



Ανάπτυξη μεθοδολογίας για τη διερεύνηση της συνδυασμένης λειτουργίας Φ/Β οροφής και ενεργειακών συστημάτων του κτηρίου

**Τομέας: Βιομηχανικής Διοίκησης και Επιχειρησιακής Έρευνας**

**Επίβλεψη:**

**Αθανάσιος Τόλης, καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**Βασίλειος Καψάλης, Ε.Δ.Ι.Π, Ε.Μ.Π.**

**Αθήνα, 2023**



## Ευχαριστίες

Με αυτή την διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται ο κύκλος φοίτησής μου στο Ε. Μ. Πολυτεχνείο. Αρκετοί καθηγητές συνέβαλαν στην απόκτηση των απαιτούμενων γνώσεων και της επιθυμητής νοοτροπίας, κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, συμβάλλοντας προκαταβολικά στην παρούσα εργασία.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους δύο επιβλέποντες καθηγητές μου, κ. Αθανάσιο Τόλη και κ. Βασίλειο Καψάλη, για τη διαρκή καθοδήγηση, την υποστήριξη και τις χρήσιμες συμβουλές και προτάσεις που μου παρείχαν τους τελευταίους μήνες.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω και να εκφράσω την εκτίμησή μου για δύο συναδέλφους μου, τον Δημήτριο Τσιάκο και το Νικόλαο Γεωργακόπουλο, με τους οποίους μελετήσαμε μαζί, προβληματιστήκαμε, ανταλλάξαμε ιδέες και έκαναν όλη τη διαδικασία πιο ευχάριστη και δημιουργική.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου, η οποία μου παρείχε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με τις σπουδές μου με προσήλωση και με επανέφερε όταν παρέκκλινα από το στόχο ή έχανα το ρυθμό μου. Τους αφιερώνω την εργασία μου.

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.

Γουργιώτης Βασίλειος



<b>Περιεχόμενα</b>	
Σύνοψη – Περίληψη.....	7
Abstract .....	8
Κατάλογος συμβόλων – αρκτικόλεξων.....	9
1. Εισαγωγή .....	12
1.1 Πλαίσιο – Ο περιορισμός της κλιματικής αλλαγής .....	12
1.2 Σκοπός, ερωτήματα και στόχοι .....	13
1.3 Οριοθέτηση.....	13
2. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο & Τεχνολογίες Φ/Β .....	14
2.1 Εισαγωγή .....	14
2.1.1 Το ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή επαφής δύο σωμάτων .....	14
2.1.2 Ο ρόλος του ενδογενούς ηλεκτρικού πεδίου στη δημιουργία του Φ/Β φαινομένου .....	15
2.1.3 Ημιαγωγοί. Επαφή p-n ημιαγωγών.....	16
2.2 Ιστορική αναδρομή Φ/Β.....	22
2.3 Φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια .....	24
2.3.1 Απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας .....	24
2.3.2 Φωτοαγωγιμότητα .....	24
2.4 Το Φ/Β φαινόμενο – Αρχή λειτουργίας Φ/Β .....	24
2.5 Παράγων πλήρωσης και απόδοση Φ/Β .....	28
2.5.1 Εξάρτηση από τη θερμοκρασία.....	28
2.6 Ανασκόπηση τεχνολογιών Φ/Β .....	29
2.6.1 Τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si).....	30
2.6.2 Τεχνολογία λεπτού υμένα – Thin Film .....	33
2.6.3 Αναδυόμενες τεχνολογίες Φ/Β .....	37
2.7 Ανακεφαλαίωση .....	39
3. Κλιματισμός κτηρίων .....	41
3.1 Ενεργειακές ανάγκες και απόδοση κτηρίων .....	41
3.2 Θερμική άνεση .....	43
3.3 Αντλία Θερμότητας (Α/Θ).....	52
3.3.1 Εισαγωγή – τι είναι οι αντλίες θερμότητας.....	52
3.3.2 Βασικά δομικά μέρη αντλίας θερμότητας .....	53
3.3.3 Αρχή λειτουργίας Α/Θ .....	55
3.3.4 Απόδοση Αντλίας Θερμότητας.....	58
3.3.5 Αντλίες Θερμότητας αέρα-αέρα .....	59
3.4 Μονάδα αφύγρανσης.....	60
3.5 Σύστημα Φ/Β – Αντλίας Θερμότητας .....	61
4. Σχεδιασμός της οικίας σε περιβάλλον SketchUp .....	63
4.1 Το λογισμικό SketchUp.....	63
4.2 Σχεδιασμός της οικίας .....	63
5. Παραμετροποίηση της οικίας στο OpenStudio.....	75

5.1	Το λογισμικό OpenStudio	75
5.2	Ορισμός παραμέτρων της οικίας .....	75
5.2.1	Καρτέλα καιρικών δεδομένων – Site Tab.....	75
5.2.2	Καρτέλα Χρονοπρογραμμάτων – Schedules Tab .....	76
5.2.3	Καρτέλα κατασκευών – Constructions Tab .....	93
5.2.4	Καρτέλα Φορτίων – Loads Tab .....	108
5.2.5	Καρτέλα Χώρων – Space Types Tab.....	113
5.2.6	Καρτέλα Spaces .....	116
5.2.7	Καρτέλα Θερμικής Ζώνης – Thermal Zones Tab .....	116
5.2.8	Καρτέλα Measures.....	117
5.3	Σενάριο με ΦΒ και Αντλία Θερμότητας – Αθήνα .....	121
5.4	Σενάριο με Φ/Β και Αντλία Θερμότητας – Βιέννη .....	125
5.5	Σενάριο με Φ/Β και Αντλία Θερμότητας – Στοκχόλμη .....	127
5.6	Σενάριο με Φ/Β και Αντλία Θερμότητας – Abu Dhabi .....	129
5.7	Σχεδιασμός - Βελτιστοποίηση Φ/Β μέσω PVGIS .....	131
6.	Αποτελέσματα .....	133
6.1	Σενάριο με Ιδανικά Φορτία .....	133
6.2	Σενάριο με Φ/Β και Αντλία Θερμότητας – Αθήνα.....	135
6.3	Σενάριο με Φ/Β και Αντλία Θερμότητας - Βιέννη .....	139
6.4	Σενάριο με Φ/Β και Αντλία Θερμότητας – Στοκχόλμη .....	143
6.5	Σενάριο με Φ/Β και Αντλία Θερμότητας – Abu Dhabi .....	147
6.6	Συγκέντρωση αποτελεσμάτων .....	150
7.	Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	156
	Κατάλογος εικόνων .....	159
	Κατάλογος πινάκων .....	164
	Βιβλιογραφία .....	165

## Σύνοψη – Περίληψη

Στην προσπάθεια διαχείρισης της κλιματικής αλλαγής επιχειρείται παγκοσμίως η μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων που προέρχονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα. Η ηλεκτρική ενέργεια είναι η σημαντικότερη μορφή ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών του ανθρώπου. Η κύρια πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα ορυκτά καύσιμα, τα οποία όμως απελευθερώνουν μεγάλα ποσά ρύπων και αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, ενώ λόγω και των αυξημένων ενεργειακών απαιτήσεων υπολογίζεται η εξάντληση των αποθεμάτων τους τα επόμενα 40-60 χρόνια. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και συγκεκριμένα η ηλιακή ενέργεια είναι μία πολλά υποσχόμενη εναλλακτική για την παραγωγή ενέργειας, βιώσιμης και φιλικής προς το περιβάλλον. Τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) έχουν βιώσει ραγδαία ανάπτυξη τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Μια καινοτόμος ιδέα, που έχει αρχίσει να εφαρμόζεται είναι η εγκατάσταση Φ/Β οροφής σε κτήρια προς κάλυψη των ενεργειακών αναγκών τους. Στην παρούσα εργασία μελετάται η εγκατάσταση Φ/Β οροφής σε συνδυασμό με αντλία θερμότητας για μία κατοικία 150 m<sup>2</sup>, τετραμελούς οικογένειας, σε 4 διαφορετικές τοποθεσίες της υδρογείου και συγκεκριμένα σε Αθήνα, Βιέννη, Στοκχόλμη και Άμπου Ντάμπι, για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της οικογένειας.

Σκοπός της εργασίας είναι να γίνει μία σύγκριση του πώς μεταβάλλονται οι ενεργειακές ανάγκες από περιοχή σε περιοχή, σε τι βαθμό είναι δυνατό να εξασφαλιστεί ενεργειακή αυτονομία της οικίας μέσω Φ/Β και σε ποιες περιοχές η εγκατάσταση Φ/Β παρουσιάζεται ευνοϊκότερη.

Η σχεδίαση της μονοκατοικίας πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό SketchUp, ενώ η πλήρης παραμετροποίησή της και προσομοίωση (δομικά υλικά, χρονοπρογράμματα, υπολογισμός φορτίων, σύστημα κλιματισμού) έγιναν στο OpenStudio, το οποίο αποτελεί ένα υπό-περιβάλλον του EnergyPlus ιδιαίτερα φιλικό προς το χρήστη. Παράλληλα, μέσω του λογισμικού PVGIS, το οποίο χρησιμοποιείται και από την Ευρωπαϊκή επιτροπή, πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση όσον αφορά στην τοποθέτηση των Φ/Β, δηλαδή κλίση και προσανατολισμό για κάθε τοποθεσία.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων κατέδειξαν ότι στην Αθήνα και στο Άμπου Ντάμπι επιτυγχάνεται πλήρης ενεργειακή αυτονομία της οικίας μέσω Φ/Β, ενώ σημαντικά ποσά ενέργειας καλύπτονται από τα Φ/Β στη Βιέννη και στη Στοκχόλμη.

Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας θα μπορούσαν να συμβάλουν σε μελλοντικές έρευνες σχετικά με το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση παθητικών κτηρίων, τα οποία θα τροφοδοτούνται με ηλεκτρισμό μέσω Φ/Β συστημάτων.

## Abstract

In the effort to manage climate change, efforts are being made, worldwide, to reduce the emitted pollutants that come from human activity. Electricity is the most important form of energy to meet human needs. The main source of electricity production is fossil fuels, which, however, release large amounts of pollutants and greenhouse gases into the atmosphere, while due to the increased energy requirements, it is estimated that their reserves will be depleted in the next 40-60 years. Renewable energy sources and specifically solar energy are a promising alternative for energy production, sustainable and environmentally friendly. Photovoltaics (PV) have experienced rapid growth over the past two decades. A modern idea that has begun to be implemented is the installation of rooftop PV in buildings to cover their needs. In this work, the installation of rooftop PV in combination with a heat pump for a 150 m<sup>2</sup> residence, for a family of 4, in 4 different locations around the globe, specifically in Athens, Vienna, Stockholm and Abu Dhabi, is studied to cover the energy needs of the family.

The purpose of the work is to make a comparison of how the energy needs change from region to region, to what extent it is possible to ensure the energy autonomy of the house through PV and in which regions the PV installation is more favorable. The house was designed in SketchUp software, while its complete parameterization and simulation (building materials, schedules, loads calculation, air conditioning system) were done in OpenStudio, which is a user-friendly sub-environment of EnergyPlus. At the same time, through the PVGIS software, which is also used by the European Commission, an optimization was carried out regarding the placement of PVs, i.e. slope and orientation for each location.

The results of the simulations showed that in Athens and in Abu Dhabi, full energy autonomy of the house is achieved through PV, while significant amounts of energy are covered by PV in Vienna and Stockholm.

The results of this work could contribute to future research on the design and optimization of passive energy buildings, which will be supplied with electricity through PV systems.

## Κατάλογος συμβόλων – αρκτικόλεξων

### Αρκτικόλεξα

ΕΕ: Ευρωπαϊκή Ένωση  
ΑΠΕ: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας  
Φ/Β: Φωτοβολταϊκά  
ΖΝΧ: Ζεστό Νερό Χρήσης  
NREL: National Renewable Energy Laboratory  
DS: Directional Solidification  
ΖΣ: Ζώνη Σθένους  
ΖΑ: Ζώνη Αγωγιμότητας  
ΗΜ: Ηλεκτρομαγνητική  
FF: Fill Factor  
ΗΠΑ: Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής  
ΗΑΕ: Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα  
CIGS: Copper Indium Gallium Selenide  
DSSC: Dye-Sensitized Solar Cell  
ΘΨΚ: Θέρμανση Ψύξη Κλιματισμός  
ΚΕΝΑΚ: Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων  
ΤΕΕ: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος  
HVAC: Heating Ventilation Air-Conditioning  
PMV: Predicted Mean Vote  
ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating, Air-Conditioning Engineers  
Α/Θ: Αντλία Θερμότητας  
COP: Coefficient of Performance  
EER: Energy Efficiency Ratio  
ISO: International Organisation of Standardization  
ΤΟΤΕΕ: Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος  
PTAC: Packaged Terminal Air Conditioner  
HIT: Heterojunction with Intrinsic Thin Layer

### Ελληνικά σύμβολα

$\epsilon$ : συντελεστής εκπομπής, [-]  
 $\sigma$ : σταθερά Stefan-Boltzmann, [-]  
 $A$ : επιφάνεια σωμάτων, [m<sup>2</sup>]  
 $\Delta x$ : απόσταση μεταξύ διαδοχικών σειρών πάνελ, [m]  
 $\beta$ : κλίση Φ/Β, [°]  
 $a$ : μήκος πάνελ, [m]  
 $\gamma$ : αζιμούθιο, [°]

E: πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας, [kW/m<sup>2</sup>]

### Λατινικά σύμβολα

E<sub>g</sub>: Ενεργειακό χάσμα, [eV]

I<sub>δ</sub>: ρεύμα διάχυσης, [A]

I<sub>L</sub>: φωτόρευμα, [A]

E<sub>C</sub>: Ενέργεια ζώνης αγωγιμότητας, [eV]

E<sub>V</sub>: Ενέργεια ζώνης σθένους, [eV]

V<sub>bi</sub>: Τάση επαφής, [V]

S: Εμβαδόν Φ/Β, [m<sup>2</sup>]

V<sub>mpp</sub>: Τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος εξόδου, [V]

I<sub>mpp</sub>: Ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος εξόδου, [A]

V<sub>oc</sub>: Τάση ανοιχτού κυκλώματος, [V]

I<sub>oc</sub>: Ρεύμα ανοιχτού κυκλώματος, [A]

I<sub>sc</sub>: Ρεύμα βραχυκύκλωσης, [A]

P<sub>max</sub>: Μέγιστη ισχύς, [W]

η<sub>c,STC</sub>: Ονομαστική απόδοση κάτω από πρότυπες συνθήκες ελέγχου, [%]

η<sub>c</sub>: Απόδοση ενεργειακής μετατροπής Φ/Β στοιχείου, [%]

q<sub>x</sub>: Πυκνότητα παροχής θερμότητας κάθετης στον άξονα x, [ $\frac{W}{m^2}$ ]

k: Ειδική θερμική αγωγιμότητα, [ $\frac{W}{m \cdot K}$ ]

dx: Μεταβολή μήκους, [m]

dT: Μεταβολή θερμοκρασίας, [K]

L: Μήκος, [m]

h: Ειδική συναγωγιμότητα, [ $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ]

T<sub>s</sub>: Θερμοκρασία επιφάνειας στερεού σώματος, [K]

T<sub>∞</sub>: Θερμοκρασία σώματος ρευστού, [K]

q: Πυκνότητα παροχής θερμότητας, [ $\frac{W}{m^2}$ ]

Q<sub>conv</sub>: Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή, [W]

Q<sub>rad</sub>: Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία, [W]

P<sub>tot</sub>: Συνολική ηλεκτρική κατανάλωση, [W]

Q<sub>cond</sub>: Θερμική ισχύς του συμπυκνωτή, [W]

Q<sub>evap</sub>: Θερμική ισχύς του ατμοποιητή, [W]

h<sub>1</sub>, h<sub>2</sub>: Ενθαλπίες, [ $\frac{kJ}{kg \cdot K}$ ]

U: Συντελεστής θερμοπερατότητας, [ $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ]

U<sub>m</sub>: Μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας, [ $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ]

U<sub>max</sub>: Μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής θερμοπερατότητας, [ $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ]

H: ύψος πάνελ υπό κλίση, [m]

$A_i$ : εμβαδό κάθε δομικού στοιχείου του κελύφους του κτιρίου, [ $m^2$ ]

$b_i$ : μειωτικός συντελεστής, [-]

$d$ : οριζόντιο μήκος πάνελ, [m]

$P_{pk}$ : μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς, [kWp]

$e_{ff, nom}$ : βαθμός απόδοσης  $\Phi/B$ , [%]

## 1. Εισαγωγή

### 1.1 Πλαίσιο – Ο περιορισμός της κλιματικής αλλαγής

Η διαχείριση της κλιματικής αλλαγής αποτελεί μείζον θέμα στη σύγχρονη εποχή. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει θέσει ως στόχο την κλιματική ουδετερότητα μέχρι το 2050 [1]. Σε αυτό το πλαίσιο το ενδιαφέρον έχει στραφεί κυρίως σε δύο τομείς:

- βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων
- εφαρμογή εναλλακτικών τρόπων παραγωγής ενέργειας φιλικών προς το περιβάλλον

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αναφέρει ότι τα κτίρια που ανήκουν στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) είναι υπεύθυνα για το 40% της ενεργειακής κατανάλωσης όσο και για το 36% των εκπεμπόμενων αερίων του θερμοκηπίου [1]. Οπότε γίνεται εύκολα αντιληπτή η ανάγκη για τον σχεδιασμό κτιρίων υψηλής ενεργειακής απόδοσης.

Η κύρια πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι σήμερα είναι τα ορυκτά καύσιμα. Δύο είναι τα προβλήματα αυτών των καυσίμων. Πρώτον, τα αποθέματά τους δεν είναι ανεξάντλητα και μάλιστα με τη σημαντική αύξηση των ενεργειακών αναγκών εκτιμάται ότι στα επόμενα 60 χρόνια θα έχουν εκλείψει. Δεύτερον, η καύση των ορυκτών καυσίμων απελευθερώνει στην ατμόσφαιρα μεγάλα ποσά αερίων ρύπων, όπως το μονοξείδιο του άνθρακα, CO, αλλά και αέρια του θερμοκηπίου, όπως το διοξείδιο του άνθρακα, CO<sub>2</sub>. Ως αποτέλεσμα, έχουν ενταθεί οι προσπάθειες για εφαρμογή εναλλακτικών μεθόδων παραγωγής ενέργειας. Η εκμετάλλευση των ΑΠΕ μπορεί να παρέχει ενέργεια με τρόπο βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον, καθώς παρατηρείται μηδενική εκπομπή ρύπων. Οι ΑΠΕ προφανώς έχουν ανεξάντλητα αποθέματα, ενώ με την άνθιση των τεχνολογιών εκμετάλλευσής τους ανοίγουν και νέες θέσεις εργασίας συμβάλλοντας και κοινωνικά, με αυτόν τον τρόπο, εκτός από περιβαλλοντικά. Πιο συγκεκριμένα, ραγδαία ανάπτυξη έχουν βιώσει τις τελευταίες δύο δεκαετίες τα Φ/Β συστήματα, τα οποία εκμεταλλεύονται τα τεράστια ποσά ενέργειας που παρέχει ο ήλιος προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μάλιστα, ήδη έχουν αρχίσει να εγκαθίστανται Φ/Β στις οροφές κτιρίων συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο στην κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών.



## 1.2 Σκοπός, ερωτήματα και στόχοι

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός μίας μονοκατοικίας 150 m<sup>2</sup>, η οποία στεγάζει μια τυπική τετραμελή οικογένεια. Η τοποθεσία που βρίσκεται η οικία στο βασικό σενάριο είναι η Βάρκιζα. Μελετώνται επιπλέον τρία σενάρια σχεδιασμού της οικίας σε διαφορετικές περιοχές, όπως στη Βιέννη, στη Στοκχόλμη και στο Άμπου Ντάμπι. Στην ταράτσα της μονοκατοικίας εγκαθίστανται Φ/Β οροφής για την κάλυψη των αναγκών της οικίας.

Ο σκοπός της εργασίας ήταν πολύπλευρος. Σε πρώτο στάδιο τέθηκε το θέμα του σχεδιασμού ενός ενεργειακά αποδοτικού κτηρίου, με κατάλληλη χρήση δομικών υλικών για μείωση των θερμικών απωλειών, μείωση κατά το δυνατό των ενεργειακών αναγκών για τον φωτισμό και τις ηλεκτρικές συσκευές της οικίας. Επιπλέον, επιλέχθηκε σύστημα αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα για τον κλιματισμό των χώρων της κατοικίας, το οποίο συμβάλλει καθοριστικά στην εξοικονόμηση ενέργειας και αποτελεσματικά στον καταρτισμό ενός πιο αποδοτικού, ενεργειακά, κτηρίου. Σε δεύτερο στάδιο, μέσω της εγκατάστασης Φ/Β οροφής και άρα της εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας, επιχειρείται η εξασφάλιση ενεργειακής αυτονομίας της οικίας, όπου αυτό είναι δυνατό. Σε τρίτο στάδιο επιχειρείται να καταφανεί το πώς μεταβάλλονται οι ενεργειακές ανάγκες από τοποθεσία σε τοποθεσία λόγω των καιρικών δεδομένων, αλλά και σε ποιες περιοχές η εγκατάσταση Φ/Β παρουσιάζεται ευνοϊκότερη.

## 1.3 Οριοθέτηση

Η παρούσα εργασία θίγει αρκετούς τομείς ενδιαφέροντος και δε θα ήταν δυνατό να εμβαθύνει σε κάθε έναν από αυτούς. Ως κύριο κομμάτι ενδιαφέροντος έχει τις τεχνολογίες φωτοβολταϊκών και τη βέλτιστη τοποθέτησή τους σε κτίρια. Περιορίζεται στη μελέτη της αντλίας θερμότητας σαν «black box», ορίζοντας τις βασικές παραμέτρους, αλλά δεν πραγματεύεται τη σύνδεσή της με τα φωτοβολταϊκά. Αυτό που ενδιέφερε ήταν μόνο τα φωτοβολταϊκά να παράγουν επαρκή ισχύ ώστε να επιτρέπουν τη λειτουργία της. Επιπλέον, σημειώνεται ότι δεν πραγματοποιήθηκε περαιτέρω ανάλυση για τα δομικά στοιχεία της οικίας σε κάθε περιοχή, δηλαδή οι μονώσεις, τα πάχη και οι στρώσεις της τοιχοποιίας παραμένουν σταθερά σαν το σενάριο της Αθήνας και για τις υπόλοιπες τοποθεσίες μελέτης. Τέλος, θεωρείται ότι υπάρχει προ - εγκατεστημένο σύστημα για ζεστό νερό χρήσης (ZNX), η θέρμανση του οποίου επιτυγχάνεται από ηλιακό θερμοσίφωνα. Αυτός ήταν και ο λόγος για τον οποίο σε περιβάλλον OpenStudio εισάγονται μόνο ανθρώπινα φορτία, φορτία φωτισμού και ηλεκτρικών συσκευών, αλλά όχι και φορτία για ZNX.

## 2. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο & Τεχνολογίες Φ/Β

### 2.1 Εισαγωγή

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ορίζεται ως μία επαφή υλικών, συννηθέστερα ημιαγωγών, στην οποία η απορροφούμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική. Όλες οι φωτοβολταϊκές συσκευές, πρακτικά, λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο. Περιέχουν μία δίοδο p-n μέσα σε έναν ημιαγωγό, κατά μήκος του οποίου εμφανίζεται ηλεκτρικό δυναμικό. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι είναι αναγκαίο να παρουσιαστούν όλα τα μέρη από τα οποία αποτελείται μια φωτοβολταϊκή συσκευή, καθώς και τα χαρακτηριστικά τους.

#### 2.1.1 Το ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή επαφής δύο σωμάτων

Κατά τη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς των ημιαγωγών και της εμφάνισης του Φ/Β φαινομένου σε αυτούς, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η ροή ηλεκτρικών φορέων, λόγω της διάχυσής τους. Για αυτό και εισάγεται ο όρος της διάχυσης. Διάχυση είναι η διαδικασία διασποράς των μελών (μορίων, ιόντων ή ηλεκτρονίων) ενός συστήματος A σε ένα σύστημα B όταν υπάρχει διαφορά στη συγκέντρωση της ουσίας A στις δύο θέσεις. Η διάχυση συνεχίζεται μέχρις ότου επιτευχθεί ισορροπία στο σύστημα, δηλαδή μέχρι η συγκέντρωση του σώματος A να ισοκατανεμηθεί μέσα στη μάζα του σώματος B.

Όταν δύο σώματα έρχονται σε στενή επαφή μεταξύ τους, αναπτύσσεται σε αυτά μια τάση, που ονομάζεται τάση επαφής. Οφείλεται στο πέρασμα ηλεκτρονίων από το ένα σώμα στο άλλο, εξαιτίας της τάσης των φορέων να περάσουν σε περιοχή όπου η συγκέντρωσή τους είναι μικρότερη (διάχυση). Επειδή η πυκνότητά τους στην περιοχή που γειτνιάζει με το άλλο σώμα ελαττώνεται, καταστρέφεται η αρχική ηλεκτρική ουδετερότητα στην περιοχή αυτή, στην οποία παραμένουν ακάλυπτα ιόντα. Στην περίπτωση δύο ημιαγωγών σε επαφή, ανάμεσά τους δημιουργείται μια περιοχή απογυμνωμένη από ηλεκτρικούς φορείς, η οποία ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης.

Στους ημιαγωγούς, η διάχυση αφορά και στα δύο είδη ηλεκτρικών φορέων, τα ηλεκτρόνια (n) και τις οπές (p), από περιοχή υψηλής σε περιοχή χαμηλής συγκέντρωσής τους. Η επαφή δύο ημιαγωγών διαφορετικής συγκέντρωσης για καθέναν από τους ηλεκτρικούς φορείς (ηλεκτρόνια και οπές) στα δύο τμήματα, δημιουργεί ηλεκτρικό ρεύμα διάχυσής τους, προς τα απέναντι τμήματα. Με αυτόν τον τρόπο προκαλείται απογύμνωση των ιόντων του πλέγματος στις πλευρές εκατέρωθεν της επαφής, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο το οποίο αυξάνεται όσο προχωρεί η διάχυση των φορέων, λειτουργώντας ανασταλτικά στην κίνησή τους, υποχρεώνοντάς τους σε κίνηση προς την αντίθετη κατεύθυνση από ότι προηγουμένως. Το ρεύμα αυτό καλείται ρεύμα ολίσθησης. Η ηλεκτρική τάση που εμφανίζεται ονομάζεται τάση επαφής (built-in potential) και συμβολίζεται με  $V_{bi}$ . Το

μέγεθός της βρίσκεται στο διάστημα  $0.5 \div 1$  V, είναι χαρακτηριστική των σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή και εξαρτάται από τη θερμοκρασία [27].

### 2.1.2 Ο ρόλος του ενδογενούς ηλεκτρικού πεδίου στη δημιουργία του Φ/Β φαινομένου

Οι επαφές σωμάτων, εν γένει, συνοδεύονται από πολύ σημαντικά αποτελέσματα. Μεταξύ αυτών είναι και η φωτοβολταϊκή μετατροπή μέρους της απορροφούμενης, στην περιοχή επαφής δύο σωμάτων, ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας (εν προκειμένω της ηλιακής ακτινοβολίας), σε ηλεκτρική.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, κατά τη στενή επαφή μεταξύ δύο στερεών σωμάτων, προκαλείται διάχυση των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από τη μια μεριά στην άλλη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού φραγμού, για καθέναν από τους φορείς. Στην τελική κατάσταση ισορροπίας, μεταξύ των δύο σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή αποκαθίσταται διαφορά δυναμικού, η οποία ονομάζεται τάση επαφής ( $V_{bi}$ ). Η τάση επαφής,  $V_{bi}$ , λοιπόν, είναι η εσωτερική ηλεκτρική τάση που διακόπτει το φαινόμενο της διάχυσης από το ένα τμήμα στο άλλο.

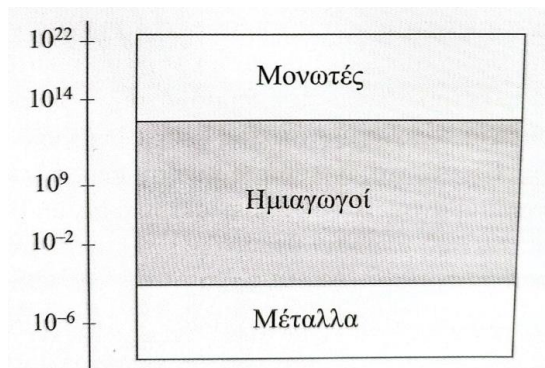
Όταν η επαφή φωτιστεί, παρατηρείται τροποποίηση της κατάστασης. Με τη δράση του φωτός δημιουργούνται επιπλέον «ελεύθεροι» ηλεκτρικοί φορείς, οι οποίοι με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου της επαφής, τίθενται σε προσανατολισμένη κίνηση παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα. Αν στα άκρα της φωτιζόμενης επαφής συνδεθεί μια ηλεκτρική αντίσταση, μέρος του φωτοδημιουργούμενου ρεύματος κυκλοφορεί μέσα σε αυτή, διατηρούμενης της ηλεκτρικής τάσης τέτοιας ώστε η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς (ρεύμα  $\times$  τάση) να μπορεί να αξιοποιηθεί αποδοτικά σε πρακτικές εφαρμογές. Η διάταξη αυτή καλείται φωτοβολταϊκό στοιχείο. Η ένταση του ρεύματος που μπορεί να δώσει μια Φ/Β επαφή εξαρτάται, κατά γενικό τρόπο, από την πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής (ηλιακής) ακτινοβολίας, από την έκταση της επαφής και από τη φύση και τη θερμοκρασία των σωμάτων που την αποτελούν.

Γενικά, τα φωτόνια που απορροφώνται μέσα στους ημιαγωγούς και προκαλούν εσωτερικό ιονισμό των ατόμων, δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών. Ιδιαίτερα τα φωτόνια που απορροφώνται κοντά στην περιοχή επαφής, δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών, τα οποία με τη βοήθεια του ηλεκτρικού πεδίου επαφής διαχωρίζονται, ωθούμενα στα δύο άκρα του συστήματος, όπου επικρατούν οι όμοιοί τους φορείς (φορείς πλειονότητας). Στους χώρους αυτούς, η πολύ μικρή συγκέντρωση φορέων αντιθέτου προσήμου (φορέων μειονότητας), ευνοεί την παραμονή τους, ως «ελεύθερων» φορέων (μειωμένη επανασύνδεση), με αποτέλεσμα τη δημιουργία του Φ/Β φαινομένου.

### 2.1.3 Ημιαγωγοί. Επαφή p-n ημιαγωγών

#### 2.1.3.1 Η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η θεωρία των ενεργειακών ζωνών των κρυσταλλικών στερεών

Ένας χημικά καθαρός, κρυσταλλικός ημιαγωγός, ονομάζεται ενδογενής (Intrinsic). Μπορεί να συνίσταται από ένα χημικό στοιχείο (πυρίτιο Si, γερμάνιο Ge, κ.ά.) ή περισσότερα στοιχεία (π.χ. αρσενιούχο γάλλιο GaAs). Διακρίνεται από τα μέταλλα και τους μονωτές, με βασικό κριτήριο την τυπική ηλεκτρική του συμπεριφορά. Σε κανονικές συνθήκες, οι μονωτές, πρακτικά δεν άγουν το ρεύμα, καθώς χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή ειδική αντίσταση. Στον αντίποδα, τα μέταλλα αποτελούν καλούς αγωγούς του ηλεκτρισμού με χαμηλή ειδική αντίσταση. Οι ημιαγωγοί αποτελούν μια ενδιάμεση κατηγορία αγωγών με ειδική αντίσταση στην περιοχή  $10^{-2}$  έως  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ , ανάλογα με τη χημική τους σύνθεση.



