πέραν της χωρητικότητας, αξίζει να αναφερθεί και ο βαθμός εκφόρτισης C ενός συσσωρευτή, ο οποίος, όσο αυξάνεται, επιδρά αρνητικά στην πραγματική χωρητικότητα του συσσωρευτή [52]. Επίσης, μεγάλη σημασία για έναν συσσωρευτή έχει και το βάθος εκφόρτισης το οποίο εκφράζει το ποσοστό της συνολικής χωρητικότητας το οποίο χρησιμοποιείται σε έναν κύκλο φόρτισης/εκφόρτισης. Οι συσσωρευτές βαθείας εκφόρτισης είναι σχεδιασμένοι να εκφορτίζονται σε ποσοστό 60% ως 80% [52] ανά κύκλο λειτουργίας. Εν γένει οι μπαταρίες χαρακτηρίζονται επίσης και από την τάση [V], αφού το γινόμενο της τάσης και της χωρητικότητας δίνει την αποθηκευμένη ισχύ για έναν συσσωρευτή. Στα αυτόνομα συστήματα, η συστοιχία συσσωρευτών συνδέεται με τον ρυθμιστή φόρτισης και με τον αντιστροφέα τάσης (inverter).

Τέλος, εκτός από τα αμιγώς αυτόνομα συστήματα, υπάρχουν και τα λεγόμενα υβριδικά συστήματα, τα οποία συνδυάζουν ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα με άλλες πηγές ενέργειας (ανανεώσιμες ή συμβατικές), όπως μια ανεμογεννήτρια ή μια γεννήτρια πετρελαίου. Στην ακόλουθη **Εικόνα 5.7** απεικονίζεται ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα με μια γεννήτρια υγρών καυσίμων, η οποία χρησιμοποιείται ως εφεδρική/εναλλακτική πηγή φόρτισης των μπαταριών, κατά τις περιπτώσεις όπου η ηλιοφάνεια δεν επαρκεί.



Εικόνα 5.7: Σχηματική αποτύπωση των επιμέρους τμημάτων και της λειτουργίας ενός υβριδικού ΦΒ σταθμού [53]

5.2.4 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος στο υπό μελέτη κτίριο και αποτελέσματα

Μετά από τις προαναφερθείσες αλλαγές εξοικονόμησης, το κτίριο εν τέλει έχει ετήσιες ενεργειακές ανάγκες ίσες με 37227 kWh , επομένως διαστασιολογείται κατάλληλα ένα φωτοβολταϊκό σύστημα που να υπερκαλύπτει αυτές τις ανάγκες. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης επιλέγεται η εγκατάσταση ΦΒ συστήματος net-metering και όχι αυτόνομου συστήματος. Στα αυτόνομα συστήματα, όπως αναλύθηκε στο **κεφάλαιο 5.2.3.2**, αναγκαία είναι η αποθήκευση ενέργειας, επομένως απαιτείται αγορά και σύνδεση μπαταριών, με στόχο το σύστημα να ανταποκρίνεται επαρκώς στην ζήτηση, χωρίς καν να είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, με όσα ζητήματα μπορεί αυτό να επιφέρει για την ενεργειακή του αξιοπιστία σε ακραίες συνθήκες. Έτσι, αυξάνεται σημαντικά το συνολικό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης του ΦΒ συστήματος, όπως διαπιστώθηκε μετά από σχετική έρευνα αγοράς, ιδίως για το δεδομένο ύψος ενεργειακών αναγκών που αφορά το υπό μελέτη κτίριο που αποτελεί εργασιακό χώρο με συνεχείς ανάγκες για ηλεκτρισμό.

Συνολικά, λοιπόν, το net-metering κρίθηκε ως καλύτερη λύση καθώς με την χρήση του εξαλείφεται η ανάγκη αποθήκευσης της παραγόμενης από τα φωτοβολταϊκά ενέργειας και επιτυγχάνεται, μέσω της σύνδεσης με το δίκτυο ηλεκτρισμού, η κάλυψη των απρόβλεπτων διακυμάνσεων και αιχμών της ζήτησης. Αυτό σημαίνει πως στα πλαίσια του net-metering, δεν υπάρχει ανάγκη πλήρους κάλυψης των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου κάθε χρονική στιγμή από την αυτοπαραγωγή. Ειδικότερα, ο συμψηφισμός στα πλαίσια του net-metering γίνεται σε ετήσια βάση, επομένως αρκεί να συγκριθεί η ετησίως παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά ενέργεια με την ετησίως απαιτούμενη ενέργεια λόγω των αναγκών του κτιρίου για να επιλεγεί η εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών. Η σύμβαση του net-metering θεωρείται ότι διαρκεί, ως συνήθως, 25 έτη, όση είναι και η διάρκεια ζωής ενός τυπικού φωτοβολταϊκού σταθμού.

Για το εν λόγω κτίριο επιλέγεται η εγκατάσταση ΦΒ πάνελ στην στέγη του, η οποία διαθέτει μεγάλο εμβαδόν χώρου και προσφέρεται για μια τέτοια χρήση. Γεωγραφικά το κτίριο τοποθετείται στην Αθήνα, δηλαδή έχει $23,73$ μοίρες ανατολικό γεωγραφικό μήκος λ και $37,9$ μοίρες βόρειο γεωγραφικό πλάτος φ. Ο προσανατολισμός του κτιρίου είναι νότιος, δηλαδή η επιμήκης διάστασή του βρίσκεται στον άξονα Ανατολής-Δύσης. Αυτό αποτελεί θετικό στοιχείο για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος στην στέγη, καθώς αποδεδειγμένα τα φωτοβολταϊκά πάνελ παράγουν περισσότερη ενέργεια όταν τοποθετούνται με νότιο προσανατολισμό, αφού, ιδίως κατά την χειμερινή περίοδο, η προσπίπτουσα ακτινοβολία στο νότιο τμήμα του κτιρίου είναι σχεδόν τριπλάσια σε σχέση αυτήν στο ανατολικό και στο δυτικό τμήμα. Άρα, στην δεδομένη περίπτωση λόγω του νοτίου προσανατολισμού του κτιρίου, μεγαλύτερο τμήμα του εμβαδού της στέγης είναι αξιοποιήσιμο για τοποθέτηση φωτοβολταϊκού συστήματος με την καλύτερη δυνατή προοπτική απόδοσης. Το κτίριο συνδέεται στο δίκτυο Χαμηλής Τάσης της ΔΕΗ και

έχει τυποποιημένη παροχή Νο3, δηλαδή συμφωνημένη ισχύ παροχής ίση με 35kVA. Επομένως σύμφωνα με τον σχετική **Εικόνα 5.5** του **υποκεφαλαίου 5.2.3.1**, η μέγιστη ισχύς φωτοβολταϊκών που είναι επιτρεπτό να εγκατασταθεί στην στέγη του κτιρίου είναι 35kWp.

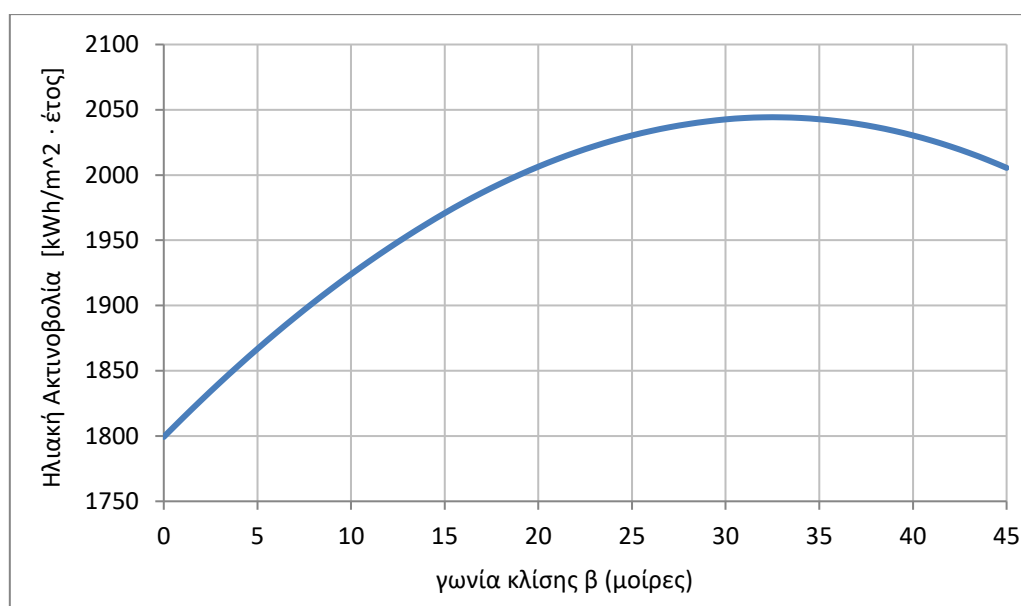
Πρωτίστως επιλέγονται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (πάνελ) που θα χρησιμοποιηθούν. Το βασικότερο κριτήριο επιλογής είναι η ισχύς τους ανά μονάδα επιφάνειας, σε συνδυασμό φυσικά με την απόδοση, την αξιοπιστία και το κόστος τους. Λόγω του περιορισμένου διαθέσιμου χώρου της στέγης (αφού επικεντρωνόμαστε μάλιστα στο νότιο τμήμα της στέγης) επιλέγονται τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια τα οποία ως τεχνολογία έχουν καλύτερες επιδόσεις, όπως αναφέρθηκε και στο **υποκεφάλαιο 5.2.1**. Μετά από σχετική διερεύνηση στην αγορά φωτοβολταϊκών πάνελ και κατάταξη βασικών μοντέλων μονοκρυσταλλικών πλαισίων βάσει της ισχύος τους ανά τετραγωνικό μέτρο, τελικά επιλέγεται το μοντέλο JAM54S30-420MR της κινεζικής εταιρείας JASolar [54], το οποίο ανά πλαίσιο έχει ονομαστική ισχύ 420Wp. Κάθε πάνελ έχει μήκος 1,722m και πλάτος 1,134m, δηλαδή εμβαδόν 1,9527m². Διαθέτει 108 φωτοβολταϊκά στοιχεία (6 x 18), το βάρος του είναι 21,5kg και η απόδοση του είναι 21,5%.

Στο φυλλάδιο τεχνικών χαρακτηριστικών του κατασκευαστή αναφέρεται πως για την διάρκεια ζωής των πάνελ (25 έτη) κάθε χρόνο υπάρχει μείωση 0,55% στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, λόγω απωλειών που σχετίζονται με την γήρανση/φθορά των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Επίσης είναι γνωστό πως σε ένα ΦΒ σύστημα, εμφανίζονται απώλειες, λόγω πτώσης τάσης, τόσο κατά την πορεία του συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος από τα πάνελ μέχρι τον inverter μέσα από τα σχετικά καλώδια, όσο και κατά την πορεία του εναλλασσόμενου πλέον ηλεκτρικού ρεύματος από τον inverter μέχρι τον μετρητή της ΔΕΗ. Οι απώλειες αυτές δεν είναι επακριβώς γνωστές αλλά παρατηρούνται ανά περίπτωση στην πράξη. Βάσει εμπειρικών τιμών θεωρείται πως κυμαίνονται σε 0,05% ανά έτος, δηλαδή συνολικά 1,25% απώλειες στο τέλος της 25ετούς λειτουργίας του ΦΒ σταθμού. Επομένως για το συγκεκριμένο πάνελ που επιλέχθηκε οι συνολικές απώλειες είναι: $(0,55 + 0,05)\% \cdot 25 = 15\%$. Αυτό σημαίνει πως στο τέλος του 25^{ου} έτους λειτουργίας του σταθμού η παραγόμενη από τα πάνελ ηλεκτρική ενέργεια θα ισούται με το 85% της αρχικά παραγόμενης ενέργειας.

Στην συνέχεια, ένα ιδιαίτερα σημαντικό σημείο για μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση είναι η επιλογή προσανατολισμού και γωνίας κλίσης β των πάνελ, η οποία έχει σαφή επίδραση στην παραγόμενη ενέργεια μιας και καθορίζει την γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο πάνελ και έτσι το ποσοστό στο οποίο μπορεί η ηλιακή ακτινοβολία να αξιοποιηθεί. Ο προσανατολισμός ενός φωτοβολταϊκού πάνελ εκφράζεται μέσω της αζιμούθιας γωνίας α και συγκεκριμένα $\alpha=0^\circ$ αντιστοιχεί σε τοποθέτηση ΦΒ προς τον Νότο, $\alpha=90^\circ$ προς την Δύση, $\alpha=-90^\circ$ προς την Ανατολή και $\alpha=-180^\circ$ προς τον Βορρά (που σαφώς δεν επιλέγεται, λόγω χαμηλής απόδοσης). Όπως ήδη αναφέρθηκε, βέλτιστος προσανατολισμός για τα πάνελ είναι ο νότιος, για αυτό και επιλέγεται η τοποθέτησή τους στο τμήμα της στέγης που κοιτάει προς τον Νότο

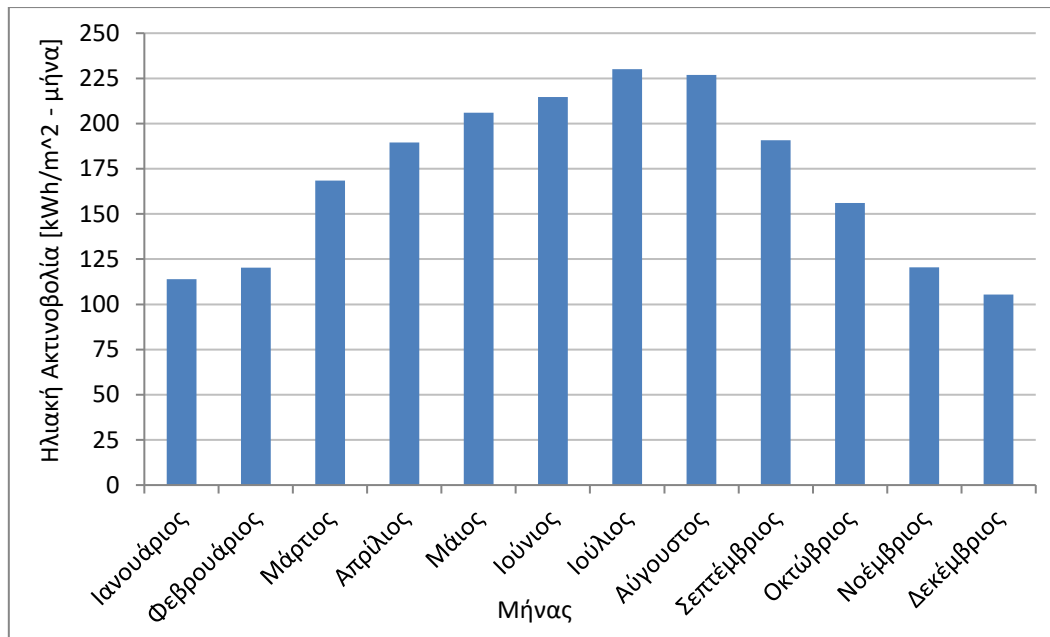
(γωνία $\alpha=0^\circ$). Επίσης, στο βόρειο ημισφαίριο, όπου βρίσκεται και υπό μελέτη κτίριο η βέλτιστη γωνία κλίση του πάνελ είναι σε γενικές γραμμές ίση με την γεωγραφικό πλάτος ϕ του τόπου. Για την εύρεση της βέλτιστης γωνίας κλίσης που οδηγεί στην μεγιστοποίηση της συνολικής ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κεκλιμένη επιφάνεια σταθερής κλίσης, εισήχθησαν τα κατάλληλα γεωγραφικά δεδομένα στο υπολογιστικό εργαλείο PVGIS το οποίο διαθέτει ενσωματωμένη βάση δεδομένων μετεωρολογικών στοιχείων και συλλέχθηκαν τα αποτελέσματα συνολικής ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια ανάλογα με την γωνία κλίσης της. Έτσι για $\alpha=0^\circ$ και τις διάφορες τιμές της γωνίας β προέκυψε το παρακάτω

Διάγραμμα 5.1:



Διάγραμμα 5.1: Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο συναρτήσει της γωνίας κλίσης

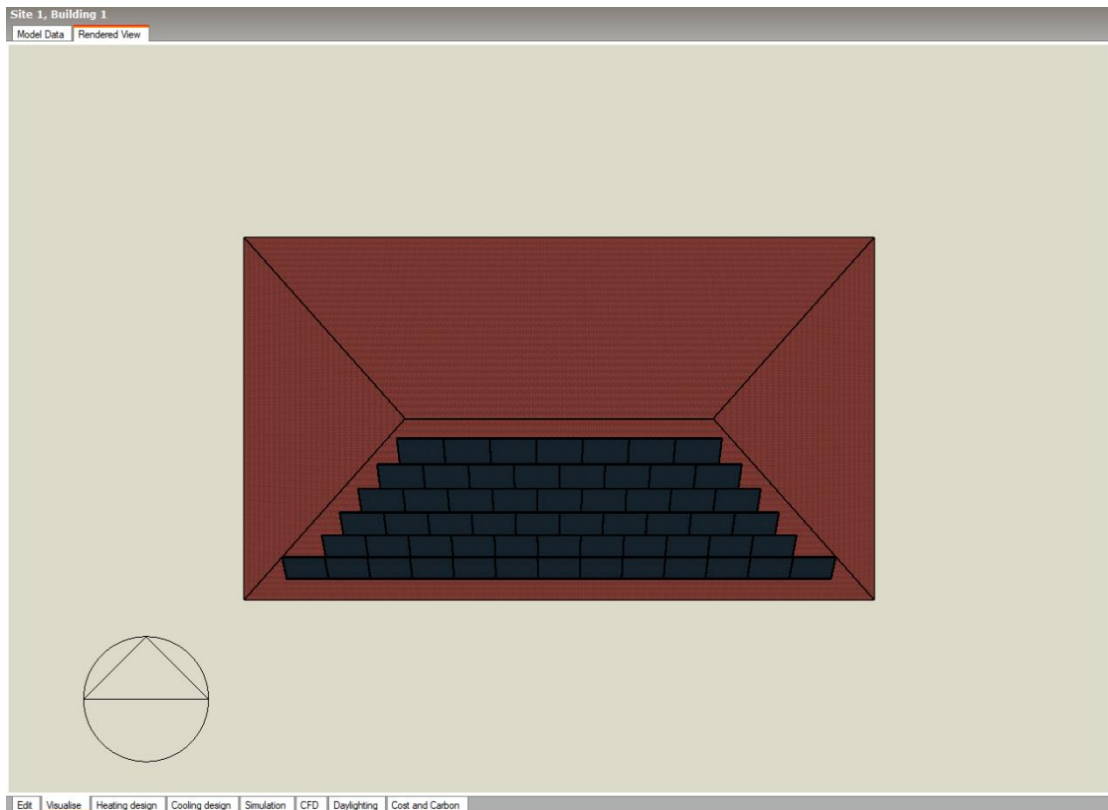
Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνεται πως η μεγιστοποίηση της συνολικής ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο συμβαίνει για γωνία κλίσης κοντά στις 30 μοίρες. Σημειώνεται πως κατασκευαστικά η στέγη του υπό μελέτη κτιρίου έχει κλίση 30 μοιρών, επομένως επιλέγεται γωνία κλίσης $\beta=30^\circ$ για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που θα τοποθετηθούν. Κατ' αυτόν τον τρόπο, αποφεύγονται ταυτόχρονα τυχόν προβλήματα σκίασης που θα δημιουργούνταν σε άλλες περιπτώσεις, μιας και εν γένει η σκίαση που προκύπτει μεταξύ των σειρών των φωτοβολταϊκών πλαισίων αποτελεί παράγοντα που επηρεάζει την παραγωγή. Παρακάτω στο **Διάγραμμα 5.2**, παρουσιάζονται, βάσει των αποτελεσμάτων του PVGIS και οι μηνιαίες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας για την συγκεκριμένη γωνία 30 μοιρών που επιλέχθηκε.