Εικόνα 1: Τυπική κατάταξη των υλικών με κριτήριο την ειδική αντίσταση  $\rho$  ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) [27].

Διακρίνονται σε ενδογενείς ημιαγωγούς, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από την ίδια στοιχειακή σύνθεση σε όλη την έκτασή τους και σε αγωγούς προσμίξεων. Οι τελευταίοι δημιουργούνται αν ένας ενδογενής ημιαγωγός εμπλουτιστεί με κατάλληλο τρόπο, με άτομα άλλου στοιχείου και οι οποίοι αποδεικνύονται εξαιρετικά σημαντικοί για τη σύγχρονη τεχνολογία.

Χαρακτηριστικό των ενδογενών ημιαγωγών είναι ότι αυξανόμενης της θερμοκρασίας, η ηλεκτρική τους αντίσταση μειώνεται δραματικά. Αυτό οφείλεται στο ότι κατά τη θέρμανση του υλικού, το πλήθος των ελεύθερων ηλεκτρονίων του ημιαγωγού αυξάνει, ενισχύοντας την αγωγιμότητά του. Αντίθετα, στους ημιαγωγούς πρόσμειξης, η αύξηση της θερμοκρασίας, σε χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες, δεν τροποποιεί αισθητά την αγωγιμότητά τους, καθώς η αύξηση των ηλεκτρικών φορέων λόγω ιονισμού των ατόμων του κυρίου συστατικού του ημιαγωγού είναι πρακτικά ασήμαντη σε σύγκριση με τους φορείς που προέρχονται από ιονισμό των ατόμων πρόσμειξης (ο ιονισμός των προσμίξεων έχει ήδη συντελεστεί σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες). Φυσικά, σε υψηλές θερμοκρασίες εμφανίζουν και αυτοί συμπεριφορά ενδογενούς ημιαγωγού, όταν το πλήθος των φορέων από τον ιονισμό των ατόμων του κυρίου υλικού γίνεται συγκρίσιμο με αυτό των ατόμων της πρόσμειξης.

Η ηλεκτρική συμπεριφορά των υλικών αυτών εξηγείται μέσω της θεωρίας των ενεργειακών ζωνών των ηλεκτρονίων της στερεάς κατάστασης της ύλης. Τα βασικά συμπεράσματα που εξάγονται από τη θεωρία των ενεργειακών ζωνών είναι τα εξής:

1. Η ενέργεια του ηλεκτρονίου μπορεί να έχει τιμές μόνο μέσα σε ορισμένες περιοχές ενέργειας, που ονομάζονται ενεργειακές ζώνες (energy bands). Κάθε ενεργειακή ζώνη αποτελείται από μεγάλο πλήθος ενεργειακών επιπέδων, με πρακτικά αμελητέα ενεργειακή απόσταση μεταξύ τους, λόγω του μεγάλου πλήθους αλληλεπιδρώντων ατόμων. Σε κάθε ενεργειακό επίπεδο μιας ενεργειακής ζώνης τοποθετούνται μέχρι και δύο ηλεκτρόνια, με αντίθετα spins, ανάλογα την ολική τους ενέργεια.
2. Οι ενεργειακές ζώνες είναι περιοχές ενέργειας των ηλεκτρονίων του στερεού, μέσα στο πεδίο των πυρήνων. Τα εσωτερικά ηλεκτρόνια των ατόμων του, είναι σφιχτά συνδεδεμένα στους αντίστοιχους πυρήνες και οι ενέργειές τους αφορούν σε στάθμες ενέργειας παρά σε ζώνες [27]. Τα απομακρυσμένα ηλεκτρόνια έχουν ενέργειες μέσα σε ενεργειακές ζώνες, που εκτείνονται σε όλη την έκταση του κρυστάλλου, υποδηλώνοντας τον μη εντοπισμό των ηλεκτρονίων αυτών σε συγκεκριμένο πυρήνα. Οι ζώνες χαμηλότερης ενέργειας αφορούν σε ηλεκτρόνια που δεν μπορούν να συνεισφέρουν σε ηλεκτρικό ρεύμα, με την έννοια ότι, ένα τυπικό ηλεκτρικό πεδίο μέσα στο στερεό, δεν μπορεί να τα θέσει σε προσανατολισμένη κίνηση.
3. Μεταξύ των ενεργειακών ζωνών υπάρχουν περιοχές ενέργειας με μη επιτρεπές τιμές για τα ηλεκτρόνια του κρυσταλλικού στερεού. Οι απαγορευμένες αυτές περιοχές ονομάζονται ενεργειακά χάσματα (energy band gaps). Αυτό σημαίνει ότι μέσα στο υλικό δεν υπάρχουν ηλεκτρόνια με ενέργειες εντός ενεργειακού χάσματος. Το εύρος των ενεργειακών χάσμάτων, ανάλογα με το υλικό, κυμαίνεται από κλάσμα του eV έως και μερικά eV.

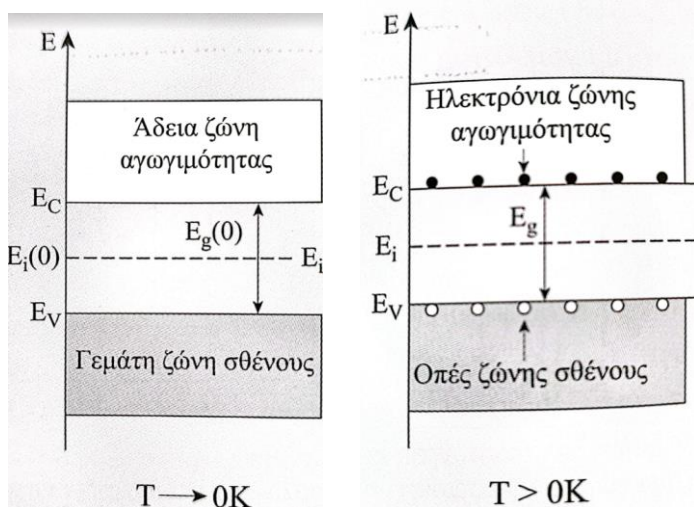
Σύμφωνα με τη θεωρία ζωνών, ημιαγωγός είναι ένα στερεό, το οποίο κοντά στο απόλυτο μηδέν (θερμοκρασία = 0 K), έχει ενεργειακό χάσμα  $E_g$  από κλάσμα του eV, μέχρι περίπου 2.5 eV [27]. Όταν ο ημιαγωγός βρίσκεται σε δεδομένη θερμοκρασία (> 0 K), υπάρχει αρκετή πιθανότητα ηλεκτρόνια από την προηγούμενη ενεργειακή ζώνη να υπερπηδήσουν το ενεργειακό χάσμα και να αποκτήσουν ενέργεια της επόμενης ενεργειακής ζώνης, που ήταν άδεια σε θερμοκρασία απόλυτου μηδενός. Στη νέα τους κατάσταση, τα ηλεκτρόνια αυτά έχουν τη δυνατότητα συμμετοχής σε ηλεκτρικό ρεύμα, με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου. Κάθε ημιαγωγός, σε θερμοκρασία πολύ κοντά στο απόλυτο μηδέν, συμπεριφέρεται ως μονωτής. Σε υψηλότερη θερμοκρασία είναι ένας σχετικά «κακός» αγωγός του ηλεκτρισμού, αλλά με σημαντικές ιδιότητες.

Από όλες τις ζώνες ενός στερεού, συνήθως σχεδιάζονται μόνο οι δύο ανώτερες. Στη μία εντάσσονται τα ηλεκτρόνια των εξωτερικών στοιβάδων των ατόμων του στερεού, δηλαδή τα ηλεκτρόνια σθένους, η οποία ονομάζεται ζώνη σθένους (ΖΣ, valence band). Στην επόμενη εντάσσονται εκείνα τα ηλεκτρόνια σθένους τα οποία, στη δεδομένη θερμοκρασία του υλικού, μπορούν να συμμετάσχουν ως «ελεύθερα» στην αγωγιμότητα του υλικού. Ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας (ΖΑ, conduction band). Η ενέργεια του χαμηλότερου ενεργειακού επιπέδου της ζώνης αγωγιμότητας (πυθμένα) συμβολίζεται με  $E_C$ , ενώ η ενέργεια του υψηλότερου ενεργειακά επιπέδου της ζώνης σθένους (κορυφή) συμβολίζεται με  $E_V$ , αντίστοιχα.

Για κρυσταλλικούς ημιαγωγούς, το ενεργειακό χάσμα  $E_g = E_C - E_V$ , παίρνει τιμές περί το 1 eV. Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, 300 K, οι τιμές του ενεργειακού χάσματος για διάφορα κρυσταλλικά υλικά είναι: Ge (0.66 eV), Si (1.12 eV), GaAs (1.42 eV) [27].

### 2.1.3.2 Ενδογενής ημιαγωγός

Σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν, ο ημιαγωγός πρακτικά είναι μονωτής. Αυτό σημαίνει ότι η ζώνη σθένους είναι πλήρης και η ζώνη αγωγιμότητας κενή. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, μερικά ηλεκτρόνια ανεβαίνουν στη ζώνη αγωγιμότητας, ενώ στη ζώνη σθένους ( $E < E_V$ ), απομένουν κενές ενεργειακές θέσεις, που αποτελούν καταστάσεις οπών. Πιο αναλυτικά, στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται η ζώνη σθένους και αγωγιμότητας για ενδογενή ημιαγωγό, κοντά και μακριά από το απόλυτο μηδέν.



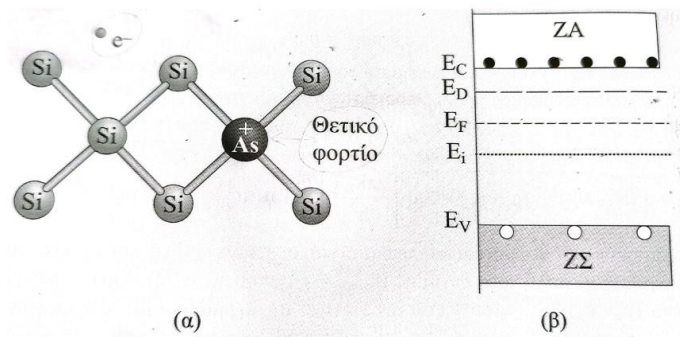
Εικόνα 2: Ζώνες σθένους και αγωγιμότητας ενός ενδογενούς ημιαγωγού [27].



### 2.1.3.3 Ημιαγωγοί πρόσμειξης

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ημιαγωγοί πρόσμειξης (Extrinsic semiconductors), οι οποίοι μέσα στο κρυσταλλικό τους πλέγμα περιέχουν διασπαρμένα άτομα από επιλεγμένο διαφορετικό υλικό. Δύο είναι οι τύποι τέτοιων ημιαγωγών: τύπου n και τύπου p.

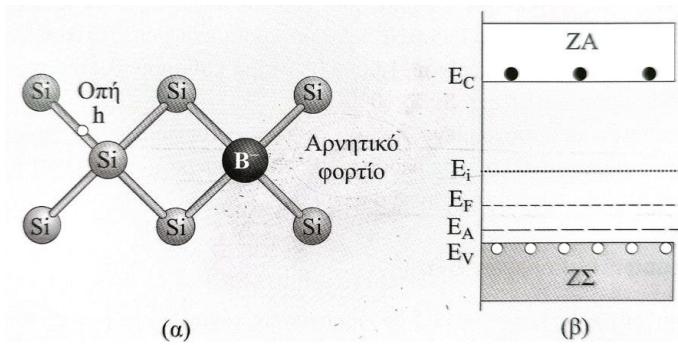
Ο ημιαγωγός τύπου n προκύπτει από τον αντίστοιχο ενδογενή ημιαγωγό, αν μερικά από τα άτομά του αντικατασταθούν από άτομα άλλου υλικού με μεγαλύτερο σθένος. Για παράδειγμα, αν μερικά άτομα του κρυσταλλικού πυριτίου Si, τα οποία χαρακτηρίζονται από σθένος 4, αντικατασταθούν με άτομα αρσενικού As, με σθένος 5, τότε δημιουργείται ο ημιαγωγός τύπου n του πυριτίου. Η αντικατάσταση αυτή έχει ως αποτέλεσμα να μένει ένα ηλεκτρόνιο ανά άτομο πρόσμειξης μη συμμετέχον σε δεσμό και το οποίο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος εγκαταλείπει το άτομο του As και μένει ελεύθερο. Έτσι, ο ημιαγωγός τύπου n περιέχει περισσότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια σε σχέση με τον ενδογενή. Τα άτομα της πεντασθενούς πρόσμειξης ονομάζονται δότες.



**Εικόνα 3: Πυριτίο τύπου n. (α) Συντακτικός τύπος. (β) Ενεργειακές ζώνες [27].**

Οι ηλεκτρονικές στάθμες των ατόμων των δοτών βρίσκονται λίγο κάτω από τον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας ( $E_D$ , D: Donors), κατά περίπου 50 meV, αφού με αυτό το ποσό ενέργειας τα ηλεκτρόνια των σταθμών αυτών γίνονται «ελεύθερα» στο εσωτερικό του υλικού [27].

Αντίστοιχα, ο ημιαγωγός τύπου p δημιουργείται αν μερικά από τα άτομα του κύριου υλικού αντικατασταθούν από άτομα μικρότερου σθένους (π.χ. Βόριο B, Γάλλιο Ga, Ίνδιο In). Παραδείγματος χάρη με αντικατάσταση ενός ατόμου πυριτίου Si, με ένα άτομο βορίου B, το οποίο έχει σθένος 3, δημιουργείται υλικό στο οποίο υπάρχουν άτομα που μπορούν να δεχτούν ένα ηλεκτρόνιο, προκειμένου να συμπληρωθεί ο ελεύθερος δεσμός. Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται μια οπή.



**Εικόνα 4: Πυρίτιο τύπου p. (α) Συντακτικός τύπος. (β) Ενεργειακές ζώνες [27].**

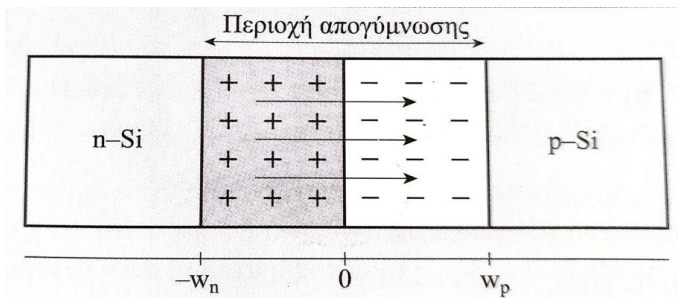
Από τα γειτονικά άτομα Si, στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, αποσπάται κάποιο από τα ηλεκτρόνια σθένους και αποδίδοντας αντίστοιχα μικρή ενέργεια με τους δότες, μεταβαίνει για κάλυψη του ελεύθερου δεσμού στο βόριο. Στη συνέχεια, η κάλυψη του δημιουργούμενου κενού δεσμού στο άτομο του Si, γίνεται με μεταπήδηση ενός ηλεκτρονίου «σθένους» από άλλο άτομο Si. Άρα η εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου, θέτει μερικά από τα ηλεκτρόνια σθένους σε κίνηση, η οποία ισοδυναμεί με κίνηση της οπής προς την αντίθετη κατεύθυνση. Τα άτομα των προσμείξεων αυτών ονομάζονται αποδέκτες (acceptors).

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, λοιπόν, οι ηλεκτρικοί φορείς ενός ημιαγωγού που μπορούν να συμβάλουν σε ρεύμα είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας και οι οπές της ζώνης σθένους.

#### 2.1.3.4 Επαφή ημιαγωγών p-n

Όταν δημιουργηθεί επαφή μεταξύ δύο ημιαγωγών, τύπου p και n αντίστοιχα, του ίδιου κυρίως υλικού, π.χ. Si, τότε, ηλεκτρόνια από τον ημιαγωγό n-Si μεταβαίνουν με διάχυση (diffusion) στον ημιαγωγό p-Si. Αυτό σημαίνει ότι στο τμήμα n-Si κι εκεί από όπου έφυγαν τα ηλεκτρόνια, παραμένουν θετικά φορτισμένα ιόντα. Ομοίως, οπές του χώρου p περνούν, με διάχυση, στην απέναντι μεριά αφήνοντας ακάλυπτα τα αντίστοιχα αρνητικά ιόντα του χώρου τους. Η μετακίνηση αυτή έχει ως αποτέλεσμα να παραμείνουν ιόντα στις γειτονικές περιοχές, εκατέρωθεν (δεξιά και αριστερά) της μεταλλουργικής επαφής. Αρνητικά ιόντα σε μέρος της περιοχής του ημιαγωγού τύπου p και θετικά σε μέρος της περιοχής του ημιαγωγού τύπου n. έτσι, δημιουργείται η περιοχή απογύμνωσης (depletion region), δηλαδή περιοχή απογυμνωμένη από ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές (ή περιοχή φορτίων χώρου).

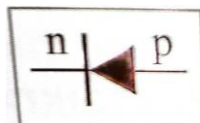




**Εικόνα 5: Επαφή ημιαγωγών p-n. Διακρίνεται η περιοχή απογύμνωσης δεξιά και αριστερά της μεταλλουργικής επαφής. Με  $w_n$  συμβολίζεται το μήκος απογύμνωσης στην περιοχή n και με  $w_p$  συμβολίζεται το μήκος απογύμνωσης στην περιοχή p [27].**

Η συγκεκριμένη διάταξη ονομάζεται ημιαγωγική επαφή p-n ή δίοδος επαφής και το βασικό ηλεκτρικό της χαρακτηριστικό είναι πως, όταν στα άκρα της εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση κατά τη μία ή την άλλη φορά, άγει ηλεκτρικό ρεύμα με χαρακτηριστικά διαφορετική ένταση σε κάθε περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση που πολώνεται κατά την ορθή φορά (forward bias), όταν δηλαδή ο θετικός πόλος της πηγής συνεχούς τάσεως συνδέεται με τον ημιαγωγό τύπου p κι ο αρνητικός πόλος με τη μεριά του ημιαγωγού τύπου n, τότε αυξανόμενης της εφαρμοζόμενης τάσης το ρεύμα παίρνει δυσανάλογα μεγάλες τιμές [27]. Κατά την πόλωση με ανάστροφη φορά (reverse bias), το ρεύμα παίρνει μικρότερες τιμές έντασης, συγκριτικά με την προηγούμενη κατάσταση, παρουσιάζοντας μια σχεδόν σταθερή τιμή, δηλαδή σχεδόν ανεξάρτητη της ανάστροφης ηλεκτρικής τάσης.

Η ορθή τάση δημιουργεί πεδίο αντίρροπο του πεδίου της περιοχής απογύμνωσης, ελαττώνοντας το συνολικό πεδίο (φραγμό) και επιτρέποντας το πέρασμά του από περισσότερους φορείς πλειονότητας (ρεύμα διάχυσης). Ενώ, κατά την ανάστροφη πόλωση, το επιβαλλόμενο πεδίο αυξάνει το ολικό πεδίο στην περιοχή απογύμνωσης, με αποτέλεσμα να αυξάνει το φραγμό για τους ηλεκτρικούς φορείς και κατ' επέκταση το ρεύμα να ελαττώνεται έντονα. Η συμπεριφορά αυτή δικαιολογεί τη χρησιμοποίηση της διάταξης (δίοδος επαφής ημιαγωγών p-n) ως στοιχείο που επιτρέπει τη δίοδο ρεύματος, βασικά, προς μία μόνο κατεύθυνση, την κατεύθυνση που ορίζει η σύνδεσή της κατά την ορθή φορά.

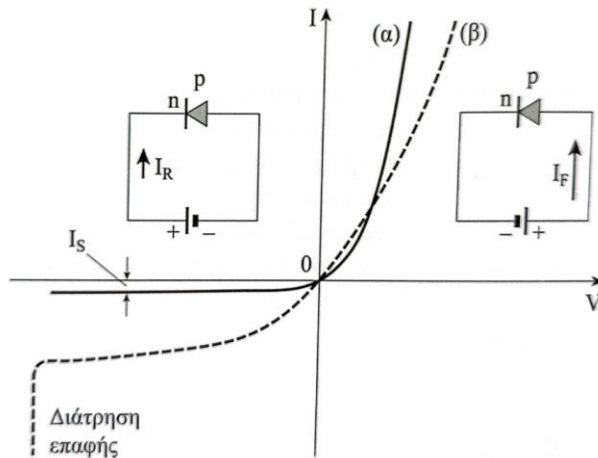


**Εικόνα 6: Κυκλωματικό ηλεκτρολογικό σύμβολο δίοδου επαφής ημιαγωγών [27].**

Τα ηλεκτρόνια στην περιοχή τύπου n αποτελούν τους φορείς πλειονότητας. Αντίθετα, οι φορείς αντίθετου προσήμου, που δημιουργήθηκαν θερμικά, σε κάθε περιοχή ή κατά τη διάχυση των φορέων πλειονότητας προς τους απέναντι χώρους, ονομάζονται φορείς μειονότητας. Στην περιοχή τύπου p οι οπές αποτελούν τους φορείς πλειονότητας και τα

ηλεκτρόνια που δημιουργήθηκαν ή εκχύθηκαν εκεί, αποτελούν τους φορείς μειονότητας. Τα αντίστοιχα ισχύουν για την περιοχή τύπου n.

Στην επόμενη εικόνα δίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη τάσης – ρεύματος μιας διόδου p-n σε ορθή και ανάστροφη πόλωση.



**Εικόνα 7:** Ιδανική Χαρακτηριστική καμπύλη I-V σε ορθή (αριστερά) και ανάστροφη (δεξιά) πόλωση. Με διακεκομμένη φαίνεται η πραγματική ηλεκτρική συμπεριφορά της επαφής p-n [27].

## 2.2 Ιστορική αναδρομή Φ/Β

Η ανακάλυψη του φωτοβολταϊκού φαινομένου αποδίδεται στον Alexandre-Edmund Becquerel (1839) και βασίστηκε στην παρατήρηση ότι το ηλεκτρικό ρεύμα προκύπτει από χημικές αντιδράσεις που σχετίζονται με το φως [2]. Αργότερα, το 1873, η παρατήρηση του Smith για την ύπαρξη φωτοαγωγιμότητας σε στερεό σελήνιο οδήγησε στην ανακάλυψη του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε μία συσκευή καθαρά στερεής κατάστασης από τους Adams και Day, οι οποίοι παρατήρησαν την ύπαρξη φωτοδυναμικού σε μία ράβδο σεληνίου το 1877 [2], [3]. Η πρώτη φωτοβολταϊκή συσκευή που δημιουργήθηκε ήταν ένα φωτόμετρο, το οποίο αποτελούνταν από ένα λεπτό στρώμα σεληνίου τοποθετημένο ανάμεσα σε μια σιδερένια πλάκα βάσης και σε ένα ημιδιαφανές στρώμα χρυσού στο επάνω μέρος. Η συγκεκριμένη συσκευή κατασκευάστηκε από τον Fritts το 1883. Τέτοιου είδους φωτόμετρα, δηλαδή με βάση το σελήνιο, βγήκαν στην αγορά στη Γερμανία τη δεκαετία του 1930, ενώ φωτοανιχνευτές άμορφου σεληνίου παρουσιάζουν ενδιαφέρον ακόμη και σήμερα σε εφαρμογές απεικόνισης στην ιατρική [3]. Στα τέλη της δεκαετίας του 1940 κατασκευάστηκαν οι πρώτες συσκευές στερεάς κατάστασης, οι οποίες άνοιξαν το δρόμο για την κατασκευή των πρώτων ηλιακών κυψελών πυριτίου με απόδοση 6%. Η ανάπτυξη των πρώτων κυττάρων πυριτίου αποτέλεσε καθοριστικό βήμα για την απαρχή των ηλιακών τεχνολογιών, καθώς αντιπροσώπευε τη μονάδα μετατροπής ισχύος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος με πρακτικές, όμως, συνέπειες και επιπτώσεις [2]. Προφανώς πολλοί

ερευνητές συνέβαλαν σε κάποιο βαθμό στις διαπιστώσεις και στην εξέλιξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται με χρονολογική σειρά οι σημαντικότερες ημερομηνίες που σχετίζονται με την ανάπτυξη και εξέλιξη των φωτοβολταϊκών.

**Πίνακας 1: Σημαντικές ημερομηνίες για την εξέλιξη των φωτοβολταϊκών [2].**

Επιστήμονες και ανακαλύψεις	Έτος
Η ανακάλυψη του Φ/Β φαινομένου από τον Becquerel	1839
Η παρατήρηση του Φ/Β φαινομένου στο σελήνιο από τους Adams και Day	1877
Ο Planck υποστηρίζει την κβαντική φύση του φωτός	1900
Ο Wilson προτείνει την κβαντική θεωρία των στερεών	1930
Οι Mott και Schottky αναπτύσσουν τη θεωρία του ανορθωτή στερεάς κατάστασης (δίοδος)	1940
Οι Bardeen, Brattain και Schottky εφευρίσκουν το τρανζίστορ	1949
Οι Charpin, Fuller και Pearson ανακοινώνουν το πρώτο ηλιακό κύτταρο πυριτίου με απόδοση 6%	1954
Ο Reynolds κ.ά. υπογραμμίζουν το ηλιακό κύτταρο θειούχου καδμίου	1954
Πρώτη χρήση ηλιακού κυττάρου στην τροχιά του δορυφόρου Vanguard 1	1958

Μέχρι τότε το κόστος παραγωγής των Φ/Β ήταν πολύ υψηλό για να αποτελέσουν μια ανταγωνιστική μέθοδο παραγωγής ενέργειας. Αργότερα, κατά τις δεκαετίες του 1970 και 1980, η εξέλιξη της τεχνολογίας συνέβαλλε στη μείωση του κόστους παραγωγής με αποτέλεσμα φωτοβολταϊκά στοιχεία να ξεκινήσουν να βρίσκουν εφαρμογή σε συστήματα χαμηλής ισχύος, όπως η φόρτιση μπαταριών ή η ναυσιπλοΐα. Τις τελευταίες δεκαετίες, επικρατεί ιδιαίτερη άνθιση στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων που έχει ως αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση του κόστους παραγωγής, η οποία συνεπάγεται την ευρεία εφαρμογή τους σε επίγειες εφαρμογές για παροχή ενέργειας για φωτισμό, ηλεκτρικές συσκευές κ.ά.

## 2.3 Φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια

### 2.3.1 Απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Γενικά, η απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέσα σε ένα υλικό οφείλεται στη διέγερση των ταλαντευόμενων ηλεκτρικών φορτίων του υλικού (ηλεκτρόνια – πυρήνες του υλικού) σε ανώτερες ενεργειακές καταστάσεις.

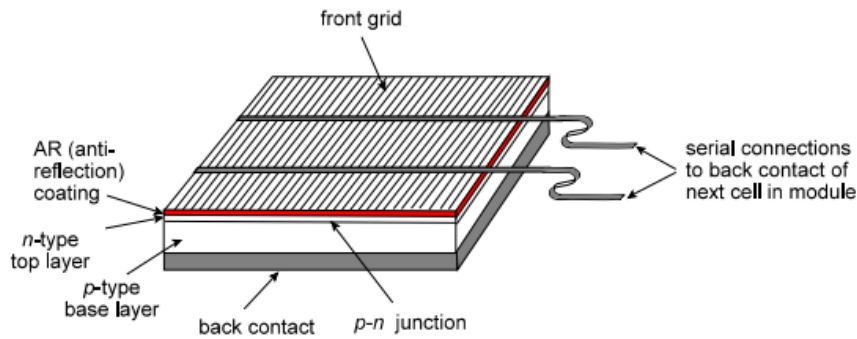
Στην περίπτωση των ημιαγωγών, μια πολύ σημαντική απορρόφηση μπορεί να γίνει από τα ηλεκτρόνια σθένους του υλικού. Η απορρόφηση αυτή καθορίζεται από το μέγεθος της ενέργειας των φωτονίων σε σχέση με το ενεργειακό χάσμα  $E_g$  του ημιαγωγού. Αν η ενέργεια του φωτονίου είναι μικρότερη του ενεργειακού χάσματος, τότε το φωτόνιο δεν απορροφάται. Στην περίπτωση που η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη ή ίση με αυτή του ενεργειακού χάσματος, τότε το φωτόνιο απορροφάται από κάποιο ηλεκτρόνιο σθένους, το οποίο καθίσταται «ελεύθερο» μέσα στον ημιαγωγό, αφήνοντας ακάλυπτο δεσμό, την οπή. Έτσι, το ηλεκτρόνιο ανεβαίνει ενεργειακά στη ζώνη αγωγιμότητας. Όταν, μάλιστα, η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη της  $E_g$ , τότε η δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου – οπής συνοδεύεται από θέρμανση του υλικού. Το επιπλέον ποσό ενέργειας αποδίδεται από τα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας και τις οπές της ζώνης σθένους στο πλέγμα του υλικού, προκαλώντας την αύξηση της θερμοκρασίας του.

### 2.3.2 Φωτοαγωγιμότητα

Η αγωγιμότητα σκότους (απουσία φωτός) ενός ημιαγωγού είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη των μετάλλων, όπως ήδη έχει αναφερθεί. Όταν ο ημιαγωγός αυτός φωτιστεί, τότε οι φορείς ρεύματος, δηλαδή τα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας και οι οπές της ζώνης σθένους, αυξάνονται και συνεπώς αυξάνεται και η αγωγιμότητά του. Η αυξημένη αγωγιμότητα του ημιαγωγού με την επίδραση του φωτός ονομάζεται φωτοαγωγιμότητα. Παραδείγματος χάριν, η φωτοαγωγιμότητα κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) με τυπικό ηλιακό φωτισμό πυκνότητας ισχύος  $1 \frac{kW}{m^2}$ , είναι 7 ή 8 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη της αγωγιμότητας σκότους [27].

## 2.4 Το Φ/Β φαινόμενο – Αρχή λειτουργίας Φ/Β

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, που παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Becquerel το 1839, είναι ένας τρόπος μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Αυτό το φαινόμενο θα μπορούσε γενικά να οριστεί ως η εμφάνιση ηλεκτρικού δυναμικού μεταξύ δύο ηλεκτροδίων που είναι συνδεδεμένα σε ένα στερεό ή υγρό σύστημα όταν σε αυτό προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία [4]. Όλες οι φωτοβολταϊκές συσκευές λειτουργούν πρακτικά με τον ίδιο τρόπο. Περιέχουν μία δίοδο p-n μέσα σε έναν ημιαγωγό κατά μήκος του οποίου εμφανίζεται ηλεκτρικό δυναμικό. Τέτοιου είδους συσκευές ονομάζονται ηλιακά κύτταρα. Στην *Εικόνα 8* φαίνεται ένα τυπικό ηλιακό κύτταρο.



**Εικόνα 8: Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ηλιακού κυττάρου  $pn$  [3].**

Εντελώς επιγραμματικά αναφέρεται ότι, «για να προκύψει το Φ/Β φαινόμενο, απαιτείται η δημιουργία διάταξης δύο φωτοαγωγίμων υλικών σε επαφή και έκθεσή της στο φως» [27].