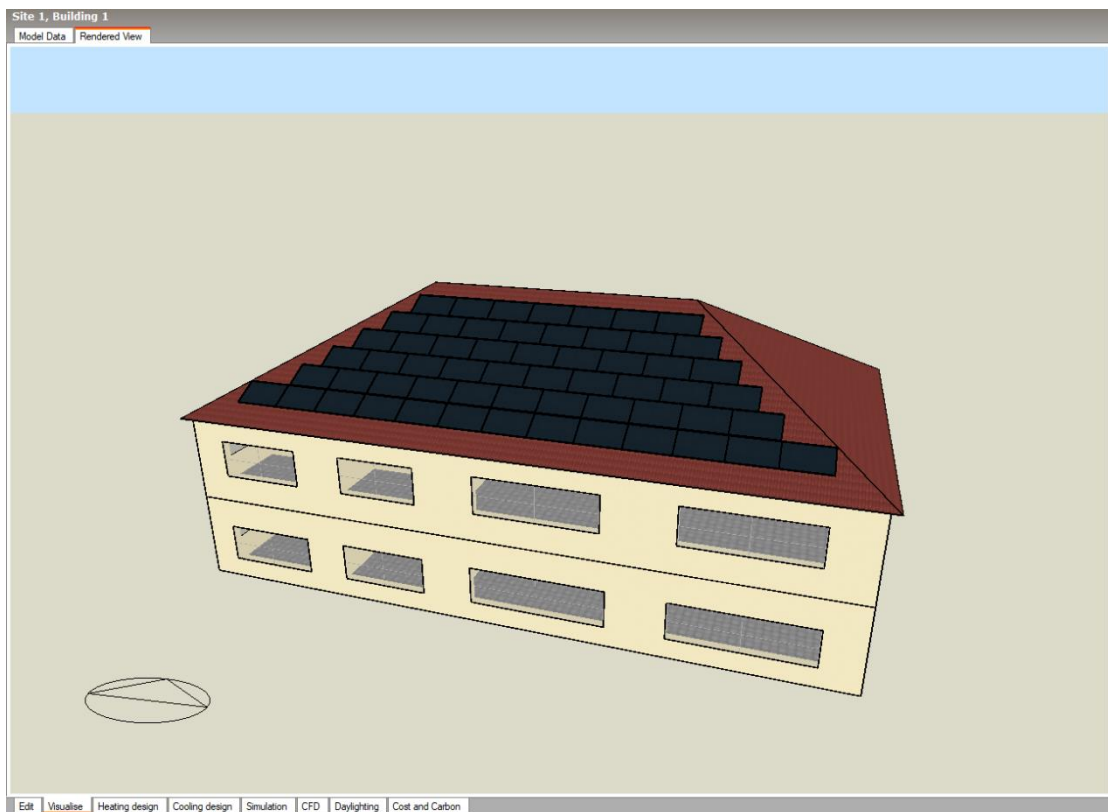
Διάγραμμα 5.2: Μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο γωνίας κλίσης 30 μοιρών

Για την επιλογή της εγκατεστημένης ισχύος [kWp] του φωτοβολταϊκού συστήματος στέγης, αφητηρία είναι οι ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου γραφείων. Η κατανάλωση ενέργειας του κτιρίου, κατόπιν των παρεμβάσεων εξοικονόμησης, είναι 37227kWh ανά έτος και το κτίριο επιλέγεται να μετατραπεί σε κτίριο θετικού ενεργειακού ισοζυγίου, δηλαδή με απλά λόγια να παράγει ποσό ενέργειας μεγαλύτερο από αυτό που καταναλώνει. Στο net-metering, η παραγόμενη και η καταναλισκόμενη ενέργεια συμψηφίζονται σε ετήσια βάση, επομένως για να θεωρείται το κτίριο θετικού ενεργειακού ισοζυγίου (Positive Energy Building, PEB), αρκεί καθ' όλη την διάρκεια λειτουργίας του φωτοβολταϊκού σταθμού, δηλαδή ακόμα και στο 25^ο έτος λειτουργίας, τα φωτοβολταϊκά να παράγουν ετησίως παραπάνω από 37227kWh. Λαμβάνοντας, λοιπόν, υπόψη και τις απώλειες του συστήματος σε βάθος χρόνου, προκύπτει ότι απαιτείται να εγκατασταθούν περίπου 24kWp φωτοβολταϊκών πάνελ με γωνία κλίσης 30°.

Τελικώς στην στέγη του κτιρίου τοποθετούνται 58 πάνελ JAM54S30-420MR που το καθένα έχει ισχύ 420Wp, επομένως η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι **24,36kWp**. Το εμβαδόν του χώρου που καταλαμβάνουν τα πάνελ είναι περίπου 114 τετραγωνικά μέτρα και χωρούν όλα στο νότιο τμήμα της στέγης του κτιρίου. Στο περιβάλλον του λογισμικού DesignBuilder σχεδιάστηκαν τα πάνελ στην στέγη του κτιρίου, όπως φαίνεται στις παρακάτω **Εικόνες 5.8 και 5.9:**



Εικόνα 5.8: Κάτοψη κτιρίου με τα φωτοβολταϊκά πάνελ στην στέγη



Εικόνα 5.9: Νότια όψη κτιρίου με τα φωτοβολταϊκά πάνελ στην στέγη

Αρχικά σχεδιάστηκε η γεωμετρία του κάθε ηλιακού πάνελ με την εντολή «Add Solar Collector – Photovoltaic» στην Layout καρτέλα της Edit οθόνης του DesignBuilder και τα απαιτούμενα 58 πάνελ τοποθετήθηκαν καταλλήλως χωροταξικά στην στέγη. Με την διάταξη που επιλέχθηκε, μετά από σχετική γεωμετρική ανάλυση, αξιοποιείται το μέγιστο δυνατόν εμβαδόν του νότιου τμήματος της στέγης, χωρίς να προεξέχει της επιφάνειας της στέγης κανένα πάνελ. Στην συνέχεια, στο επίπεδο του πάνελ, στην Construction καρτέλα της Edit οθόνης του DesignBuilder εισήχθησαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πάνελ JAM54S30-420MR, βάσει του φυλλαδίου του κατασκευαστή για το συγκεκριμένο μοντέλο, όπως φαίνεται στην παρακάτω **Εικόνα 5.10**:

Photovoltaic Generator - One-Diode	
Performance Model	
General	
Name	Panel JAM54S30-420MR
Cell type	1-Crystalline Silicon
Cells in series	108
Active area (m2)	1,9527
Transmittance absorptance product	0,9000
Semiconductor bandgap (eV)	1,12
Shunt resistance (ohms)	1000000,00
Reference temperature (°C)	25,00
Reference insolation (W/m2)	1000,00
Module heat loss coefficient (W/m2-K)	30,00
Total heat capacity (J/m2-K)	50000,00
Rated electric power output per module (W)	420,00
Availability schedule	On 24/7
Current	
Short circuit current (A)	14,10
Module current at max power (A)	13,21
Temperature coefficient of short circuit current (A/K)	0,00231
Voltage	
Open circuit voltage (V)	37,6
Module voltage at max power (V)	31,8
Temperature coefficient of open circuit voltage (V/K)	-0,038
Nominal Operating Cell Temperature	
NOCT ambient temperature (°C)	20,00
NOCT cell temperature (°C)	45,00
NOCT insolation (W/m2)	800

Εικόνα 5.10: Τεχνικά χαρακτηριστικά επιλεγμένου πάνελ JAM54S30-420MR

Στην συνέχεια επιλέχθηκαν οι αντιστροφείς τάσεις (inverters) που χρειάζεται να συνδεθούν με τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Βάσει νομοθεσίας, όπως αναφέρθηκε στο **υποκεφάλαιο 5.2.2**, οι ΦΒ εγκαταστάσεις εγκατεστημένης ισχύος άνω των 5kWp, υποχρεωτικά συνδέονται σε τριφασικό σύστημα, για αυτό και στην προκειμένη περίπτωση οι αντιστροφείς τάσης που επιλέγονται είναι τριφασικοί. Ο κατάλληλος ή οι κατάλληλοι (όταν δεν επαρκεί ένας) αντιστροφείς επιλέγονται βάσει της εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών. Ειδικότερα, η συνηθέστερη πρακτική είναι η επιλογή αντιστροφήα ονομαστικής ισχύος περίπου ίσης με την συνολική

εγκατεστημένη ισχύ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με την οποία αυτός συνδέεται. Στην προκειμένη περίπτωση η συνολική ισχύς του συστήματος είναι 24,36kWp, επομένως (βάσει των τυπικών μοντέλων τριφασικών inverters που κυκλοφορούν στην αγορά) επιλέγονται δύο όμοιοι τριφασικοί αντιστροφείς που ο καθένας έχει ονομαστική ισχύ 12,5kW. Με στόχο την ορθή διαστασιολόγηση του αντιστροφέα τάσης και την λειτουργική συμβατότητα μεταξύ αντιστροφέα και συνδεδεμένης φωτοβολταϊκής συστοιχίας, πρέπει ο αριθμός των πάνελ που συνδέονται σε σειρά να ικανοποιεί τα εξής κριτήρια [55]:

- Η ελάχιστη τάση λειτουργίας της συστοιχίας [$V_{mp}(60^{\circ}\text{C})$] πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη τάση λειτουργίας του αντιστροφέα
- Η μέγιστη τάση λειτουργίας της συστοιχίας [$V_{mp}(20^{\circ}\text{C})$] πρέπει να είναι μικρότερη από την μέγιστη τάση λειτουργίας του αντιστροφέα
- Η μέγιστη τάση ανοικτού κυκλώματος [$V_{oc}(-10^{\circ}\text{C})$] πρέπει να είναι μικρότερη της μέγιστης τάσης εισόδου του αντιστροφέα
- Η μέγιστη τάση ανοικτού κυκλώματος [$V_{oc}(-10^{\circ}\text{C})$] πρέπει να μην ξεπερνά την μέγιστη τάση του συστήματος

Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή για την τάση λειτουργίας και την τάση εισόδου του αντιστροφέα αναγράφονται στο φυλλάδιο τεχνικών χαρακτηριστικών που δίδεται από τον κατασκευαστή. Αφού ελέγχθηκε ότι οι παραπάνω συνθήκες ικανοποιούνται και συνεκτιμώντας και το κόστος αγοράς συγκριτικά με άλλα μοντέλα, για την εγκατάσταση του κτιρίου τελικώς επιλέχθηκε ο αντιστροφέας PVI-12.5-TL-OUTD της εταιρείας FIMER (πρώην ABB) [56]. Ειδικότερα, απαιτούνται δύο αντιστροφείς PVI-12.5-TL-OUTD, καθένας εκ των οποίων έχει ονομαστική ισχύ 12,5kW και συνδέεται με συστοιχία 29 πάνελ. Για την εισαγωγή των αντιστροφέων στο περιβάλλον του DesignBuilder στην Generation καρτέλα της Edit οθόνης επιλέχθηκαν 2 «load centers» (λόγω της ύπαρξης δύο αντιστροφέων) και στο καθένα εισήχθησαν καταλλήλως τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αντιστροφέα PVI-12.5-TL-OUTD, βάσει του φυλλαδίου κατασκευαστή για το συγκεκριμένο μοντέλο, όπως παρατίθενται στις παρακάτω **Εικόνες 5.11 και 5.12:**

Inverters	
General	
General	
Name	Inverter PVI-12.5-TL-OUTD
Category	Function Of Power
Availability schedule	On 24/7
Function of Power	
<input checked="" type="checkbox"/> Efficiency function of power curve	Generic inverter efficiency curve
Rated maximum continuous input power (W)	12800
Minimum efficiency	0,000
Maximum efficiency	0,978
Minimum power output (W)	200
Maximum power (W)	13800
Ancillary power consumed in standby (W)	0,0

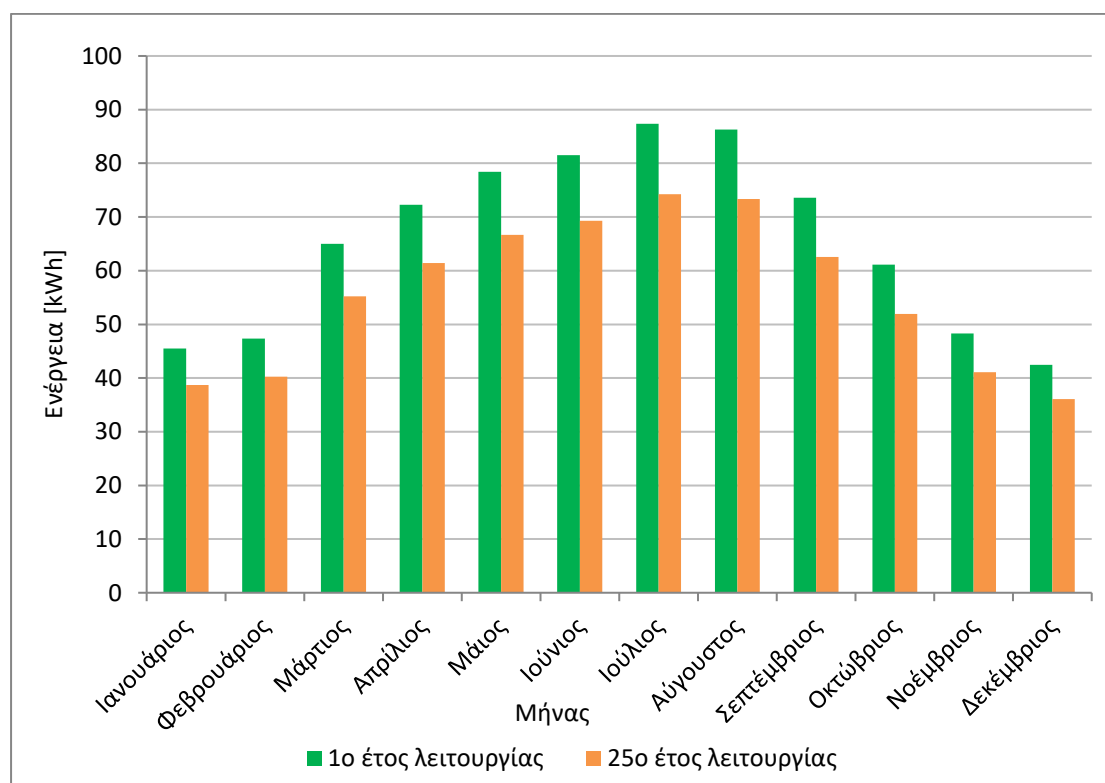
Εικόνα 5.11: Τεχνικά χαρακτηριστικά ισχύος επιλεγθέντος αντιστροφέα PVI-12.5-TL-OUTD

Inverters	
General	
General	
Name	Inverter PVI-12.5-TL-OUTD
Category	Lookup Table
Availability schedule	On 24/7
Lookup Table	
Rated maximum continuous output power (W)	12500,0
Night tare loss power (W)	1,0
Nominal voltage input (V)	580,0
Efficiency at Nominal Voltage	
At 10% power	0,955
At 20% power	0,970
At 30% power	0,974
At 50% power	0,978
At 75% power	0,977
At 100% power	0,975

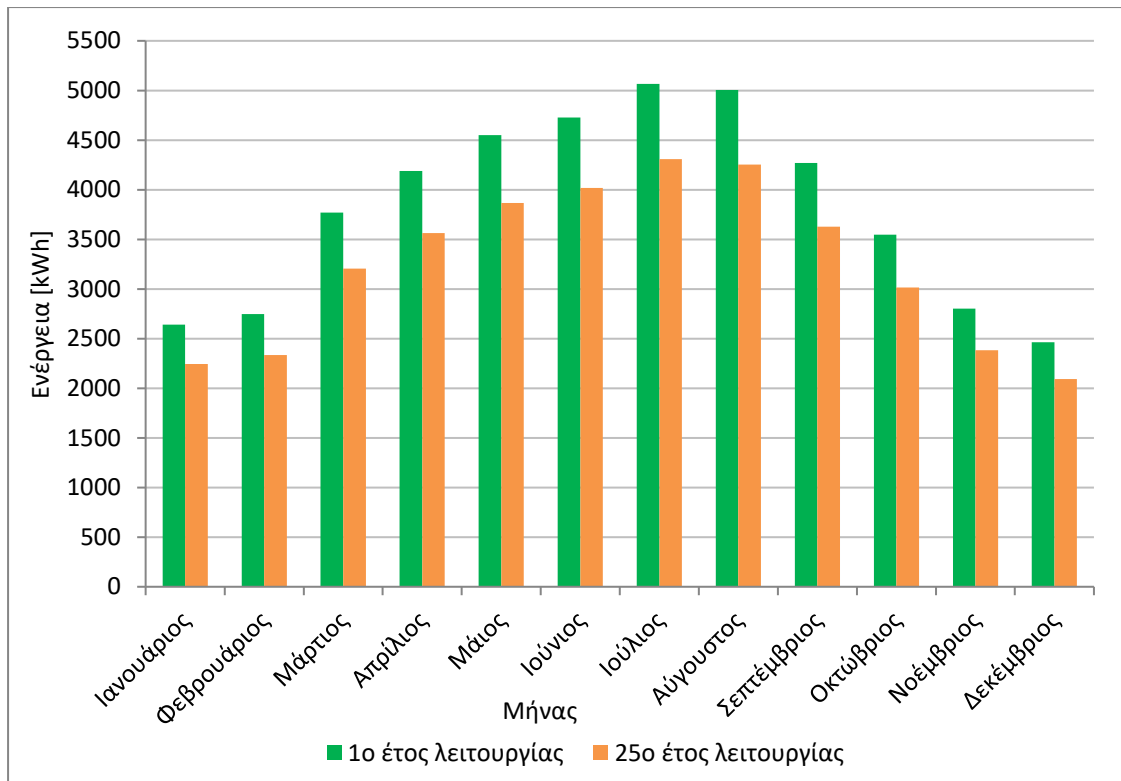
Εικόνα 5.12: Επιπλέον τεχνικά χαρακτηριστικά απόδοσης επιλεγθέντος αντιστροφέα PVI-12.5-TL-OUTD

Τελικώς, λοιπόν, προκύπτει πως ο συγκεκριμένος φωτοβολταϊκός σταθμός 24,36kWp που εγκαθίσταται στην στέγη του κτιρίου συνολικά το πρώτο έτος παράγει 45773,98 kWh ηλεκτρικής ενέργειας και, βάσει των αναμενόμενων απωλειών που λήφθηκαν υπόψη, το 25^ο έτος λειτουργίας του παράγει 38907,88 kWh. Επομένως, αφού οι ετήσιες ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου έχουν υπολογιστεί ίσες με 37227 kWh, εκ των αποτελεσμάτων καθίσταται σαφές πως, χάρη στην εγκατάσταση

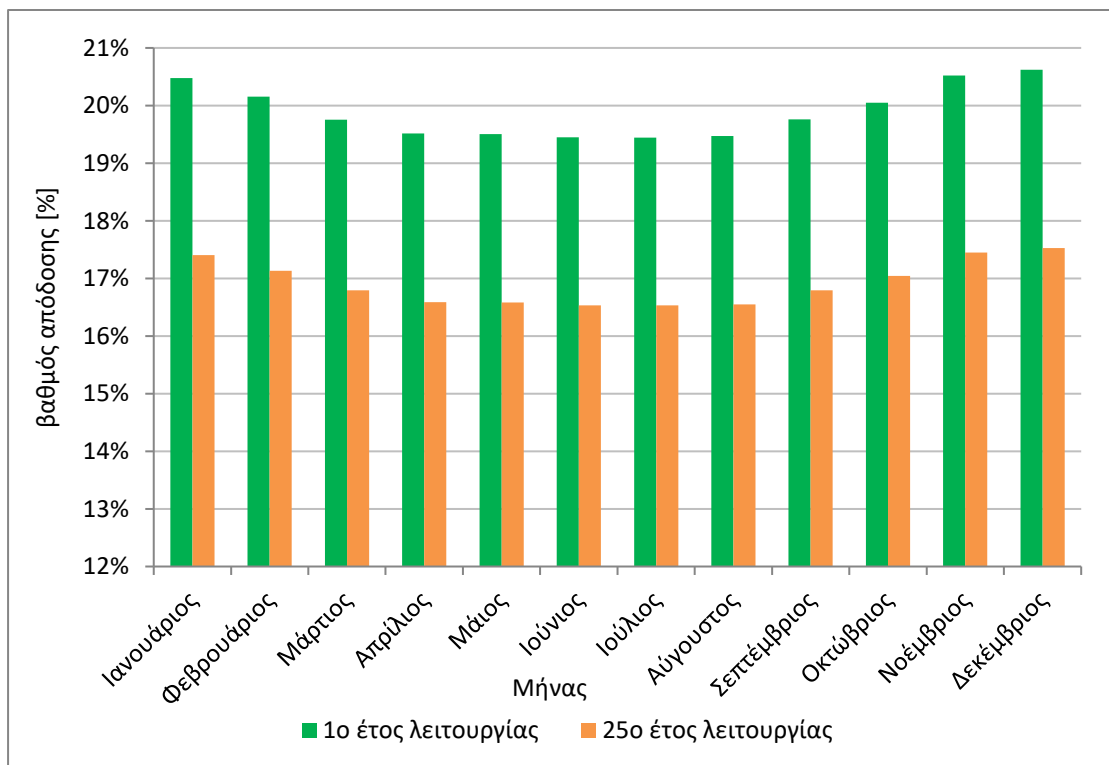
24,36kWh φωτοβολταϊκών, το υπό μελέτη κτίριο γίνεται σε ετήσια βάση κτίριο θετικού ενεργειακού ισοζυγίου και μάλιστα το ισοζύγιο παραμένει θετικό μέχρι και το τέλος της περιόδου μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται σε μηνιαία βάση η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από ένα πάνελ 420Wh, από το σύνολο των εγκατεστημένων πάνελ συνολικής ισχύος 24,36kWh καθώς και ο μέσος μηνιαίος βαθμός απόδοσης του πάνελ, ο οποίος προκύπτει από το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικώς μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Για να καταδεχθεί η διατήρηση του θετικού ισοζυγίου, καθώς και η πτώση στην παραγωγή ενέργειας λόγω των απωλειών σε βάθος χρόνου, σε κάθε διάγραμμα παρατίθεται συγκριτικά η παραγωγή τόσο στην αρχή λειτουργίας του ΦΒ σταθμού, όσο και στο τέλος της διάρκειας ζωής του και της σύμβασης του net-metering, δηλαδή στον 25^ο χρόνο λειτουργίας. Όπως είναι αναμενόμενο, υψηλότερη παραγωγή ενέργειας παρατηρείται στο διάστημα Μαΐου – Σεπτεμβρίου, ενώ σε χαμηλά επίπεδα κινείται η παραγωγή για το διάστημα Νοεμβρίου – Φεβρουαρίου. Καταδεικνύεται, λοιπόν, και στην πράξη, από τις παρατηρούμενες αυτές διακυμάνσεις, η αξία της επιλογής του net-metering για την ισοστάθμιση μεταξύ της παραγόμενης και της καταναλισκόμενης ενέργειας.



Διάγραμμα 5.3: Μηνιαίως παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από ένα πάνελ (420Wh)



Διάγραμμα 5.4: Μηνιαίως παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από το σύνολο των 58 πάνελ (24,36kWp)



Διάγραμμα 5.5: Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκών πάνελ

5.2.5 Θετικό ενεργειακό ισοζύγιο βελτιωμένου ενεργειακά κτιρίου

Στον παρακάτω Πίνακα 5.3 παρατίθεται το ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου σε ετήσια βάση για τον ορίζοντα 25ετίας ο οποίος μελετάται, καθώς και το ποσοστό κάλυψης των ετησίων ενεργειακών αναγκών του κτιρίου από τον ΦΒ σταθμό 24,36kWp που εγκαθίσταται στην στέγη. Όπως γίνεται σαφές, υπάρχει περίσσεια παραγόμενης ενέργειας κάθε έτος, η οποία αφενός εξασφαλίζει το θετικό ενεργειακό ισοζύγιο και αφετέρου αποτελεί μια δικλείδα ασφαλείας για το κτίριο στην περίπτωση που προκύψει μελλοντικώς απρόοπτη αύξηση των ενεργειακών καταναλώσεων (λόγω για παράδειγμα πρόσληψης παραπάνω εργαζομένων και συνεπακόλουθης αύξησης στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό και στα θερμικά και ψυκτικά φορτία του χώρου).

Πίνακας 5.3: Ποσοστό κάλυψης κτιριακών ενεργειακών αναγκών από τον φωτοβολταϊκό σταθμό σε βάθος 25ετίας

Έτος λειτουργίας φωτοβολταϊκού σταθμού	Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια [kWh/έτος]	Καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια [kWh/έτος]	Ποσοστό κάλυψης κτιριακών ενεργειακών αναγκών	Περίσσεια παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας [kWh/έτος]
1	45773,98	37227,0	122,96%	8546,98
2	45224,69	37227,0	121,48%	7997,69
3	44950,05	37227,0	120,75%	7723,05
4	44675,40	37227,0	120,01%	7448,40
5	44400,76	37227,0	119,27%	7173,76
6	44126,12	37227,0	118,53%	6899,12
7	43851,47	37227,0	117,79%	6624,47
8	43576,83	37227,0	117,06%	6349,83
9	43302,19	37227,0	116,32%	6075,19
10	43027,54	37227,0	115,58%	5800,54
11	42752,90	37227,0	114,84%	5525,90
12	42478,25	37227,0	114,11%	5251,25
13	42203,61	37227,0	113,37%	4976,61
14	41928,97	37227,0	112,63%	4701,97
15	41654,32	37227,0	111,89%	4427,32
16	41379,68	37227,0	111,16%	4152,68
17	41105,03	37227,0	110,42%	3878,03
18	40830,39	37227,0	109,68%	3603,39
19	40555,75	37227,0	108,94%	3328,75
20	40281,10	37227,0	108,20%	3054,10
21	40006,46	37227,0	107,47%	2779,46
22	39731,81	37227,0	106,73%	2504,81
23	39457,17	37227,0	105,99%	2230,17
24	39182,53	37227,0	105,25%	1955,53
25	38907,88	37227,0	104,52%	1680,88

Κεφάλαιο 6: Οικονομική αξιολόγηση προτεινόμενων αλλαγών

Στο κεφάλαιο αυτό λαμβάνει χώρα η οικονομική αξιολόγηση όλων των βελτιωτικών επεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας για το υπό μελέτη κτίριο, καθώς και της εγκατάστασης φωτοβολταϊκού συστήματος στην στέγη του. Στην παρούσα μελέτη, η χρονική διάρκεια αξιολόγησης των επενδύσεων ορίζεται ίση με 25 έτη δηλαδή ίση με την διάρκεια της σύμβασης που συνάπτεται στα πλαίσια του net-metering που προτείνεται για το κτίριο. Αρχικώς προσδιορίζεται το κόστος επένδυσης για κάθε μια προτεινόμενη αλλαγή και στην συνέχεια με κατάλληλη μεθοδολογία, η οποία θα παρουσιαστεί ακολούθως, υπολογίζονται τα έτη απόσβεσης των επενδύσεων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, θα εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με το κατά πόσο είναι τεχνοοικονομικά συμφέρουσες οι προτεινόμενες επενδύσεις για την ενεργειακή αναβάθμιση του κτιρίου γραφείων.

6.1 Βασικοί οικονομικοί δείκτες και κριτήρια αξιολόγησης επενδύσεων

Η οικονομική αξιολόγηση μιας επένδυσης βασίζεται σε ορισμένους οικονομικούς δείκτες και κριτήρια, τα οποία χρησιμοποιούνται ως ενδείξεις για το αν μια επένδυση είναι βιώσιμη ή σαν μέτρα σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών επενδύσεων. Τα πιο αντιπροσωπευτικά κριτήρια αποδοτικότητας στην ανάλυση επενδυτικών σχεδίων είναι το κριτήριο της Καθαρής Παρούσας Αξίας (Net Present Value – NPV) και το κριτήριο του Εσωτερικού Συντελεστή Απόδοσης (Internal Rate of Return – IRR), τα οποία ως μέθοδοι εμπίπτουν συνολικά στην Ανάλυση Προεξοφλημένων Ταμειακών Ροών (Discount Cash Flow Analysis) [57]. Τα δύο κριτήρια αυτά, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα μελέτη και θα αναλυθούν ακολούθως, θεμελιώνονται πάνω στην διαχρονική αξία του χρήματος, δηλαδή λαμβάνουν υπόψη τον διαφορετικό χρόνο πραγματοποίησης των χρηματικών εκροών-εισροών του εκάστοτε σχεδίου επένδυσης. Για αυτό ανταποκρίνονται ικανοποιητικά στην πραγματικότητα και χρησιμοποιούνται ευρέως για αξιολόγηση επενδύσεων.

Σε γενικές γραμμές, κάθε σχέδιο επένδυσης ολοκληρώνει τον κύκλο του χρήματος στις εξής τρεις βασικές διαφορετικές χρονικές περιόδους: 1)διάθεση μετρητών «τώρα» (επένδυση), 2)σχηματισμός παγίου κεφαλαίου (παραγωγική μονάδα), 3)απόκτηση μετρητών «αργότερα» (απόσβεση). Οι διαφορετικές χρονικές ροές μετρητών δεν είναι ομοιογενείς ή ισοδύναμες και για αυτό δεν είναι εφικτό να αθροιστούν και να συγκριθούν μεταξύ τους προτού μετατραπούν σε αξίες ενιαίας χρονικής βάσης σε ένα ορισμένο έτος. Η τεχνική με την οποία γίνεται η μετατροπή μελλοντικών αξιών (ποσών) σε παρούσες (σημερινές) αξίες, δηλαδή η προσαρμογή των μελλοντικών τιμών των ταμειακών ροών ενός έργου (εισροών και εκροών) στην παρούσα αξία τους, με βάση κάποιο κατάλληλο επιτόκιο, καλείται προεξόφληση (discounting) [57].

Το επιτόκιο που χρησιμοποιείται ονομάζεται επιτόκιο προεξόφλησης (ή αλλιώς επιτόκιο αναγωγής) και καθορίζεται από τον επενδυτικό φορέα. Κατά την επιλογή του επιτοκίου προεξόφλησης λαμβάνεται υπόψη το επιτόκιο που επικρατεί στην κεφαλαιαγορά (ως το ελάχιστο επιτρεπτό), εφόσον αυτή λειτουργεί σχετικά ομαλά και αντανακλά τις πραγματικές συνθήκες προσφοράς και ζήτησης κεφαλαίων. Ωστόσο, για την επιλογή του επιτοκίου προεξόφλησης υπάρχουν και υποκειμενικά κριτήρια αφού, επί της ουσίας, αυτό εκφράζει είτε το κόστος κεφαλαίου της επιχείρησης, είτε το ελάχιστο αποδεκτό επιτόκιο για τον λήπτη αποφάσεων προκειμένου να καλυφθεί ο κίνδυνος της εξεταζόμενης επένδυσης έναντι μιας πιο ασφαλούς τοποθέτησης του κεφαλαίου. Ο συντελεστής προεξόφλησης (ή αλλιώς συντελεστής αναγωγής) εξαρτάται από το επιτόκιο προεξόφλησης i και τον χρόνο προεξόφλησης t και δίνεται από τον τύπο [58]: $(1 + i)^{-t}$. Γενικά όλες οι μελλοντικές αξίες αν μετατραπούν σε παρούσες, δηλαδή αν μεταφερθούν στο παρόν, μειώνονται και, όπως είναι προφανές και από τον τύπο, όσο πιο απομακρυσμένες στο μέλλον είναι οι μελλοντικές αξίες, τόσο χαμηλότερη γίνεται η παρούσα αξία τους.

6.1.1 Κριτήριο Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV - Net Present Value)

Η Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value – NPV) είναι η αξία που προκύπτει αν προεξοφληθεί στο παρόν (παρούσα αξία), για κάθε έτος χωριστά, η διαφορά μεταξύ όλων των μελλοντικών χρηματικών (ταμειακών) εισροών και εκροών για ολόκληρο τον χρόνο ζωής του σχεδίου επένδυσης, με βάση έναν ορισμένο συντελεστή προεξόφλησης [57]. Η έννοια της Καθαρής Παρούσας Αξίας έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς αντιπροσωπεύει και εκφράζει όλες τις ροές του σχεδίου επένδυσης στην τωρινή αξία τους, δηλαδή σε αυτήν που ισχύει την στιγμή που ο εκάστοτε επενδυτής παίρνει την απόφαση.