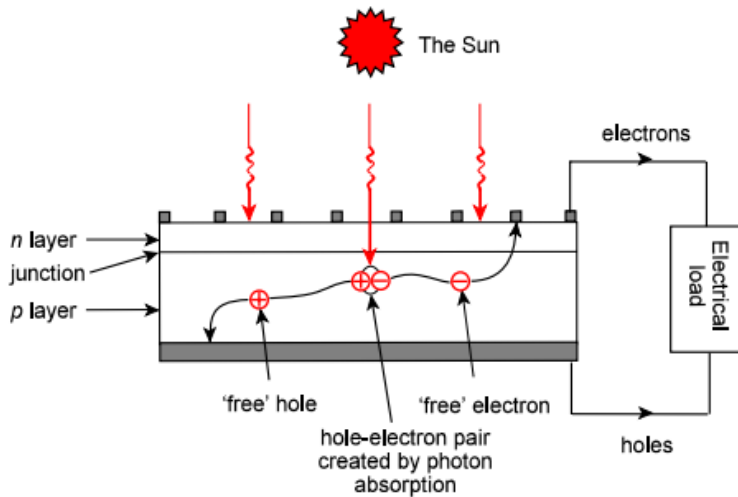
Πιο αναλυτικά, ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών δημιουργούνται σε όλο το χώρο των ημιαγωγών που βρίσκονται σε επαφή με δύο βασικούς τρόπους: (α) θερμικά (εξαιτίας του ότι η διάταξη βρίσκεται σε ορισμένη θερμοκρασία), (β) με τη δράση εξωτερικού φωτισμού κατάλληλου μήκους κύματος.

Τα φωτοδημιουργούμενα ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών, μέσα και κοντά στην περιοχή επαφής της διάταξης, ωθούνται από το υφιστάμενο εκεί ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, στους χώρους όπου υπερτερούν οι όμοιοί τους ηλεκτρικοί φορείς (φορείς πλειονότητας του χώρου). Η συνεχής κίνηση των φωτοδημιουργούμενων φορέων, με την επίδραση του ισχυρού πεδίου, αποτελεί ρεύμα με φορά αυτή του ενδογενούς πεδίου, δηλαδή από τον ημιαγωγό τύπου  $n$  στον ημιαγωγό τύπου  $p$ . Το φωτοδημιουργούμενο ηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται φωτόρευμα και συμβολίζεται με  $i_L$ . Το ισχυρό φωτόρευμα διατηρεί τις συγκεντρώσεις των φορέων πλειονότητας σε κάθε πλευρά, σε αρκετά υψηλότερα επίπεδα από ότι κατά την απουσία φωτός, προσδίδοντας στη διάταξη χαρακτηριστικά πηγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σημειώνεται ότι το φωτόρευμα,  $i_L$ , είναι ευθέως ανάλογο της πυκνότητας ισχύος της ΗΜ ακτινοβολίας που προσπίπτει στην ημιαγωγική διάταξη καθώς και του εμβαδού της επαφής των δύο ημιαγωγών.

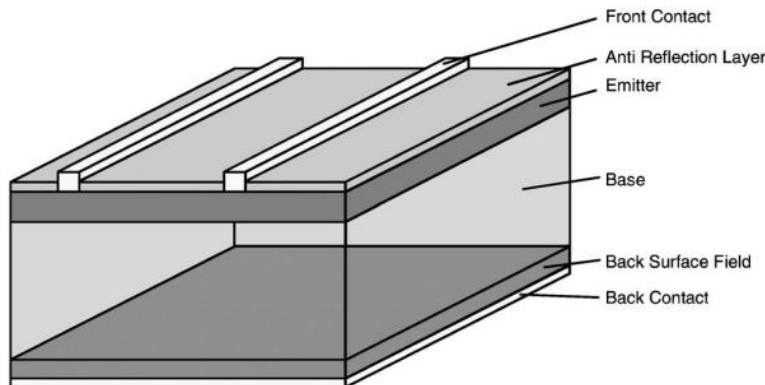
Οι αυξημένες πυκνότητες των φορέων πλειονότητας, στις αντίστοιχες περιοχές, λόγω του φωτορεύματος, έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος διάχυσης,  $i_D$ , των φορέων αυτών προς τις αντίθετες περιοχές, όπου οι φορείς αυτοί αποτελούν μειονότητα. Το ρεύμα διάχυσης είναι ισχυρό και αποτελείται από τις δύο συνιστώσες (ρεύμα ηλεκτρονίων και οπών), ενώ η φορά του είναι από τον ημιαγωγό τύπου  $p$  προς τον ημιαγωγό τύπου  $n$ .

Τα υλικά των ημιαγωγών χρειάζεται να έχουν υψηλή ικανότητα απορρόφησης του ηλιακού φάσματος [4]. Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μέσω των φωτοβολταϊκών βασίζεται στη συμπεριφορά των ηλεκτρονίων εντός του ημιαγωγού, η οποία προκύπτει από την ύπαρξη δύο ενεργειακών ζωνών ηλεκτρονίων: της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας. Η ενεργειακή διαφορά μεταξύ του πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας και της

κορυφής της ζώνης σθένους, ονομάζεται ενεργειακό χάσμα,  $E_g$  [5]. Όταν τα κβάντα φωτός, δηλαδή τα φωτόνια, που προσπίπτουν έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα, τότε δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών, τα οποία καλούνται εξιτόνια. Το φως απορροφάται από διεγερμένα ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους του ημιαγωγού προς τη ζώνη αγωγιμότητας σε όλο τον όγκο της διασταύρωσης p-n. Όταν λειτουργούν ως ηλιακό κύτταρο, τα ηλεκτρόνια που διεγείρονται στη ζώνη αγωγιμότητας ρέουν από την πλευρά τύπου p στην πλευρά τύπου n, ενώ οι οπές που αφήνονται πίσω στη ζώνη σθένους, ρέουν προς την αντίθετη κατεύθυνση. Έτσι, ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους προωθούνται στη ζώνη αγωγιμότητας και γρήγορα τα ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών διασπώνται σε ελεύθερους φορείς και κινούμενες οπές που κινούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους. Εάν αποτραπεί ο ανασυνδυασμός τους, φτάνουν στη δίοδο όπου διαχωρίζονται μέσω του ηλεκτρικού πεδίου, το οποίο «σαρώνει» ηλεκτρόνια από την p στην n μεριά και οπές από την n στην p μεριά [3].



Εικόνα 9: Δημιουργία και κίνηση ελεύθερων φορέων σε κύτταρο με δίοδο pn [3].

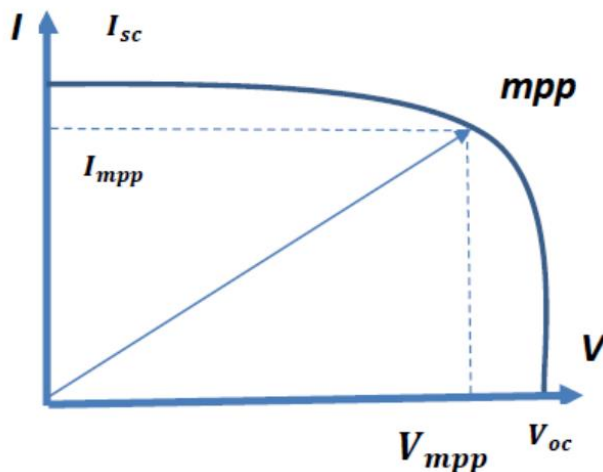


Εικόνα 10: Τυπικό ηλιακό κύτταρο [4].

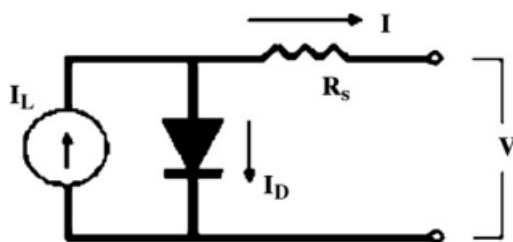
Μία πολύ σημαντική παράμετρος για το σχεδιασμό ενός Φ/Β συστήματος είναι η θερμοκρασία της διάταξης. Έχει αποδειχθεί ότι για κάθε βαθμό κελσίου κατά τον οποίο αυξάνεται η θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών κυττάρων, επέρχεται μείωση της παραγόμενης ισχύος της διάταξης κατά 0.5%. Επομένως, επιδιώκεται η μείωση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών κυττάρων, η οποία οδηγεί σε αυξημένο βαθμό απόδοσης αλλά και χαμηλότερες θερμικές καταπονήσεις και φθορές των μονάδων. Περισσότερα για την επίδραση της θερμοκρασίας στα Φ/Β θα αναφερθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Συνοψίζοντας, η μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής (ΗΜ) ενέργειας, που απορροφάται στο εσωτερικό μιας διάταξης υλικών σε επαφή, σε ηλεκτρική, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η διάταξη ονομάζεται φωτοβολταϊκό στοιχείο. Το Φ/Β φαινόμενο είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού δύο διαφορετικών εσωτερικών φαινομένων. Πρώτον, της φωτοδημιουργίας «ελεύθερων» ηλεκτρικών φορέων στο εσωτερικό των ημιαγωγών (φωτοαγωγιμότητα) και δεύτερον, της δημιουργίας εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή της επαφής δύο ημιαγωγών.

Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να παρασταθεί η χαρακτηριστική καμπύλη τάσης - ρεύματος για ένα Φ/Β στοιχείο, καθώς και το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα της διάταξης, που ακολουθούν στις επόμενες εικόνες.



Εικόνα 11: Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης - ρεύματος για ηλιακό κύτταρο [5].



Εικόνα 12: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ηλιακού κυττάρου [2].



## 2.5 Παράγων πλήρωσης και απόδοση Φ/Β

Το, σχηματισμένο με διακεκομμένες παραλληλόγραμμο εντός της καμπύλης I-V, της Εικόνας 11, με πλευρές  $I_{mpp}$  και  $V_{mpp}$ , έχει εμβαδόν ίσο με τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ ( $mpp$ : maximum power output) από το Φ/Β στοιχείο. Το πηλίκο του εμβαδού αυτού προς το εμβαδόν ενός άλλου παραλληλογράμμου με πλευρές  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$ , που περιγράφει την ιδανική συμπεριφορά του Φ/Β στοιχείου, ως πηγή σταθερού ρεύματος, λέγεται **παράγων πλήρωσης FF (Fill Factor)**. Οι τιμές του καθορίζονται από το υλικό του Φ/Β στοιχείου και τις συνθήκες. Λαμβάνει τιμές από 0 έως 1. Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι οι τιμές του FF, τόσο περισσότερο η λειτουργία του Φ/Β στοιχείου πλησιάζει την ιδανική συμπεριφορά της πηγής σταθερού ρεύματος, στην περιοχή τάσεων 0 –  $V_{oc}$ . Τυπικές τιμές 0.7 έως 0.9 χαρακτηρίζουν Φ/Β στοιχεία με αποδεκτή έως πολύ καλή ενεργειακή απόδοση [27].

$$FF = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (1)$$

Όπου  $I_{sc}$  είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης,  $V_{oc}$  η τάση ανοιχτού κυκλώματος,  $I_{mpp}$  το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος και  $V_{mpp}$  η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Το πηλίκο της ηλεκτρικής ισχύος  $P_{mpp}$ , που αποδίδεται από το Φ/Β στοιχείο στο αντίστοιχο σημείο μέγιστης ισχύος, προς την προσπίπτουσα ισχύ ακτινοβολίας  $P_{in}$ , καθορίζει την **απόδοση** της ενεργειακής μετατροπής,  $\eta_c$ , του στοιχείου.

$$\eta_c = \frac{P_{mpp}}{P_{in}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{E \cdot S} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{E \cdot S} \quad (2)$$

Όπου  $E$  είναι η πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ΗΜ ακτινοβολίας και  $S$  το εμβαδό ενός Φ/Β στοιχείου.

Η απόδοση του Φ/Β στοιχείου εξαρτάται από τον ημιαγωγό που χρησιμοποιείται, αυξάνεται με αύξηση της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας,  $E$  (διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία της κυψελίδας) και μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Η περισσότερο αποδοτική περιοχή ενεργειακού χάσματος είναι περί την τιμή 1.5 eV [27].

### 2.5.1 Εξάρτηση από τη θερμοκρασία

Η ονομαστική τιμή της απόδοσης καθορίζεται κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC) και η οποία συμβολίζεται με  $\eta_{c,STC}$ . Σε συνθήκες διαφορετικές από τις πρότυπες, η τιμή του προσδιορίζεται από τη διαφορά  $\theta_c - \theta_{STC}$ , των θερμοκρασιών της κυψελίδας και της θερμοκρασίας αναφοράς (STC, 25 °C) και από την πυκνότητα ισχύος,  $E$ , της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Η εξάρτηση αυτή, σε κάθετη πρόσπτωση της ακτινοβολίας, προκύπτει από τη σχέση:

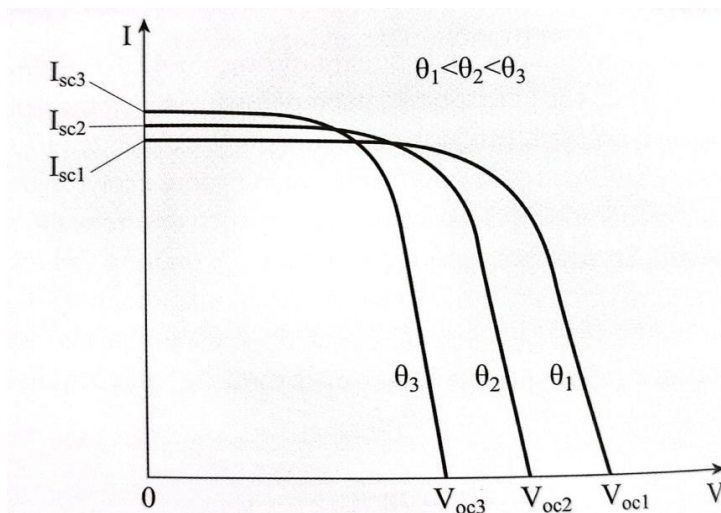
$$\eta_c = \eta_T \cdot \eta_{c,STC} \quad (3)$$



Όπου ο παράγων  $\eta_T$ , που ονομάζεται παράγων θερμοκρασίας του Φ/Β στοιχείου, εκφράζει την επίδραση της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας της κυψελίδας σε σχέση με τη θερμοκρασία αναφοράς (25 °C), στην απόδοση του στοιχείου.

Όπως παρατηρείται στην *Εικόνα 13*, το ρεύμα βραχυκύκλωσης,  $I_{sc}$ , αυξάνεται ελαφρώς με αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό συμβαίνει καθώς αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται αύξηση του μήκους διάχυσης των φωτοδημιουργούμενων φορέων μειονότητας. Δηλαδή αυξάνεται το πλήθος των φορέων που καταφέρνουν να φτάσουν στους «απέναντι» χώρους της διάταξης, όπου οι φορείς αυτοί αποτελούν την πλειονότητα.

Αντίθετα, η τάση ανοικτού κυκλώματος,  $V_{oc}$ , μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας και μάλιστα η ποσοστιαία ελάττωσή της, ανά βαθμό θερμοκρασίας, είναι σχεδόν μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη της αντίστοιχης αύξησης του ρεύματος βραχυκύκλωσης της κυψελίδας. Αιτία αποτελεί η ισχυρή εξάρτηση του ρεύματος κόρου της διόδου από τη θερμοκρασία [27].



**Εικόνα 13:** Μεταβολή της καμπύλης I-V με την αύξηση της θερμοκρασίας [27].

## 2.6 Ανασκόπηση τεχνολογιών Φ/Β

Στα πλαίσια της δημιουργίας αποδοτικότερων Φ/Β συστημάτων με χαμηλότερο κόστος παραγωγής έχουν εφευρεθεί διάφορες τεχνολογίες. Οι τεχνολογίες με βάση το πυρίτιο (Si) είναι οι πιο διαδεδομένες και ευρέως χρησιμοποιούμενες, καθώς απασχολούν περίπου το 90% της παγκόσμιας παραγωγής φωτοβολταϊκών. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλες τεχνολογίες οι οποίες εφαρμόζονται, καθώς και αναδυόμενες τεχνολογίες που θα απασχολήσουν στο μέλλον. Στις υπό - ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζεται η κάθε τεχνολογία Φ/Β αναλυτικά.

### 2.6.1 Τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si)

Τα Φ/Β πρώτης γενιάς είναι κατασκευασμένα από κρυσταλλικές δομές πυριτίου. Οι τεχνολογίες με βάση το πυρίτιο, παρόλο που είναι οι παλαιότερες, δεν είναι καθόλου απαρχαιωμένες, αλλά συνεχίζουν να αναπτύσσονται με στόχο καλύτερες επιδόσεις. Το πυρίτιο, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό στη βιομηχανία των Φ/Β. Η κυριαρχία του στην αγορά, σε ποσοστό περίπου 90%, οφείλεται στους παρακάτω παράγοντες:

- Μπορεί να βρεθεί πολύ εύκολα στη φύση καθώς είναι το δεύτερο σε αφθονία υλικό που υπάρχει στον πλανήτη μετά το οξυγόνο. Το διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$  – άμμος) και ο χαλαζίτης αποτελούν το 28% του φλοιού της γης.
- Χαρακτηρίζεται ως υλικό με υψηλή καθαρότητα, ενώ είναι εύκολη η μετατροπή του στην κρυσταλλική του μορφή [6].
- Τα Φ/Β στοιχεία πυριτίου έχουν τη δυνατότητα να ανταπεξέρχονται σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και αρκετά δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος, καθώς το πυρίτιο έχει τη δυνατότητα να διατηρεί τις ηλεκτρικές του ιδιότητες μέχρι τους  $125^\circ\text{C}$ .
- Στη ραγδαία ανάπτυξη των Φ/Β τα τελευταία χρόνια συνέβαλε η ήδη ανεπτυγμένη τεχνολογία στον τομέα της ηλεκτρονικής (υπολογιστές, τηλεοράσεις), η οποία βασίζεται στην επεξεργασία πυριτίου [7].

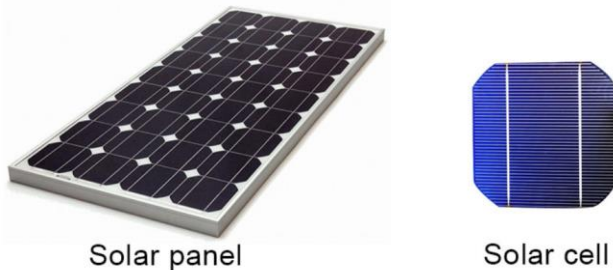
#### 2.6.1.1 Φ/Β κύτταρα μονοκρυσταλλικού πυριτίου (sc-Si)

Τα Φ/Β αυτού του τύπου είναι τα πιο συνηθισμένα στην αγορά σε ποσοστό που αγγίζει το 80%, χάρη στην απόδοσή τους και το συμφέρον κόστος παραγωγής. Η λειτουργία τους συνίσταται στη χρήση διόδων p-n με βάση το κρυσταλλικό πυρίτιο. Για να κατασκευαστεί μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, ένας σπόρος (ingot) πυριτίου καλλιεργείται με τη μέθοδο Czochralski (CZ). Σύμφωνα με τη μέθοδο CZ, η οποία είναι μια τεχνολογία ανάπτυξης κρυστάλλων, μικρό τμήμα του κρυσταλλικού υλικού (c-Si) χρησιμοποιείται ως φύτρο κρυστάλλωσης, τιθέμενο σε επαφή με την επιφάνεια τήγματος του ίδιου κρυσταλλικού υλικού και στη συνέχεια ανασύρεται πολύ αργά, με ταχύτητα μερικών mm/min. Κρύσταλλοι από το τήγμα προσκολλώνται προσανατολιζόμενοι στο φύτρο και έτσι πίσω του σχηματίζεται ένας μονοκρύσταλλος, σε κυλινδρική μορφή, μεγάλης σχετικά διαμέτρου (~6 in) και μήκους περίπου 1 m. Μετά το πέρας της εργασίας, ο κύλινδρος κόβεται σε φέτες (wafers) κατάλληλου πάχους, ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζονται. Στην περίπτωση παρασκευής Φ/Β στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου οι φέτες αυτές συνήθως έχουν πάχος περί τα 300  $\mu\text{m}$  [27]. Η μέθοδος ονομάστηκε έτσι προς τιμήν του Πολωνού επιστήμονα Jan Czochralski, ο οποίος την ανέπτυξε το 1916.

Στο υλικό του πυριτίου η ποσότητα της ενέργειας που παράγεται από τα φωτόνια μειώνεται σε μεγαλύτερα μήκη κύματος, οπότε η αύξηση της απόδοσης που επιχειρείται περιορίζεται

από την παραγόμενη ενέργεια των φωτονίων. Ακόμα, η ακτινοβολία σε μεγαλύτερα μήκη κύματος οδηγεί σε θερμική διάχυση προκαλώντας ουσιαστικά τη θέρμανση του Φ/Β κυττάρου, με αποτέλεσμα τη μείωση στην απόδοσή του. Η υψηλότερη απόδοση ηλιακού κυττάρου πυριτίου που έχει καταγραφεί, σε συνθήκες εργαστηρίου, αγγίζει το 24.7%. Ωστόσο, σε πραγματική εφαρμογή προκύπτουν απώλειες λόγω του συνδυασμού αντιστάσεων ηλιακών κυττάρων, της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας και των διαθέσιμων μεταλλικών επαφών στο επάνω μέρος. Αφού κατασκευασθούν οι κρύσταλλοι πυριτίου, κόβονται σε λωρίδες πάχους 0.3 mm προς σχηματισμό μιας ηλιακής κυψέλης έντασης ρεύματος περίπου 35 mV / cm<sup>2</sup> επιφάνειας με δυναμικό 0.55 V σε πλήρη φωτισμό. Για ημιαγωγούς με βάση διαφορετικά υλικά, η ιδεατή απόδοση σε συνθήκες εργαστηρίου μπορεί να φτάσει και το 30%, ελάχιστα χαμηλότερη από το όριο που έχουν αποδείξει οι επιστήμονες Shockley-Queisser. Οι αποδόσεις των μονάδων, δηλαδή των Φ/Β διατάξεων, τείνουν πάντοτε να είναι μικρότερες από ότι η απόδοση απλού ηλιακού κυττάρου. Η απόδοσή τους με τη μορφή κυψελίδας κυμαίνεται στο 21% - 24% [27]. Πρόσφατα η εταιρία Sunpower ανακοίνωσε τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης Φ/Β διάταξης που έχει μετρηθεί και ισούται με 20.4%, ο οποίος μετρήθηκε από το Εθνικό Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (NREL) [2]. Το συγκεκριμένο πάνελ αναμένεται να έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, ενώ και η τιμή του είναι αρκετά συμβατή με άλλες υπάρχουσες πηγές. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η τεχνολογία επεξεργασίας ηλιακού πυριτίου παρουσιάζει πολλά κοινά σημεία με την μικροηλεκτρονική βιομηχανία. Οι πολύ σημαντικές βελτιώσεις στην επεξεργασία του πυριτίου για εφαρμογές μικροηλεκτρονικής, από τις οποίες προκύπτουν ηλιακά κύτταρα πυριτίου υψηλότερης απόδοσης, έχουν συμβάλει στο να καταστήσουν τις τεχνολογίες πυριτίου πιο ευνοϊκές. Το χρώμα τους είναι σκούρο μπλε.

### Monocrystalline



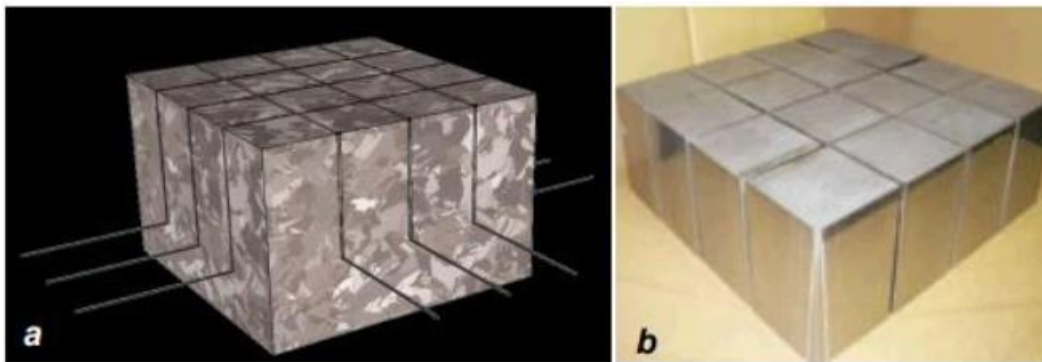
Εικόνα 14: Ηλιακό πάνελ (πλαίσιο) και ηλιακό κύτταρο μονοκρυσταλλικού πυριτίου [8].

#### 2.6.1.2 Φ/Β κύτταρα πολυκρυσταλλικού πυριτίου (mc-Si)

Στην προσπάθεια για μείωση του κόστους παραγωγής και αύξησης του ρυθμού της βιομηχανικής παραγωγής δημιουργήθηκε η ανάγκη για ανάπτυξη νέων τεχνικών κρυστάλλωσης. Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι αρκετά ελκυστική λόγω του χαμηλού κατασκευαστικού κόστους, παρόλο που ο βαθμός απόδοσης είναι ελαφρώς χαμηλότερος (15%) σε σχέση με τα κύτταρα μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Το βασικό πλεονέκτημα της μετατροπής κρυσταλλικών κυττάρων από μονοπυρίτιο σε πολυπυρίτιο είναι προκειμένου να μειωθούν τα ελαττώματα στην κρυσταλλική δομή.

Το πάχος των κυττάρων είναι επίσης 0.3 mm. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από την αντίστοιχη των μονοκρυσταλλικών κυττάρων, για αυτό και η τιμή τους είναι ελαφρώς χαμηλότερη. Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι οι εξής: α) η μέθοδος κατευθυντικής στερεοποίησης DS (directional solidification), β) η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου (χύτευση) και γ) η ηλεκτρομαγνητική χύτευση. Η πιο συνήθης μέθοδος παραγωγής πολυκρυσταλλικών κυττάρων είναι η μέθοδος της κατευθυντικής στερεοποίησης. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η διαδικασία ξεκινά με την τήξη του πολυκρυσταλλικού πυριτίου και τη στερεοποίησή του για να προσανατολίσει τους κρυστάλλους σε μια σταθερή κατεύθυνση. Η διαδικασία διαρκεί περίπου 50 ώρες. Αυτό που παράγεται είναι ορθογωνικά πλινθώματα από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, τα οποία στη συνέχεια τεμαχίζονται σε κομμάτια και τέλος σε μικρές λωρίδες (γκοφρέτες), όπως φαίνεται στην *Εικόνα 15*. Οι γκοφρέτες είναι γενικά τετράγωνα με πλευρές 15-17 cm. Η συγκεκριμένη τεχνική αναπτύχθηκε από την Evergreen Solar [2].

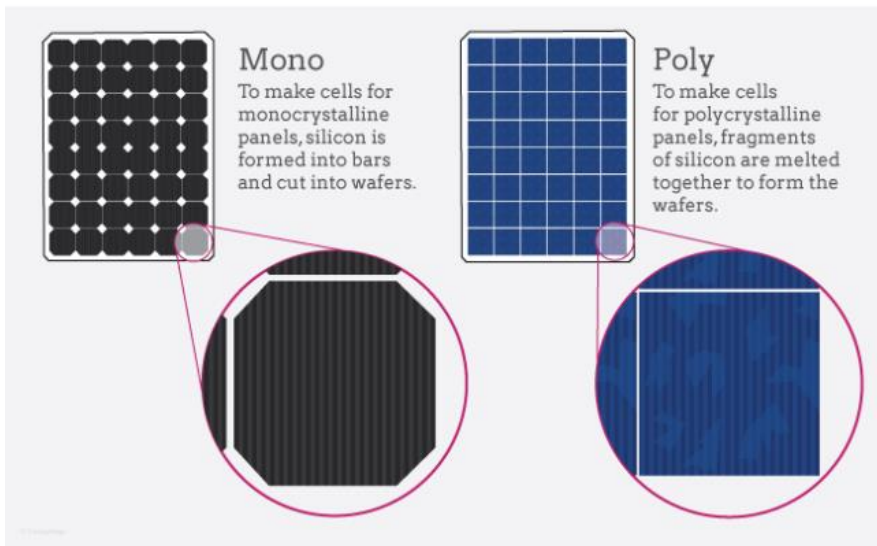
Οι μονοκρυσταλλικές περιοχές είναι ορατές και με γυμνό μάτι. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές δομές, τόσο υψηλότερος είναι και ο βαθμός απόδοσης για τα πολυκρυσταλλικά κελιά. Σε εργαστηριακές εφαρμογές για ηλιακά κύτταρα πολυκρυσταλλικού πυριτίου έχουν επιτευχθεί βαθμοί απόδοσης 20%, ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με βαθμό απόδοσης 13-15% για τα Φ/Β πλαίσια. Το κόστος παρασκευής τους είναι χαμηλότερο σε σχέση με το αντίστοιχο του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Το χρώμα τους είναι γαλάζιο [27].



**Εικόνα 15:** Τα μεγάλα πλινθώματα πριονίζονται σε μικρότερα τούβλα [9].



Εικόνα 16: Πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου [10].



Εικόνα 17: Μονοκρυσταλλικό vs Πολυκρυσταλλικό πλαίσιο [8].

### 2.6.2 Τεχνολογία λεπτού υμένα – Thin Film

Η τεχνολογία λεπτού υμένα είναι μια τεχνολογία που υπόσχεται μείωση του κόστους της Φ/Β διάταξης σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά Φ/Β, μέσω μείωσης του υλικού κατασκευής, χωρίς να θυσιάζεται η διάρκεια ζωής των κυττάρων. Σε αντίθεση με τις κρυσταλλικές μορφές ηλιακών κυψελών, όπου κομμάτια ημιαγωγών τοποθετούνται ανάμεσα σε γυάλινα πάνελ, τα πάνελ λεπτού υμένα δημιουργούνται με την εναπόθεση λεπτών στρωμάτων υλικού (π.χ. πυριτίου) σε υποστρώματα γυαλιού ή ανοξειδωτού χάλυβα.



Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου έγκειται στο γεγονός ότι το πάχος των εναποτιθέμενων στρωμάτων είναι μόλις μερικά μm, σε αντίθεση με τις κρυσταλλικές «γκοφρέτες» που τείνουν να έχουν πάχος μερικών εκατοντάδων μm. Έτσι, προκύπτει μείωση του κόστους κατασκευής λόγω της υψηλής απόδοσης της διαδικασίας εναπόθεσης, καθώς και χαμηλότερου κόστους υλικού και άρα χαμηλότερη τιμή τους στο εμπόριο.

Τεχνικά, τα λεπτότερα στρώματα έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερους βαθμούς απόδοσης της συγκεκριμένης τεχνολογίας σε σχέση με τις τεχνολογίες κρυσταλλικού πυριτίου, αφού υπάρχει λιγότερο υλικό (λεπτότερο στρώμα) διαθέσιμο προς απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Παρόλα αυτά, η δυνατότητα εναπόθεσης διαφόρων υλικών και κραμάτων επέτρεψε μεγάλη πρόοδο στην απόδοση. Επιπλέον, η ευελιξία και η θερμοκρασιακή στιβαρότητα των Φ/Β λεπτού υμένα οδήγησε σε σημαντική άνοδο της διάθεσής τους στην αγορά. Τα τελευταία χρόνια Φ/Β αυτής της τεχνολογίας έφτασαν να ξεπερνούν το 10% στην αγορά [2].