Στην πράξη υπολογίζεται από την ακολουθία των μελλοντικών ροών (εισροές-εκροές) που προκύπτουν εφόσον καταρτιστεί ο λογαριασμός ταμειακών ροών. Η πιο ολοκληρωμένη μαθηματική έκφραση της καθαρής παρούσας αξίας η οποία περιλαμβάνει και το αρχικό κόστος της επένδυσης είναι η εξής [58]:

$$NPV = -CF_0 + \sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (6.1)$$

Όπου:

i είναι το επιλεγμένο επιτόκιο προεξόφλησης που αναλύθηκε στο **κεφάλαιο 6.1**.

CF_0 είναι η ταμειακή ροή (cash flow) της κεφαλαιουχικής επένδυσης στο χρονικό σημείο «0». Είναι συνυφασμένη με το αρχικό κόστος επένδυσης ή την αρχική καθαρή εκροή μετρητών και περιλαμβάνει το κόστος κτήσης και τα έξοδα εγκατάστασης του κεφαλαιουχικού εξοπλισμού.

CF_t είναι η ταμειακή ροή (cash flow) της επένδυσης για την χρονική περίοδο t , η οποία κατά τους υπολογισμούς θεωρείται ότι εμφανίζεται στο τέλος της κάθε χρονικής περιόδου t . Αρνητικές ταμειακές ροές συνεπάγονται εκροές (outflows) μετρητών της επένδυσης και θετικές τιμές συνεπάγονται εισροές (inflows) μετρητών.

Ο δείκτης t παίρνει τις τιμές $t = 0, 1, 2, \dots, N$ όπου το 0 συμβολίζει την χρονική στιγμή ολοκλήρωσης της κεφαλαιουχικής δαπάνης, δηλαδή την αρχή της διάρκειας ζωής της επένδυσης και το N συμβολίζει την χρονική στιγμή παύσης της επένδυσης ή το τέλος της ωφέλιμης διάρκειας ζωής της. Επί της ουσίας το N είναι ο οικονομικός κύκλος ζωής της επένδυσης, δηλαδή το διάστημα για το οποίο μελετάται και πρέπει να είναι ίσο ή και μικρότερο της πραγματικής διάρκειας ζωής του βασικού εξοπλισμού της επένδυσης.

Η αξιολόγηση της επένδυσης με το κριτήριο της Καθαρής Παρούσας Αξίας γίνεται ως εξής [58]:

- Αν $NPV > 0$, η επένδυση είναι βιώσιμη για δεδομένες συνθήκες (N, i) και ο εσωτερικός συντελεστής απόδοσης είναι μεγαλύτερος από το ευκαιριακό κόστος του κεφαλαίου.
- Αν $NPV = 0$, η επένδυση είναι βιώσιμη για δεδομένες συνθήκες (N, i) και ο εσωτερικός συντελεστής απόδοσης είναι ίσος με το ευκαιριακό κόστος κεφαλαίου.
- Αν $NPV < 0$, η επένδυση για δεδομένες συνθήκες (N, i) δεν είναι βιώσιμη ή είναι αντιοικονομική.

Για την επιλογή μεταξύ δύο αμοιβαία αποκλειόμενων επενδυτικών σχεδίων, αρκεί να βρεθεί η Καθαρή Παρούσα Αξία κάθε σχεδίου και προτιμότερη επένδυση είναι αυτή που έχει την μεγαλύτερη, έναντι των υπολοίπων, Καθαρή Παρούσα Αξία για την περίοδο του μελετάται [58].

Εν συνεχεία, με βάση το κριτήριο της Καθαρής Παρούσας Αξίας, εξάγονται αποτελέσματα και σχετικά με την περίοδο της αποπληρωμής της επένδυσης. Ο χρόνος απόσβεσης (ή αλλιώς περίοδος αποπληρωμής) μιας επένδυσης ορίζεται ως ο αριθμός των ετών που απαιτούνται ώστε η επιχείρηση να εισπράξει πίσω τα χρήματα που επένδυσε. Ο χρόνος απόσβεσης έχει θετική σχέση με τον επενδυτικό κίνδυνο μιας επένδυσης με αβέβαιες ταμειακές ροές, δηλαδή όσο πιο μεγάλος είναι ο χρόνος απόσβεσης μιας επένδυσης, τόσο πιο μεγάλος είναι ο επενδυτικός κίνδυνος [58]. Σε γενικές γραμμές, για να γίνει αποδεκτή μια επένδυση, ο χρόνος απόσβεσης θα πρέπει να είναι μικρότερος από το μέγιστο χρονικό όριο που έχει θέσει η διοίκηση της εκάστοτε επιχείρησης.

Συχνά γίνεται εύρεση της απλής περιόδου αποπληρωμής (Simple PayBack Period - SPBP), όπου χρόνος απόσβεσης αποτελεί το πηλίκο του αρχικού κόστους μιας κεφαλαιουχικής επένδυσης προς τα ετήσια έσοδα που προκύπτουν από την μείωση των λειτουργικών εξόδων λόγω της επένδυσης/αναβάθμισης αυτής. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση δεν λαμβάνεται υπόψη η χρονική αξία του χρήματος, για αυτό και τα αποτελέσματα δεν είναι ιδιαίτερα αξιόπιστα. Αντ' αυτού, λοιπόν, η πιο

αντιπροσωπευτική μέθοδος είναι η εύρεση της έντοκης περιόδου αποπληρωμής (Discounted PayBack Period - DPBP). Η έντοκη περίοδος αποπληρωμής ορίζεται ως η χρονική διάρκεια (αριθμός ετών) που απαιτείται για την ανάκτηση του αρχικού κεφαλαίου της επένδυσης, λαμβάνοντας υπόψη την μεταβολή της αξίας του χρήματος βάσει του επιτοκίου προεξόφλησης i . Υπολογίζεται με βάση την Καθαρή Παρούσα Αξία, αφού είναι η ελάχιστη τιμή των χρονικών περιόδων N_{min} για την οποία η Καθαρή Παρούσα Αξία αποκτά θετική τιμή. Δηλαδή είναι, βάσει της **σχέσης (6.1)** και με την θεώρηση ότι η υπολειμματική αξία της επένδυσης είναι μηδενική, η τιμή N_{min} για την οποία ισχύει [58]:

$$-CF_0 + \sum_{t=1}^{N_{min}=DPBP} \frac{CF_t}{(1+i)^t} \geq 0 \quad (6.2)$$

6.1.2 Κριτήριο Εσωτερικού Συντελεστή Απόδοσης (IRR- Internal Rate of Return)

Ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (Internal Rate of Return – IRR) είναι το υπολογιζόμενο επιτόκιο (εσωτερική αποδοτικότητα), για το οποίο η παρούσα αξία των ταμειακών εισροών (εσόδων) του σχεδίου επένδυσης είναι ίση με την παρούσα αξία των ταμειακών εκροών (εξόδων) [57]. Στην ουσία, ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης σε μία επένδυση ισούται με την τιμή που πρέπει να λάβει το προεξοφλητικό επιτόκιο ώστε η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης να λαμβάνει μηδενική τιμή, δηλαδή να ικανοποιείται η εξής συνθήκη [58]: $NPV(i = IRR) = 0$. Επομένως ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης προσδιορίζεται από την λύση ως προς i της εξίσωσης $-CF_0 + \sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+i)^t} = 0$.

Η αξιολόγηση της επένδυσης με το κριτήριο του Εσωτερικού Συντελεστή Απόδοσης γίνεται, σε σχέση με το ισχύον προεξοφλητικό επιτόκιο i , ως εξής [58]:

- Αν $IRR > i$, το σχέδιο επένδυσης είναι αποδεκτό.
- Αν $IRR = i$, το σχέδιο επένδυσης είναι μεν αποδεκτό αλλά αδιάφορο.
- Αν $IRR < i$, το σχέδιο επένδυσης απορρίπτεται.

Γενικά, λοιπόν, μια επένδυση γίνεται δεκτή, όταν ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης είναι υψηλότερος από το επιτόκιο που ισχύει στον συγκεκριμένο κλάδο του σχεδίου επένδυσης. Στην περίπτωση που υπάρχουν διάφορες εναλλακτικές επενδύσεις, τότε προτιμότερη είναι η επένδυση που παρουσιάζει τον υψηλότερο εσωτερικό συντελεστή απόδοσης, εφόσον βέβαια αυτός υπερβαίνει το κατώτατο αποδεκτό επιτόκιο (δηλαδή το επιτόκιο προεξόφλησης).

Ως ένα υπολογιζόμενο επιτόκιο, ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης αποδίδει την μέγιστη αναμενόμενη ετήσια καθαρή απόδοση της σχεδιαζόμενης επένδυσης και αντανακλά το υψηλότερο επιτόκιο που θα μπορούσε να πληρώσει ο επενδυτικός φορέας χωρίς να κινδυνεύει να χάσει τα χρήματα που διέθεσε στην επένδυση, ακόμα

κι αν υποτεθεί ότι είχε δανειστεί όλο το ποσό για την χρηματοδότηση της επένδυσης. Έτσι, λοιπόν, καταδεικνύει την πραγματική αποδοτικότητα της συνολικής επένδυσης και μπορεί να προσδιορίσει τους όρους δανεισμού του σχεδίου επένδυσης, δεδομένου ότι καθορίζει το μέγιστο επιτόκιο που θα μπορούσε να πληρωθεί από τον επενδυτή χωρίς να κινδυνεύει να χάσει τα κεφάλαια. Πρακτικά ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (IRR) δίνει την μέση ετήσια απόδοση των χρημάτων που επενδύθηκαν σε μια επένδυση κατά την διάρκεια του οικονομικού κύκλου ζωής της και εξαρτάται μόνο από τις ταμειακές ροές της επένδυσης (δεν επηρεάζεται από το κόστος κεφαλαίου) [58]. Για παράδειγμα, αν το IRR ενός επενδυτικού έργου με ωφέλιμη ζωή 5 έτη είναι 8%, σημαίνει ότι κάθε 100 ευρώ που επενδύθηκαν στο έργο, για τα επόμενα 5 χρόνια, θα αποδώσουν 8 ευρώ ετησίως.

6.2 Ανάλυση αρχικού κόστους επένδυσης για τις προτεινόμενες αλλαγές

Σημειώνεται πως στα κόστη που παρουσιάζονται ακολούθως δεν συμπεριλαμβάνεται ο φόρος προστιθέμενης αξίας Φ.Π.Α. καθώς το κτίριο το οποίο μελετάται αποτελεί επαγγελματικό και όχι οικιακό χώρο. Και αυτό που ισχύει σε επαγγελματικούς χώρους – επιχειρήσεις είναι πως το Φ.Π.Α. των συναλλαγών που σχετίζονται με τις πραγματοποιούμενες επενδύσεις συμψηφίζεται με το Φ.Π.Α. όλων των υπόλοιπων εμπορικών συναλλαγών της επιχείρησης (οι οποίες προφανώς δεν είναι δυνατόν να ληφθούν υπόψη στα πλαίσια την παρούσας μελέτης). Για αυτό, με στόχο την ρεαλιστική αποτύπωση των οικονομικών μεγεθών, η όλη οικονομική αξιολόγηση στο κομμάτι των προτεινόμενων επενδύσεων γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τις καθαρές αξίες, χωρίς Φ.Π.Α.

Το αρχικό κόστος επένδυσης περιλαμβάνει το κόστος οποιασδήποτε απαιτούμενης αγοράς εξοπλισμού/υλικών που προκύπτει στα πλαίσια μιας βελτιωτικής αλλαγής για το υπό μελέτη κτίριο γραφείων, καθώς και το κόστος εγκατάστασης του εκάστοτε επιλεχθέντος νέου συστήματος. Στο σημείο αυτό παρατίθενται οι συγκεκριμένες τιμές για το αρχικό κόστος επένδυσης για καθεμία από τις προτεινόμενες παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας οι οποίες προέκυψαν από έρευνα στο διαδίκτυο καθώς και από σχετικές προσφορές από συγκεκριμένες εταιρίες.

6.2.1 Αρχικό κόστος επένδυσης για τις παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας

Ως προς την τοποθέτηση κουφωμάτων με θερμοδιακοπή σε όλα τα παράθυρα του κτιρίου, το συνολικό κόστος, το οποίο περιλαμβάνει τόσο το κόστος αγοράς όσο το κόστος εγκατάστασης κουφωμάτων αλουμινίου ALUMIL με θερμοδιακοπή, ισούται με 230 €/m^2 [59]. Το υπό μελέτη κτίριο διαθέτει 30 παράθυρα και το συνολικό

εμβαδόν των παραθύρων είναι $105,84 \text{ m}^2$, επομένως το συνολικό αρχικό κόστος για την συγκεκριμένη επένδυση είναι $24343,2 \text{ €}$. Σημειώνεται ότι για την συγκεκριμένη παρέμβαση το κόστος συντήρησης θεωρείται αμελητέο και το προσδόκιμο ζωής των κουφωμάτων είναι επαρκές για το βάθος 25ετίας που αποτελεί την χρονική διάρκεια της οικονομικής αξιολόγησης.

Ως προς την αλλαγή στον φωτισμό με την τοποθέτηση λαμπτήρων LED, επιλέχθηκε το φωτιστικό πάνελ LED της εταιρείας PHILIPS διαστάσεων 60×60 , ισχύος 34 W , ονομαστικής τάσης 230 V και φωτεινής ροής 3200 lumens . Η εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού για το υπό μελέτη κτίριο είναι $5929,9 \text{ W}$ και η τιμή κάθε πάνελ είναι $24,4 \text{ €}$ [60], επομένως το συνολικό αρχικό κόστος για αυτή την επένδυση είναι $4276,2 \text{ €}$. Τα φωτιστικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται έχουν προσδόκιμο ζωής 50000 ώρες λειτουργίας, που αντιστοιχεί σε περίπου 12 ως 13 χρόνια. Εφόσον η επένδυση μελετάται οικονομικά σε βάθος 25ετίας, για περίοδο δηλαδή περίπου διπλάσια σε σχέση με την μέση διάρκεια ζωής των φωτιστικών πάνελ, απαραίτητη κρίνεται η επαναγορά τους στο τέλος του δωδέκατου χρόνου λειτουργίας του κτιρίου. Τότε, λοιπόν, η αξία τους θα προστεθεί εκ νέου, προσαρμοσμένη σύμφωνα με τον συντελεστή προεξόφλησης, ως λειτουργικό κόστος στις ταμειακές ροές που θα παρουσιαστούν αναλυτικά στο **υποκεφάλαιο 6.4**. Το τέλος της διάρκειας ζωής αυτής της δεύτερης παρτίδας φωτιστικών θεωρείται πως συμπίπτει με το τέλος της χρονικής διάρκειας της οικονομικής μελέτης.

Ως προς την τοποθέτηση θερμομόνωσης στην εξωτερική τοιχοποιία και στην στέγη, επιλέχθηκε ως θερμομονωτικό υλικό η εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS) και συγκεκριμένα το XPS ETICS της εταιρείας Styrgoran σε πλάκες πάχους 10 εκατοστών, το οποίο κοστίζει $13,57 \text{ €/m}^2$ [61]. Η συνολική τιμή εγκατάστασης της θερμομόνωσης περιλαμβάνει, εκτός του κόστους αγοράς του XPS, το κόστος αγοράς των υπόλοιπων απαιτούμενων υλικών που αναφέρονται στο **υποκεφάλαιο 4.3.5** (κόλλα, βύσματα στερέωσης, πλέγμα συγκράτησης και επιχρίσματα) καθώς και το κόστος εγκατάστασης, επομένως η συνολική τιμή για την θερμομόνωση τελικώς ανέρχεται στα $25,57 \text{ €/m}^2$. Το κτίριο διαθέτει εμβαδόν εξωτερικής τοιχοποιίας το οποίο δύναται να μονωθεί ίσο με $416,56 \text{ m}^2$, ενώ η επιφάνεια της κεκλιμένης στέγης η οποία μονώνεται είναι ίση με $366,65 \text{ m}^2$. Επομένως, η συνολική επιφάνεια που καλύπτεται στα πλαίσια της θερμομόνωσης είναι $783,21 \text{ m}^2$ και το συνολικό αρχικό κόστος για την συγκεκριμένη επένδυση είναι $20026,54 \text{ €}$. Δεν απαιτείται κάποιου είδους συντήρηση για την θερμομόνωση και η διάρκεια ζωής της είναι επαρκής μιας και υπερβαίνει την 25ετία για την οποία μελετάται η επένδυση.

Ως προς την τοποθέτηση του γεωθερμικού συστήματος για την θέρμανση και την ψύξη του κτιρίου το οποίο συνδέεται με τα υπάρχοντα τερματικά fan coils, όπως αναφέρθηκε και στο **υποκεφάλαιο 5.1**, επιλέχθηκε η γεωθερμική αντλία Buderus

Logatherm WPS 33R η οποία κοστίζει 11500 € [62]. Για το κάθετο σύστημα του γεωεναλλάκτη που εγκαθίσταται γίνεται χρήση σωλήνων πολυαιθυλενίου (HDPE) με οπή παρόμοια με αυτή της γεώτρησης και βάθος 45 ως 100 μέτρα. Το συνολικό κόστος του γεωεναλλάκτη, το οποίο περιλαμβάνει το κόστος σωλήνων, το κόστος γεώτρησης, το κόστος υλικού πλήρωσης και αντιψυκτικού καθώς και το κόστος εγκατάστασης του όλου συστήματος είναι ίσο με 34 €/m^2 (ανά τετραγωνικό μέτρο κλιματιζόμενης επιφάνειας). Η συνολική επιφάνεια που κλιματίζεται για το υπό μελέτη κτίριο είναι $625,04 \text{ m}^2$, έτσι το συνολικό κόστος για την πλήρη εγκατάσταση του γεωεναλλάκτη είναι 21251,4 €. Επομένως, το συνολικό αρχικό κόστος για την επένδυση στο γεωθερμικό σύστημα ανέρχεται στα 32751,4 €.

Τα γεωθερμικά συστήματα δεν παρουσιάζουν βλάβες λόγω παρατεταμένης χρήσης και έτσι οι δαπάνες συντήρησης είναι ελάχιστες συγκριτικά με ένα συμβατικό σύστημα θέρμανσης ή ψύξης και αφορούν μόνο τον καθαρισμό του γεωεναλλάκτη, την συντήρηση της γεωθερμικής αντλίας θερμότητας και την αλλαγή των φίλτρων αέρα, όπου και αν υπάρχουν. Για αυτό και θεωρείται ένα ετήσιο κόστος συντήρησης ίσο με 100 €, το οποίο προστίθεται ως λειτουργικό κόστος κάθε έτος στις ταμειακές ροές που θα παρουσιαστούν στο **υποκεφάλαιο 6.4** και αναπροσαρμόζεται ανά έτος σύμφωνα με τον συντελεστή προεξόφλησης. Η διάρκεια ζωής του γεωθερμικού συστήματος, εφόσον τα υλικά που χρησιμοποιούνται ακολουθούν τις ορισμένες προδιαγραφές, είναι κατά μέσο όρο 30 έτη, επομένως καλύπτεται σαφώς το διάστημα 25ετίας κατά το οποίο μελετάται οικονομικά η επένδυση.

Οι παραπάνω τέσσερις παρεμβάσεις, έχει νόημα να γίνουν όλες μαζί ως ενιαία επένδυση με στόχο την κατάληξη στο, κατά το δυνατόν, χαμηλότερο επίπεδο ενεργειακής κατανάλωσης για το υπό μελέτη κτίριο. Συνολικά, λοιπόν, για όλες τις παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας που προτείνονται, το αρχικό κόστος επένδυσης ανέρχεται στα 81396,9 €.

6.2.2 Αρχικό κόστος επένδυσης για το διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα στέγης

Ως προς το φωτοβολταϊκό σύστημα ισχύος $24,36 \text{ kWp}$ που τοποθετείται στην στέγη του υπό μελέτη κτιρίου, στο αρχικό κόστος επένδυσης συμπεριλαμβάνεται το κόστος αγοράς του εξοπλισμού και το κόστος εγκατάστασης, όπως και προηγουμένως. Για το φωτοβολταϊκό σύστημα ο απαιτούμενος εξοπλισμός περιλαμβάνει τα φωτοβολταϊκά πάνελ, τους αντιστροφείς τάσης, τις βάσεις στήριξης για την στέγη, τις καλωδιώσεις και τους πίνακες.

Όπως αναφέρθηκε στο **υποκεφάλαιο 5.2.4**, επιλέχθηκαν τα φωτοβολταϊκά πάνελ JAM54S30-420MR της εταιρείας JASolar, καθένα εκ των οποίων έχει ονομαστική ισχύ 420 Wp . Η τιμή αγοράς των συγκεκριμένων πάνελ είναι $0,345 \text{ €/Wp}$ [63], επομένως το συνολικό κόστος για τα 58 πάνελ συνολικής ισχύος $24,36 \text{ kWp}$ είναι 8404,2 €. Επίσης επιλέχθηκαν δύο όμοιοι τριφασικοί αντιστροφείς τάσης VI-12.5-TL-OUTD της

εταιρείας FIMER, καθένας εκ των οποίων έχει ονομαστική ισχύ $12,5 \text{ kW}$. Η τιμή αγορά του συγκεκριμένου μοντέλου αντιστροφέα είναι 1429 € [63], συνεπώς το συνολικό κόστος των αντιστροφένων ανέρχεται στα 2858 € . Όσον αφορά τις βάσεις στήριξης, οι οποίες είναι απαραίτητες για την υλοποίηση του σταθμού, η τιμή τους είναι $0,21 \text{ €/Wp}$, οπότε για την συγκεκριμένη εγκατάσταση το συνολικό κόστος των βάσεων προκύπτει ίσο με $5115,6 \text{ €}$. Στην συνέχεια, οι πίνακες και οι καλωδιώσεις που απαιτούνται για τον φωτοβολταϊκό σταθμό κοστίζουν $0,176 \text{ €/Wp}$ και επομένως το συνολικό τους κόστος ανέρχεται στα $4287,4 \text{ €}$, τιμή στην οποία περιλαμβάνονται και στηρίγματα καλωδίων και βύσματα. Τέλος, στο αρχικό κόστος της όλης επένδυσης περιλαμβάνεται και το κόστος εγκατάστασης του σταθμού, το οποίο εκτιμάται στα $0,15 \text{ €/Wp}$, δηλαδή συνολικά στα 3654 € . Συνολικά, λοιπόν, αθροίζοντας όλα τα παραπάνω κόστη, το αρχικό κόστος επένδυσης για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος ισχύος $24,36 \text{ kWp}$ στην στέγη του υπό μελέτη κτιρίου προκύπτει ίσο με $24319,2 \text{ €}$, δηλαδή το κόστος τελικώς ανέρχεται στα $998,3 \text{ €/kWp}$ (ανά εγκατεστημένο kWp φωτοβολταϊκών).

Παρά τις εγγυήσεις των κατασκευαστών οι οποίες καλύπτουν τυπικές φθορές σε συνθήκες καιρικές συνθήκες, αναγκαία κρίνεται και η συντήρηση του φωτοβολταϊκού συστήματος μέσα από τυπικούς ελέγχους στην διάρκεια ζωής και λειτουργίας του. Στην πράξη για πάνελ στην στέγη του κτιρίου, απαιτείται ετησίως ειδικός καθαρισμός (πλύσιμο) των πάνελ με απιονισμένο νερό, ενώ επίσης διενεργείται έλεγχος με θερμοκάμερα και διάφορες μετρήσεις. Ειδικότερα γίνεται μέτρηση των γειώσεων, του ρεύματος και της τάσης για κάθε string καθώς και μέτρηση της μόνωσης τόσο των πάνελ όσο και των καλωδίων AC και DC. Επιπρόσθετα, ελέγχονται οι ηλεκτρολογικοί πίνακες και, ως προς τις βάσεις, οι συσφίξεις και η στατικότητα τους [64]. Κατ'αυτόν τον τρόπο, λοιπόν, επιβεβαιώνεται η καλή λειτουργία των πλαισίων και η αποδοτική παραγωγή τους. Το κόστος συντήρησης του συγκεκριμένου φωτοβολταϊκού σταθμού εκτιμάται στα 800 € ανά έτος και προστίθεται ως λειτουργικό κόστος στις ταμειακές ροές κάθε έτος αναπροσαρμοζόμενο και σύμφωνα με τον συντελεστή προεξόφλησης. Το τέλος της διάρκειας ζωής του φωτοβολταϊκού σταθμού θεωρείται πως συμπίπτει με το τέλος της χρονικής διάρκειας της σύμβασης για το net-metering, βάσει της οποίας καθορίστηκε και ο ορίζοντας της οικονομικής μελέτης των επενδύσεων στα 25 έτη.

Όπως έχει προταθεί στο **κεφάλαιο 5**, με στόχο να προκύψει θετικό ενεργειακό ισοζύγιο για το κτίριο γραφείων, η τοποθέτηση του φωτοβολταϊκού συστήματος στην στέγη συμβαίνει κατόπιν των τεσσάρων αλλαγών εξοικονόμησης ενέργειας. Για αυτό κρίνεται σκόπιμο να υπολογιστεί το αρχικό κόστος επένδυσης για το σύνολο των τεσσάρων παρεμβάσεων εξοικονόμησης καθώς και για το φωτοβολταϊκό σύστημα μαζί, για όλες δηλαδή τις ενέργειες που χρειάζεται να γίνουν ώστε το κτίριο να αποκτήσει θετικό ενεργειακό ισοζύγιο. Το συνολικό αρχικό κόστος επένδυσης, λοιπόν, για την αναβάθμιση του υπό μελέτη κτιρίου γραφείων σε κτίριο θετικού ενεργειακού ισοζυγίου είναι ίσο με $105716,1 \text{ €}$.

6.3 Ετήσιο λειτουργικό κόστος κτιρίου γραφείων για κάθε ενεργειακή κατάσταση

Ως ετήσιο λειτουργικό κόστος θεωρείται το τρέχον κόστος και το κόστος αντικατάστασης. Το τρέχον κόστος αφορά κατά βάση το ενεργειακό κόστος για το κτίριο, δηλαδή το κόστος αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο καθορίζεται από τις εκάστοτε ανάγκες του κτιρίου για κατανάλωση. Δευτερευόντως στο τρέχον κόστος περιλαμβάνονται και τα κόστη συντήρησης που προκύπτουν για τα επιμέρους συστήματα του κτιρίου. Το κόστος αντικατάστασης, με την σειρά του, σχετίζεται τα συστήματα που χρήζουν αντικατάστασης στην διάρκεια μελέτης της οικονομικής επένδυσης. Στην πλαίσια της παρούσας μελέτης, αυτό αφορά την επέμβαση στον φωτισμό του κτιρίου, καθώς μόνο σε αυτή την περίπτωση η διάρκεια ζωής του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται είναι μικρότερη από την χρονική περίοδο μελέτης της επένδυσης.

Στο σημείο αυτό παρατίθενται τα ενεργειακά λειτουργικά κόστη για το κτίριο ανάλογα με την ενεργειακή κατάσταση στην οποία αυτό βρίσκεται. Συγκεκριμένα, στα πλαίσια της παρούσας μελέτης προκύπτουν τρεις διακριτές ενεργειακές καταστάσεις για το κτίριο. Αρχικά, υπάρχει η υφιστάμενη ενεργειακή κατάσταση η οποία αναλύθηκε στο **κεφάλαιο 3** και τότε το κτίριο ετησίως καταναλώνει ενέργεια ίση με $70113,23 \text{ kWh}$. Έπειτα, προκύπτει η ενεργειακή κατάσταση μετά την υλοποίηση του συνόλου των παρεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας που προτάθηκαν (θερμοδιακοπή στα κουφώματα, φωτισμός LED, θερμομόνωση, γεωθερμικό σύστημα) οπότε και η ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια για το κτίριο γίνεται ίση με 37227 kWh , όπως παρουσιάστηκε στο **κεφάλαιο 4**. Τέλος, το κτίριο καταλήγει στην ενεργειακή κατάσταση μετά τις τέσσερις ενεργειακές παρεμβάσεις και μετά την εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος στην στέγη, τα χαρακτηριστικά του οποίου αναλύθηκαν στο **κεφάλαιο 5** και έτσι καταλήγει να έχει μηδενική, χρεωστέα από το εθνικό δίκτυο ηλεκτρισμού, ενεργειακή κατανάλωση σε ετήσια βάση με το σύστημα του net-metering.

Ειδικότερα, στα πλαίσια του net-metering, για έναν αυτοπαραγωγό ενέργειας, ως χρεωστέα ενέργεια (στο ανταγωνιστικό σκέλος του τιμολογίου του παρόχου) υπολογίζεται η διαφορά των ποσοτήτων που καταγράφονται από τον μετρητή της ΔΕΗ, δηλαδή η διαφορά της απορροφώμενης από το δίκτυο ενέργειας (κάθε στιγμή που το ΦΒ σύστημα δεν μπορεί να καλύψει πλήρως την ζήτηση του κτιρίου) και της εγχεόμενης στο δίκτυο ενέργειας (κάθε στιγμή που το ΦΒ σύστημα παράγει περίσσεια ενέργεια σε σχέση με την ζήτηση του κτιρίου). Χρεωστέα ενέργεια υφίσταται μόνο στην περίπτωση που η διαφορά αυτή είναι θετική. Στην περίπτωση που η διαφορά αυτή είναι αρνητική, η διαφορά πιστώνεται στον επόμενο εκκαθαριστικό λογαριασμό ως πρόσθετη εγχεόμενη ενέργεια, όμως κατά τον ετήσιο συμψηφισμό η ενέργεια αυτή δεν αποζημιώνεται [49]. Στην περίπτωση λοιπόν του φωτοβολταϊκού συστήματος $24,36 \text{ kWp}$ που προτείνεται να εγκατασταθεί στην στέγη του κτιρίου, η διαστασιολόγηση έχει γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε σε ετήσια βάση (και καθόλη την διάρκεια ζωής και λειτουργίας του) ο φωτοβολταϊκός σταθμός

να παράγει πάντα ενέργεια που να υπερκαλύπτει την ζήτηση από το κτίριο, όπως φαίνεται και στον **Πίνακα 5.3**, δηλαδή σε ετήσια βάση η χρεωστέα ενέργεια στον λογαριασμό της ΔΕΗ να είναι μηδενική. Σαφώς, βέβαια, συνεχίζουν παρά την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών να υπάρχουν λειτουργικά έξοδα για την ΔΕΗ τα οποία σχετίζονται με τις ρυθμιζόμενες χρεώσεις και θα αναλυθούν παρακάτω.

Για καθεμία λοιπόν από τις προαναφερθείσες ενεργειακές καταστάσεις υπολογίζεται σε ετήσια βάση το ποσό που θα έπρεπε να πληρωθεί στην ΔΕΗ για τις καταναλώσεις του κτιρίου. Αρχικά αναφέρεται ότι το κτίριο είναι ενταγμένο στο Επαγγελματικό τιμολόγιο Γ22 [65] το οποίο χορηγείται σε μονάδες με εγκατεστημένη ισχύ μεγαλύτερη από 25kVA και έως 250kVA και απευθύνεται σε επαγγελματίες για κτίρια χαμηλής τάσης με αυξημένες ανάγκες κατανάλωσης.

Γενικώς, στα νέα τιμολόγια ενέργειας, η χρέωση προμήθειας μεταβάλλεται κάθε μήνα καθώς προκύπτει ως τελική τιμή χρέωσης από την αρχική χρέωση προμήθειας κάθε εταιρείας ενέργειας μείον την κρατική επιδότηση που δίδεται από το Ταμείο Ενεργειακής Μετάβασης. Για τους υπολογισμούς της μελέτης και για την εύρεση του ετήσιου λειτουργικού κόστους ΔΕΗ για κάθε ενεργειακή κατάσταση του κτιρίου, οι τιμές αναφοράς για το ηλεκτρικό ρεύμα ελήφθησαν βάσει των τιμών χρεώσεων Αυγούστου 2022 (δηλαδή βάσει των πλέον πρόσφατων τιμών που έχουν ανακοινωθεί) από την επίσημη ιστοσελίδα της ΔΕΗ για το επαγγελματικό τιμολόγιο Γ22. Ομοίως, αντλήθηκε η τιμή και για το φυσικό αέριο το οποίο χρησιμοποιείται για θέρμανση στην υφιστάμενη ενεργειακή κατάσταση του κτιρίου. Η τιμή του φυσικού αερίου αφορά τιμολόγιο ΔΕΗ με χρήση θέρμανσης και, εν αντιθέσει με την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος, συμπεριλαμβάνει χρέωση προμήθειας, μεταφοράς και διανομής (ρυθμιζόμενες χρεώσεις) καθώς και όλους τους επιβαλλόμενους από την Πολιτεία φόρους και τέλη. Η τελική αυτή τιμή ανά μονάδα καταναλισκόμενης ενέργειας για το φυσικό αέριο είναι $0,125 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ και συνοδεύεται και από ένα πάγιο 5€ ανά μήνα που για κάθε έτος είναι κόστος 60€ [65].

Αντιθέτως, για το ηλεκτρικό ρεύμα στον λογαριασμό υπάρχουν ξεχωριστά διάφορες επιμέρους χρεώσεις, οι οποίες παρουσιάζονται ακολούθως. Εν συνόλω ο λογαριασμός ρεύματος περιλαμβάνει τις χρεώσεις προμήθειας, τις ρυθμιζόμενες χρεώσεις, καθώς και τις χρεώσεις υπέρ τρίτων. Στις χρεώσεις προμήθειας περιλαμβάνονται η χρέωση ενέργειας, που σχετίζεται με το κόστος των kWh ενέργειας που καταναλώθηκαν, και η χρέωση ισχύος, που σχετίζεται με το κόστος της ισχύος που απαιτήθηκε από το ηλεκτρικό δίκτυο και συγκεκριμένα αφορά το μέγιστο της ζητούμενης από το δίκτυο ισχύος για την περίοδο που αφορά ο λογαριασμός. Η μοναδιαία χρέωση ενέργειας είναι $0,233 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ [65] και η τελική χρέωση ενέργειας υπολογίζεται ως το γινόμενο της μοναδιαίας με το σύνολο των καταναλισκόμενων kWh για το έτος που μελετάται. Η μοναδιαία χρέωση ισχύος είναι $2,2 \frac{\text{€}}{\text{kW}\cdot\text{μήνα}}$ [65] και η τελική χρέωση ισχύος υπολογίζεται ως το γινόμενο της μοναδιαίας με την τιμή της συμφωνημένης ισχύος κατανάλωσης, η οποία για το υπό μελέτη κτίριο αναφέρθηκε και στο **υποκεφάλαιο 5.2.4**. Και έπειτα ανάγεται από μηνιαίο σε ετήσιο

κόστος. Επιπλέον, στις χρεώσεις προμήθειας προστίθεται και μία πάγια χρέωση 1,55€ ανά μήνα [65].