Σήμερα, η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την παρασκευή σύνθετων Φ/Β στοιχείων, με διαδοχικές ενώσεις δύο ή τριών στρωμάτων με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα, με σκοπό την αύξηση του αξιοποιήσιμου τμήματος του ηλιακού φάσματος. Το ιδιαίτερο κατασκευαστικό χαρακτηριστικό τους είναι η δυνατότητα δημιουργίας διαδοχικών Φ/Β στοιχείων σε μεγάλες επιφάνειες Φ/Β πλαισίων [27].

Τέσσερα είδη Φ/Β λεπτού υμένα χαρακτηρίζονται ως άξια αναφοράς στο εμπόριο και αναφέρονται παρακάτω. Ο συνδυασμός τους γίνεται έτσι ώστε να προκύπτει διάταξη με καλύτερη αξιοποίηση του ηλιακού φάσματος.

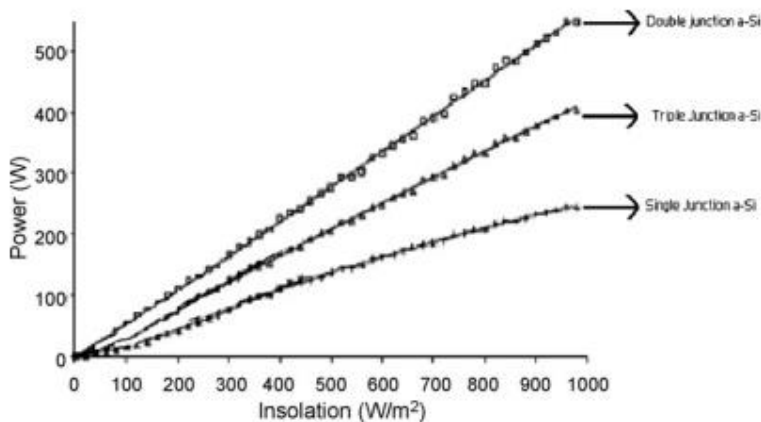
#### 2.6.2.1 Άμορφο πυρίτιο (a-Si)

Η τεχνολογία άμορφου πυριτίου είναι από τις πρώτες τεχνολογίες λεπτού υμένα που αναπτύχθηκαν. Η διαφορά σε σχέση με τις τεχνολογίες κρυσταλλικού πυριτίου συνίσταται στο ότι τα άτομα πυριτίου βρίσκονται ακαθόριστα τοποθετημένα μεταξύ τους. Αυτή η τυχαία ατομική δομή έχει σημαντική επίδραση στις ηλεκτρονικές ιδιότητες του υλικού, καθώς προκαλεί μεγαλύτερο ενεργειακό χάσμα (περίπου 1.7 eV) από το κρυσταλλικό πυρίτιο (1.1 eV). Το μεγαλύτερο διάκενο ζώνης επιτρέπει στα κύτταρα του άμορφου πυριτίου να απορροφούν ισχυρότερα το ορατό μέρος του ηλιακού φάσματος σε σχέση με το υπέρυθρο. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές της συγκεκριμένης τεχνολογίας με διαφορετικά χαρακτηριστικά και αποδόσεις.

- **Άμορφο πυρίτιο διπλής ή τριπλής διόδου (a-Si double or triple junction)**

Η μέγιστη απόδοση που έχει μετρηθεί για αυτή την κατηγορία είναι 12% σε συνθήκες εργαστηρίου. Οι μονάδες απλής διασταύρωσης a-Si υποβαθμίζονται με την έκθεσή τους στο ηλιακό φως και σταθεροποιούνται στο 4-8% [2]. Αυτή η πτώση οφείλεται στο φαινόμενο Staebler – Wronski που προκαλεί αλλαγές στις ιδιότητες του υδρογονοποιημένου άμορφου πυριτίου. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος και τη βελτίωση των αποδόσεων επιχειρήθηκε η δημιουργία συσκευών a-Si πολλαπλών

συνδέσεων – Εικόνα 18. Αυτή η βελτίωση συνδέεται με τη δομή σχεδίασης τέτοιων κυψελών, όπου συλλαμβάνεται ηλιακή ακτινοβολία από διαφορετικά μήκη κύματος (από μικρό μέχρι μεγάλο μήκος κύματος). Οι αποδόσεις τέτοιων τεχνολογιών κυμαίνονται περίπου στο 6-7% [2]. Ένα παράδειγμα τριών επαφών είναι τα Φ/Β στοιχεία που κατασκευάζονται από κράμα πυριτίου με άνθρακα και γερμάνιο: a-SiGe (~1.4 eV), a-SiC (1.85 eV), με σταθεροποιημένη απόδοση ~13% [27].



Εικόνα 18: Ισχύς εξόδου σε συνάρτηση με την ηλιοφάνεια για τις διάφορες συνδέσεις [2].

- Άμορφο πυρίτιο διαδοχικών συνδέσεων και πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (Tandem a-Si and multi-crystalline Si)

Σε αυτή τη μέθοδο δύο ή περισσότερες διασταυρώσεις Φ/Β τοποθετούνται σε στρώσεις η μία επάνω στην άλλη. Στην κορυφή βρίσκεται ένα στρώμα το οποίο είναι κατασκευασμένο από πολύ λεπτό άμορφο πυρίτιο, το οποίο μετατρέπει τα μικρότερα μήκη κύματος του ορατού ηλιακού φάσματος. Ωστόσο, σε μεγαλύτερο μήκος κύματος, το μικροκρυσταλλικό πυρίτιο είναι πολύ αποτελεσματικό και σε κάποιο εύρος της εμβέλειας υπερέθρων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερες αποδόσεις σε σχέση με το άμορφο πυρίτιο, οι οποίες κυμαίνονται στο 8-9% ανάλογα τη δομή των κυττάρων και το πάχος του στρώματος [2]. Μάλιστα, υπήρξε μεγάλη ώθηση για στροφή της τεχνολογίας λεπτού υμένα για ηλιακά Φ/Β προς αυτή την κατεύθυνση και ειδικότερα από δύο εταιρίες, τις Oerlikon και Applied Materials [2].

#### 2.6.2.2 Τελλοριούχο Κάδμιο (CdTe) ή Θειούχο Κάδμιο/Τελλοριούχο Κάδμιο (CdS/CdTe)

Η τεχνολογία τελλοριούχου καδμίου είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που εντάσσεται σε αυτές του λεπτού υμένα. Είναι γνωστό ότι το τελλοριούχο κάδμιο έχει το ιδανικό ενεργειακό χάσμα (1.45 eV) και χαρακτηρίζεται από υψηλό συντελεστή άμεσης απορρόφησης για ένα υλικό απορρόφησης ηλιακής ενέργειας. Κύτταρα CdTe μικρής επιφάνειας παρουσιάζουν βαθμό απόδοσης άνω του 15%, ενώ για ολόκληρες μονάδες CdTe παρουσιάζονται βαθμοί απόδοσης άνω του 9%. Σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες λεπτού υμένα, η συγκεκριμένη είναι εύκολη στην εγκατάσταση και καταλληλότερη για

παραγωγή μεγάλης κλίμακας (μονάδα 40 MW στο Οχάιο των ΗΠΑ, μονάδα 5 MW στο Abu Dhabi στα ΗΑΕ) [2]. Το κάδμιο είναι τοξικό και τα περιβαλλοντικά ζητήματα που σχετίζονται με αυτό αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα για αυτήν την τεχνολογία. Για το λόγο αυτό η First Solar εισήγαγε ένα πρόγραμμα ανακύκλωσης για παροπλισμένα Φ/Β. Η First Solar έχει καταστήσει αυτή την τεχνολογία ιδιαίτερα δημοφιλή στον τομέα του λεπτού υμένα λόγω της αποτελεσματικής διαδικασίας παραγωγής, η οποία έχει τη δυνατότητα να μειώσει το κόστος παραγωγής και να καταστήσει τη συγκεκριμένη τεχνολογία ιδιαίτερα ανταγωνιστική από άποψη κόστους. Ένα ακόμα πιθανό ζήτημα αφορά στη διαθεσιμότητα του τελλουριδίου, που θα μπορούσε να προκαλέσει πιθανούς περιορισμούς σε πρώτες ύλες, οι οποίοι με τη σειρά τους θα επηρεάσουν το κόστος των μονάδων [2].

Glass Superstrate
Front contact (ITO/ZnO)
Cds (Cadmium Sulfide) n-type layer
CdTe p-type layer
Back Contact

**Εικόνα 19: Τυπική διατομή κυττάρου CdS/CdTe [2].**

### 2.6.2.3 Δισεληνιούχο ίνδιο του χαλκού (αλλιώς χαλκοπυρίτης) ( $CuInSe_2$ ) ή Δισεληνιούχο γάλλιο του ινδίου χαλκού (CIGS)

Ο δισεληνοϊνδιούχος χαλκός ( $CuInSe_2$ ), γνωστός και ως σεληνοϊνδιούχος χαλκός (CIS) ή χαλκοπυρίτης, αφορά σε Φ/Β συσκευές που περιέχουν ημιαγώγιμα στοιχεία της 1<sup>ης</sup>, 3<sup>ης</sup> και 6<sup>ης</sup> ομάδας του περιοδικού πίνακα, το οποίο είναι ωφέλιμο λόγω των υψηλών συντελεστών οπτικής απορρόφησης και των ηλεκτρικών τους χαρακτηριστικών που επιτρέπουν τη ρύθμιση των συσκευών. Ο δισεληνοϊνδιούχος χαλκός με πρόσμειξη γαλλίου (CIGS) χαρακτηρίζεται από αυξημένο χάσμα ζώνης και αποτελεί πολυστρωματικό σύνθετο λεπτού υμένα. Σε αντίθεση με τη βασική διασταύρωση p-n στα ηλιακά κύτταρα πυριτίου, αυτού του είδους τα κύτταρα χαρακτηρίζονται από ένα μοντέλο πολύπλευρης έτερο – διασταύρωσης. Η μεγαλύτερη απόδοση που έχει καταγραφεί για ηλιακό κύτταρο λεπτού υμένα με CIGS είναι 20%, ενώ για μονάδες μεγάλης κλίμακας ανέρχεται σε 13%. Η μεγαλύτερη ανησυχία αυτής της τεχνολογίας συνίσταται στην έλλειψη ινδίου, το οποίο χρησιμοποιείται έμμεσα για την παραγωγή επίπεδων οθονών για υπολογιστές, τηλεοράσεις κ.ά.. Συγκεκριμένα, το ίνδιο χρησιμοποιείται προς σχηματισμό οξειδίου του κασσιτέρου του ινδίου, το οποίο είναι ένα διαφανές οξείδιο που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των επίπεδων οθονών που αναφέρθηκε προηγουμένως. Σε αυτό το πλαίσιο, στη Γερμανία υποστηρίζονται στρατηγικές ανακύκλωσης και βιομηχανικής αναγέννησης [2]. Η ανακύκλωση παροπλισμένων Φ/Β μονάδων ινδίου μπορεί να επιτευχθεί αρκετά εύκολα. Τόσο οι μονάδες τελλουριούχου καδμίου (CdTe), όσο και αυτές με CIGS παρουσιάζουν



υποβάθμιση και φθορές σε υψηλά επίπεδα θερμότητας και υγρασίας και χρειάζονται πρόσθετες επικαλύψεις για την προστασία τους έναντι υποβάθμισης.

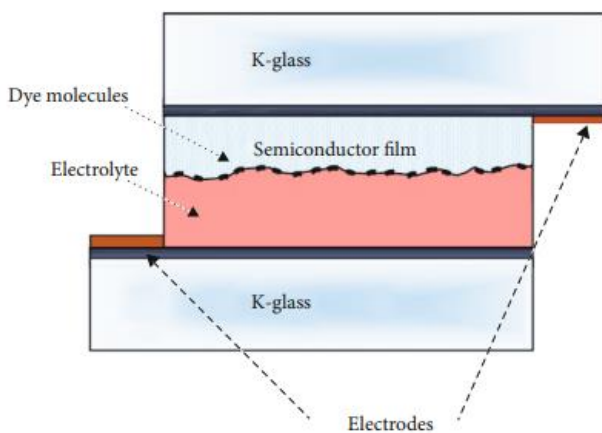
#### 2.6.2.4 Αρσενιούχο γάλλιο (GaAs)

Παρουσιάζει την υψηλότερη ενεργειακή απόδοση ~ 25.5%. χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας γίνεται σε διαστημικές εφαρμογές. Βασικότερο πλεονέκτημα αποτελεί η υψηλή ενεργειακή απόδοση βιομηχανικού Φ/Β πλαισίου, η οποία κυμαίνεται περίπου στο 22%. Ανασταλτικό παράγοντα αποτελεί το υψηλό κόστος κατασκευής.

### 2.6.3 Αναδυόμενες τεχνολογίες Φ/Β

#### 2.6.3.1 Ηλιακά κύτταρα ευαισθητοποιημένα σε χρωστικές ουσίες – Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC)

Η τεχνολογία ευαισθητοποιημένων ηλιακών κυττάρων έχει κεντρίσει την επιστημονική προσοχή χάρη στο προβλεπόμενο χαμηλό κόστος παραγωγής και την εύκολη συναρμολόγηση. Οι υψηλότερες αποδόσεις που έχουν καταγραφεί φτάνουν περίπου στο 13%. Σε αυτό την τεχνολογία, η μετατροπή του φωτός σε ηλεκτρισμό πραγματοποιείται μέσω φασματικής ευαισθητοποίησης του εύρους της ζώνης χάσματος σε ημιαγωγούς όπως το διοξείδιο του τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ ), το μονοξείδιο του ψευδαργύρου ( $\text{ZnO}$ ) κ.ά. Γίνεται ευαισθητοποίηση των ημιαγωγών με χρωστικές προς βελτίωση της ικανότητάς τους να απορροφούν ηλιακή ακτινοβολία και να εγχέουν ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού. Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην ευαισθητοποιημένη επιφάνεια του ημιαγωγού, απορροφάται από τα μόρια της χρωστικής ουσίας διεγείροντάς τα με αποτέλεσμα τη διεπιφανειακή μεταφορά ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού. Στα ευαισθητοποιημένα ηλιακά κύτταρα ο ημιαγωγός έχει δύο ηλεκτρόδια, το ηλεκτρόδιο και το αντιηλεκτρόδιο, κατασκευασμένα από πλατίνα ή επιπλατινοποιημένα, ενώ ένας υγρός ή στερεός ηλεκτρολύτης γεμίζει το χώρο ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 20* [11].



**Εικόνα 20: Μηχανισμός μεταφοράς φορτίου στα DSSCs [11].**

Οι τύποι ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι υγροί, σε κατάσταση γέλης, και στερεοί ηλεκτρολύτες. Ο τύπος του ηλεκτρολύτη επηρεάζει σημαντικά την απόδοση και τη σταθερότητα της συσκευής. Οι υγροί ηλεκτρολύτες φαίνεται να αποδίδουν την υψηλότερη απόδοση, ωστόσο η διάρκεια ζωής των κυττάρων που προκύπτουν παρατηρείται σχετικά περιορισμένη.

### 2.6.3.2 Οργανικά Φ/Β – Organic PV

Τα οργανικά Φ/Β αποτελούν μια εναλλακτική λύση χαμηλού κόστους έναντι των Φ/Β κυττάρων πυριτίου, καθώς οι οργανικοί ημιαγωγοί χαρακτηρίζονται από υψηλούς συντελεστές οπτικής απορρόφησης, που επιτρέπουν την ανάπτυξη αποδοτικών φωτοβολταϊκών συσκευών με στρώματα πάχους μόνο μερικών νανομέτρων (nm). Τα οργανικά ηλιακά κύτταρα έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως το ότι είναι ελαφριά, ότι παρέχουν μεγάλες επιφάνειες και ότι χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος κατασκευής. Πρόσφατα αναφέρθηκαν βαθμοί απόδοσης μεγαλύτεροι του 18%. Σε αυτή την τεχνολογία το απορροφητικό στρώμα βασίζεται σε ορισμένους οργανικούς ημιαγωγούς. Χαρακτηρίζονται από την παρουσία φωτοενεργών οργανικών στρωμάτων που αποτελούνται από ημιαγωγίμα πολυμερή τύπου p και n. Για να γίνουν τα οργανικά υλικά αγώγιμα ή ημιαγώγιμα απαιτείται υψηλό επίπεδο σύζευξης. Τα υψηλότερα κατελιημμένα μοριακά τροχιακά και τα χαμηλότερα μη κατελιημμένα μοριακά τροχιακά των οργανικών υλικών αντιστοιχίζονται σε ζώνη σθένους και αγωγιμότητας των συμβατικών ανόργανων ημιαγωγών [11]. Ανάμεσα στο υψηλότερο κατελιημμένο και στο χαμηλότερο μη κατελιημμένο μοριακό τροχιακό υπάρχει ένα ενεργειακό χάσμα (το διάκενο ή χάσμα ζώνης του ημιαγωγού). Έτσι, υψηλά επίπεδα σύζευξης μειώνουν το χάσμα ζώνης και ευνοούν τη διέγερση των ηλεκτρονίων από το υψηλότερο κατελιημμένο προς το χαμηλότερο μη κατελιημμένο μοριακό τροχιακό. Το κύριο μειονέκτημα αυτών των Φ/Β στοιχείων έγκειται στην ευπάθειά τους στο φως και η συνακόλουθη ταχεία γήρανσή τους [27].

### 2.6.3.3 Ηλιακά κύτταρα περοβσκίτη – Perovskite solar cells

Αυτού του είδους τα Φ/Β θεωρείται ότι θα αποτελέσουν επανάσταση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως η υψηλή κινητικότητα ηλεκτρονίων και οπών και η χαμηλή ενέργεια δέσμωσης εξιτονίων. Χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος παραγωγής και μπορούν να κατασκευαστούν ακόμα και από εύκαμπτα υποστρώματα χρησιμοποιώντας διεργασίες roll-to-roll [11]. Η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει τις βλέψεις να παρουσιάσει μία από τις υψηλότερες αποδόσεις και ταυτόχρονα μία από τις φθηνότερες τεχνολογίες στην αγορά. Μέσα στα επόμενα έτη μπορεί ακόμη και να αντικαταστήσει τα συμβατικά κύτταρα πυριτίου. Οι οργανικοί-ανόργανοι υβριδικοί περοβσκίτες με βάση τα αλογονίδια είναι μια ομάδα υλικών με δομή  $ABX_3$ , όπου το A είναι οργανικό κατιόν ( $CH_3NH_3^+$  ή  $NH_2CH_3NH_2^+$ ), το B είναι δισθενές κατιόν ( $Pb_2^+$  ή  $Sn_2^+$ ) και το X είναι μονοσθενές ανιόν αλογονιδίου ( $I^-$ ,  $Cl^-$  ή  $Br^-$ ). Οι μεγαλύτερες αποδόσεις που έχουν καταγραφεί αγγίζουν το 25%, ωστόσο ακόμη δεν έχουν επιλυθεί ορισμένα θέματα, που

αφορούν κυρίως στη σταθερότητα των συσκευών, που θα επιτρέψουν την περαιτέρω ένταξή τους στην αγορά.

## 2.7 Ανακεφαλαίωση

Η ανακάλυψη του φωτοβολταϊκού φαινομένου πιστώνεται στον φυσικό Becquerel το 1839. Ως φωτοβολταϊκό φαινόμενο ορίζεται η εμφάνιση ηλεκτρικού δυναμικού μεταξύ δύο ηλεκτροδίων συνδεδεμένα σε ένα στερεό ή υγρό σύστημα (ημιαγωγός) όταν σε αυτό προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία.

Όλες οι φωτοβολταϊκές συσκευές ουσιαστικά χαρακτηρίζονται από την ίδια αρχή λειτουργίας. Περιέχουν έναν ημιαγωγό και μία δίοδο p-n. Ο ημιαγωγός χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη δύο ενεργειακών ζωνών διαφορετικής ενεργειακής στάθμης, της ζώνης αγωγιμότητας και της ζώνης σθένους. Η μέγιστη ενεργειακή τους διαφορά καλείται ενεργειακό χάσμα,  $E_g$ . Όταν κβάντα φωτός, ή αλλιώς φωτόνια, με ενέργεια μεγαλύτερη του ενεργειακού χάσματος προσπίπτουν στο σύστημα, τότε αυτή η ενέργεια απορροφάται από διεγερμένα ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια που διεγείρονται κινούνται από τη ζώνη σθένους προς τη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας πίσω οπές, οι οποίες κινούνται αντίστροφα από τη ζώνη αγωγιμότητας προς τη ζώνη σθένους. Όταν φτάσουν στη δίοδο, ηλεκτρόνια και οπές διαχωρίζονται μέσω του ηλεκτρικού πεδίου επαφής.

Από την ανακάλυψη του Φ/Β φαινομένου μέχρι και σήμερα έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί διάφορες τεχνολογίες Φ/Β. Ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες, λόγω και της στροφής στις ΑΠΕ, ο τομέας των Φ/Β έχει γνωρίσει μεγάλη άνθιση. Οι επικρατέστερες τεχνολογίες στο εμπόριο είναι οι τεχνολογίες πυριτίου, που δεσπόζουν στην αγορά σε ποσοστό μέχρι και 90%, καθώς το πυρίτιο βρίσκεται πολύ εύκολα στη φύση και χαρακτηρίζεται από υψηλή καθαρότητα, ενώ διατηρεί τις ηλεκτρικές του ιδιότητες και σε αντίξοες, περιβαλλοντικά, συνθήκες. Φυσικά υπάρχουν και άλλες ανταγωνιστικές τεχνολογίες στο εμπόριο, όπως οι τεχνολογίες λεπτού υμένα και κυρίως αυτές με άμορφο πυρίτιο και τελλουριούχο κάδμιο. Αυτές οι τεχνολογίες υπόσχονται μείωση στο υλικό και άρα στο κόστος παραγωγής. Προφέρουν μεγαλύτερο ενεργειακό χάσμα που επιτρέπει ισχυρότερη απορρόφηση του ορατού ηλιακού φάσματος συγκριτικά τις τεχνολογίες κρυσταλλικού πυριτίου. Ωστόσο, ακόμα χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη απόδοση, ενώ ανασταλτικό παράγοντα αποτελεί η τοξικότητα του καδμίου. Αναδυόμενες τεχνολογίες υπάρχουν επίσης,

όπως ηλιακά κύτταρα ευαίσθητοποιημένα σε χρωστικές ουσίες (DSSCs), οργανικά Φ/Β, και κυρίως τα ηλιακά κύτταρα περοβσκίτη. Ειδικά η τεχνολογία με τον περοβσκίτη θεωρείται ότι θα αποτελέσει επανάσταση στον τομέα των ΑΠΕ, χάρη στις υψηλές αποδόσεις με ταυτόχρονο χαμηλό κόστος που υπόσχεται, μόλις επιλυθούν ορισμένα προβλήματα σταθερότητας και αναμένεται να εισέλθουν δυναμικά στην αγορά.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τεχνολογίες Φ/Β σε συνάρτηση με τις μέγιστες ενδεικτικές αποδόσεις που έχουν καταγραφεί.

**Πίνακας 2: Τεχνολογίες Φ/Β και ενδεικτικοί βαθμοί απόδοσης.**

Τεχνολογία Φ/Β	Ενδεικτική απόδοση (%)
Πυριτίου	
Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (sc-Si)	20-21
Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (mc-Si)	13-17
Λεπτού υμένα (Thin film)	
Άμορφο πυρίτιο (a-Si)	6-9
Τελλοριούχο κάδμιο (CdTe)	9-12
Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CIS) & Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός με πρόσμειξη γαλλίου (CIGS)	13
Αρσενιούχο γάλλιο (GaAs)	25
Αναδυόμενες	
Ηλιακά κύτταρα ευαισθητοποιημένα σε χρωστικές ουσίες (DSSCs)	13
Οργανικά Φ/Β	18
Ηλιακά κύτταρα περοβσκίτη	25

### 3. Κλιματισμός κτηρίων

#### 3.1 Ενεργειακές ανάγκες και απόδοση κτηρίων

Η κατανάλωση ενέργειας παρουσιάζει συνεχή αύξηση με σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και ειδικότερα στην εξάντληση των διαθέσιμων πόρων και κατά συνέπεια υποβάθμιση της ποιότητας ζωής. Για την αντιμετώπιση αυτών των επιπτώσεων, πρωταρχικό ρόλο αποκτά η εξοικονόμηση ενέργειας, συμβάλλοντας αποτελεσματικά στην παγκόσμια οικονομία, στην κάλυψη των κοινωνικών αναγκών και στην προστασία του περιβάλλοντος. Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι η φθηνότερη, εναλλακτική, ήπια, καθαρή και άμεσα διαθέσιμη πηγή ενέργειας για την αντιμετώπιση των σύγχρονων οικονομικών και ενεργειακών αναγκών.

Στην Ελλάδα, σήμερα, οι κτιριακές δομές απορροφούν σχεδόν το 40% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται στη χώρα. Επιπλέον, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε κτίρια, για τον κλιματισμό (θέρμανση και ψύξη χώρων), το φωτισμό και τις λοιπές ηλεκτρικές συσκευές τους, μπορεί να φτάσει μέχρι και στο 65%. Λόγω της υψηλής συμμετοχής των κτιρίων στην κατανάλωση ενέργειας και κυρίως στον ηλεκτρισμό, τα κτίρια συμμετέχουν ετησίως στις εκπομπές ρύπων CO<sub>2</sub> σε ποσοστό άνω του 43%. Φυσικά, το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας που καταναλώνεται στα κτίρια αφορά στον κλιματισμό τους.

Ο κλιματισμός των κτιρίων, ειδικότερα των βιομηχανικών και επαγγελματικών, είναι πολύ σημαντικός προκειμένου να εξασφαλίζονται συνθήκες που ανταποκρίνονται αποτελεσματικά στις ανάγκες του ανθρώπου για άνετη και υγιεινή διαβίωση στους χώρους εργασίας ή διαμονής. Η ρύθμιση της θερμοκρασίας, της υγρασίας, της κίνησης και καθαρότητας του αέρα επιτυγχάνεται από τα κατάλληλα συστήματα ψύξης-θέρμανσης, ύγρανσης - αφύγρανσης και αερισμού, τα οποία καταναλώνουν σημαντικά ποσά ενέργειας. Για αυτό το λόγο και είναι σημαντική η σύσταση ενός αποδοτικού ενεργειακά κτιρίου.

Στην Ελλάδα οι δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας στον κτιριακό τομέα είναι πολύ υψηλές και είναι εύκολα υλοποιήσιμες με την εφαρμογή κατάλληλων μέτρων. Επισημαίνεται ότι το 70% των ελληνικών κτιρίων δεν είναι θερμομονωμένα, ενώ ταυτόχρονα το μεγαλύτερο ποσοστό από αυτά χαρακτηρίζονται από κακή αεροστεγανότητα και ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό παλιάς τεχνολογίας (εξοπλισμός θέρμανσης, ψύξης, φωτισμού κ.ά.). Η σημερινή, υψηλής ενεργειακής απόδοσης τεχνολογία χρήσης και διαχείρισης ενέργειας μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην εξοικονόμηση στα κτίρια, ενώ η χρήση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακών συστημάτων, γεωθερμίας, βιομάζας κ.ά.) είναι πλέον ενεργειακά αποδοτικότερη και τεχνικοοικονομικά βιώσιμη στα κτίρια.

Ένα κτίριο καταναλώνει ενέργεια για θέρμανση - ψύξη - κλιματισμό, (ΘΨΚ), ζεστό νερό χρήσης (ΖΝΧ) και φωτισμό (εκτός της ηλεκτρικής ενέργειας που δαπανάται για την χρήση

ηλεκτρικών συσκευών, π.χ. διαφόρων οικιακών συσκευών, ηλεκτρονικών υπολογιστών, μηχανημάτων στην βιομηχανία κ.α.). Η εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα κτίριο εξασφαλίζεται με την ποιότητα των ενεργειακών συστημάτων και την ορθή ενεργειακή διαχείριση, που περιλαμβάνει πολλές δραστηριότητες με στόχο τον καταρτισμό ενός ενεργειακά αποδοτικού κτιρίου.

Η εφαρμογή μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια και βιομηχανίες, μπορεί να αποδώσει οικονομικά, λειτουργικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Τα οικονομικά οφέλη συμβάλλουν στην μείωση των λειτουργικών εξόδων, τα λειτουργικά οφέλη βελτιώνουν τα επίπεδα άνεσης, ασφάλειας και αποδοτικότητας των εργαζομένων μιας βιομηχανίας ή των ενοίκων ενός κτιρίου και τα περιβαλλοντικά οφέλη εξασφαλίζουν την μείωση των εκπομπών των διαφόρων ρύπων και των ενεργειακών αναγκών σε εθνικό επίπεδο.

Ο υπολογισμός της ενεργειακής απόδοσης ενός κτιρίου ουσιαστικά είναι ο υπολογισμός της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας ανά τελική χρήση (ψύξη, θέρμανση, κλιματισμός, ζεστό νερό χρήσης, φωτισμός, ηλεκτρικές συσκευές), αλλά και αθροιστικά, και η σύγκριση αυτής τιμής με την αντίστοιχη κατανάλωση του κτιρίου αναφοράς, προκειμένου να καταταχθεί ενεργειακά το κτίριο. Ως κτίριο αναφοράς ορίζεται ένα απόλυτα όμοιο με το υπό μελέτη κτίριο. Έχει ίδια ακριβώς γεωμετρία και χρήση, ίδιο προσανατολισμό, βρίσκεται στην ίδια τοποθεσία, χαρακτηρίζεται από πανομοιότυπα δομικά χαρακτηριστικά. Η ενεργειακή κατάταξη ενός κτιρίου αποδίδει σε αυτό έναν ποιοτικό δείκτη ενεργειακής κατανάλωσης, ο οποίος επιτρέπει στον κάθε ένοικο ή γενικότερα χρήστη του κτιρίου να έχει μια γενική άποψη για την ποιότητα της κατασκευής του (από άποψη θερμομονώσεως αλλά και εφαρμογής «έξυπνων» ενεργειακών λύσεων) και των ηλεκτρομηχανολογικών του εγκαταστάσεων.

Το 2010 εκδόθηκε ο κανονισμός ενεργειακής απόδοσης κτιρίων, KENAK, στον οποίο αναφέρονται οι εθνικές προδιαγραφές για όλες τις παραμέτρους που απαιτούνται για τη διαδικασία υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων, ακολουθούνται μεθοδολογίες υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης ενός κτιρίου και παρουσιάζεται εν συντομία το πρόγραμμα TEE KENAK του τεχνικού επιμελητηρίου Ελλάδος (ΤΕΕ), το οποίο αποτελεί χρήσιμο εργαλείο των μηχανικών για την εκπόνηση ενεργειακών μελετών.

### 3.2 Θερμική άνεση

Στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων είναι αναγκαίο να επικρατούν ικανοποιητικές συνθήκες, που να επιτρέπουν στους ενοίκους να ζουν άνετα και να πραγματοποιούν τις εργασίες τους. Οι ικανοποιητικές αυτές συνθήκες περιγράφονται από το φαινόμενο της θερμικής άνεσης. Για την επίτευξη των συνθηκών αυτών χρησιμοποιούνται συστήματα θέρμανσης και κλιματισμού (HVAC systems), τα οποία και καταναλώνουν σημαντικά ποσά ενέργειας. Για την εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων από τη χρήση αυτών των συστημάτων είναι πολύ σημαντική η ύπαρξη ενός λειτουργικού κτιριακού κελύφους. Ως «θερμική άνεση» ορίζεται η νοητική διεργασία που αφορά στην κατάσταση εκείνη στην οποία ένας άνθρωπος μπορεί να εκφράσει την ικανοποίησή του σχετικά με τις επικρατούσες θερμικές συνθήκες [12].