Οι Ρυθμιζόμενες χρεώσεις εγκρίνονται από την Πολιτεία και εφαρμόζονται σε όλους τους πελάτες που κάνουν χρήση του εθνικού ηλεκτρικού συστήματος ανεξαρτήτως του προμηθευτή που έχουν επιλέξει και περιλαμβάνουν τις εξής χρεώσεις:

- Χρέωση ΑΔΜΗΕ (δίκτυο μεταφοράς)
- Χρέωση ΔΕΔΔΗΕ (δίκτυο διανομής)
- Υπηρεσίες Κοινής Ωφέλειας (ΥΚΩ)
- Ειδικό Τέλος Μείωσης Εκπομπών Αερίων Ρύπων (ΕΤΜΕΑΡ)
- Λοιπές Χρεώσεις

Η χρέωση ΑΔΜΗΕ αλλά και η χρέωση ΔΕΔΔΗΕ έχουν δύο μέρη: το κομμάτι της πάγιας χρέωσης, ανάλογα με το ύψος της συμφωνημένης ισχύος κατανάλωσης [kVA], και το κομμάτι της μεταβλητής χρέωσης, ανάλογα με το ύψος της κατανάλωσης [kWh]. Υπολογίζονται βάσει ειδικών τύπων που αναφέρονται στην ιστοσελίδα της ΔΕΗ [66]. Καθεμία από τις υπόλοιπες ρυθμιζόμενες χρεώσεις υπολογίζεται ως γινόμενο της ετησίως καταναλισκόμενης ενέργειας [kWh] με την εκάστοτε μοναδιαία χρέωση $\left[\frac{\text{€}}{kWh}\right]$ που έχει τεθεί για την συγκεκριμένη κατηγορία [66]. Όλες οι τιμές των μοναδιαίων ρυθμιζόμενων χρεώσεων λαμβάνονται, όπως και οι μοναδιαίες χρεώσεις ενέργειας και ισχύος που προαναφέρθηκαν, από λογαριασμό Αυγούστου 2022 για επαγγελματικό τιμολόγιο Γ22. Επίσης με στόχο την κατά το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια, στους υπολογισμούς προσμετρώνται και οι «Διάφορες χρεώσεις» που πάντα περιλαμβάνονται στους λογαριασμούς ΔΕΗ και αφορούν τον Ειδικό Φόρο Κατανάλωσης (ΕΦΚ) και το Ειδικό Τέλος 5%. Ο ΕΦΚ προκύπτει ομοίως ως το γινόμενο της μοναδιαίας του χρέωσης $\left[\frac{\text{€}}{kWh}\right]$ με την ετήσια κατανάλωση [kWh] ενώ το Ειδικό Τέλος 5% είναι το 5%, δηλαδή το 0,5%, της αξίας του αθροίσματος όλων των υπολοίπων χρεώσεων εκτός από το ΕΤΜΕΑΡ.

Έτσι, λοιπόν, υπολογίζονται οι επιμέρους ετήσιες χρεώσεις και τελικώς η συνολική ετήσια χρέωση για την ΔΕΗ για κάθε ενεργειακή κατάσταση του κτιρίου. Η συνολική αυτή ετήσια χρέωση αποτελεί το κυριότερο κομμάτι των λειτουργικών εξόδων του κτιρίου, μιας και το μόνο επιπλέον λειτουργικό έξοδο για την ενεργειακή μελέτη είναι τα επιμέρους έξοδα συντήρησης των συστημάτων που αναφέρθηκαν στο **υποκεφάλαιο 6.2**. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών ως προς τις επιμέρους ετήσιες χρεώσεις ενέργειας παρατίθενται στον **Πίνακα 6.1**, ενώ το συνολικό ετήσιο λειτουργικό κόστος για το κτίριο ανάλογα με την ενεργειακή κατάσταση παρουσιάζεται στον **Πίνακα 6.2**. Στο σημείο αυτό αξίζει να τονιστεί πως, εφόσον οι χρεώσεις υπολογίζονται σε ετήσια βάση, με στόχο να προκύψει μια ρεαλιστική εικόνα του ετήσιου κόστους που πρέπει να αποδίδεται στην ΔΕΗ, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να συνυπολογιστούν όλες οι προαναφερθείσες χρεώσεις και όχι μόνο οι χρεώσεις προμήθειας, οι οποίες είναι οι κυριότερες μεταξύ αυτών. Όπως φαίνεται και στον πίνακα των αποτελεσμάτων, πολλές και από τις υπόλοιπες επιμέρους χρεώσεις αποτελούν σημαντικό ποσοστό του συνολικού ποσού που προκύπτει.

Πίνακας 6.1: Επιμέρους ετήσιες χρεώσεις λογαριασμού ρεύματος και φυσικού αερίου για κάθε ενεργειακή κατάσταση του υπό μελέτη κτιρίου

Κατηγορία λογαριασμού	Μοναδιαία χρέωση ανά κατηγορία	Τελική ετήσια χρέωση $\left[\frac{\text{€}}{\text{έτος}}\right]$		
		Αρχικά υφιστάμενη ενεργειακή κατάσταση	Μετά τις παρεμβάσεις εξοικονόμησης	Μετά τις παρεμβάσεις εξοικονόμησης και τα φωτοβολταϊκά
Ηλεκτρικό Ρεύμα				
Χρέωση ενέργειας	$0,233 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$	15618,14	8673,89	0,0
Χρέωση Ισχύος	$2,2 \frac{\text{€}}{\text{kW}\cdot\text{μήνα}}$	924,0	924,0	924,0
Πάγια χρέωση	$1,55 \frac{\text{€}}{\text{μήνα}}$	18,60	18,60	18,60
Χρέωση ΑΔΜΗΕ	$0,51 \frac{\text{€}}{\text{kVA}\cdot\text{έτος}}$	366,41	211,43	17,85
	$0,0052 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$			
Χρέωση ΔΕΔΔΗΕ	$3,98 \frac{\text{€}}{\text{kVA}\cdot\text{έτος}}$	1298,93	783,33	139,30
	$0,0173 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$			
Χρέωση ΥΚΩ	$0,01824 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$	1222,64	679,02	0,0
ΕΤΜΕΑΡ	$0,017 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$	1139,52	632,86	0,0
Λοιπές χρεώσεις	$0,00007 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$	4,69	2,61	0,0
Ειδικός φόρος κατανάλωσης	$0,005 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$	335,15	186,14	0,0
Ειδικό τέλος 5‰	5‰	98,94	57,40	5,50
Φυσικό Αέριο				
Χρέωση φυσικού αερίου	$0,125 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$	385,33	0,0	0,0
Πάγια χρέωση	$5 \frac{\text{€}}{\text{μήνα}}$	60	0,0	0,0

Πίνακας 6.2: Ετήσιο λειτουργικό κόστος για κάθε ενεργειακή κατάσταση του υπό μελέτη κτιρίου

	Αρχικά υφιστάμενη ενεργειακή κατάσταση	Μετά τις παρεμβάσεις εξοικονόμησης	Μετά τις παρεμβάσεις εξοικονόμησης και τα φωτοβολταϊκά
Συμφωνημένης ισχύς κατανάλωσης [kVA]	35	35	35
Ετήσια χρεωστέα κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος [kWh/έτος]	67030,63	37227	0
Ετήσια χρεωστέα κατανάλωση φυσικού αερίου [kWh/έτος]	3082,60	0	0
Συνολική ετήσια χρέωση ηλεκτρικού ρεύματος [€/έτος]	21027,02	12169,26	1105,25
Συνολική ετήσια χρέωση φυσικού αερίου [€/έτος]	445,33	0	0
Συνολικό ετήσιο λειτουργικό κόστος κτιρίου [€/έτος]	21472,35	12269,26	2005,25

Όπως φαίνεται και από τις τιμές του **Πίνακα 6.2** λόγω του συνόλου των τεσσάρων στοχευμένων παρεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας, το ετήσιο λειτουργικό κόστος για το υπό μελέτη κτίριο μειώνεται κατά 42,86% σε σχέση με την αρχικά υφιστάμενη κατάσταση. Αφότου μάλιστα τοποθετηθεί και το φωτοβολταϊκό σύστημα στην στέγη συνδυαστικά με τις προηγούμενες παρεμβάσεις, δηλαδή όταν το κτίριο φτάσει στο θετικό ενεργειακό ισοζύγιο, το ετήσιο λειτουργικό κόστος μειώνεται κατακόρυφα και συγκεκριμένα κατά 90,66% σε σχέση με την αρχική υφιστάμενη κατάσταση και 83,66% κατά σε σχέση με την ενεργειακή κατάσταση που προέκυψε μετά τις τέσσερις παρεμβάσεις εξοικονόμησης.

6.4 Τελική οικονομική αξιολόγηση (NPV, IRR, χρόνος απόσβεσης)

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η τελική οικονομική αξιολόγηση των προτεινόμενων επενδύσεων όπως αυτή προέκυψε σύμφωνα με τα κριτήρια και την μεθοδολογία που αναλύθηκαν θεωρητικά στο **υποκεφάλαιο 6.1**. Εφαρμόζεται η **σχέση (6.1)** στα πλαίσια της αξιολόγησης βάσει του κριτηρίου της Καθαρής Παρούσας Αξίας και υπολογίζεται ο χρόνος απόσβεσης για κάθε επένδυση βάσει της **σχέσης (6.2)**. Τέλος προσδιορίζεται και ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης για τις επενδύσεις, ο οποίος καταδεικνύει κατά πόσο είναι επενδυτικά συμφέρουσες.

Για τους υπολογισμούς αυτούς, επιλέγεται προεξοφλητικό επιτόκιο i ίσο με 4% καθώς μια τέτοια τιμή διατυπώνει αμιγώς εμπορική, βραχυπρόθεσμη προσέγγιση για την εκτίμηση επενδύσεων, όπως ακριβώς συμβαίνει στην παρούσα ανάλυση. Όπως ήδη αναφέρθηκε, ο χρονικός ορίζοντας οικονομικής μελέτης των επενδύσεων ορίζεται στα 25 έτη καθώς τόσο διαρκεί η σύμβαση για το net-metering. Ως προς τις ταμειακές ροές (cash flows) που εισέρχονται στις σχέσεις υπολογισμού, η CF_0 (δηλαδή η ταμειακή ροή της κεφαλαιουχικής επένδυσης στο χρονικό σημείο «0») είναι ίση με το αρχικό κόστος επένδυσης για καθεμία περίπτωση, ενώ η CF_t (δηλαδή η ταμειακή ροή της επένδυσης στο τέλος της εκάστοτε χρονικής περιόδου t) λαμβάνεται ως η διαφορά του ετήσιου συνολικού λειτουργικού κόστους του κτιρίου μεταξύ των δύο ενεργειακών καταστάσεων του κτιρίου που εξετάζονται κάθε φορά. Για τις προτεινόμενες επενδύσεις, οι τιμές της CF_t είναι πάντα θετικές καθώς το λειτουργικό κόστος μειώνεται λόγω των αλλαγών.

6.4.1 Τελική οικονομική αξιολόγηση για την επένδυση στις προτεινόμενες παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας

Στο σημείο αυτό, προσδιορίζονται τα μεγέθη NPV, IRR και ο χρόνος απόσβεσης για το σχέδιο επένδυσης που αφορά την υλοποίηση του συνόλου των τεσσάρων προτεινόμενων παρεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας (θερμοδιακοπή στα κουφώματα, φωτισμός LED, θερμομόνωση, γεωθερμικό σύστημα). Η διαφορά του ετήσιου λειτουργικού κόστους προφανώς υπολογίζεται μεταξύ της ενεργειακής κατάστασης που θα επιφέρει για το κτίριο η υλοποίηση της εν λόγω επένδυσης και της αρχικά υφιστάμενης ενεργειακής κατάστασης. Ακολουθεί ο **Πίνακας 6.3** με όλες τις ταμειακές ροές και τις καθαρές παρούσες αξίες που υπολογίστηκαν για την επένδυση αυτή.

Πίνακας 6.3: Καθαρή παρούσα αξία ανά έτος σε βάθος 25ετίας για την επένδυση στο σύνολο των τεσσάρων προτεινόμενων επεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας

Έτος t	Αρχικό κόστος επένδυσης CF_0 [€]	Διαφορά λειτουργικού κόστους CF_t [€]	$(1 + i)^t$	$\sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1 + i)^t}$	Καθαρή παρούσα αξία NPV [€]
0	81396,93				
1		9203,08	1,040	8849,12	-72547,81
2		9203,08	1,082	8508,77	-64039,05
3		9203,08	1,125	8181,51	-55857,54
4		9203,08	1,170	7866,84	-47990,70
5		9203,08	1,217	7564,26	-40426,44
6		9203,08	1,265	7273,33	-33153,11
7		9203,08	1,316	6993,59	-26159,52
8		9203,08	1,369	6724,60	-19434,91
9		9203,08	1,423	6465,97	-12968,95
10		9203,08	1,480	6217,27	-6751,67
11		9203,08	1,539	5978,15	-773,53
12		9203,08	1,601	5748,22	4974,69
13		4926,87	1,665	2958,95	7933,65
14		9203,08	1,732	5314,55	13248,20
15		9203,08	1,801	5110,15	18358,34
16		9203,08	1,873	4913,60	23271,95
17		9203,08	1,948	4724,62	27996,56
18		9203,08	2,026	4542,90	32539,47
19		9203,08	2,107	4368,17	36907,64
20		9203,08	2,191	4200,17	41107,81
21		9203,08	2,279	4038,62	45146,43
22		9203,08	2,370	3883,29	49029,72
23		9203,08	2,465	3733,93	52763,66
24		9203,08	2,563	3590,32	56353,98
25		9203,08	2,666	3452,23	59806,21

Όπως φαίνεται και στον πίνακα, θεωρώντας ως χρόνο έναρξης λειτουργίας το 1^ο έτος, προκύπτει πως η Καθαρή Παρούσα Αξία της επένδυσης αρχίζει να αποκτά θετικές τιμές μετά το πέρας του 11^{ου} έτους λειτουργίας. Στο χρονικό σημείο αυτό επιτυγχάνεται και η απόσβεση της επένδυσης. Με ακρίβεια, βάσει της **σχέσης (6.2)**, υπολογίζεται πως ο χρόνος απόσβεσης, δηλαδή η περίοδος αποπληρωμής της επένδυσης στο σύνολο των τεσσάρων παρεμβάσεων εξοικονόμησης είναι 11 χρόνια και 2 μήνες. Επίσης στο τελευταίο έτος λειτουργίας, δηλαδή στο 25^ο, η επένδυση

αυτή παρουσιάζει καθαρή παρούσα αξία ίση με 59806,21 €. Τέλος, υπολογίστηκε και ο Συντελεστής Εσωτερικής Απόδοσης, ο οποίος για την συγκεκριμένη επένδυση είναι $IRR = 10,144\%$. Εφόσον προκύπτει μεγαλύτερος από το επιτόκιο προεξόφλησης ($i = 4\%$), καταδεικνύεται σαφώς ότι η προτεινόμενη επένδυση είναι οικονομικά αποδεκτή.

6.4.2 Τελική οικονομική αξιολόγηση για την συνολική επένδυση στις προτεινόμενες παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας και την εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος στέγης

Στο σημείο αυτό, προσδιορίζονται τα μεγέθη NPV, IRR και ο χρόνος απόσβεσης για το επενδυτικό πακέτο που συνολικά προτείνεται ούτως ώστε να μετατραπεί το υπό μελέτη κτίριο γραφείων σε κτίριο θετικού ενεργειακού ισοζυγίου. Το επενδυτικό πακέτο αυτό, λοιπόν, αφορά την υλοποίηση του συνόλου των τεσσάρων προτεινόμενων παρεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας (θερμοδιακοπή στα κουφώματα, φωτισμός LED, θερμομόνωση, γεωθερμικό σύστημα) μαζί με την εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος $24,36 kWp$ στην στέγη του κτιρίου. Η διαφορά του ετήσιου λειτουργικού κόστους προφανώς υπολογίζεται μεταξύ της ενεργειακής κατάστασης που θα επιφέρει για το κτίριο η υλοποίηση του εν λόγω επενδυτικού πακέτου και της αρχικά υφιστάμενης ενεργειακής κατάστασης. Ακολουθεί ο **Πίνακας 6.4** με όλες τις ταμειακές ροές και τις καθαρές παρούσες αξίες που υπολογίστηκαν για την επένδυση αυτή.

Πίνακας 6.4: Καθαρή παρούσα αξία ανά έτος σε βάθος 25ετίας για την συνολική επένδυση στις προτεινόμενες επεμβάσεις εξοικονόμησης και στο φωτοβολταϊκό σύστημα

Έτος t	Αρχικό κόστος επένδυσης CF_0 [€]	Διαφορά λειτουργικού κόστους CF_t [€]	$(1+i)^t$	$\sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+i)^t}$	Καθαρή παρούσα αξία NPV [€]
0	105716,09				
1		19467,10	1,040	18718,37	-86997,73
2		19467,10	1,082	17998,43	-68999,30
3		19467,10	1,125	17306,18	-51693,12
4		19467,10	1,170	16640,56	-35052,56
5		19467,10	1,217	16000,54	-19052,02
6		19467,10	1,265	15385,13	-3666,89
7		19467,10	1,316	14793,40	11126,50
8		19467,10	1,369	14224,42	25350,92
9		19467,10	1,423	13677,33	39028,25
10		19467,10	1,480	13151,28	52179,52
11		19467,10	1,539	12645,46	64824,98
12		19467,10	1,601	12159,09	76984,07
13		15190,89	1,665	9123,25	86107,33
14		19467,10	1,732	11241,77	97349,09
15		19467,10	1,801	10809,39	108158,48
16		19467,10	1,873	10393,64	118552,13
17		19467,10	1,948	9993,89	128546,01
18		19467,10	2,026	9609,51	138155,52
19		19467,10	2,107	9239,91	147395,43
20		19467,10	2,191	8884,53	156279,96
21		19467,10	2,279	8542,82	164822,78
22		19467,10	2,370	8214,25	173037,03
23		19467,10	2,465	7898,31	180935,34
24		19467,10	2,563	7594,53	188529,88
25		19467,10	2,666	7302,44	195832,31

Όπως φαίνεται και στον πίνακα, θεωρώντας ως χρόνο έναρξης λειτουργίας το 1^ο έτος, προκύπτει πως η Καθαρή Παρούσα Αξία της επένδυσης αρχίζει να αποκτά θετικές τιμές μετά το πέρας του 6^{ου} έτους λειτουργίας. Στο χρονικό σημείο αυτό επιτυγχάνεται και η απόσβεση της επένδυσης. Με ακρίβεια, βάσει της **σχέσης (6.2)**, υπολογίζεται πως ο χρόνος απόσβεσης, δηλαδή η περίοδος αποπληρωμής της επένδυσης στο σύνολο των παρεμβάσεων εξοικονόμησης και του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι 6 χρόνια και 3 μήνες. Επίσης στο τελευταίο έτος λειτουργίας, δηλαδή στο 25^ο, η επένδυση αυτή παρουσιάζει καθαρή παρούσα αξία ίση με 195832,31 €. Τέλος, υπολογίστηκε και ο Συντελεστής Εσωτερικής Απόδοσης, ο

οποίος για την συγκεκριμένη επένδυση είναι $IRR = 18,038\%$. Εφόσον προκύπτει μεγαλύτερος από το επιτόκιο προεξόφλησης ($i = 4\%$), καταδεικνύεται σαφώς ότι η προτεινόμενη επένδυση είναι οικονομικά αποδεκτή και επιπρόσθετα εφόσον είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο IRR για την επένδυση μόνο στις παρεμβάσεις εξοικονόμησης, συμπεραίνεται ότι η επένδυση συνδυαστικά στις παρεμβάσεις εξοικονόμησης και στο φωτοβολταϊκό σύστημα είναι η πλέον συμφέρουσα οικονομικά λύση.

6.4.3 Τελική οικονομική αξιολόγηση μεμονωμένα για την επένδυση στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος στέγης

Στο σημείο αυτό, εξετάζεται και η περίπτωση κατά την οποία το φωτοβολταϊκό σύστημα εγκαθίσταται στην στέγη του κτιρίου σε δεύτερο χρόνο, έχοντας ήδη υλοποιημένες τις αλλαγές εξοικονόμησης ενέργειας που επιφέρουν το συγκεκριμένο ύψος ενεργειακής κατανάλωσης ($32227 kWh$) για το οποίο διαστασιολογήθηκε το φωτοβολταϊκό σύστημα αυτό. Επομένως, προσδιορίζονται τα μεγέθη NPV, IRR και ο χρόνος απόσβεσης για το επενδυτικό σχέδιο που αφορά αποκλειστικά την εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος $24,36 kWp$ στην στέγη του κτιρίου. Η διαφορά του ετήσιου λειτουργικού κόστους προφανώς υπολογίζεται μεταξύ της ενεργειακής κατάστασης που θα επιφέρει για το κτίριο η υλοποίηση της εν λόγω επένδυσης και της ενεργειακής κατάστασης μετά το σύνολο των αλλαγών εξοικονόμησης. Ακολουθεί ο **Πίνακας 6.5** με όλες τις ταμειακές ροές και τις καθαρές παρούσες αξίες που υπολογίστηκαν για την επένδυση αυτή.

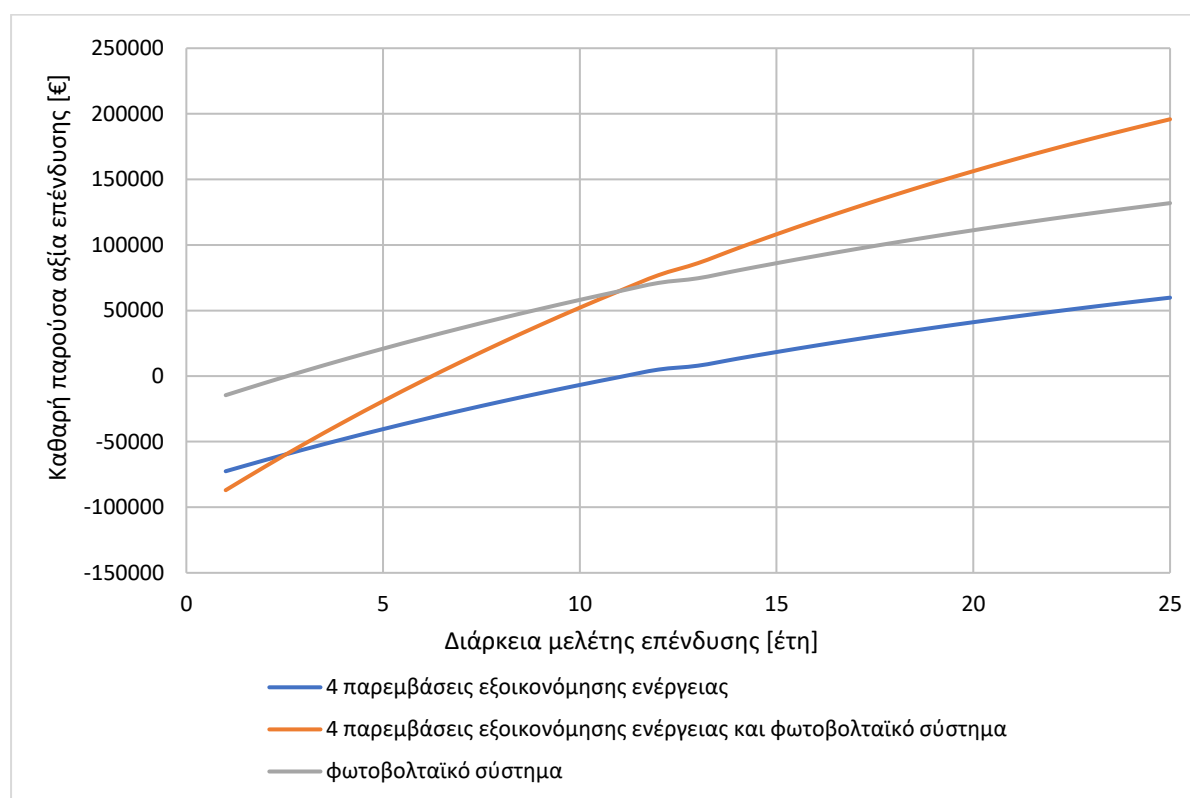
Πίνακας 6.5: Καθαρή παρούσα αξία ανά έτος σε βάθος 25ετίας για την επένδυση στο φωτοβολταϊκό σύστημα

Έτος t	Αρχικό κόστος επένδυσης CF_0 [€]	Διαφορά λειτουργικού κόστους CF_t [€]	$(1+i)^t$	$\sum_{t=1}^N \frac{CF_t}{(1+i)^t}$	Καθαρή παρούσα αξία NPV [€]
0	24319,16				
1		10164,02	1,040	9773,09	-14546,07
2		10164,02	1,082	9397,20	-5148,87
3		10164,02	1,125	9035,77	3886,91
4		10164,02	1,170	8688,24	12575,15
5		10164,02	1,217	8354,08	20929,23
6		10164,02	1,265	8032,77	28962,00
7		10164,02	1,316	7723,82	36685,81
8		10164,02	1,369	7426,75	44112,56
9		10164,02	1,423	7141,10	51253,66
10		10164,02	1,480	6866,44	58120,11
11		10164,02	1,539	6602,35	64722,46
12		10164,02	1,601	6348,41	71070,87
13		5887,81	1,665	3536,06	74606,94
14		10164,02	1,732	5869,47	80476,40
15		10164,02	1,801	5643,72	86120,12
16		10164,02	1,873	5426,65	91546,77
17		10164,02	1,948	5217,93	96764,70
18		10164,02	2,026	5017,24	101781,95
19		10164,02	2,107	4824,27	106606,22
20		10164,02	2,191	4638,72	111244,94
21		10164,02	2,279	4460,31	115705,25
22		10164,02	2,370	4288,76	119994,01
23		10164,02	2,465	4123,81	124117,82
24		10164,02	2,563	3965,20	128083,02
25		10164,02	2,666	3812,69	131895,72

Όπως φαίνεται και στον πίνακα, θεωρώντας ως χρόνο έναρξης λειτουργίας το 1^ο έτος, προκύπτει πως η Καθαρή Παρούσα Αξία της επένδυσης αρχίζει να αποκτά θετικές τιμές μετά το πέρας του 2^{ου} έτους λειτουργίας. Στο χρονικό σημείο αυτό επιτυγχάνεται και η απόσβεση της επένδυσης. Με ακρίβεια, βάσει της **σχέσης (6.2)**, υπολογίζεται πως ο χρόνος απόσβεσης, δηλαδή η περίοδος αποπληρωμής της επένδυσης στο φωτοβολταϊκό σύστημα είναι 2 χρόνια και 7 μήνες. Επίσης στο τελευταίο έτος λειτουργίας, δηλαδή στο 25^ο, η επένδυση αυτή παρουσιάζει καθαρή παρούσα αξία ίση με 131895,72 €. Τέλος, υπολογίστηκε και ο Συντελεστής Εσωτερικής Απόδοσης, ο οποίος για την συγκεκριμένη επένδυση είναι $IRR = 41,706\%$. Εφόσον προκύπτει μεγαλύτερος από το επιτόκιο προεξόφλησης ($i = 4\%$),

καταδεικνύεται σαφώς ότι η προτεινόμενη επένδυση είναι οικονομικά αποδεκτή και βιώσιμη. Ωστόσο δεν τίθεται ζήτημα σύγκρισης του συγκεκριμένου *IRR* με τα υπολογισμένα *IRR* των προηγούμενων δύο υποκεφαλαίων καθώς στην προκειμένη περίπτωση η αφετηρία για την επένδυση είναι η ενεργειακή κατάσταση του κτιρίου με υλοποιημένες τις αλλαγές εξοικονόμησης ενέργειας, ενώ στα δύο προηγούμενα υποκεφάλαια υπήρξε ως αφετηρία η αρχικά υφιστάμενη κατάσταση του υπό μελέτη κτιρίου.

Συνολικά, στο παρακάτω **Διάγραμμα 6.1** παρατίθεται η Καθαρή Παρούσα Αξία της επένδυση για κάθε προαναφερθείσα περίπτωση, όπου διακρίνονται, ανάλογα και με το χρονικό σημείο μηδενισμού της *NPV*, τα έτη που απαιτούνται για την απόσβεση σε κάθε περίπτωση.



Διάγραμμα 6.1: Καθαρή Παρούσα Αξία των επενδύσεων για τον χρονικό ορίζοντα 25ετίας της οικονομικής μελέτης

Συνοψίζοντας, παρατηρείται ότι όλες οι επενδύσεις που προτείνονται με στόχο την αναβάθμιση σε θετικό ενεργειακό ισοζύγιο είναι οικονομικά αποδεκτές και βιώσιμες και σαφώς προκύπτουν λογικές περίοδοι αποπληρωμής σε σχέση με το διάστημα της 25ετίας για την οποία μελετάται το κτίριο γραφείων. Προτείνεται η υλοποίηση τόσο των τεσσάρων ενεργειακών αλλαγών όσο και του φωτοβολταϊκού συστήματος την ίδια χρονική στιγμή και όχι με χρονική διαφορά ετών μεταξύ τους, διότι για την ενιαία επένδυση η απόσβεση επέρχεται πολύ συντομότερα και συγκεκριμένα στα 6 χρόνια και 3 μήνες.

Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε, με την βοήθεια του προγράμματος DesignBuilder, η μετατροπή ενός κτιρίου γραφείων στην περιοχή της Αθήνας σε κτίριο θετικού ενεργειακού ισοζυγίου (Positive Energy Building -PEB). Πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση και αξιολογήθηκε τόσο από ενεργειακής όσο και από οικονομικής άποψης κάθε προτεινόμενη αλλαγή για το κτίριο.

Αρχικώς σχεδιάστηκε το γεωμετρικό μοντέλο του κτιρίου που έχει συνολικό εμβαδόν 700 τετραγωνικών μέτρων, μοντελοποιήθηκε η υφιστάμενη ενεργειακή κατάσταση και εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για την αξιολόγησή της και την λήψη βελτιωτικών μέτρων. Διαπιστώθηκε ότι στην υφιστάμενη κατάσταση το κτίριο, το οποίο ενεργειακά καλύπτεται από ηλεκτρικό ρεύμα και φυσικό αέριο για την θέρμανση, έχει συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας ίση με 70113,23 kWh. Με στόχο, λοιπόν, την ενεργειακή εξοικονόμηση, επιλέχθηκαν και προτάθηκαν οι εξής παρεμβάσεις: η τοποθέτηση κουφωμάτων με θερμοδιακοπή, η αλλαγή των λαμπτήρων και η χρήση λαμπτήρων LED, η θερμομόνωση της εξωτερικής τοιχοποιίας και της στέγης του κτιρίου με θερμομονωτικό υλικό την εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS) και τέλος η αλλαγή του υφιστάμενου συστήματος θέρμανσης και ψύξης και η τοποθέτηση γεωθερμικού συστήματος με αντλία θερμότητας. Επιλέχθηκε ο κατάλληλος εξοπλισμός, μοντελοποιήθηκε λεπτομερειακά κάθε αλλαγή στα πλαίσια του λογισμικού και εκτελέστηκαν με το εργαλείο EnergyPlus προσομοιώσεις με στόχο την διερεύνηση της επίδρασης των αλλαγών στην ενεργειακή κατανάλωση και στην συνολική εικόνα του κτιρίου. Συνολικά οι τέσσερις προτεινόμενες αλλαγές εξοικονόμησης ενέργειας επέφεραν μείωση 46,9% στην ετήσια κατανάλωση του κτιρίου, ενώ παράλληλα επήλθε αποδέσμευση του κτιρίου από το ορυκτό καύσιμο φυσικό αέριο, καθώς το σύνολο των αναγκών του στην δοθείσα πρόταση καλύπτεται από ηλεκτρικό ρεύμα.

Μετά την υλοποίηση των παραπάνω παρεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας, μελετήθηκε η εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος στην στέγη του κτιρίου και ειδικότερα έγινε ολοκληρωμένη πρόταση εγκατάστασης φωτοβολταϊκού σταθμού 24,36kWp ο οποίος, στα πλαίσια του net-metering, εξασφαλίζει αυτοπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και πλήρη κάλυψη της κατανάλωσης του κτιρίου σε ορίζοντα 25ετίας. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το κτίριο μετετρέπη σε κτίριο θετικού ενεργειακού ισοζυγίου και εξασφαλίστηκε η ενεργειακή του αυτάρκεια. Τέλος, στο στάδιο της οικονομικής αξιολόγησης του κτιρίου, υπολογίστηκαν με ακρίβεια τα αναμενόμενα αρχικά κόστη επένδυσης και λειτουργικά ετήσια κόστη για κάθε περίπτωση και απεδείχθη ότι οι προτεινόμενες επενδύσεις είναι οικονομικά αποδεκτές και βιώσιμες. Ειδικότερα, η συνδυαστική εφαρμογή των τεσσάρων προτεινόμενων παρεμβάσεων εξοικονόμησης και η εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού σταθμού ως ενιαίο επενδυτικό πακέτο έχει αρχικό κόστος 105716,1€ και περίοδο αποπληρωμής ίση με 6 έτη και 3 μήνες.

Συνολικά στον τομέα της κτιριακής αναβάθμισης και της μετατροπής κτιρίων σε κτίρια σχεδόν μηδενικού (nZEB), μηδενικού (ZEB) και θετικού (PEB) ενεργειακού ισοζυγίου υπάρχει σήμερα ευρύ πεδίο προόδου και περαιτέρω μελέτης. Στο πλαίσιο αυτό, παρακάτω ακολουθούν ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα πάνω στο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής.

Αρχικά, σε πιο μακροσκοπικό επίπεδο, προτείνεται η επέκταση της μελέτης προς την κατεύθυνση κτιριακής αναβάθμισης και επίτευξης μηδενικού ή θετικού ενεργειακού ισοζυγίου και σε επίπεδο γειτονιάς ή ευρύτερης συνοικίας. Με άλλα λόγια προτείνεται η δημιουργία μιας ευρύτερης ενεργειακής κοινότητας από κτίρια τα οποία θα μπορούν να παράγουν ενέργεια από κατάλληλη χρήση ΑΠΕ και ταυτόχρονα να είναι ενεργειακά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Έτσι, προκύπτει η αυτοπαραγωγή ενέργειας παράλληλα με την δυνατότητα βέλτιστης διαχείρισής της, καθώς η ενέργεια αυτή θα μπορεί να διαμοιράζεται στην κοινότητα ανάλογα με τις ανάγκες κάθε κτιριακής εγκατάστασης. Σε μια τέτοια περίπτωση, βάσει της παρούσας μελέτης, η πλεονάζουσα ενέργεια που προκύπτει από την παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος στέγης 24,36kWp θα μπορούσε να τροφοδοτεί κάποιο άλλο γειτονικό κτίριο με ανάλογο αντίτιμο. Η υλοποίηση ενός τέτοιου εγχειρήματος επιτάσσει την συνολική ενεργειακή μελέτη της συνοικίας και την κατάλληλη διασύνδεση μεταξύ των επιμέρους κτιρίων μέσα από ένα ρυθμισμένο νομικό και τεχνολογικό πλαίσιο.