Η αίσθηση της θερμικής άνεσης εξασφαλίζεται όταν η θερμότητα που παράγεται από τον ανθρώπινο οργανισμό διαχέεται στο περιβάλλον με την ίδια ταχύτητα με την οποία παράγεται. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μια σταθερή κατάσταση θερμικής ισορροπίας μεταξύ του ανθρώπου και του περιβάλλοντος και δεν παρουσιάζονται φαινόμενα που να οφείλονται σε έλλειψη συνθηκών άνεσης, όπως η εφίδρωση ή το ρίγος [13].

Από τον ορισμό της θερμικής άνεσης γίνεται αντιληπτό ότι πρόκειται για έναν υποκειμενικό δείκτη που δεν είναι δυνατό να είναι ίδιος για όλους τους ανθρώπους. Επιστημονικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμική άνεση έχουν χωριστεί σε δύο κατηγορίες: α) ατομικούς και β) περιβαλλοντικούς.

- a) Ατομικοί παράγοντες. Πρόκειται για παραμέτρους που επηρεάζουν την αντίληψη του ατόμου για τη θερμική άνεση και έχουν σχέση με το ίδιο το άτομο και τις ιδιαιτερότητές του. Η ηλικία, η σωματική άσκηση, η κατάσταση της υγείας, ο ρουχισμός κ.ά. είναι παράμετροι που επιδρούν σημαντικά στο αίσθημα της θερμικής άνεσης. Άτομα μεγάλης ηλικίας συνήθως νοιώθουν άνετα όταν η θερμοκρασία χώρου είναι μεγαλύτερη. Το ίδιο συμβαίνει σε άτομα που νοσηλεύονται σε νοσοκομεία ενώ το ακριβώς αντίθετο, αλλά με παροδικό χαρακτήρα, σε εγκύους. Επίσης άτομα που αθλούνται θέλουν γενικά ηπιότερες θερμοκρασίες στους χώρους άθλησης. Αυτά είναι μερικά παραδείγματα που δείχνουν ότι ο άνθρωπος επιδρά σημαντικά στη διαμόρφωση του δείκτη θερμικής άνεσης.
- b) Περιβαλλοντικοί παράγοντες. Έχουν να κάνουν με τις εξωγενείς συνθήκες που επιδρούν και διαμορφώνουν την αντίληψη θερμικής άνεσης του ατόμου όπως η θερμοκρασία, οι ακτινοβολίες, η υγρασία και η ροή του αέρα. Πρόκειται για παράγοντες για τους οποίους η αντικειμενικότητα της φύσης τους και η καθολικότητα της επίδρασής τους στον άνθρωπο τους κάνει περισσότερο πρόσφορους να ελεγχθούν και να διαμορφώσουν το γενικό αίσθημα της θερμικής

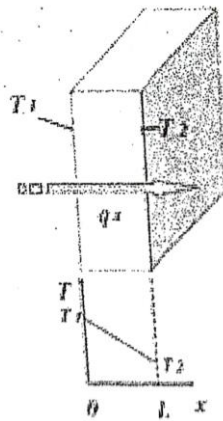


άνεσης. Αν για παράδειγμα η θερμοκρασία σε ένα δωμάτιο κατά το χειμώνα είναι 21 °C, τότε ικανοποιείται η γενική συνθήκη θερμικής άνεσης που ικανοποιεί τους περισσότερους ανθρώπους. Φυσικά είναι δυνατό να επέμβουμε με τεχνικά μέσα προκειμένου να διαμορφώσουμε τους περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Ο άνθρωπος λειτουργεί όπως μία θερμική μηχανή. Το ανθρώπινο σώμα καταναλώνει ουσίες που λαμβάνει μέσω της τροφής και με τη χημική διαδικασία της καύσης, χρησιμοποιώντας το ατμοσφαιρικό οξυγόνο, παράγει θερμότητα. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται μεταβολισμός και είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της ζωής. Η θερμική ενέργεια που παράγεται αυξάνει τη θερμοκρασία του ανθρώπινου σώματος στους 36.6°C και τη διατηρεί εκεί. Το ανθρώπινο σώμα διαθέτει διάφορους μηχανισμούς που δρουν προς εξισορρόπηση στη μεταβολή της θερμοκρασίας διατηρώντας τη στο σωστό επίπεδο, όπως ακριβώς επιτυγχάνει και ο κινητήρας του αυτοκινήτου μέσω του ψυγείου του. Το σώμα, λοιπόν, παράγει θερμότητα και οι διάφοροι μηχανισμοί αναλαμβάνουν να την αποβάλλουν στο περιβάλλον, ώστε η τελική του θερμοκρασία να παραμένει πάντα η ίδια. Υπάρχουν τρεις μηχανισμοί μεταφοράς της θερμότητας από ένα σώμα: η αγωγή, η συναγωγή και η ακτινοβολία. Το ανθρώπινο σώμα χρησιμοποιεί και τους τρεις τρόπους για να αποβάλλει τη θερμότητα προς το περιβάλλον που συνήθως βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτό.

- **Αγωγή:** Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή λαμβάνει χώρα όταν υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά μέσα σε ένα σώμα στερεό, υγρό ή αέριο, χωρίς να συνοδεύεται από αλλαγή φάσης καθώς και στην περίπτωση δύο σωμάτων που βρίσκονται σε απόλυτη επαφή χωρίς σχετική κίνηση. Στα στερεά σώματα, η μετάδοση της θερμότητας πραγματοποιείται είτε μέσω μοριακών ταλαντώσεων είτε μέσω ελεύθερων ηλεκτρονίων. Στα υγρά σώματα, η ύπαρξη δυνάμεων μεταξύ των μορίων τους επιδρά στην κίνησή τους και συνεπώς στη μετάδοση θερμότητας. Στα αέρια σώματα η κινητική ενέργεια των μορίων αυξάνεται όταν αυτά συγκρούονται με μόρια που προέρχονται από περιοχές υψηλότερης θερμοκρασίας του σώματος και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η μετάδοση θερμότητας. Στην περίπτωση των αερίων σωμάτων, η μετάδοση θερμότητας εξαρτάται και από την πίεση αφού αυτή επιδρά στην κινητικότητα των μορίων τους. Είναι φανερό ότι η μετάδοση θερμότητας με αγωγή στα υγρά και στα αέρια σώματα υφίσταται μόνο σε λεπτά στρώματα αυτών, αφού σε παχύτερα στρώματα λαμβάνουν χώρα μακροσκοπικές κινήσεις των μορίων και ατόμων τους οπότε εμφανίζονται φαινόμενα συναγωγής [14]. Η αγωγή είναι ο καλύτερος τρόπος μεταφοράς θερμότητας για αυτό και χρησιμοποιείται όταν απαιτείται η ταχεία και άμεση μεταφορά. Στον άνθρωπο ο μηχανισμός της αγωγής χρησιμοποιείται με εμφανή τρόπο όταν για να δροσιστεί από την καλοκαιρινή ζέση βουτάει στο νερό της θάλασσας ή κάνει ντους. Η άμεση επαφή του σώματος με το δροσερό νερό ενεργοποιεί το μηχανισμό της αγωγής και η θερμοκρασία του ανθρώπου μειώνεται.





**Εικόνα 21: Μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας σε επίπεδο στερεό σώμα [14].**

Η γνωστή εξίσωση του Fourier, που περιγράφει τη θερμορροή που περνά ανά μονάδα χρόνου από τη στοιχειώδη επιφάνεια ισότροπου σώματος, σε στερεό επίπεδο σώμα, στο οποίο λαμβάνει χώρα μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας παράλληλα προς τον άξονα  $x$  στη μονάδα του χρόνου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$q_x = -k \cdot \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

Η πυκνότητα παροχής θερμότητας  $q_x$  [W/m<sup>2</sup>] είναι κάθετη στον άξονα  $x$  όπως και η επιφάνεια στην οποία λαμβάνει χώρα η μετάδοση θερμότητας. Όπως φαίνεται και από τη Σχέση (4), η πυκνότητα παροχής θερμότητας εξαρτάται από την κλίση της θερμοκρασίας και το συντελεστή  $k$  [W/m·K], που ονομάζεται ειδική θερμική αγωγιμότητα και προσδιορίζεται από τις ιδιότητες του σώματος. Το αρνητικό πρόσημο υποδεικνύει την αντίστροφη μεταβολή των μεγεθών της θερμοκρασίας  $T$  και του μήκους  $x$ . Στην απλή περίπτωση η κατανομή της θερμοκρασίας στο επίπεδο σώμα είναι γραμμική. Οπότε η Σχέση (4) μετασχηματίζεται ως:

$$q_x = k \cdot \frac{T_1 - T_2}{L} = k \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad (5)$$

Οι θερμοκρασίες  $T_1$  και  $T_2$  αναφέρονται στις θέσεις 1, 2 του στερεού επιπέδου σώματος και  $L$  [m] είναι το πάχος αυτού. Με δεδομένη την κάθετη επιφάνεια στην οποία λαμβάνει χώρα η μετάδοση της θερμότητας  $A$  [m<sup>2</sup>], το ρεύμα θερμότητας  $Q_x$  [W] δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Q_x = A \cdot q_x \quad (6)$$

- **Συναγωγή:** Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή συμβαίνει μεταξύ της επιφάνειας ενός στερεού σώματος και ενός ρευστού (υγρού ή αέριου σώματος) που έρχονται σε επαφή και παρουσιάζουν θερμοκρασιακή διαφορά. Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή είναι μεγαλύτερη κοντά στην επιφάνεια επαφής των δύο σωμάτων όπου η ταχύτητα του ρευστού είναι χαμηλή, ενώ στα σημεία όπου η ταχύτητα του ρευστού μηδενίζεται η μετάδοση θερμότητας γίνεται με αγωγή. Όταν η κίνηση του ρευστού οφείλεται σε εξωτερικά αίτια π.χ. έναν ανεμιστήρα (fan), η συναγωγή χαρακτηρίζεται ως εξαναγκασμένη ενώ, όταν οφείλεται σε διαφορές πυκνοτήτων του ρευστού λόγω θερμοκρασιακών διαφορών (π.χ. ο αέρας ενός δωματίου στο οποίο λειτουργεί θερμαντικό σώμα) χαρακτηρίζεται ως ελεύθερη ή φυσική. Τα παραπάνω παραδείγματα περιγράφουν μεταφορά αισθητής θερμότητας μέσω του μηχανισμού της συναγωγής. Μετάδοση θερμότητας με συναγωγή εμφανίζεται και κατά την αλλαγή φάσης ενός ρευστού. Το φαινόμενο αυτό χαρακτηρίζεται από τη μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας [14]. Ένα παράδειγμα συναγωγής αισθητής θερμότητας στον άνθρωπο είναι όταν μέσω της εκπνοής ο ζεστός εσωτερικός αέρας μεταφέρεται στο περιβάλλον, αποβάλλοντας μεγάλα ποσά μη αναγκαίας θερμότητας (υπάρχει και μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας σε αυτό το παράδειγμα).

Χαρακτηριστική σχέση για τον υπολογισμό της πυκνότητας παροχής θερμότητας  $q$  [ $W/m^2$ ] μέσω συναγωγής είναι η σχέση Newton:

$$q = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad (7)$$

Η πυκνότητα παροχής θερμότητας είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας του στερεού σώματος  $T_s$  και του ρευστού σώματος σε σημείο το οποίο δεν επηρεάζεται πλέον από τη θερμοκρασία του στερεού  $T_\infty$ . Ο συντελεστής  $h$  [ $W/m^2 \cdot K$ ] ονομάζεται ειδική συναγωγιμότητα και εξαρτάται από τη γεωμετρία της επιφάνειας, το είδος του ρευστού και της ροής του. Η ειδική συναγωγιμότητα είναι συνάρτηση της ειδικής θερμικής αγωγιμότητας, της ταχύτητας, του δυναμικού ιξώδους, της πυκνότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας υπό σταθερή πίεση του ρευστού, καθώς και των γεωμετρικών συνθηκών [14].

- **Ακτινοβολία:** Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία γίνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Βασίζεται στην ικανότητα αρκετών σωμάτων να απορροφούν μέρος της ακτινοβολίας που δέχονται και να την επανεκπέμπουν. Σε αντίθεση με τους προαναφερθέντες τρόπους μετάδοσης θερμότητας με αγωγή και

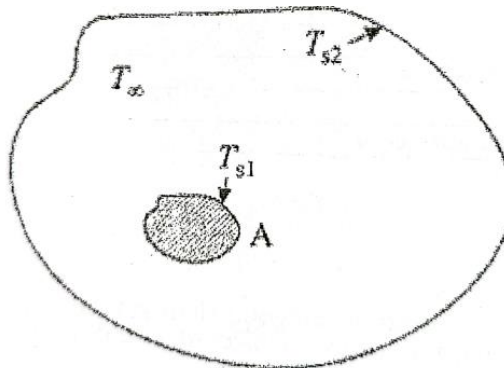
συναγωγή, στην ακτινοβολία δεν απαιτείται η ύπαρξη υλικού μέσου για να πραγματοποιηθεί η μετάδοση θερμότητας, η οποία ενισχύεται στο κενό [14].

Η πυκνότητα παροχής θερμότητας  $q$  [ $W/m^2$ ] που ακτινοβολείται από ένα σώμα δίνεται από τη σχέση:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (8)$$

Όπου  $\varepsilon$  είναι ο συντελεστής εκπομπής του σώματος, που κυμαίνεται από 0 έως 1 και

$\sigma = 5.6697 \cdot 10^{-8}$  [ $W/m^2 \cdot K^4$ ] η σταθερά Stefan – Boltzmann και  $T_s$  [K] η θερμοκρασία του σώματος.

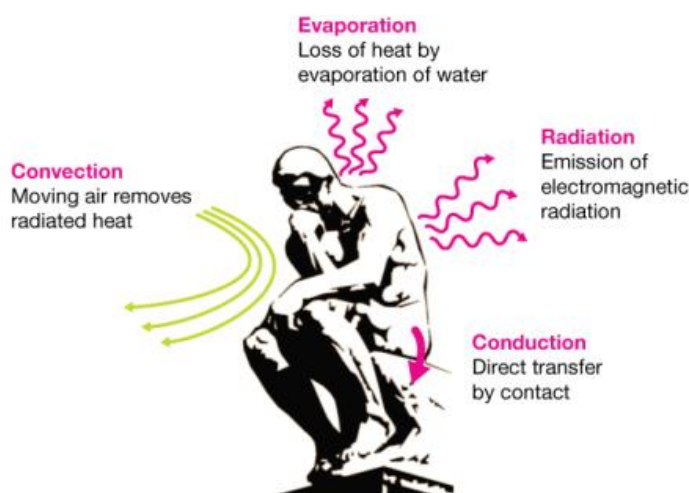


**Εικόνα 22: Μετάδοση θερμότητας μεταξύ δύο σωμάτων όπου το ένα περιβάλλει το άλλο με συναγωγή και ακτινοβολία [14].**

Μια συνήθης περίπτωση μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία απεικονίζεται στην *Εικόνα 22* όπου ένα μικρό στερεό σώμα ακτινοβολεί θερμότητα σε ένα μεγαλύτερο στερεό σώμα που το περιβάλλει ενώ ο μεταξύ τους χώρος καταλαμβάνεται από ένα αέριο. Το ολικό ρεύμα θερμότητας  $Q$  [W] υπολογίζεται ως το άθροισμα της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή από το μικρό στερεό σώμα θερμοκρασίας  $T_{s1}$  στο αέριο θερμοκρασίας  $T_\infty$  και της μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία από το μικρό στερεό σώμα θερμοκρασίας  $T_{s1}$  στο μεγάλο θερμοκρασίας  $T_{s2}$ .

$$Q = Q_{conv} + Q_{rad} = hA(T_{s1} - T_\infty) + \varepsilon A \sigma (T_{s1}^4 - T_{s2}^4) \quad (9)$$

Το ανθρώπινο σώμα μεταφέρει και αυτό θερμότητα προς το περιβάλλον με ακτινοβολία, που βέβαια είναι μη ορατή. Όμως, αυτός ο ασυνήθιστος ηλεκτρομαγνητικός «πομπός» καταφέρνει να απαλλάσσεται από την αχρείαστη θερμότητα μέσω της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.



**Εικόνα 23: Μεταφορά θερμότητας στον άνθρωπο [15].**

Κάθε τρόπος μεταφοράς από τους παραπάνω μπορεί να δρα και αντίστροφα μεταφέροντας ενέργεια από το περιβάλλον προς τον άνθρωπο. Η διαδικασία είναι αμφίδρομη και εκτελείται συνεχώς και προς τις δυο κατευθύνσεις. Ο ανθρώπινος οργανισμός ενεργοποιεί διάφορους μηχανισμούς μεγιστοποίησης ή ελαχιστοποίησης της αποβολής θερμότητας ανάλογα με το εάν απαιτείται να δροσιστεί ή να ζεσταθεί. Ο γνωστότερος, τέτοιος, μηχανισμός είναι η εφίδρωση, κατά την οποία ο ιδρώτας που ρέει μέσω των πόρων του δέρματος στην επιδερμίδα εξατμίζεται και συνεπώς ψύχει το σώμα. Η εξάτμιση του ιδρώτα είναι ισχυρός μηχανισμός αποβολής θερμότητας. Αντίθετα, όταν το σώμα αντιληφθεί ότι χάνει περισσότερη θερμότητα από όση πρέπει, ενεργοποιεί μηχανισμούς περιορισμού της απώλειας. Συστέλλει για παράδειγμα τα αγγεία των άκρων για να περιορίσει σε αυτά τη ροή του θερμού αίματος και να διατηρήσει ζεστό το υπόλοιπο σώμα και ενεργές τις κρίσιμες λειτουργίες του.

Φυσικά υπάρχουν και περιβαλλοντικοί παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν και συνεκτιμώνται από τον ανθρώπινο οργανισμό στο σχηματισμό του αισθήματος θερμικής άνεσης.

- **Θερμοκρασία του αέρα:** Πρόκειται για τον σημαντικότερο παράγοντα της θερμικής άνεσης, ο οποίος έχει και άμεση επίδραση στην ανθρώπινη αντίληψη. Ο περιβάλλον αέρας έρχεται σε άμεση επαφή με το σώμα και συμμετέχει σημαντικά στο αίσθημα της θερμικής άνεσης. Τη θερμοκρασία του αέρα μεταβάλλουν άμεσα οι περισσότερες πηγές θερμότητας, όπως τα κλιματιστικά και τα σώματα καλοριφέρ. Ο αέρας αφού ζεσταθεί ή δροσιστεί, περιβάλλει το ανθρώπινο σώμα και του δημιουργεί την αίσθηση της άνεσης ή της δυσφορίας. Οι περισσότεροι άνθρωποι αισθάνονται θερμικά άνετοι το χειμώνα σε θερμοκρασίες 21 °C - 22 °C και το καλοκαίρι σε θερμοκρασίες 25 °C – 27 °C. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται

στη διαφορά θερμοκρασίας των σωμάτων ή των επιφανειών του χώρου και οδηγεί στην ανάλυση του επόμενου παράγοντα.

- Θερμοκρασία Σωμάτων και Επιφανειών: Τα αντικείμενα που βρίσκονται στο χώρο όπως προαναφέρθηκε έχουν κάποια θερμοκρασία και συνεπώς ακτινοβολούν. Για παράδειγμα, σε έναν κρύο και για μεγάλο χρονικό διάστημα δίχως θέρμανση χώρο, χρειάζεται πολύς χρόνος για να νιώσει κανείς το αίσθημα θερμικής άνεσης, παρόλο που η θέρμανση εργάζεται σε υψηλούς ρυθμούς. Αυτό συμβαίνει καθώς οι επιφάνειες του χώρου, όπως και τα δομικά στοιχεία, χρειάζονται αρκετό χρόνο προκειμένου να πλησιάσουν τη θερμοκρασία του αέρα.
- Ταχύτητα αέρα: Η ταχύτητα αέρα από μόνη της αποτελεί παράγοντα σημαντικό για τη θερμική άνεση. Η ταχύτητα του αέρα όταν ξεπερνάει κάποιο όριο γίνεται άμεσα αντιληπτή και ενοχλητική από τους ανθρώπους, όταν αφορά στον δροσισμό. Χαμηλές ταχύτητες, πάλι, δίνουν το αίσθημα της στασιμότητας και της περιορισμένης ανανέωσης. Αντίθετα ο κλιματισμός στη θέρμανση γίνεται καλύτερα ανεκτός, γιατί το θερμό ρεύμα συμβάλλει στη θερμική άνεση εφόσον δε συνοδεύεται από μετακίνηση των ενδιάμεσων ψυχρών αερίων μαζών. Και η κατεύθυνση του ρεύματος του αέρα, όμως, έχει μεγάλη σημασία. Γενικά, όταν ο αέρας κατευθύνεται στο ανθρώπινο πρόσωπο από το πλάι δημιουργεί έντονο και δυσάρεστο συναίσθημα. Ακόμα και όταν η ροή είναι φυσική, δηλαδή ένα ανοιχτό παράθυρο από το οποίο μπαίνει αέρας, θα πρέπει να φροντίζουμε ώστε να μη χτυπάει το πρόσωπό μας από το πλάι. Αυτό δεν προξενεί απλά δυσάρεστο συναίσθημα αλλά ενέχει και σημαντικούς άλλους κινδύνους. Η παρατεταμένη έκθεση σε ρεύμα αέρα έχει ως συνέπεια τον έντονο πονοκέφαλο, τον ίλιγγο και σε πολλές περιπτώσεις την απώλεια ισορροπίας, που οφείλονται στη διαρκή διαφορά πίεσης των αυτιών.
- Υγρασία: Ατμοσφαιρική υγρασία είναι η ποσότητα των υδρατμών που βρίσκεται σε κάποιο όγκο ατμοσφαιρικού αέρα. Με άλλα λόγια το μείγμα των ατμοσφαιρικών αερίων όπως είναι ευρέως γνωστό (άζωτο, οξυγόνο κλπ.) περιέχει και κάποια ποσότητα νερού υπό τη μορφή υδρατμών. Όταν κάποιος αναφέρεται, λοιπόν, στην ατμοσφαιρική υγρασία και συγκεκριμένα στην απόλυτη υγρασία εννοεί την ποσότητα αυτού του νερού που βρίσκεται στον αέρα. Ο αέρας όμως δεν μπορεί να συγκρατήσει απεριόριστα μεγάλη ποσότητα υδρατμών. Έχει οριστεί ένα χρησιμότερο μέγεθος, η σχετική υγρασία, η οποία πληροφορεί για το ποσοστό των υδρατμών του αέρα σε σχέση με το μέγιστο που θα μπορούσε να έχει ο αέρας. Σε αυτό το σημείο εισάγεται ο όρος φαινόμενη θερμοκρασία. Η φαινόμενη θερμοκρασία συμπεριλαμβάνει όλες τις αντικειμενικές παραμέτρους που επηρεάζουν το ανθρώπινο αίσθημα της θερμικής άνεσης και προσεγγίζει καλύτερα το πώς αισθάνεται κάποιος. Το ενδιαφέρον είναι ότι η φαινόμενη θερμοκρασία ως συνισταμένη μετρήσιμων μεγεθών όπως η θερμοκρασία, η υγρασία κ.α. μπορεί να

δώσει το ίδιο αποτέλεσμα ως ανθρώπινη αίσθηση με διαφορετικούς συνδυασμούς των μεγεθών αυτών [15]. Στην *Εικόνα 24* φαίνεται το πώς επηρεάζει η υγρασία τη φαινόμενη θερμοκρασία. Για παράδειγμα είναι φανερό ότι σε θερμοκρασία αέρα 22°C και για ποσοστό υδρατμών ίσο με 50%, η φαινόμενη θερμοκρασία ισούται με 22 °C, ενώ για την ίδια θερμοκρασία αέρα και ποσοστό υδρατμών ίσο με 70%, η φαινόμενη θερμοκρασία ισούται με 24 °C.

Apparent temperature (AT) from temperature and relative humidity - after Steadman 1994

		Temperature (°C)																														
		20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Relative Humidity (%)	0	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46
	5	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	44	45	46	47	48
	10	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	31	32	33	34	35	36	37	38	39	41	42	43	44	45	46	48	49	50
	15	17	18	19	20	21	22	24	25	26	27	28	29	30	31	33	34	35	36	37	38	40	41	42	43	45	46	47	48	50		
	20	17	18	20	21	22	23	24	25	26	28	29	30	31	32	33	35	36	37	38	40	41	42	43	45	46	47	49	50			
	25	18	19	20	21	22	24	25	26	27	28	29	31	32	33	34	36	37	38	40	41	42	44	45	46	48	49					
	30	18	19	21	22	23	24	25	26	28	29	30	31	33	34	35	37	38	39	41	42	43	45	46	48	49						
	35	19	20	21	22	23	25	26	27	28	30	31	32	34	35	36	38	39	40	42	43	45	46	48	49							
	40	19	20	21	23	24	25	26	28	29	30	32	33	34	36	37	39	40	41	43	44	46	48	49								
	45	19	21	22	23	24	26	27	28	30	31	32	34	35	37	38	40	41	43	44	46	47	49									
	50	20	21	22	24	25	26	28	29	30	32	33	35	36	38	39	41	42	44	45	47	49	50									
	55	20	22	23	24	25	27	28	30	31	32	34	35	37	38	40	42	43	45	46	48	50										
	60	21	22	23	25	26	27	29	30	32	33	35	36	38	39	41	42	44	46	48	49											
	65	21	22	24	25	27	28	29	31	32	34	35	37	39	40	42	43	45	47	49												
	70	21	23	24	26	27	28	30	31	33	35	36	38	39	41	43	44	46	48	50												
	75	22	23	25	26	28	29	31	32	34	35	37	38	40	42	44	45	47	49													
80	22	24	25	27	28	30	31	33	34	36	38	39	41	43	45	46	48	50														
85	23	24	26	27	29	30	32	33	35	37	38	40	42	44	45	47	49															
90	23	25	26	28	29	31	32	34	36	37	39	41	43	45	46	48	50															
95	23	25	26	28	30	31	33	35	36	38	40	42	43	45	47	49																
100	24	25	27	29	30	32	33	35	37	39	41	42	44	46	48	50																

AT above 50°C

Εικόνα 24: Σχέση φαινόμενης θερμοκρασίας – υγρασίας [15].

- Άμεση ακτινοβολία: Αξίζει να αναφερθεί η συμμετοχή της άμεσης ακτινοβολίας, κυρίως από τον ήλιο ή κάποια άλλη ισχυρή πηγή, στη διαμόρφωση του αισθήματος της θερμικής άνεσης. Αν και η ακτινοβολία αυτή δε διαφέρει σε τίποτα από την ακτινοβολία των σωμάτων και των επιφανειών λόγω της θερμοκρασίας τους, για την οποία έγινε αναφορά παραπάνω, εντούτοις η εξωγενής της φύση και η δραματικά μεγαλύτερη ισχύς της την καθιστά πολύ σημαντική. Πηγές ακτινοβολίας όπως ο ήλιος προσφέρουν έστω και μέσω υαλοπινάκων δυνατό αίσθημα θαλπωρής και θερμικής άνεσης. Το ίδιο συμβαίνει και με μια άλλη πηγή άμεσης ακτινοβολίας που είναι το τζάκι.

Υπάρχει επίσης και μία κλίμακα θερμικής άνεσης. Ο Fanger ανέπτυξε και το δείκτη προβλεπόμενης μέσης ψήφου PMV (predicted mean vote), μια κλίμακα επτά σημείων θερμικής άνεσης, στην οποία προβλέπεται η μέση τιμή ψήφων των ατόμων που βρίσκονται σε ένα χώρο με συγκεκριμένες συνθήκες. Αυτή η κλίμακα προτείνεται και από την ASHRAE. Το σημείο 0 υποδηλώνει ότι οι άνθρωποι αισθάνονται θερμικά άνετα-ουδέτερα. Θετικές τιμές υποδηλώνουν υψηλότερες θερμοκρασίες από την ιδανική, ενώ αρνητικές τιμές



υποδηλώνουν χαμηλότερες θερμοκρασίες από την ιδανική (τη θερμοκρασία δηλαδή στην οποία επικρατεί το αίσθημα της θερμικής άνεσης). Πιο συγκεκριμένα, στην *Εικόνα 25* παρουσιάζεται η κλίμακα των επτά σημείων κατά την ASHRAE.

+3	hot
+2	warm
+1	slightly warm
0	neutral
-1	slightly cool
-2	cool
-3	cold

**Εικόνα 25: Κλίμακα θερμικής αίσθησης Y κατά ASHRAE [12].**

Σύμφωνα με την εικόνα που ακολουθεί, η οποία περιέχει αποτελέσματα μελέτης που διενεργήθηκε από την ASHRAE, οι γυναίκες παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία αναφορικά με τη θερμοκρασία και μικρότερη αναφορικά με την υγρασία σε σχέση με τους άντρες για περίοδο έκθεσης μεγαλύτερη των δύο ωρών.

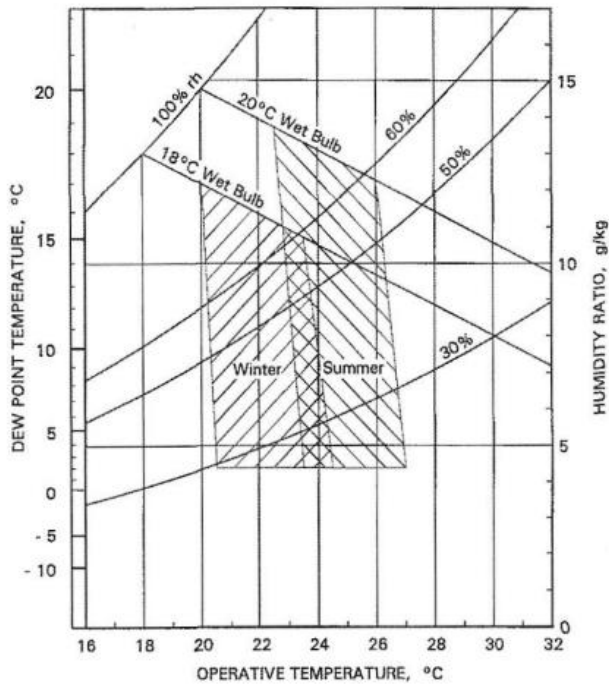
Exposure Period, h	Subjects	Regression Equations <sup>a, b</sup>
		$t = \text{dry-bulb temperature, } ^\circ\text{C}$ $p = \text{vapor pressure, kPa}$
1.0	Men	$Y = 0.220 t + 0.233 p - 5.673$
	Women	$Y = 0.272 t + 0.248 p - 7.245$
	Both	$Y = 0.245 t + 0.248 p - 6.475$
2.0	Men	$Y = 0.221 t + 0.270 p - 6.024$
	Women	$Y = 0.283 t + 0.210 p - 7.694$
	Both	$Y = 0.252 t + 0.240 p - 6.859$
3.0	Men	$Y = 0.212 t + 0.293 p - 5.949$
	Women	$Y = 0.275 t + 0.255 p - 8.622$
	Both	$Y = 0.243 t + 0.278 p - 6.802$

<sup>a</sup>Y values refer to the ASHRAE thermal sensation scale.

<sup>b</sup>For young adult subjects with sedentary activity and wearing clothing with a thermal resistance of approximately 0.5 clo,  $t_r = \bar{t}_a$  and air velocities < 0.2 m/s.