Οι μέθοδοι εξοικονόμησης και γενικώς τα εργαλεία που απαιτείται να χρησιμοποιηθούν προφανώς ποικίλουν ανάλογα με το τοπικό δυναμικό της εκάστοτε εξεταζόμενης περιοχής, για αυτό και η μετατροπή συνοικιών σε περιοχές θετικού ενεργειακού προσήμου αποτελεί ένα σημαντικό και πολλά υποσχόμενο πεδίο ενδιαφέροντος και έρευνας. Αυτή η μετατροπή, με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή, πρωτίστως προωθεί την αξιοποίηση σε μεγαλύτερη κλίμακα του υψηλού ηλιακού, αιολικού και γεωθερμικού δυναμικού της χώρας. Ταυτόχρονα, όμως, αποτελεί και έναν εναλλακτικό μηχανισμό κάλυψης των ενεργειακών αναγκών, με ισχυρή συμμετοχή των τοπικών κοινωνιών που δίνει την δυνατότητα στον πολίτη να περάσει από ρόλο καταναλωτή σε ρόλο βασικού συνδιαμορφωτή της ενεργειακής μετάβασης. Έτσι, λοιπόν, με την υιοθέτηση μιας σειράς μέτρων βιώσιμης ενεργειακής πολιτικής και εξοικονόμησης για κάθε κτίσμα που μετέχει στην κοινότητα και με την επίλυση τεχνολογικών ζητημάτων με στόχο να καθίσταται εφικτή η απρόσκοπτη και ασφαλής ενεργειακή τροφοδοσία της, ένα τέτοιο σχήμα μπορεί να αποτελέσει μια συμφέρουσα ενεργειακή επιλογή μελλοντικά.

Σε επίπεδο ενός μεμονωμένου κτιρίου στον τομέα της ενεργειακής βελτίωσης, στο μέλλον θα μπορούσε η μελέτη να επεκταθεί προς την κατεύθυνση δημιουργίας ενός πλήρως αυτόνομου κτιρίου θετικού ενεργειακού ισοζυγίου που να συνδυάζεται με τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, αλλά παράλληλα να αποτελεί και μια τεχνοοικονομικά αποδεκτή και βιώσιμη λύση. Ειδικότερα, αυτή η ανάγκη προκύπτει διότι στα διασυνδεδεμένα κτίρια, όπως αυτό της παρούσας εργασίας, το ισοζύγιο ενέργειας μελετάται σε ετήσια βάση και σαφώς παρατηρείται ζήτηση ενέργειας και από το δίκτυο σε ώρες και ημέρες αιχμής, όταν το εγκατεστημένο σύστημα αυτοπαραγωγής βρίσκεται στο όριο του φορτίου που δύναται να καλύψει. Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια και να καλύπτει όλα τα φορτία, γεγονός που σημαίνει ότι η ύπαρξη των διασυνδεδεμένων κτιρίων μηδενικού ή θετικού ενεργειακού ισοζυγίου δεν μειώνει απαραίτητα την εγκατεστημένη ισχύ του δικτύου. Επομένως για να εφαρμοστεί το διασυνδεδεμένο σύστημα σε ευρεία κλίμακα πρέπει πρώτα να επιλυθούν διάφορα ζητήματα επάρκειας ισχύος από το εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Εκεί ακριβώς έγκειται η αναγκαιότητα τεχνολογικής προόδου προς την δημιουργία ενεργειακά αυτόνομων κτιρίων που να αποτελούν μια βιώσιμη οικονομικά επένδυση και να εξασφαλίζουν πλήρη ενεργειακή ασφάλεια στους χρήστες. Προς αυτή την κατεύθυνση, αρχικά προτείνεται η διερεύνηση της χρήσης συσσωρευτών σε τέτοια συστήματα, η οποία στην πράξη στα κτίρια εμφανίζει ορισμένα θέματα που χρήζουν επίλυσης. Όμως, πέραν αυτού, ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον, παρουσιάζει η χρήση του υδρογόνου (H_2) ως «καθαρό» μέσο αποθήκευσης της ενέργειας στα κτίρια, με την ταυτόχρονη τήρηση συγκεκριμένων προδιαγραφών ασφαλείας. Σε ένα τέτοιο αυτόνομο ενεργειακά κτίριο, στην περίπτωση κατά την οποία η παραγωγή ενέργειας από τις ΑΠΕ είναι μεγαλύτερη από τις ανάγκες, η πλεονάζουσα ενέργεια θα χρησιμοποιείται για την παραγωγή αερίου υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης, το οποίο θα αποθηκεύεται συμπιεσμένο σε ειδικές φιάλες. Όταν η παραγόμενη ενέργεια από τις ΑΠΕ δεν επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες, το αποθηκευμένο αυτό υδρογόνο θα αξιοποιείται σαν εφεδρικό καύσιμο μέσω μιας κυψέλης καυσίμου, χωρίς την οποιαδήποτε εκπομπή ρύπων.

Σε ένα τέτοιο εγχείρημα, το υδρογόνο διαδραματίζει σημαντικό διττό ρόλο. Αφενός, αποτελεί μια εφεδρική πηγή ενέργειας, προκειμένου να εξομαλύνονται οι εγγενείς αβεβαιότητες της παραγωγής ενέργειας μέσω ΑΠΕ που οφείλονται στις μεταβολές των μετεωρολογικών συνθηκών. Και αφετέρου, προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατικούς τρόπους αποθήκευσης της ενέργειας που βασίζονται σε συσσωρευτές, με τα σημαντικότερα να είναι ο μικρότερος απαιτούμενος χώρος, καθώς και η μηδενική επιβάρυνση προς το περιβάλλον. Φυσικά, για την ευρεία εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος, απαιτείται ακόμα η επίτευξη σημαντικής προόδου για τον σχεδιασμό και την ανάπτυξή του. Για αυτό και γενικότερα αποτρεπτικό παράγοντα για τον πολλαπλασιασμό των αυτόνομων κτιρίων μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης, αποτελεί η αδυναμία αποσύνδεσης από το συμβατικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Εν κατακλείδι, ο στόχος της παρούσας μελέτης ήταν ακριβώς να καταδείξει πως η ενεργειακή αναβάθμιση υφιστάμενων κτιρίων με στοχευμένες παρεμβάσεις εξοικονόμησης και χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας αποτελεί εφικτή και συμφέρουσα επιλογή με επακόλουθα περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη. Αξίζει, δε, να σημειωθεί πως η ευρύτερη εφαρμογή και η ωρίμανση ορισμένων τεχνολογιών στο μέλλον θα επιφέρει μείωση του αρχικού κόστους, καθιστώντας την ενεργειακή αναβάθμιση με χρήση ΑΠΕ ακόμα πιο συμφέρουσα λύση, ιδίως στα πλαίσια της ολοένα αυξητικής τάσης που παρουσιάζουν σήμερα οι τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος και των ορυκτών καυσίμων, η οποία επιδρά σημαντικά στα λειτουργικά κτιριακά κόστη. Συνολικά, στα πλαίσια της εθνικής στρατηγικής εξοικονόμησης ενέργειας και στροφής προς τις ΑΠΕ, η αξιοποίηση νέων τεχνολογιών προς αναμόρφωση ενεργοβόρων κτιρίων βελτιώνει σημαντικά την ενεργειακή κατάσταση της χώρας, για αυτό και η παρούσα εργασία υποστηρίζει την προώθηση της γνώσης σχετικά με την αιεφορία στα κτίρια του μέλλοντος.

Αναφορές

- [1] Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ypen.gov.gr/energeia/energeiaki-exoikonomisi/ktiria/>
- [2] «Εθνικό Σχέδιο αύξησης του αριθμού των κτιρίων με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας,» Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Αθήνα, 2017
- [3] ICON Innovative Construction, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://iconstruct.gr/pliροφοries-gia-energeiaka-ktiria/>
- [4] «DesignBuilder v7 Documentation,» DesignBuilder Software Ltd
- [5] «Τεχνική Οδηγία Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017,» Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα, 2017
- [6] «Τεχνική Οδηγία Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2017,» Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα, 2017
- [7] Γεωργιάδου Ζ., Δομικά και διακοσμητικά υλικά, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2021
- [8] Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος, [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.hcia.gr/el/cement-concrete/concrete/>
- [9] Αραβαντινός Δ., Οδηγός Θερμομόνωσης και Στεγανοποίησης, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΚΤΙΡΙΟ, 2011
- [10] DominalGroup building systems, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://dominal.gr/productsets/siromena-cold/>
- [11] ΚΤΙΡΙΟ Εκδόσεις, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ktirio.gr/el/εφαρμογες/κουφωματα/συστηματα-κουφωματων-αλουμινιου-με-θερμοδιακοπή/>
- [12] Κτίσμα + αλουμίνιο, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.aludata.gr/θερμοδιακοπτομενα-κουφωματα/>
- [13] Κακαράς Ε. και Καρέλλας Σ., Αποκεντρωμένα Θερμικά Συστήματα, Αθήνα: Εκδόσεις Τσότρας, 2015
- [14] ANDRIANOS systems, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.andrianos.gr/gr/proionta/thermansil/levites-ugraeriu-fusiku-aeriu/>
- [15] «Towards BIM-integrated, resource-efficient building services», CIBSE Technical Symposium, London, 2015
- [16] AIRCOLine Energy, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.aircoline.gr/fcu.el.aspx/>
- [17] ANDRIANOS systems, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.andrianos.gr/gr/proionta/klimatismos/antlies-thermohtas-fan-coils/>
- [18] The Engineering Mindset, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://theengineeringmindset.com/air-cooled-chillers-work/>

- [19] HVAC Investigators (HVACi), [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.hvacinvestigators.com/webinars/the-basics-of-chillers-how-they-work-where-theyre-used-and-common-problems/>
- [20] Volton energy, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://volton.gr/ta-5-eidi-lamptiron/>
- [21] ANDRIANOS systems, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.andrianos.gr/gr/nea/arthra/apodotikes-texnologies-kai-meiwsh-katanalwshs/>
- [22] easyKENAK Υποστήριξη, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://docs.easykenak.gr/doku.php?id=manual:step3:thermogefyres/>
- [23] Lighting Equipment Sales, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://lightingequipmentsales.com/luminous-efficacy-lm-w.html/>
- [24] CitiTech Construction, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://cititech.gr/xrhsimes-symboloules/όλα-όσα-πρέπει-να-γνωρίζετε-για-τις-ηλε/>
- [25] «Οδηγός Θερμομόνωσης Κτιρίων,» Υπηρεσία Ενέργειας Υπουργείου Εμπορίας, Βιομηχανίας και Τουρισμού, Αθήνα, 2010
- [26] «Τεχνική Οδηγία Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-6/2022,» Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα, 2022
- [27] ΒΙΟΠΕΡ, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.vioper.gr/knauf-thermoprosopsis/>
- [28] Κεραμουργία Βορείου Ελλάδος (ΚΕΒΕ), [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.kebe-sa.gr/products/touvla/katheton-opon/>
- [29] ΜΟΝΩΔΟΜΙΚΗ Τεχνική Εταιρεία Μονώσεων, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.monodomiki.gr/Arthra-kai-symvoyles/Gia-Monotika-Ylika/Katigories-monotikon-ylikon/>
- [30] Βέντζης Α.Ε. Δομικά Υλικά, [Ηλεκτρονικό]. Available: www.ventzissa.gr/products/MONΩΤΙΚΑ_ΥΛΙΚΑ-7/35-ΕΞΗΛΑΣΜΕΝΗ_ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗ/
- [31] Βέντζης Α.Ε. Δομικά Υλικά, [Ηλεκτρονικό]. Available: www.ventzissa.gr/products/MONΩΤΙΚΑ_ΥΛΙΚΑ-7/36-ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗ_ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗ/
- [32] Βέντζης Α.Ε. Δομικά Υλικά, [Ηλεκτρονικό]. Available: www.ventzissa.gr/products/MONΩΤΙΚΑ_ΥΛΙΚΑ-7/37-ΠΕΤΡΟΒΑΜΒΑΚΑΣ/
- [33] Βραχόπουλος Μ., Κούκος Μ. και Καρύτσας Κ., Κανονική Γεωθερμία: Αρχές Σχεδιασμού Γεωθερμικών Συστημάτων και Εφαρμογές, Αθήνα: Εκδόσεις Συνδέσμου Ελλήνων Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, 2015
- [34] «Idronics: Air-to-Water Heat Pump Systems,» Caleffi North America INC, Milwaukee, 2020
- [35] Φραγκογιάννης Γ., «Εφαρμογή Γεωθερμικών Συστημάτων σε Δημόσια Κτίρια,» 2017
- [36] ErgoClima Τεχνική Εταιρεία Κλιματισμού, [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://ergoclima.gr/services/heat-pumps/heat-pumps/>

- [37] Technotec Ενεργειακές Λύσεις, [Ηλεκτρονικό]. Available: www.technotec.gr/ειδη_αντλιών_θερμότητας.el.aspx/
- [38] ResearchGate, Geothermal heat pump schematic, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Geothermal-heat-pump-schematic-in-heating-mode_fig2_316919670/
- [39] «Geo Vision: Harnessing the heat beneath our feet,» U.S. Department of Energy, Springfield, 2019
- [40] «Product Datasheet: Logatherm WPS R33» Buderus
- [41] Goswami Y., Ηλιακή Ενέργεια για μηχανικούς, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2021
- [42] Βαρνάς Εταιρεία Τεχνικών Έργων, [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.varnas-ete.gr/photovoltaic-systems.php>
- [43] «Φωτοβολταϊκά: ένας πρακτικός τεχνικός οδηγός,» Σύνδεσμος Εταιρειών Φωτοβολταϊκών, Αθήνα, 2013
- [44] Solar Magazine, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://solarmagazine.com/solar-panels/>
- [45] Treehugger – Sustainability for All, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.treehugger.com/types-of-solar-panels-pros-and-cons-5181546/>
- [46] AZO CleanTech, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=603/>
- [47] Καραϊσάς Π., «Φωτοβολταϊκά Συστήματα και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας,» Ινστιτούτο Μικρών Επιχειρήσεων και Γενική Συνομοσπονδία Επαγγελματιών Βιοτεχνών Εμπόρων Ελλάδας, Αθήνα, 2017
- [48] «Net-metering: Αυτοπαραγωγή με ενεργειακό συμψηφισμό και εικονικό ενεργειακό συμψηφισμό για ιδιώτες, επιχειρήσεις και ενεργειακές κοινότητες με ή χωρίς αποθήκευση,» Σύνδεσμος Εταιρειών Φωτοβολταϊκών, Αθήνα, 2022
- [49] SolarBay Τεχνική Εταιρεία, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://solarbay.gr/net-metering/>
- [50] MP-Energy Τεχνική Εταιρεία, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.mp-energy.gr/αυτοπαραγωγή-ενεργειασ/αυτοπαραγωγή-με-φωτοβολταϊκα.html/>
- [51] «Ένας πρακτικός οδηγός για επενδύσεις στα φωτοβολταϊκά,» Σύνδεσμος Εταιρειών Φωτοβολταϊκών, Αθήνα, 2022
- [52] SolarBay Τεχνική Εταιρεία, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://solarbay.gr/αυτόνομα-φωτοβολταϊκά/>
- [53] MP-Energy Τεχνική Εταιρεία, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.mp-energy.gr/αυτονομα-συστηματα/αρχη-λειτουργιασ.html/>
- [54] «Product Datasheet: JAM54S30 395-420MR» JaSolar

- [55] «Technical Application Paper: Photovoltaic Plants,» ABB Ltd, Zurich, 2019
- [56] «Product Datasheet: PVI-10.0/12.5-TL-OUTD» Fimer
- [57] Αραβώσης Κ., Καρμπέρης Αθ. και Σωτήρχος Αν., Τεχνοοικονομική Αξιολόγηση Επενδύσεων, Αθήνα: Εκδόσεις Οικονομική Βιβλιοθήκη, 2011
- [58] Θεοδοσίου Π., Χρηματοοικονομική Ανάλυση και Εφαρμογές, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Σοφία, 2019

Ιστοσελίδες για τιμές /προσφορές για την οικονομική μελέτη:

- [59] <https://www.anakainispition.gr/koufomata/koufomata-times>
- [60] https://www.kafkas.gr/fotistika/epangelmatikos-fotismos/fotistika-panels-60x60/philips-fotistiko-panel-led-60x60-34w-230v-4000k-3200lm-lefko_288500/
- [61] <https://baumarket.gr/product/styropan-xps-etics-θερμοπρόσοψης/>
- [62] <https://www.qatenergy.com/proionta/antlies-thermotitas/geothermikes/logatherm-wps/>
- [63] <https://www.bigsolar.gr/el/bigsolar-fotovoltaika/>
- [64] PVtech Τεχνική Εταιρεία, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.pvtech.gr/solar/maintenance/>
- [65] ΔΕΗ, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.dei.gr/el/gia-tin-epixeirisi/revma/epaggelmaties-epixeiriseis/g22/>
- [66] ΔΕΗ, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.dei.gr/el/gia-tin-epixeirisi/ypostiriksi-epikoinonia/logariasmoi-xreoseis-revma/>