**Εικόνα 26: Προσεγγιστικός υπολογισμός του συντελεστή Y για διάφορες περιπτώσεις [12].**





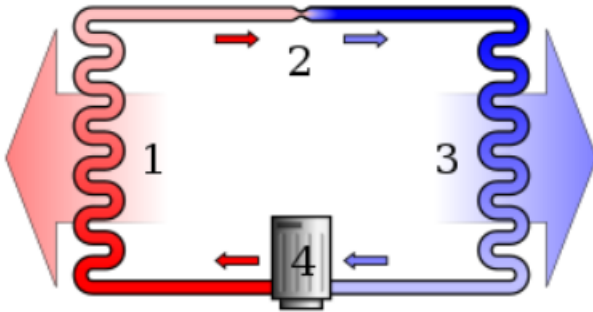
Εικόνα 27: Περιοχές θερμικής άνεσης κατά ASHRAE [12].

### 3.3 Αντλία Θερμότητας (Α/Θ)

#### 3.3.1 Εισαγωγή – τι είναι οι αντλίες θερμότητας

Ως αντλία θερμότητας ορίζεται μία διάταξη-συσκευή, η οποία επιτρέπει τη μεταφορά θερμικής ενέργειας από έναν χώρο σε έναν άλλο, είτε αυτό αφορά σε θέρμανση είτε σε ψύξη. Είναι γνωστό ότι η θερμότητα ρέει φυσικά από το θερμό προς το ψυχρό σώμα, δηλαδή από το χώρο υψηλότερης προς το χώρο χαμηλότερης θερμοκρασίας. Η αντλία θερμότητας, ως σύστημα, έχει την ικανότητα να μεταφέρει θερμότητα αντίθετα προς τη φυσική ροή, για αυτό το λόγο και χρειάζεται ενέργεια για να λειτουργήσει. Το μεγάλο πλεονέκτημα τέτοιων συστημάτων είναι ότι μπορούν να λειτουργήσουν με υψηλές αποδόσεις, σε ένα μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος, τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη. Φυσικά, όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ ενός εσωτερικού χώρου που κλιματίζεται και του εξωτερικού περιβάλλοντος, τόσο μειώνονται οι επιδόσεις του συστήματος.

Η αρχή λειτουργίας των αντλιών θερμότητας βασίζεται στον ψυκτικό κύκλο, δηλαδή σε έναν συνεχή ψυκτικό κύκλο εκτόνωσης και συμπίεσης ενός ρευστού (ψυκτικού μέσου), μεταφέροντας θερμότητα από το περιβάλλον σε έναν χώρο και αντίστροφα.



Εικόνα 28: Ψυκτικός κύκλος [16].

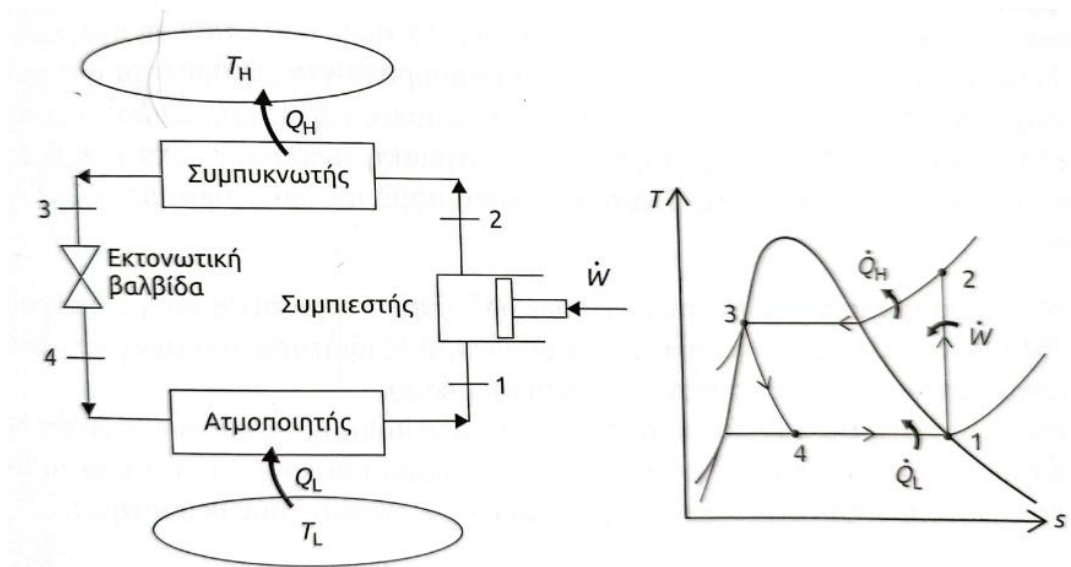
### 3.3.2 Βασικά δομικά μέρη αντλίας θερμότητας

Τα βασικά δομικά μέρη μιας αντλίας θερμότητας είναι τα εξής:

- **Ατμοποιητής:** είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας για την παραγωγή ψύξης, εντός του οποίου λαμβάνει χώρα η ατμοποίηση του ψυκτικού μέσου υπό χαμηλή θερμοκρασία, γεγονός που οδηγεί σε απορρόφηση θερμότητας από το ψυκτικό μέσο.
- **Γραμμή αναρρόφησης:** είναι ο σωλήνας που συνδέει τον ατμοποιητή με το συμπιεστή. Αφού απορροφήσει θερμότητα στον ατμοποιητή, το ψυκτικό μέσο οδηγείται μέσω της γραμμής αναρρόφησης (suction line), συνήθως σε κατάσταση κορεσμένου ατμού, στο συμπιεστή.
- **Συμπιεστής:** η συσκευή αυτή αποτελεί «σύνορο» μεταξύ της περιοχής χαμηλής και της περιοχής υψηλής πίεσης του κύκλου. Πραγματοποιεί διπλή εργασία, την αναρρόφηση των ατμών από τον ατμοποιητή και τη συμπίεση των ατμών χαμηλής πίεσης σε μικρότερο όγκο, ώστε να παραχθεί υπέρθερμος ατμός υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας [17].
- **Γραμμή κατάθλιψης:** αυτός ο σωλήνας συνδέει το συμπιεστή με το συμπυκνωτή. Αφού ο συμπιεστής μετατρέπει το ψυκτικό μέσο σε ατμό υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, η γραμμή κατάθλιψης (hot gas discharge line) διοχετεύει το ψυκτικό μέσο προς το συμπυκνωτή [17].
- **Συμπυκνωτής:** είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας, όπως και ο ατμοποιητής, με τη διαφορά ότι ο συμπυκνωτής αποσκοπεί στην απόρριψη θερμότητας (και όχι στην απορρόφηση θερμότητας όπως ο ατμοποιητής), που είναι η σημαντική διαφορά μεταξύ τους. Στο συμπυκνωτή προκαλείται αλλαγή φάσης του υπέρθερμου ατμού σε κορεσμένο υγρό.

- **Συμπληρωματική ηλεκτρική αντίσταση:** αυξάνει τη θερμική απόδοση του συστήματος. Η λειτουργία της συνίσταται στο να αποτρέπει την ψύξη του ρευστού σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- **Τετράοδη βαλβίδα:** αποτελεί τον μηχανισμό αντιστροφής του συστήματος από θέρμανση σε ψύξη και αντίστροφα, ανάλογα με τις ανάγκες του κλιματιζόμενου χώρου.
- **Γραμμή υγρού:** είναι ο σωλήνας που συνδέει το συμπυκνωτή με την εκτονωτική βαλβίδα. Μόνο υγρή φάση επιτρέπεται να διέρχεται από τη γραμμή υγρού (liquid line), η οποία χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, αφού το ψυκτικό μέσο είναι ακόμα υπό υψηλή πίεση.

Εκτός από τα παραπάνω, όπως είναι λογικό, υπάρχουν και αυτοματισμοί που είναι υπεύθυνοι για την ορθή λειτουργία του συστήματος.



Εικόνα 29: Ιδανικός ψυκτικός κύκλος συμπίεσης ατμών και διάγραμμα T-s αυτού [17].

Σημαντική είναι και η επιλογή του κατάλληλου ψυκτικού μέσου σε μια αντλία θερμότητας. Επιγραμματικά παρουσιάζονται τα σημαντικότερα κριτήρια που πρέπει να πληρούνται από ένα ψυκτικό μέσο.

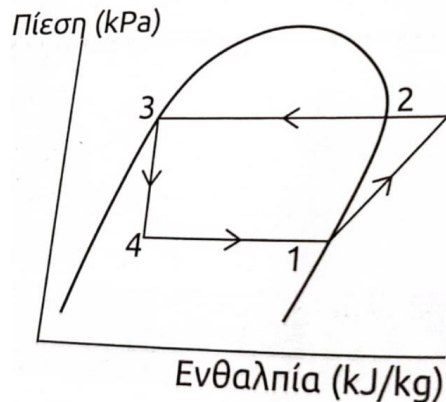
- Καλές θερμοφυσικές ιδιότητες (π.χ. θερμική αγωγιμότητα και συνεκτικότητα)
- Φιλικότητα προς το περιβάλλον
- Χαμηλή θερμοκρασία βρασμού

- Χαμηλή παροχή όγκου ανά μονάδα ψυκτικής ικανότητας
- Πίεση ατμοποίησης χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής
- Υψηλές λανθάνουσες θερμότητες ατμοποίησης

Κατά την επιλογή ενός ψυκτικού μέσου, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι θερμοδυναμικές ιδιότητές του σε κατάσταση κορεσμού. Για να επιτευχθεί μετάδοση θερμότητας με ικανοποιητικούς ρυθμούς, θα πρέπει να διατηρείται μια θερμοκρασιακή διαφορά της τάξεως περίπου των 10°C μεταξύ του ψυκτικού μέσου και του ρευστού που παραλαμβάνει ή αποδίδει τη θερμότητα. Για παράδειγμα, αν ο ψυχόμενος χώρος πρέπει να διατηρείται στους 5°C, τότε το ψυκτικό μέσο θα πρέπει να ατμοποιείται σε θερμοκρασία -5°C στον ατμοποιητή. Επίσης, η θερμοκρασία στο συμπυκνωτή (άρα και η υψηλή πίεση) εξαρτάται από τη θερμοκρασία του μέσου απόρριψης θερμότητας. Χρησιμοποιώντας ένα χαμηλής θερμοκρασίας μέσο απόρριψης θερμότητας (π.χ. νερό), είναι δυνατό να διατηρηθεί χαμηλή η πίεση συμπυκνώσεως επιτυγχάνοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, υψηλότερους COP όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Ένα ψυκτικό μέσο το οποίο επιλέγεται συχνά σε εφαρμογές κλιματισμού είναι το R-410a. Ένα πιο οικολογικό είναι το R32, ενώ το R134a χρησιμοποιείται συχνά στα ψυγεία αυτοκινήτων.

### 3.3.3 Αρχή λειτουργίας A/Θ

Η αρχή λειτουργίας μιας A/Θ είναι η ίδια που εφαρμόζεται σε ψυγεία και κλιματιστικές συσκευές. Η λειτουργία τους βασίζεται στον ψυκτικό κύκλο, όπως προαναφέρθηκε, ο οποίος είναι ένας αένας κύκλος εκτόνωσης και συμπίεσης ενός ρευστού (εργαζόμενο μέσο). Το ρευστό ρέει μέσα σε σωλήνες και στο σημείο 1 είναι κορεσμένος ατμός πριν την είσοδο στο συμπιεστή. Ο συμπιεστής αυξάνει την πίεση και κατ' επέκταση τη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου. Στην έξοδο του συμπιεστή (σημείο 2) το εργαζόμενο μέσο βγαίνει ως υπέρθερμος ατμός και κατευθύνεται στο συμπυκνωτή. Στο συμπυκνωτή αποβάλλει τη θερμότητα που έδωσε ο συμπιεστής κατά τη συμπίεση και εξέρχεται σε κατάσταση κορεσμένου υγρού στο σημείο 3. Στη συνέχεια το ψυκτικό μέσο εκτονώνεται στην εκτονωτική βαλβίδα με αποτέλεσμα την πτώση της πίεσης και της θερμοκρασίας του (μεταβολή 3 → 4). Τέλος, από τη βαλβίδα στραγγαλισμού (ή εκτονωτική βαλβίδα) το διφασικό μείγμα χαμηλής πίεσης οδηγείται στον ατμοποιητή, όπου ατμοποιείται απορροφώντας θερμότητα για να παράξει το ψυκτικό αποτέλεσμα (μεταβολή 4 → 1). Η περιγραφή του ψυκτικού κύκλου που προηγήθηκε αφορά στο θερμοδυναμικό διάγραμμα της Εικόνας 30.



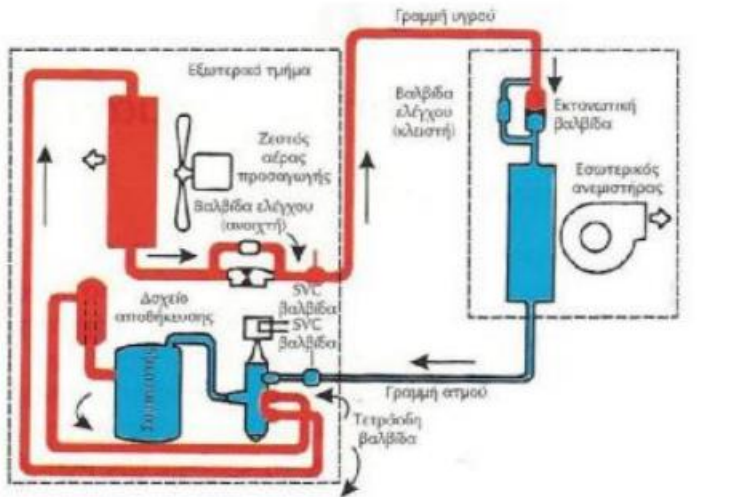
Εικόνα 30: Θεωρητικό θερμοδυναμικό διάγραμμα ψυκτικού κύκλου για αντλίες θερμότητας πίεσης – ενθαλπίας (logP-h) [17].

Η λειτουργία του κύκλου αποτελείται από τις παρακάτω μεταβολές:

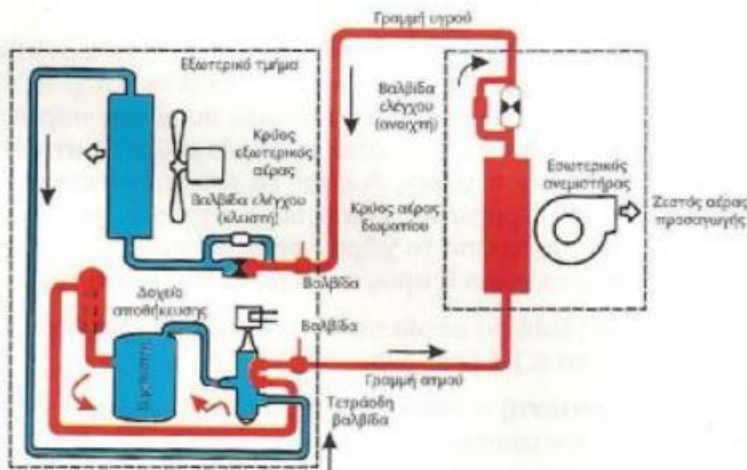
- την **αντιστρεπτή αδιαβατική συμπίεση**  $1 \rightarrow 2$ . Από τον ατμοποιητή, ο κορεσμένος ατμός χαμηλής πίεσης του ψυκτικού μέσου οδηγείται στο συμπιεστή, όπου συμπιέζεται προς μικρότερο όγκο και αυξημένη πίεση και θερμοκρασία, ώστε να διοχετευτεί προς το συμπυκνωτή.
- την **αντιστρεπτή ισόθλιπτη ψύξη**  $2 \rightarrow 3$ . Από το συμπιεστή, ο ατμός υψηλής πίεσης εισάγεται στο συμπυκνωτή και συμπυκνώνεται με τη βοήθεια αέρα ή νερού (ανάλογα τον τύπο της αντλίας).
- τον **μη αντιστρεπτό ισενθαλπικό στραγγαλισμό**  $3 \rightarrow 4$ . Από το συμπυκνωτή, το κορεσμένο υγρό υψηλής πίεσης διέρχεται μέσω μιας στραγγαλιστικής βαλβίδας, ώστε να υποστεί μείωση της πίεσης και της θερμοκρασίας του.
- την **αντιστρεπτή ισόθλιπτη θέρμανση**  $4 \rightarrow 1$ . Από τη στραγγαλιστική βαλβίδα, το διφασικό μείγμα χαμηλής πίεσης οδηγείται στον ατμοποιητή, όπου ατμοποιείται απορροφώντας θερμότητα από το ψυχόμενο μέσο, ώστε να παράξει το ψυκτικό αποτέλεσμα.

Μια αντλία θερμότητας λειτουργεί είτε για θέρμανση είτε για ψύξη. Σε κάθε περίπτωση ακολουθεί τη λειτουργία του ψυκτικού κύκλου. Το μόνο που αντιστρέφεται στις δύο περιπτώσεις είναι ο ρόλος του ατμοποιητή με εκείνον του συμπυκνωτή. Το καλοκαίρι ο ατμοποιητής είναι τοποθετημένος στον ψυχόμενο χώρο εφόσον αντλεί – απορροφά θερμότητα από αυτόν και τον ψύχει. Το χειμώνα, αντίστροφα, θα έπρεπε ο ατμοποιητής να τοποθετηθεί στο εξωτερικό περιβάλλον ώστε να απορροφήσει θερμότητα την οποία θα απέβαλε μέσω του συμπυκνωτή στον θερμαινόμενο σε αυτή την περίπτωση χώρο. Αντί λοιπόν να μεταφέρονται οι εναλλάκτες του ατμοποιητή και του συμπυκνωτή από τον

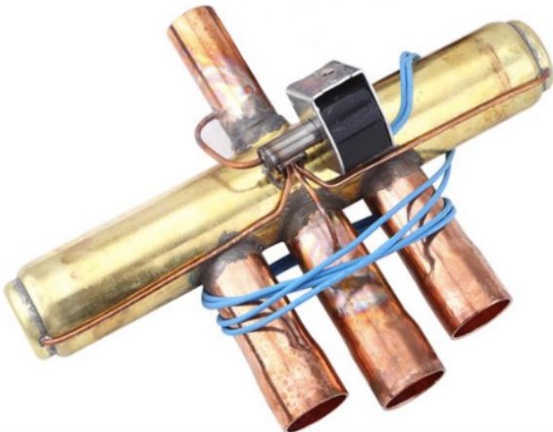
κλιματιζόμενο χώρο στο περιβάλλον και αντίστροφα, η ύπαρξη της τετράοδης βαλβίδας επιτρέπει την αντιστροφή της ροής του ψυκτικού μέσου, διατηρώντας φυσικά τον ψυκτικό κύκλο, στον οποίο συνεχίζεται κανονικά η προσφορά μηχανικού έργου για τη συμπίεση των ατμών του ψυκτικού μέσου.



Εικόνα 31: Κύκλος A/Θ για ψύξη [18].



Εικόνα 32: Κύκλος A/Θ για θέρμανση [18].



**Εικόνα 33:** Τετράοδη βαλβίδα που χρησιμοποιείται σε Α/Θ για αντιστροφή της ροής του ψυκτικού μέσου [19].

### 3.3.4 Απόδοση Αντλίας Θερμότητας

Η λειτουργία μιας αντλίας θερμότητας χαρακτηρίζεται από περισσότερους από έναν βαθμούς απόδοσης, καθένας εκ των οποίων επικεντρώνεται σε κάτι διαφορετικό. Ο κάθε βαθμός απόδοσης της αντλίας θερμότητας είναι διαφορετικός στη θέρμανση και στην ψύξη.

Ο σημαντικότερος βαθμός απόδοσης μιας αντλίας θερμότητας είναι ο στιγμιαίος βαθμός απόδοσης, COP (Coefficient of Performance), ή αλλιώς συντελεστής συμπεριφοράς, για τον οποίο ισχύει γενικά ο παρακάτω κανόνας:

$$COP = \frac{\text{Τι κερδίζω}}{\text{Τι πληρώνω}} = \frac{\text{Θερμική Ισχύς Ατμοποιητή [W]}}{\text{Ηλεκτρική ισχύς συμπιεστή [W]}}_{\psiύξη} \quad \text{ή} \quad \frac{\text{Θερμική Ισχύς Συμπυκνωτή [W]}}{\text{Ηλεκτρική ισχύς συμπιεστή [W]}}_{\thetaέρμανση}$$

Όσο μικρότερη είναι η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του κλιματιζόμενου χώρου και του εξωτερικού περιβάλλοντος, τόσο υψηλότερο είναι και το COP. Αυτό σημαίνει ότι στην Ελλάδα για παράδειγμα, όπου εν γένει δεν επικρατούν ακραίες θερμοκρασίες, η απόδοση των αντλιών θερμότητας παρουσιάζεται γενικά υψηλή. Ο συντελεστής συμπεριφοράς, COP, συνήθως κυμαίνεται στο εύρος 3-5.

Όμως, η τιμή του COP ισχύει μόνο για μια συγκεκριμένη εξωτερική θερμοκρασία και δε συμπεριλαμβάνει τις διακυμάνσεις. Τις περισσότερες φορές, μάλιστα, οι κατασκευαστές των αντλιών θερμότητας, βασίζουν τον COP σε εκείνη την εξωτερική θερμοκρασία που δίνει την υψηλότερη απόδοση. Για αυτό το λόγο υπάρχει και ο εποχιακός συντελεστής απόδοσης, SCOP, ο οποίος δίνει μια πιο ακριβή εικόνα της απόδοσης μιας αντλίας θερμότητας σε σχέση με τον COP και δείχνει πόσο αποτελεσματική είναι η αντλία σε ετήσια βάση. Διευκρινίζεται ότι ο όρος SCOP αντιστοιχεί στην εποχιακή απόδοση των αντλιών θερμότητας μόνο σε λειτουργία θέρμανσης [20].



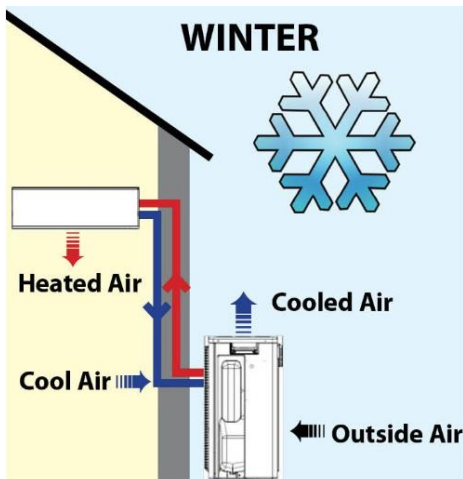
Γνωρίζοντας τη θερμική ισχύ του ατμοποιητή (evap) για ψύξη και του συμπυκνωτή (cond) για θέρμανση, καθώς και της συνολικής ηλεκτρικής κατανάλωσης ( $P_{tot}$ ), υπολογίζεται η απόδοση της αντλίας θερμότητας σε κάθε λειτουργία, μέσω των COP (Coefficient of Performance) για θέρμανση και EER (Energy Efficiency Ratio) για ψύξη, αντίστοιχα, ως ακολούθως και με βάση τα σημεία της *Εικόνα 29*:

$$COP = \frac{Q_{cond}}{P_{tot}} = \frac{\dot{m} \cdot (h_2 - h_3)}{P_{tot}} \quad (10)$$

$$EER = \frac{Q_{evap}}{P_{tot}} = \frac{\dot{m} \cdot (h_1 - h_4)}{P_{tot}} \quad (11)$$

### 3.3.5 Αντλίες Θερμότητας αέρα-αέρα

Οι αντλίες θερμότητας διακρίνονται σε διάφορους τύπους, ανάλογα με το ρευστό που προσλαμβάνει και το ρευστό που προσδίδει θερμότητα, όπως για παράδειγμα αντλίες αέρα-νερού, νερού-νερού, αέρα-αέρα κ.ά. Πιο συγκεκριμένα, οι αντλίες θερμότητας αέρα-αέρα είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μονάδα για μεικτή λειτουργία θέρμανσης και ψύξης σε κτίρια κατοικιών, κτίρια στέγασης γραφείων και χώρους καταστημάτων. Όπως είναι προφανές, ο αέρας είναι τόσο το ρευστό που προσλαμβάνει θερμότητα, όσο και το ρευστό που προσδίδει θερμότητα. Σε λειτουργία θέρμανσης, πηγή θέρμανσης είναι ο αέρας του περιβάλλοντος και η θερμική ισχύς αποδίδεται στους εσωτερικούς χώρους του κτιρίου. Μια γνωστή κατηγορία τέτοιων αντλιών θερμότητας είναι τα κλιματιστικά διαιρούμενου τύπου (split type). Σε αυτόν τον τύπο αντλιών θερμότητας το ένα στοιχείο (εναλλάκτης) βρίσκεται εντός του κτιρίου και προσλαμβάνει ενέργεια και το άλλο στοιχείο (εναλλάκτης) βρίσκεται εξωτερικά του κτιρίου μαζί με το συμπιεστή. Συνήθως την εσωτερική μονάδα τη συναντάμε επίτοιχο (σε άνοιγμα του τοίχου).



Εικόνα 34: Αντλία θερμότητας αέρα-αέρα [21].

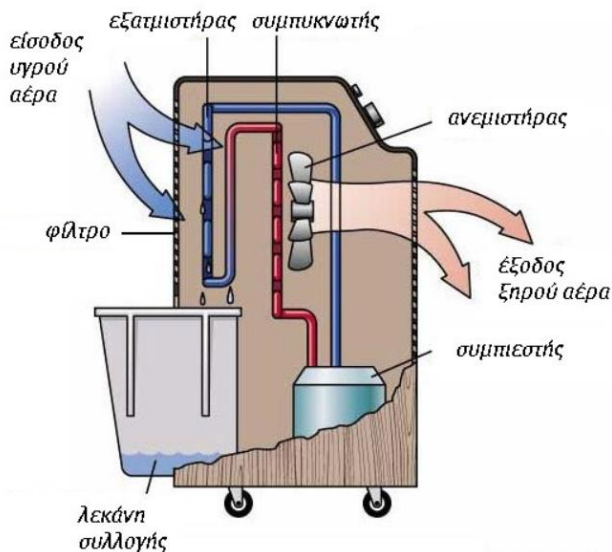
### 3.4 Μονάδα αφύγρανσης

Η τοποθέτηση αφυγραντήρα γίνεται κυρίως προκειμένου αυτός να ορίζει τα επιθυμητά επίπεδα υγρασίας σε έναν χώρο, συμβάλλοντας έτσι στην επίτευξη θερμικής άνεσης. Οι χώροι στους οποίους συχνά τοποθετούνται αφυγραντήρες είναι σε οικίες, δωμάτια με προβλήματα υγρασίας, σε αποθήκες, σκάφη και σε άλλους χώρους. Ορισμένες φορές οι ενδείξεις που καταδεικνύουν την εφαρμογή συστήματος αφύγρανσης μπορούν να γίνουν ιδιαίτερα έντονες και εμφανείς, όπως οι παρακάτω:

- Όταν πάνω στους υαλοπίνακες και στα παντζούρια συγκεντρώνονται υδρατμοί στη μορφή σταγόνων.
- Σημάδια μούχλας στο ταβάνι ή στις γωνίες των τοίχων (κυρίως στο μπάνιο)
- Ύπαρξη χαρακτηριστικής οσμής της μούχλας και της υγρασίας (π.χ. στο γκαράζ)

Οι αφυγραντήρες με ψυκτικό κύκλωμα ψύχουν τον αέρα σε έναν εναλλάκτη και του αφαιρούν την υγρασία. Ο τύπος αυτός αφυγραντήρα διαθέτει ψυκτικό κύκλωμα ίδιο με αυτό των κλιματιστικών που περιλαμβάνει συμπιεστή, εκτονωτική βαλβίδα και δύο εναλλάκτες θερμότητας. Ο αέρας του χώρου εισέρχεται στον αφυγραντήρα, ψύχεται, αποβάλλει την υγρασία του και στη συνέχεια αναθερμαίνεται και αποδίδεται και πάλι στον χώρο σε θερμοκρασία ελάχιστα μεγαλύτερη της αρχικής. Πρόκειται για τον συνηθέστερο τύπο αφυγραντήρα της αγοράς.

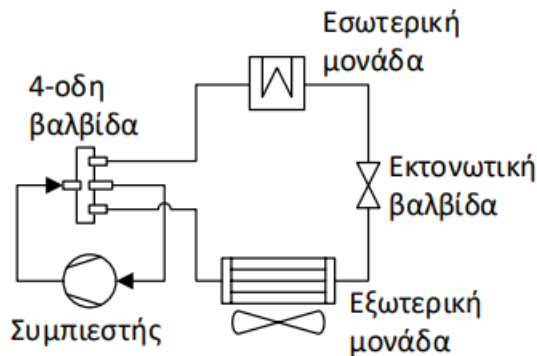
Οι αφυγραντήρες με συμπιεστή λειτουργούν πολύ καλά σε θερμοκρασίες άνω των 15°C. Σε χαμηλότερες, όμως, θερμοκρασίες δεν λειτουργούν ικανοποιητικά, γιατί ο αέρας του χώρου είναι ήδη κρύος (άρα έχει ήδη αποβάλλει μέρος της υγρασίας του στους τοίχους, τα παράθυρα και τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία του κτιρίου), ενώ η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ στοιχείου ψύξης και αέρα μειώνεται, άρα δεν μπορεί να επιτευχθεί ικανοποιητική ψύξη. Σε ακόμη χαμηλότερες θερμοκρασίες, οι αφυγραντήρες με συμπιεστή (ψυκτικό κύκλο) σταματούν την λειτουργία τους για να κάνουν απόψυξη, ώστε να προστατεύσουν το ψυκτικό κύκλωμα από πάγο. Ο χρόνος απόψυξης μπορεί ανάλογα με τη θερμοκρασία του χώρου να φτάσει και τα 2/3 του συνολικού χρόνου λειτουργίας.



Εικόνα 35: Αφυγραντήρας με ψυκτικό κύκλωμα [22].

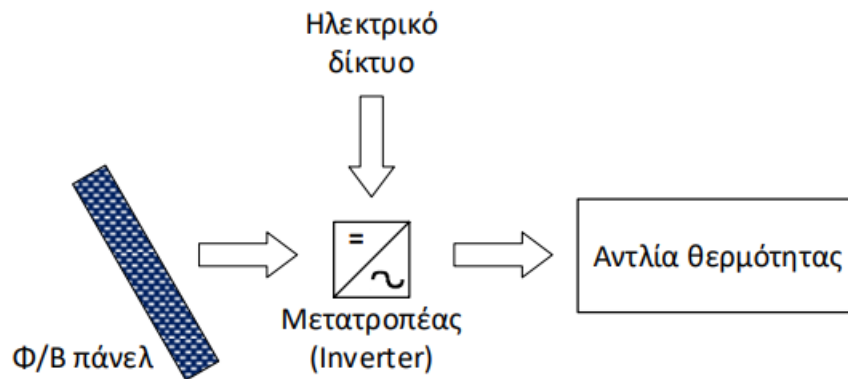
### 3.5 Σύστημα Φ/Β – Αντλίας Θερμότητας

Σε αυτό το σημείο το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη σύνδεση των Φ/Β στοιχείων με την αντλία θερμότητας, η οποία είναι υπεύθυνη για τον κλιματισμό της οικίας της παρούσας διπλωματικής. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η αντλία θερμότητας αποτελείται από έναν συμπιεστή, δύο εναλλάκτες θερμότητας, εκ των οποίων ο ένας επικοινωνεί με το εξωτερικό περιβάλλον (εξωτερική μονάδα) και ο άλλος με το εσωτερικό (εσωτερική μονάδα), μία εκτονωτική και μία τετράοδη βαλβίδα. Συνοπτικά, λοιπόν, χρησιμοποιείται μια τυπική διάταξη αντλίας θερμότητας, με ρευστό παραλαβής και πρόσδοσης θερμότητας τον αέρα, με την προσθήκη μιας τετράοδης βαλβίδας για την εναλλαγή της λειτουργίας από θέρμανση σε ψύξη και αντίστροφα. Πιο αναλυτικά, στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το μονογραμμικό διάγραμμα της αντλίας.



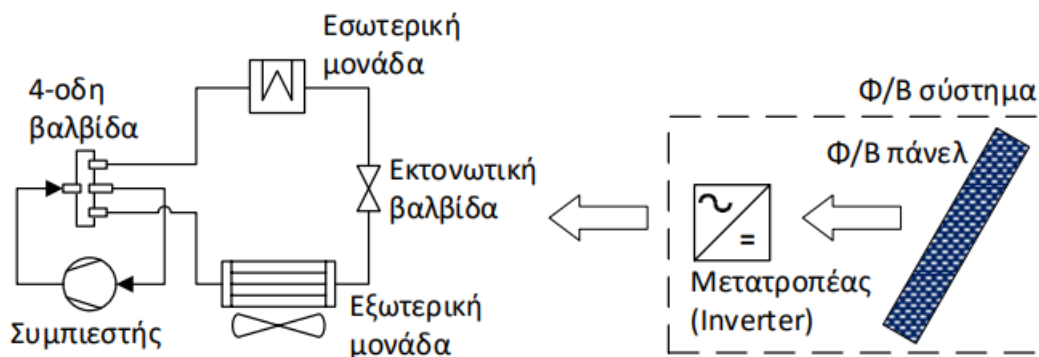
Εικόνα 36: Μονογραμμικό διάγραμμα αντλίας θερμότητας.

Όσον αφορά στα Φ/Β, αποτελούνται από συστοιχίες πάνελ διαφορετικής επιφάνειας σε κάθε σενάριο και διαφορετικού βαθμού απόδοσης ανάλογα με την τεχνολογία που επιλέγεται. Τα Φ/Β είναι υπεύθυνα για την ηλεκτροδότηση της αντλίας θερμότητας για τον κλιματισμό των χώρων της οικίας και, όταν η ενέργεια που παράγουν επαρκεί, για την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της οικίας σε ηλεκτρισμό (φωτισμός, ηλεκτρικές συσκευές κλπ.). Σημειώνεται ότι δε γίνεται χρήση μπαταριών. Λόγω της απαίτησης της αντλίας θερμότητας σε εναλλασσόμενο ρεύμα, είναι αναγκαία η χρήση μετατροπέα (inverter) για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος, που παράγουν τα Φ/Β, σε εναλλασσόμενο. Εκτός της μετατροπής σε εναλλασσόμενο ρεύμα, ο μετατροπέας επιβαρύνεται και με την τροφοδοσία φορτίου από τα Φ/Β ή από το δίκτυο, βάσει της παραγόμενης ενέργειας από τα Φ/Β προς υλοποίηση ενεργειακού συμψηφισμού (Net - metering). Ένα πολύ απλό μονογραμμικό διάγραμμα του Φ/Β συστήματος παρουσιάζεται σε αυτό το σημείο.



**Εικόνα 37: Μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος Φ/Β.**

Το συνολικό σύστημα Φ/Β και αντλίας θερμότητας παρουσιάζεται παρακάτω.



**Εικόνα 38: Σύστημα Φ/Β – Αντλίας θερμότητας.**

## 4. Σχεδιασμός της οικίας σε περιβάλλον SketchUp

### 4.1 Το λογισμικό SketchUp

---

Για τη σχεδίαση της οικίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SketchUp Make 2017. Το SketchUp δημιουργήθηκε το 1999 από το Last Software. Το 2006 η Google αγόρασε το SketchUp και δημιούργησε μια προσθήκη για το Google Earth. Το 2012, η Trimble Navigation (νυν Trimble Inc) αγόρασε το SketchUp από την Google και επέκτεινε την εφαρμογή ξεκινώντας μια ιστοσελίδα που φιλοξενεί plugins και επεκτάσεις. Μέσω του OpenStudio SketchUp Plugin έγινε εν συνεχεία η ενεργειακή παραμετροποίηση της οικίας, διαδικασία που αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο. Το SketchUp είναι μια διαισθητική εφαρμογή 3D μοντελοποίησης που επιτρέπει στο χρήστη να δημιουργεί και να επεξεργάζεται μοντέλα 2D και 3D με τη μέθοδο «Push and Pull». Το εργαλείο Push and Pull επιτρέπει στους σχεδιαστές να εξωθήσουν οποιαδήποτε επίπεδη επιφάνεια σε τρισδιάστατα σχήματα.

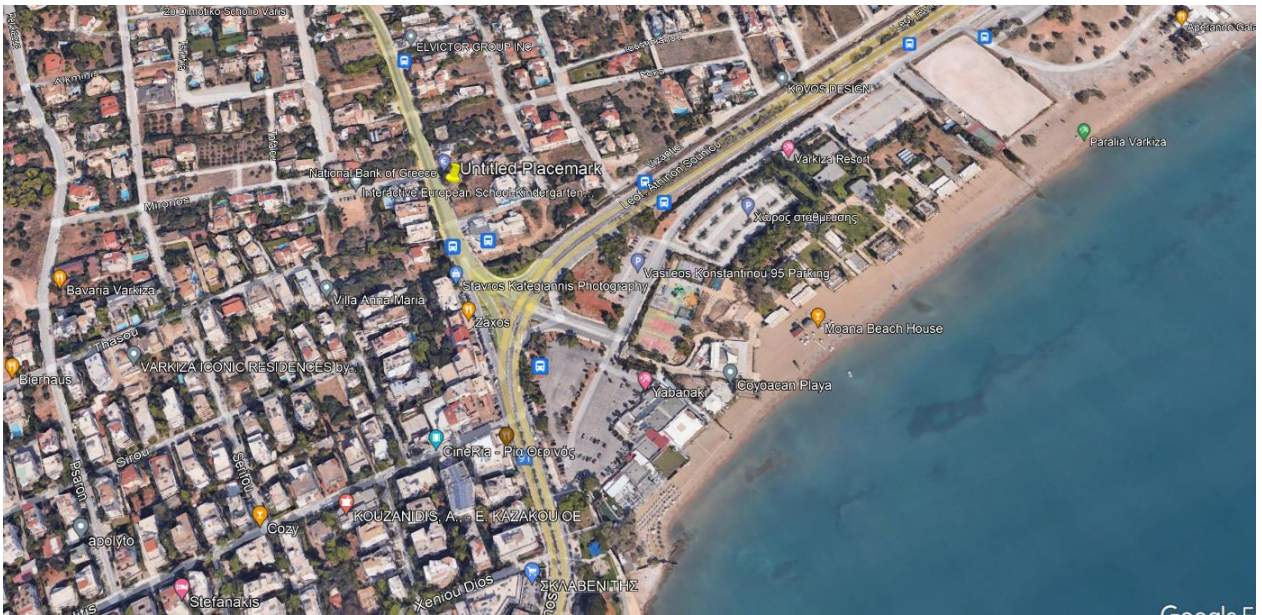
Το SketchUp είναι ένα πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για μια ευρεία γκάμα τρισδιάστατων έργων μοντελοποίησης. Η αρχιτεκτονική, η εσωτερική διακόσμηση, η αρχιτεκτονική τοπίου και ο σχεδιασμός βιντεοπαιχνιδιών είναι κάποιοι από τους βασικούς κλάδους στους οποίους το SketchUp βρίσκει εφαρμογή.

### 4.2 Σχεδιασμός της οικίας

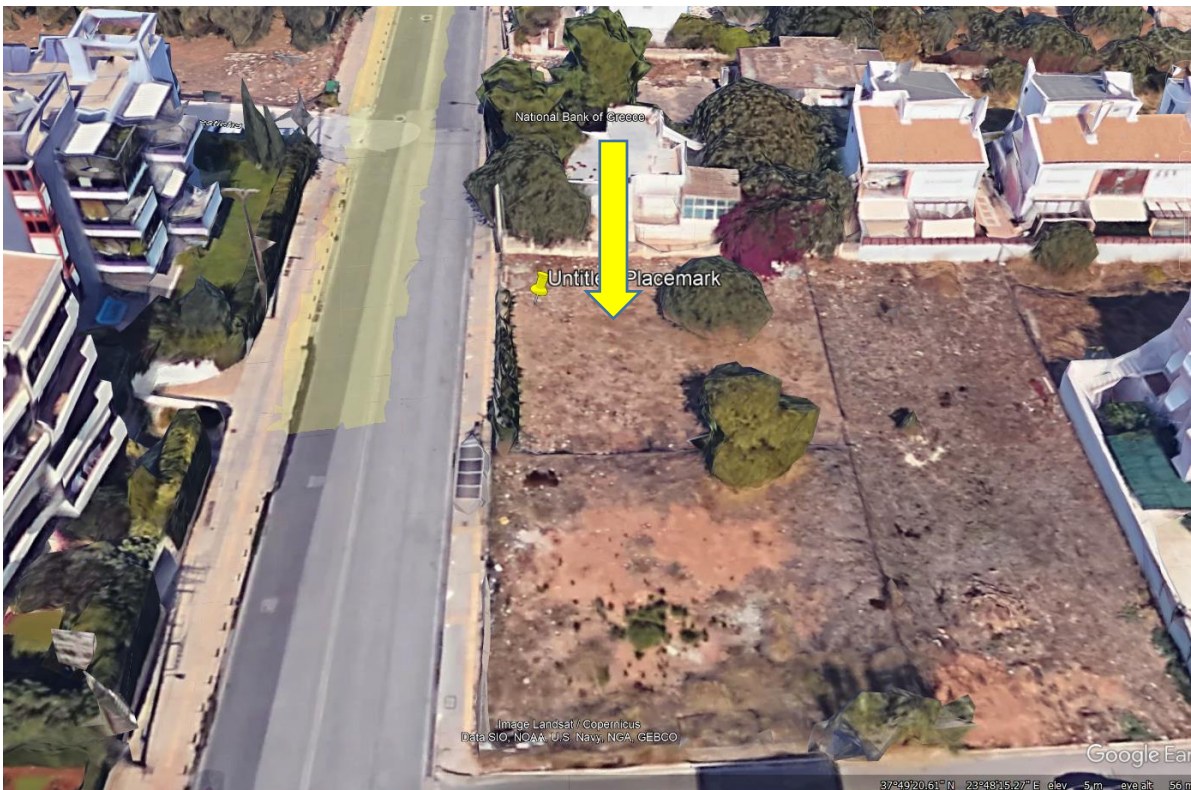
---

Το οικόπεδο, στο οποίο σχεδιάζεται η μονοκατοικία, βρίσκεται στην περιοχή της Βάρης επί της οδού Βασιλέως Κωνσταντίνου και έχει έκταση περίπου 400 m<sup>2</sup>. Η σχεδίαση γίνεται σε περιβάλλον SketchUp όπως ήδη αναφέρθηκε.



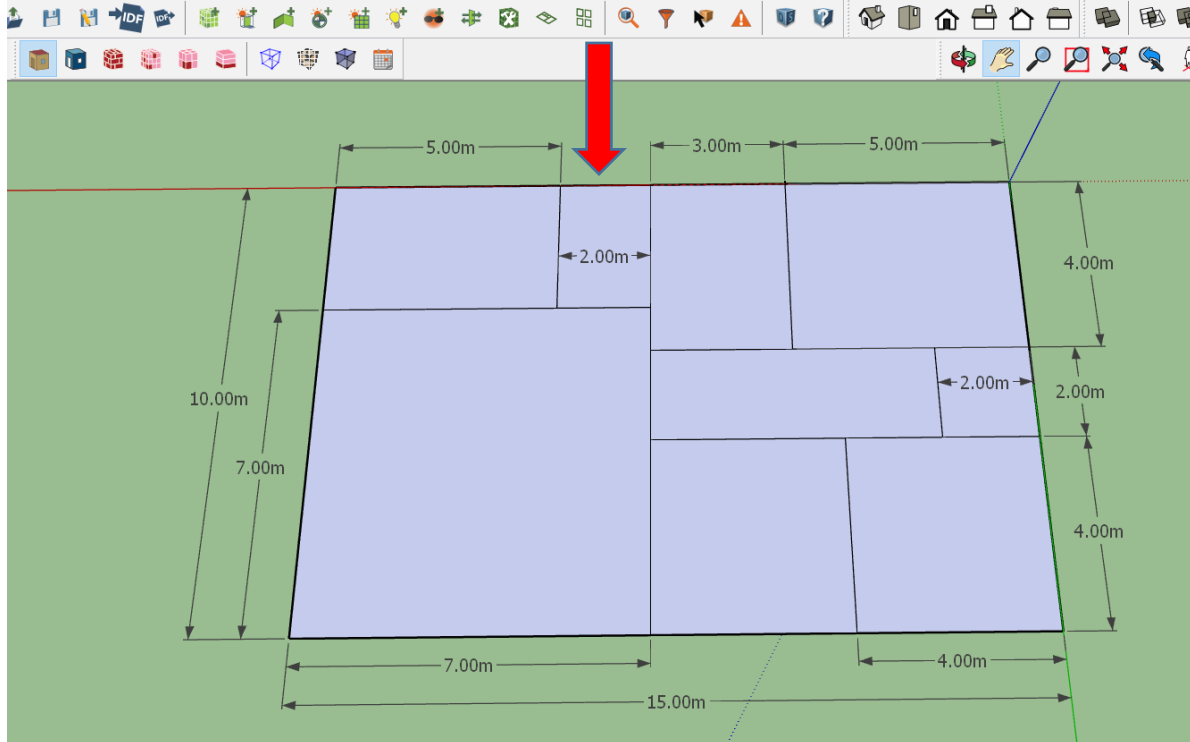


Εικόνα 39: Η ευρύτερη περιοχή πλησίον του οικοπέδου (φαίνεται με την πινέζα) στην περιοχή της Βάρκιζας μέσω του Google Earth.



Εικόνα 40: Η ακριβής θέση του οικοπέδου επί της οδού Βασ. Κωνσταντίνου μέσω του Google Earth.

Αρχικά, σχεδιάζεται η κάτοψη του κτηρίου με χρήση των εντολών Line και Rectangle. Στην Εικόνα 41 με το κόκκινο βέλος προσδιορίζεται η βορεινή πλευρά της οικίας. Εικόνα 41: Κάτοψη και διαστάσεις χώρων μονοκατοικίας.



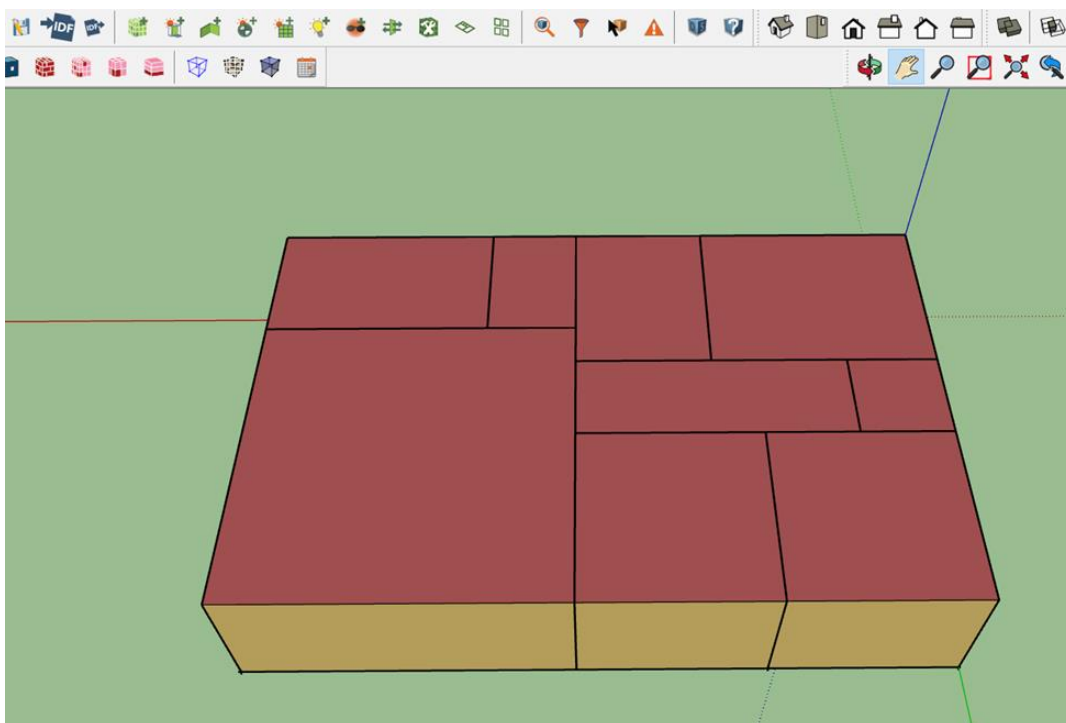
Εικόνα 41: Κάτοψη και διαστάσεις χώρων μονοκατοικίας.

Αφού σχεδιαστεί η κάτοψη στο SketchUp, επιλέγεται η εντολή **Create Spaces from Diagram** και γίνεται extrusion σε ύψος 2,90 m (floor height). Προφανώς ο αριθμός των ορόφων ορίζεται ίσος προς 1 (number of floors = 1).

Πίνακας 3: Διαστάσεις των χώρων της οικίας.

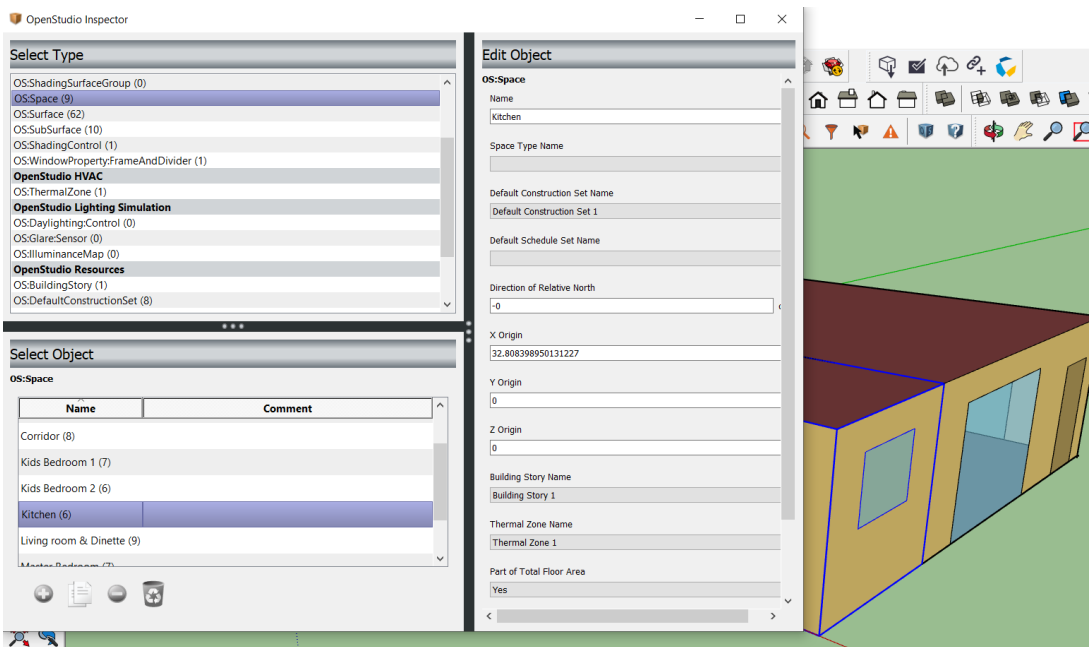
Δωμάτιο	Μήκος (m)	Πλάτος (m)	Εμβαδόν (m <sup>2</sup> )
Utility (πλύσιμο ρούχων)	2	2	4
Bedroom 1	4	4	16
Bedroom 2	4	4	16
Master Bedroom (γονείς)	5	4	20
Bath 1	3	4	12
Bath 2	2	3	6
Corridor	6	2	12
Kitchen	5	3	15
Living Room & Dinette	7	7	49





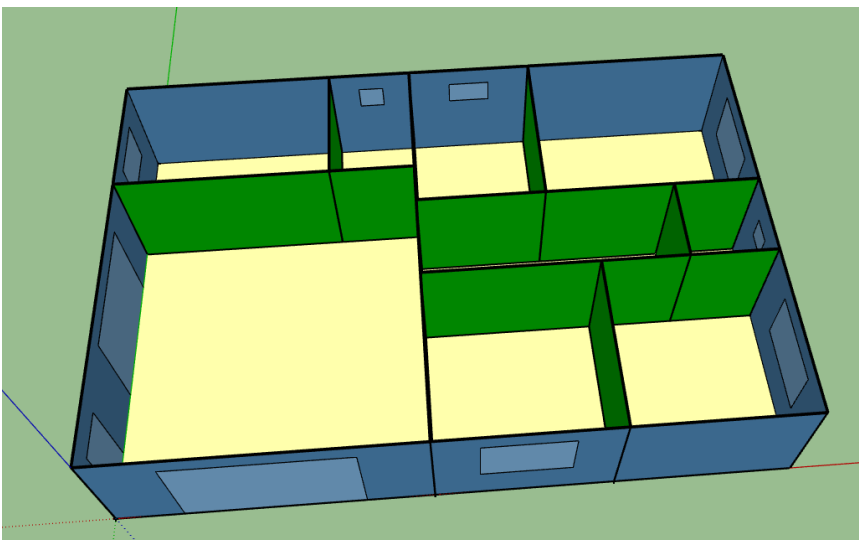
**Εικόνα 42: Κάτοψη οικίας χωρίς πόρτες και παράθυρα.**

Με την εντολή **OpenStudio Inspector** → **Spaces** δίνεται η δυνατότητα να ονομαστούν οι διάφοροι χώροι της κατοικίας προς διευκόλυνση του διαχωρισμού αυτών και των ιδιοτήτων τους.



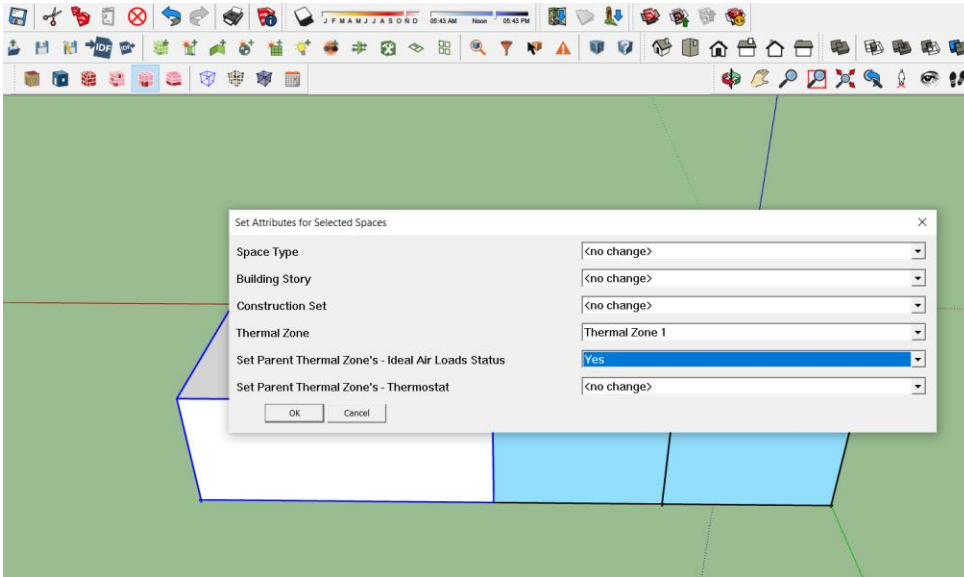
Εικόνα 43: Παράδειγμα ονομασίας χώρου μέσω της εντολής Inspector.

Μία από τις ιδιότητες του λογισμικού είναι να αναγνωρίζει εξωτερικούς τοίχους, δηλαδή τοίχους που επικοινωνούν με το περιβάλλον και να τους χρωματίζει με μπλε χρώμα, εσωτερικούς τοίχους με πράσινο, δάπεδο με καφέ. Αυτό γίνεται μέσω της εντολής **Surface Matching** (Intersect in Entire Model & Match in Entire Model), ενώ ο χρωματικός διαχωρισμός των χώρων επιτυγχάνεται με χρήση της εντολής **Render By Boundary Condition**.

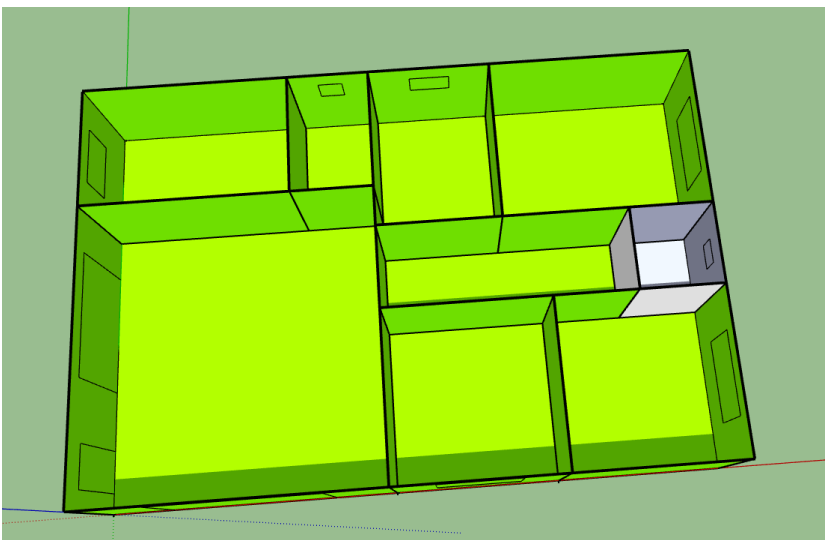


Εικόνα 44: Χρωματισμός των επιφανειών με βάση τη συνοριακή συνθήκη (χωρίς εσωτερικές πόρτες).

Σε αυτό το σημείο πραγματοποιείται ο καθορισμός των θερμικών ζωνών. Σχεδιάζεται μία ενιαία θερμική ζώνη, καθώς πρόκειται για μία απλή μονοκατοικία. Σημειώνεται ότι για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας, ο χώρος πλυσίματος ρούχων (Utility room) δεν κλιματίζεται και άρα δεν λαμβάνεται υπόψη στον καθορισμό της θερμικής ζώνης. Η θερμική ζώνη εισάγεται με χρήση του εργαλείου **Set Attributes for Selected Spaces** για κάθε χώρο ξεχωριστά. Έτσι, όλοι οι χώροι της οικίας (πλην Utility) ανήκουν στο Thermal Zone 1, που είναι και η μοναδική ορισμένη θερμική ζώνη.



Εικόνα 45: Καθορισμός θερμικής ζώνης.



Εικόνα 46: Χρωματισμός των χώρων της οικίας με βάση τη θερμική ζώνη μέσω της εντολής Render by Thermal zone.

Στη συνέχεια σχεδιάζονται πόρτες και παράθυρα, τα οποία θεωρούνται Subsurfaces. Το παράθυρο είναι ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία ενός κτιρίου. Ο χώρος των ανοιγμάτων παραθύρων αφενός συμβάλλει στον αερισμό του κτηρίου, την εισροή καθαρού αέρα και αφετέρου παρέχει τον απαραίτητο φωτισμό. Ένα παράθυρο είναι το μέσο που ενώνει το εσωτερικό του δωματίου με το εξωτερικό περιβάλλον. Οι διαστάσεις ενός υαλοπίνακα κυμαίνονται σε εύρος 35-50% επί της επιφάνειας του τοίχου της πρόσοψης και ρυθμίζονται από το πρότυπο GOST 11214-86. Σύμφωνα με αυτό, το πλάτος των παραθύρων μπορεί να είναι από 870 έως 2670 mm και το ύψος από 1160 έως 2060 mm [23]. Σήμερα, ωστόσο, οι διαστάσεις των παραθύρων είναι ένα αρκετά ευέλικτο θέμα και δεν υπακούουν απαραίτητα σε τυποποιήσεις, αλλά μόνο σε ενεργειακά και περιβαλλοντικά πρότυπα (π.χ. μηδενικών κτηρίων κ.λπ.). Τα πρότυπα αυτά αφορούν όλα τα ενεργητικά και παθητικά στοιχεία του κτηρίου (π.χ. TEE, European Building Performance Directive, ASHRAE, κ.λπ.).

Επιπλέον, σε κτίριο κατοικιών υπάρχει τυπικό ύψος τοποθέτησης των παραθύρων:

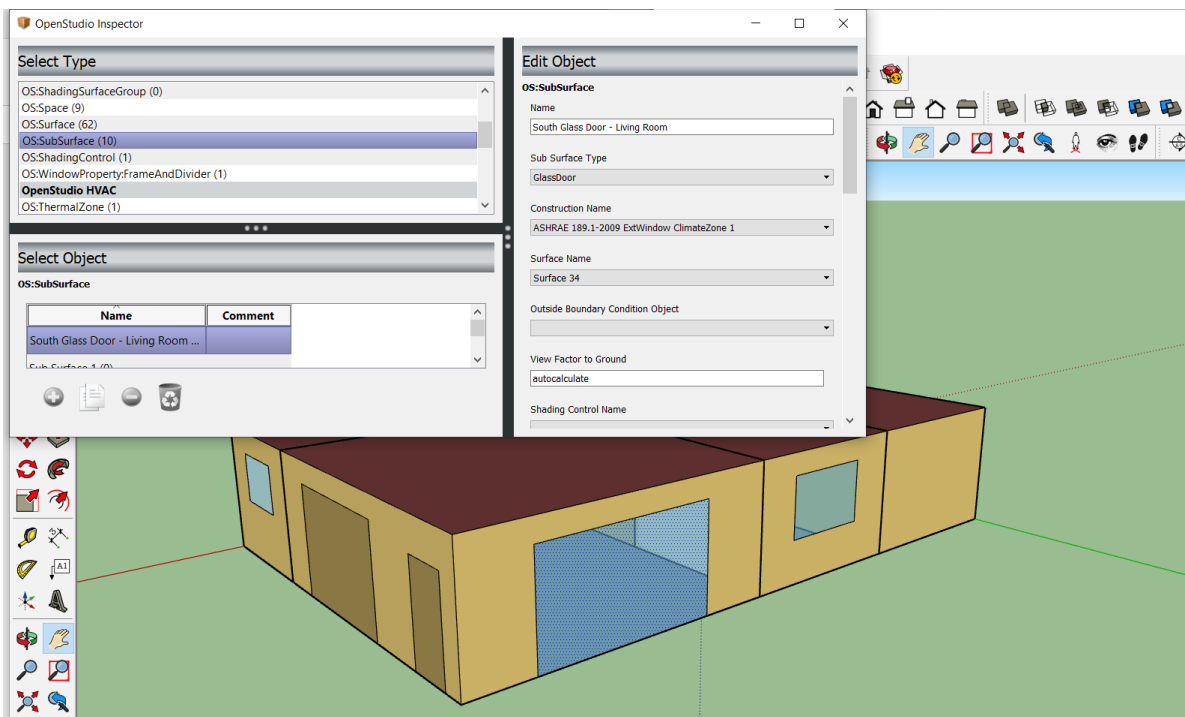
- Υπνοδωμάτιο: 700-1000 mm. Αυτό το ύψος παρέχει εξαιρετική ορατότητα και φωτισμό καθώς επίσης είναι εφικτή και η τοποθέτηση γραφείου για μελέτη ακριβώς κάτω από το παράθυρο ή καλοριφέρ [23].
- Κουζίνα: 1200-1300 mm. Σε αυτή την περίπτωση το ύψος οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχει η ανάγκη για τοποθέτηση επίπλων και ηλεκτρικών συσκευών κουζίνας [23].
- Μπάνιο: τουλάχιστον 1600 mm, ώστε να καλύπτει από τυχόν αδιάκριτα βλέμματα
- Βοηθητικά δωμάτια: 1200-1600 mm. Αυτό το ύψος οφείλεται στο ότι υπάρχει μεγάλη πιθανότητα υπερβολικής υγρασίας λόγω της εισροής κρύου αέρα [23].

Πιο συγκεκριμένα, στη βόρεια μεριά του κτηρίου επιλέχθηκαν μικρότερα παράθυρα, ενώ στη νότια μεριά μεγαλύτερα προς εκμετάλλευση του ηλίου.

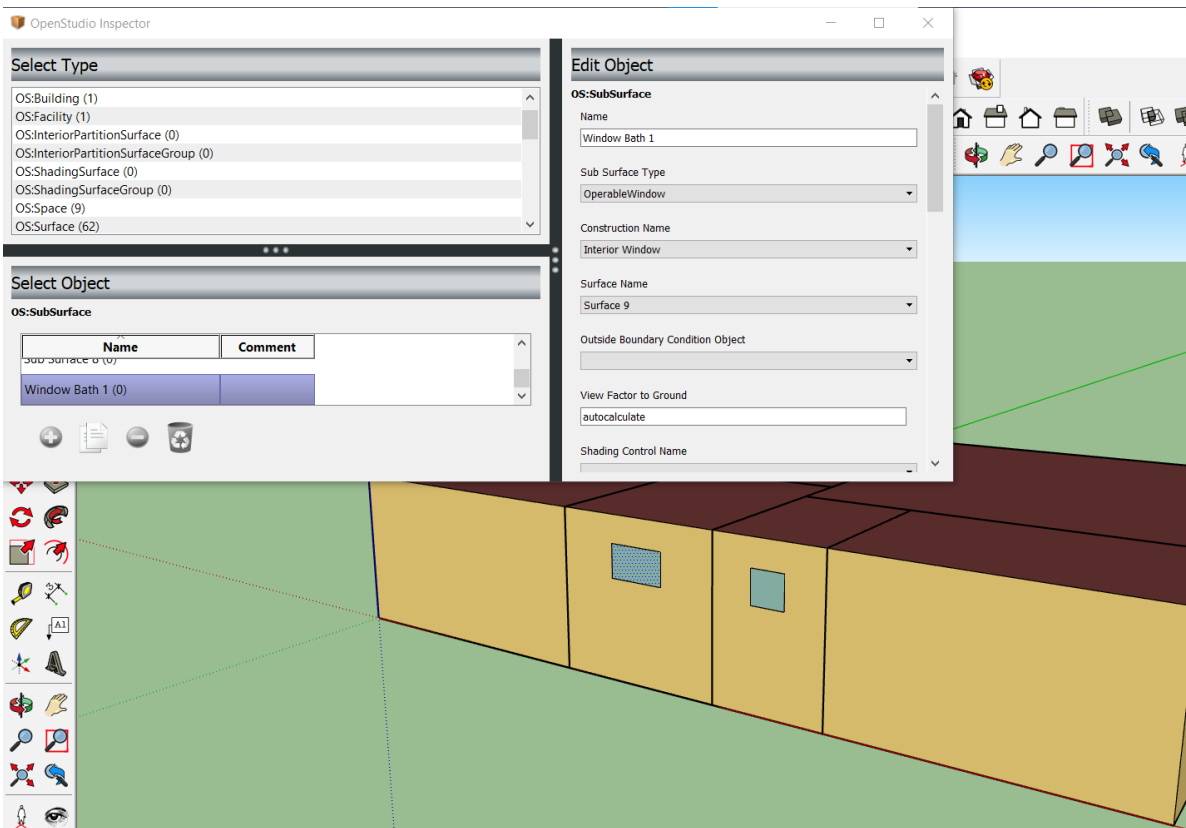
- Bedroom 1: παράθυρο  $2 \times 1,4 \text{ m}$  με τη βάση του στο 1 m
- Master Bedroom: παράθυρο  $2 \times 1,4 \text{ m}$  με τη βάση του στο 1m
- Bathroom 1: παράθυρο  $1 \times 0,6 \text{ m}$  με τη βάση του στο 1,8 m (βορεινό)
- Utility (βοηθητικό): παράθυρο  $0,6 \times 0,6 \text{ m}$  με τη βάση του στο 1,6 m
- Bedroom 2: παράθυρο  $2 \times 1,4 \text{ m}$  με τη βάση του στο 1 m
- Bathroom 2: παράθυρο  $0,6 \times 0,6 \text{ m}$  με τη βάση του στο 1,8 m
- Kitchen: παράθυρο  $1,4 \times 1,1 \text{ m}$  με τη βάση του στο 1,3 m
- Living Room: παράθυρο  $4 \times 2,4 \text{ m}$  (νότιο) και  $3 \times 2,4 \text{ m}$  (δυτικό) (συρόμενα μεγάλα παράθυρα – μπαλκονόπορτες)

Για όλες τις εσωτερικές πόρτες, το ύψος του ανοίγματος λαμβάνει την τυπική τιμή των 2070 mm και το πλάτος του ανοίγματος λαμβάνει την τιμή των 870 mm. Για την μοναδική πόρτα εισόδου στην οικία το ύψος του ανοίγματος λαμβάνεται ίσο με 2165 mm και το πλάτος ίσο με 1030 mm.

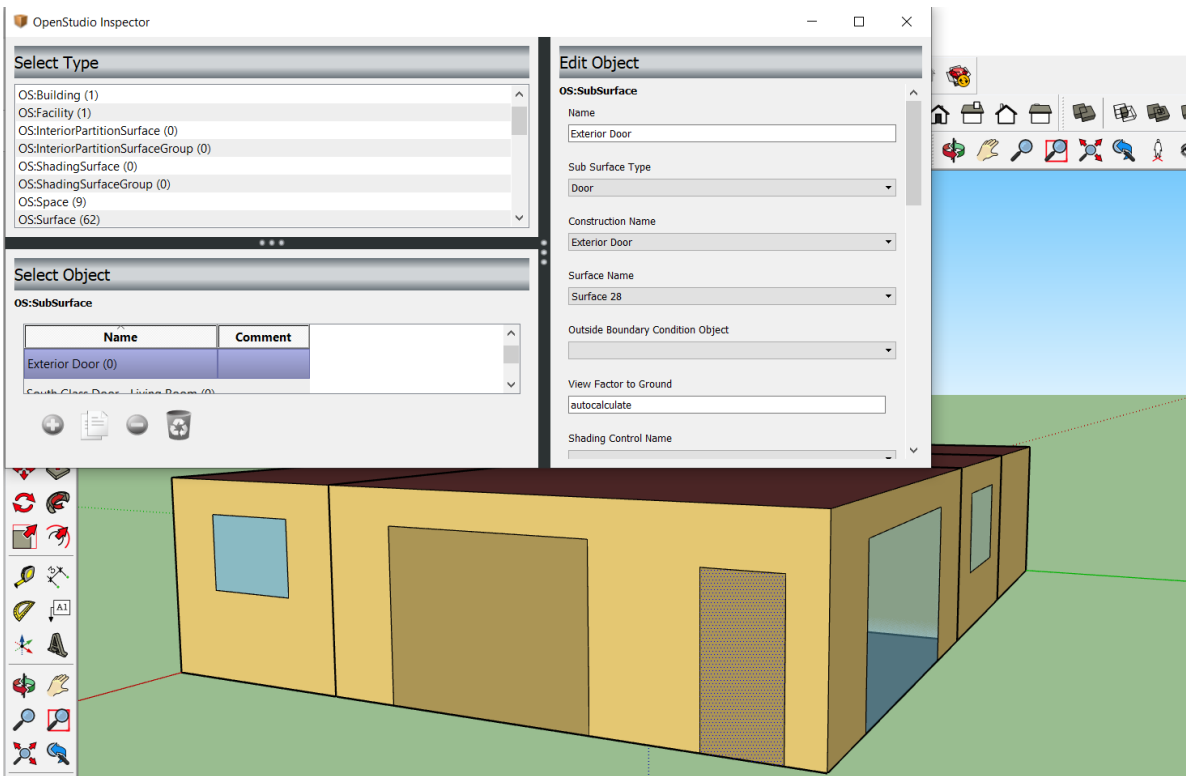
Οι διατομές σχεδιάζονται με την εντολή **Rectangle** στις επιθυμητές θέσεις. Επιλέγοντας διατομή πόρτας ή παραθύρου και με χρήση της εντολής **Project Loose Geometry**, το λογισμικό καθορίζει τον τύπο της διατομής (δηλ. αν είναι πόρτα ή παράθυρο). Το λογισμικό OpenStudio SketchUp έχει την ιδιότητα να αναγνωρίζει ως παράθυρα τις διατομές που δεν έρχονται σε επαφή με το δάπεδο, ενώ όποια διατομή έρχεται σε επαφή με το δάπεδο την αναγνωρίζει αυτόματα ως πόρτα. Όπως και στους χώρους σχεδίασης (Spaces), έτσι και εδώ (Subsurfaces) ορίζεται ονομασία διατομής και είδος (π.χ. εξωτερική πόρτα). Αυτό γίνεται και πάλι μέσω της εντολής **Inspector** → **Subsurfaces**. Στην περίπτωση σχεδίασης μιας μπαλκονόπορτας, σχεδιάζεται κανονικά η διατομή, όμως παρατηρείται ότι με χρήση της εντολής Project Loose Geometry αυτή αναγνωρίζεται ως πόρτα (ακουμπάει στο δάπεδο). Για να έρθει το επιθυμητό αποτέλεσμα από την εντολή Inspector → Subsurfaces ορίζεται Type : Glass Door.



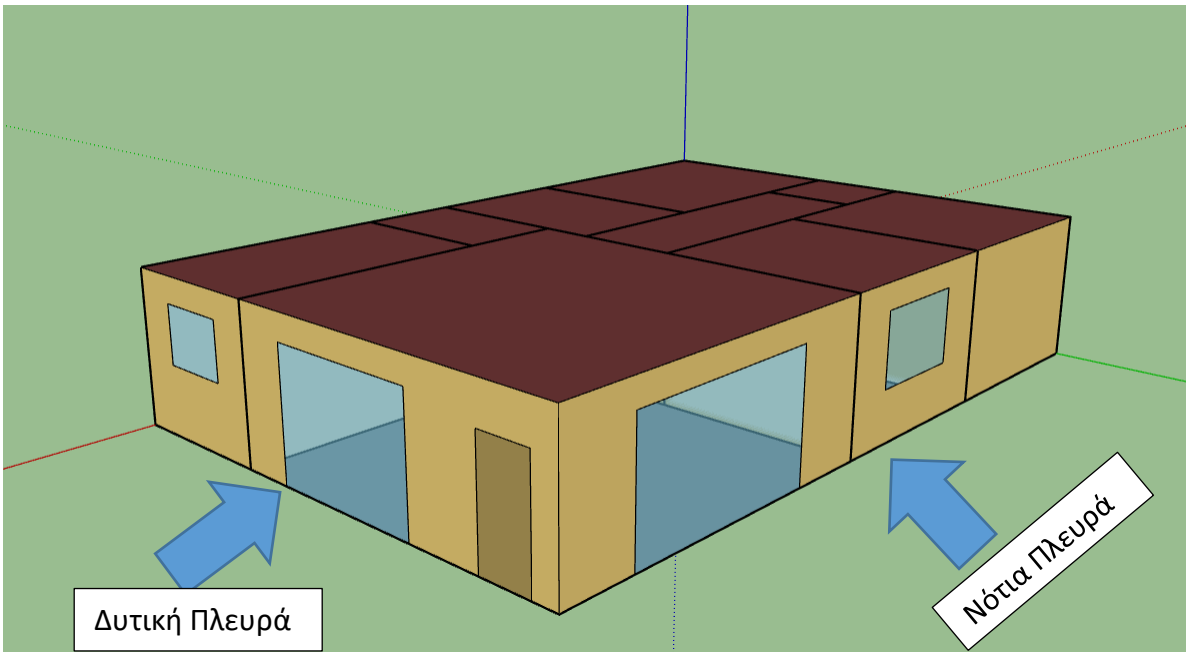
Εικόνα 47: Παράδειγμα ορισμού μπαλκονόπορτας (Glass Door) μέσω του OpenStudio Inspector.



**Εικόνα 48: Παράδειγμα ορισμού ανοιγόμενου παραθύρου (Operable window) μέσω του OpenStudio Inspector.**

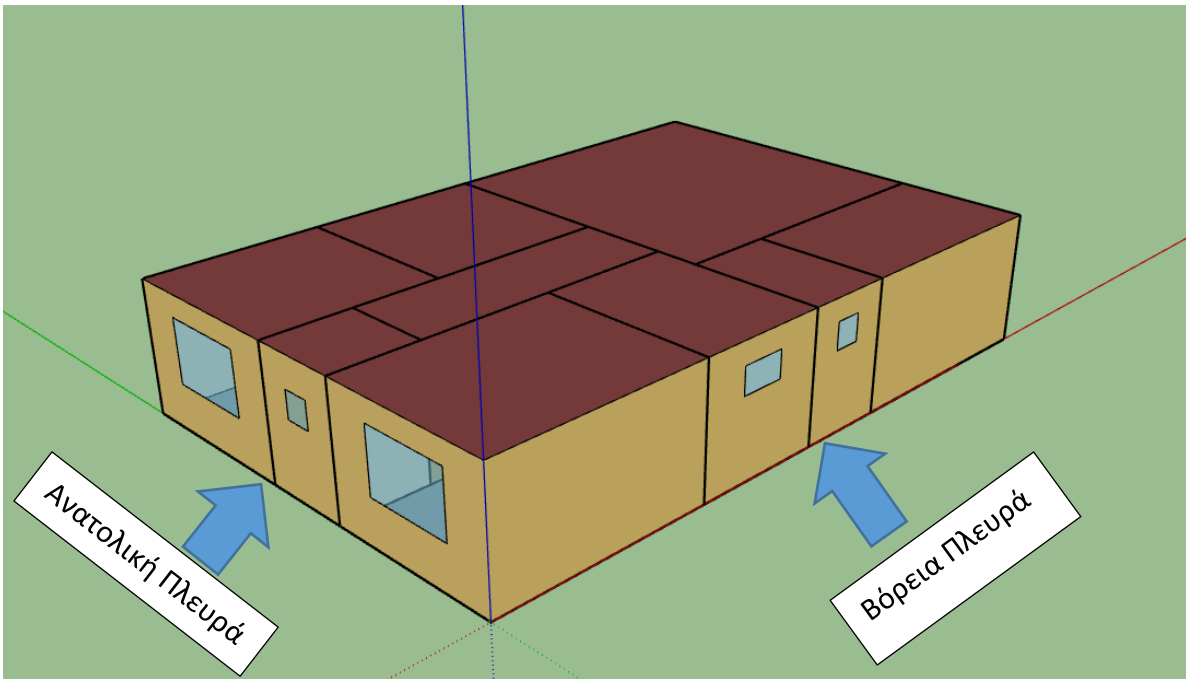


Εικόνα 49: Παράδειγμα ορισμού εξωτερικής πόρτας μέσω OpenStudio Inspector.



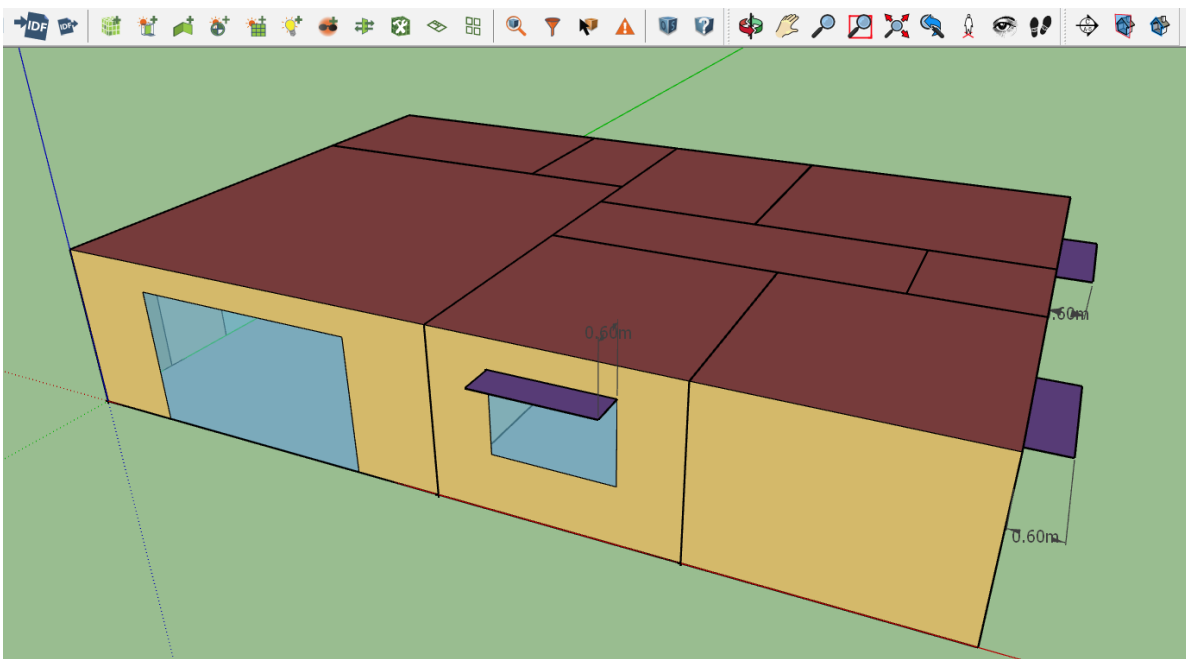
Εικόνα 50: ΝΔ πλευρά μονοκατοικίας.



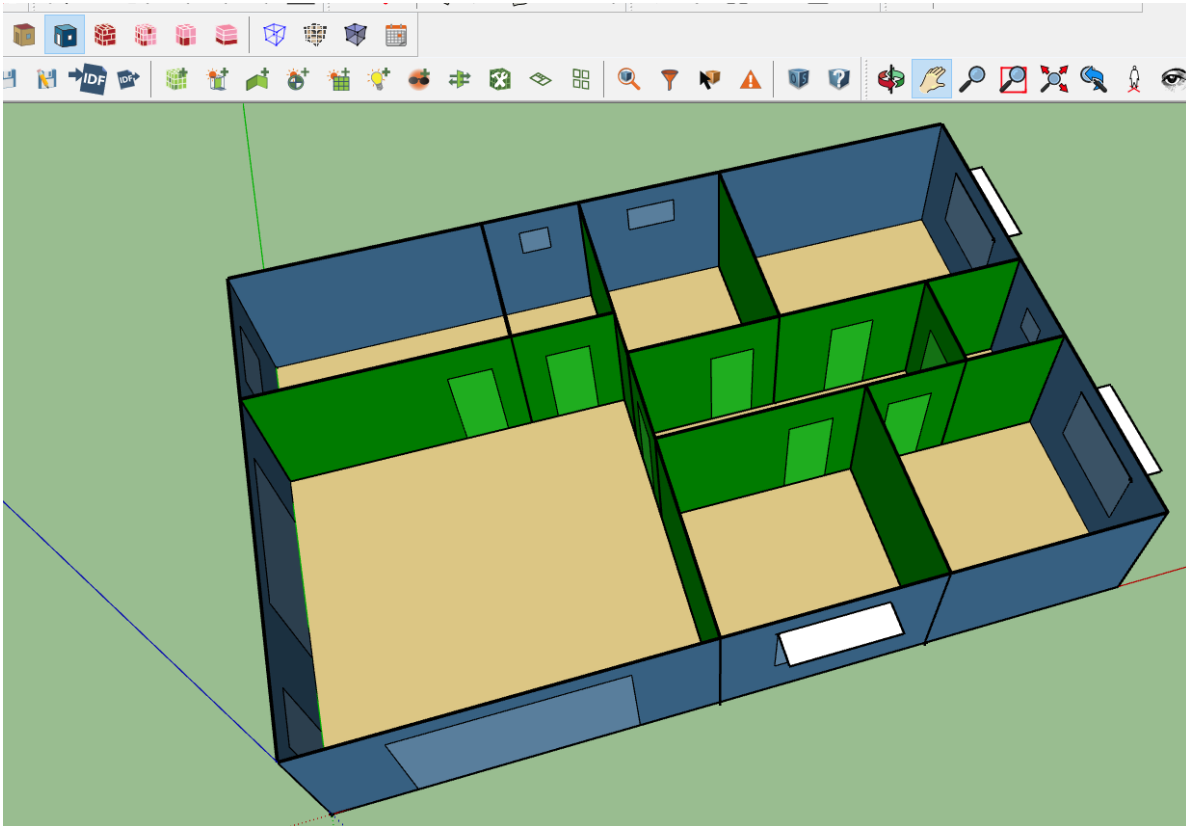


Εικόνα 51: ΒΑ πλευρά μονοκατοικίας.

Σε καθένα από τα τρία υπνοδωμάτια εισάγεται ένα σκίαστρο με πλάτος προεξοχής 0.6 m. Αυτό γίνεται μέσω της εντολής **New Shading Surface Group**.



Εικόνα 52: Εισαγωγή σκιάστρων στα υπνοδωμάτια.



**Εικόνα 53: Πλήρως ορισμένες συνοριακές συνθήκες της μονοκατοικίας στην τελική της μορφή.**

Τέλος, θεωρείται ότι το κλιμακοστάσιο που οδηγεί στην ταράτσα της μονοκατοικίας είναι εξωτερικό αφενός για λόγους αισθητικής και αφετέρου για λόγους εξοικονόμησης χώρου από την οροφή της οικίας προκειμένου για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών.

## 5. Παραμετροποίηση της οικίας στο OpenStudio

### 5.1 Το λογισμικό OpenStudio

---

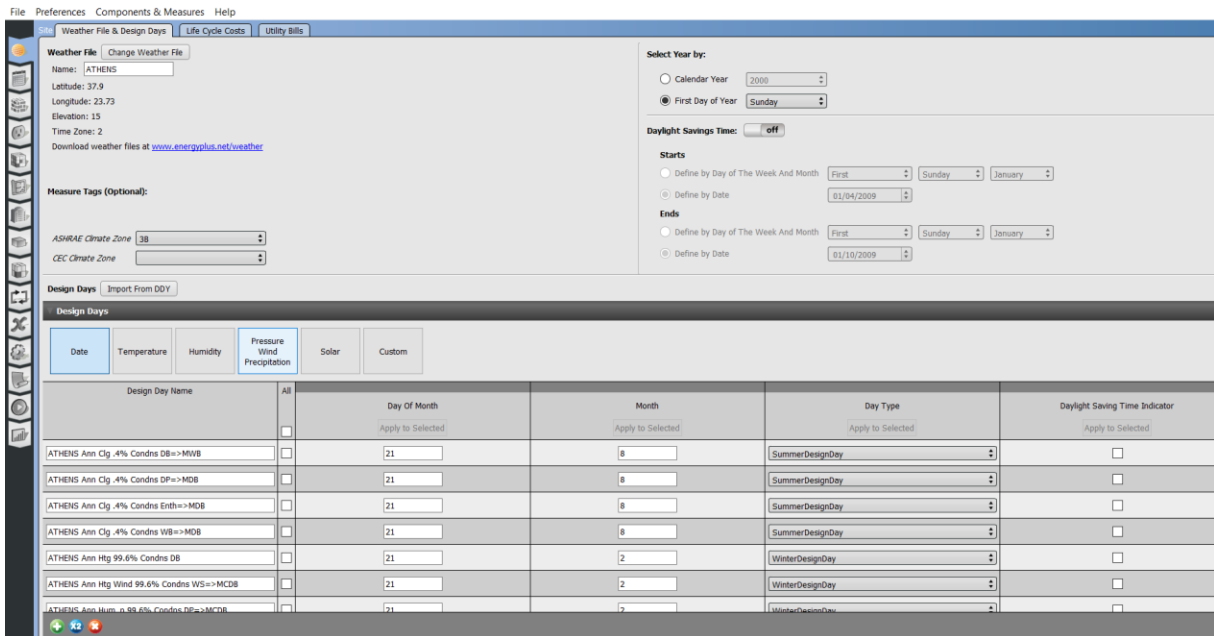
Το OpenStudio κυκλοφόρησε για πρώτη φορά τον Απρίλιο του 2008 από το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (NREL). Έχει σχεδιασθεί για να λειτουργεί σε συνδυασμό με το SketchUp, ως πρόσθετο SketchUp Plugin, καθώς πολλοί είναι οι αρχιτέκτονες που ήδη σχεδιάζουν κτίρια στο SketchUp. Πρόκειται για ένα δωρεάν λογισμικό ανοιχτού κώδικα που χρησιμοποιείται για την ενεργειακή ανάλυση και μοντελοποίηση κτιρίων. Η κύρια εφαρμογή του είναι το πρόσθετο SketchUp Plugin που επιτρέπει στους μηχανικούς να προβάλουν και να επεξεργάζονται τρισδιάστατα μοντέλα με στόχο την προσομοίωσή τους στο λογισμικό EnergyPlus. Στις επόμενες ενότητες θα γίνει ανάλυση του προσδιορισμού των παραμέτρων της οικίας. Αυτά που ορίζονται μέσω του OpenStudio προκειμένου έπειτα να γίνει η προσομοίωση με τη βοήθεια του EnergyPlus είναι: καιρικά δεδομένα, χρονοπρογράμματα για κάθε χώρο της οικίας, κατασκευαστικά υλικά, προσδιορισμός ηλεκτρικών και ανθρώπινων φορτίων, αερισμός, σύστημα κλιματισμού, εγκατάσταση Φ/Β κ.ά.

### 5.2 Ορισμός παραμέτρων της οικίας

---

#### 5.2.1 Καρτέλα καιρικών δεδομένων – Site Tab

Αρχικά, γίνεται εισαγωγή των καιρικών δεδομένων, συγκεκριμένα για την περιοχή της Αθήνας. Τα δεδομένα αυτά υπάρχουν στην ιστοσελίδα του EnergyPlus και είναι διαθέσιμα προς λήψη. Στην καρτέλα Site του OpenStudio εισάγονται τα αρχεία τύπου .epw και .ddy.



Εικόνα 54: Εισαγωγή καιρικών δεδομένων στο OpenStudio.

## 5.2.2 Καρτέλα Χρονοπρογραμμάτων – Schedules Tab

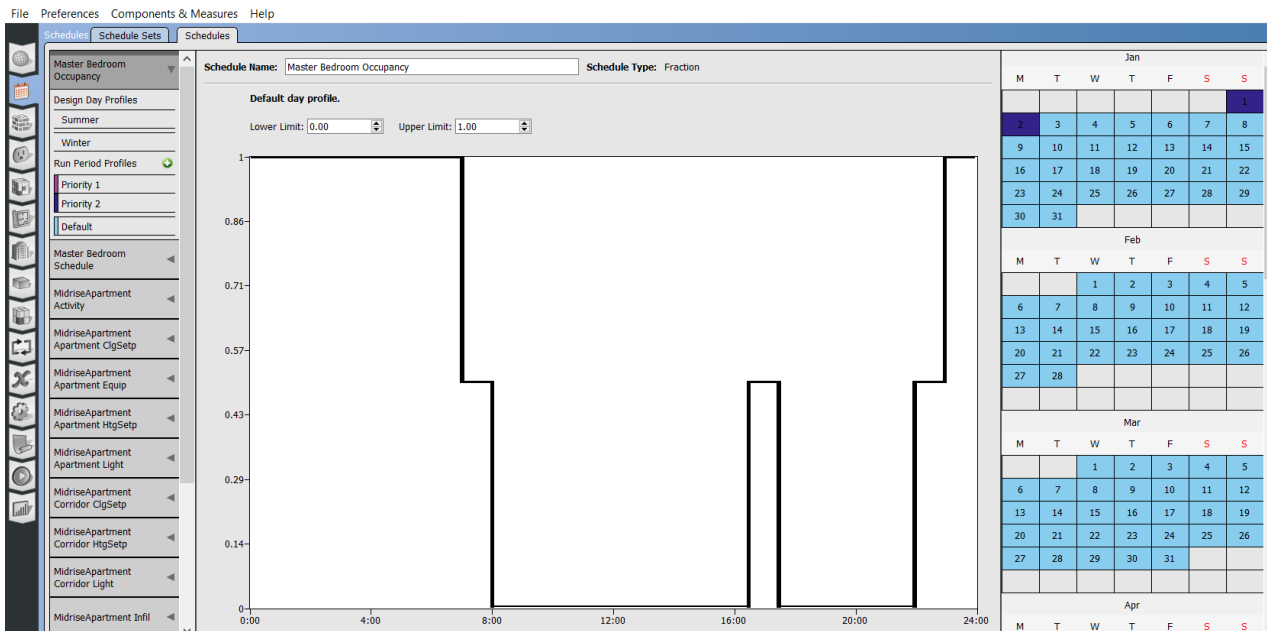
Τα χρονοπρογράμματα χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες και προσδιορίζονται για κάθε χώρο της μονοκατοικίας. Κάθε χρονοπρόγραμμα προκύπτει έχοντας θεωρήσει ένα τυπικό ημερήσιο πρόγραμμα μίας τυπικής τετραμελούς οικογένειας για τη χρήση του κάθε χώρου του σπιτιού. Ο προσδιορισμός των χρονοπρογραμμάτων αναφέρεται σε όλο το 24ωρο και πραγματοποιείται με μεγάλη ακρίβεια προκειμένου η ενεργειακή προσομοίωση της οικίας να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πραγματικότητα - από την ώρα που ξυπνούν οι γονείς, μέχρι να φύγουν για τη δουλειά, τις ώρες που τα παιδιά διαβάζουν στα δωμάτιά τους, τις ώρες που κοιμούνται, τρώνε, παρακολουθούν τηλεόραση κλπ. Τέλος, έχει θεωρηθεί ότι η οικογένεια θα βρίσκεται σε διακοπές τις περιόδους 24/12-02/01 (Priority 1: Christmas Holidays) και 05/08-20/08 (Priority 2: Summer Holidays).

Στην καρτέλα «Schedule Sets» είναι δυνατή η ομαδοποίηση των χρονοπρογραμμάτων κατά space type για διευκόλυνση στη χρήση του λογισμικού, το οποίο θα παρουσιαστεί στο τέλος της ενότητας. Επίσης, για κάθε επιμέρους τύπο Schedule, μαζί με την επεξήγησή του θα δίνεται και ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα. Το σύνολο των χρονοπρογραμμάτων, Schedules, θα παρουσιαστεί και αυτό στο τέλος του κεφαλαίου.

### 5.2.2.1 Χρονοπρογράμματα κατηγορίας Occurancy

Αυτού του είδους τα χρονοπρογράμματα σχετίζονται με την παραμονή των ατόμων σε κάθε χώρο της οικίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Είναι τύπου fractional, δηλαδή ο αριθμός των ατόμων που βρίσκονται σε κάθε χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας εκφράζεται ως ποσοστό των συνολικών ατόμων που εισέρχονται στον εκάστοτε χώρο. Το occurancy προσδιορίζεται

εμπειρικά, λαμβάνοντας υπόψη ένα τυπικό ημερήσιο πρόγραμμα μίας τετραμελούς οικογένειας.



**Εικόνα 55: Χρονοπρόγραμμα κατηγορίας Occupancy τύπου fractional για το χώρο Master bedroom.**

### 5.2.2.2 Χρονοπρογράμματα κατηγορίας Activity Level

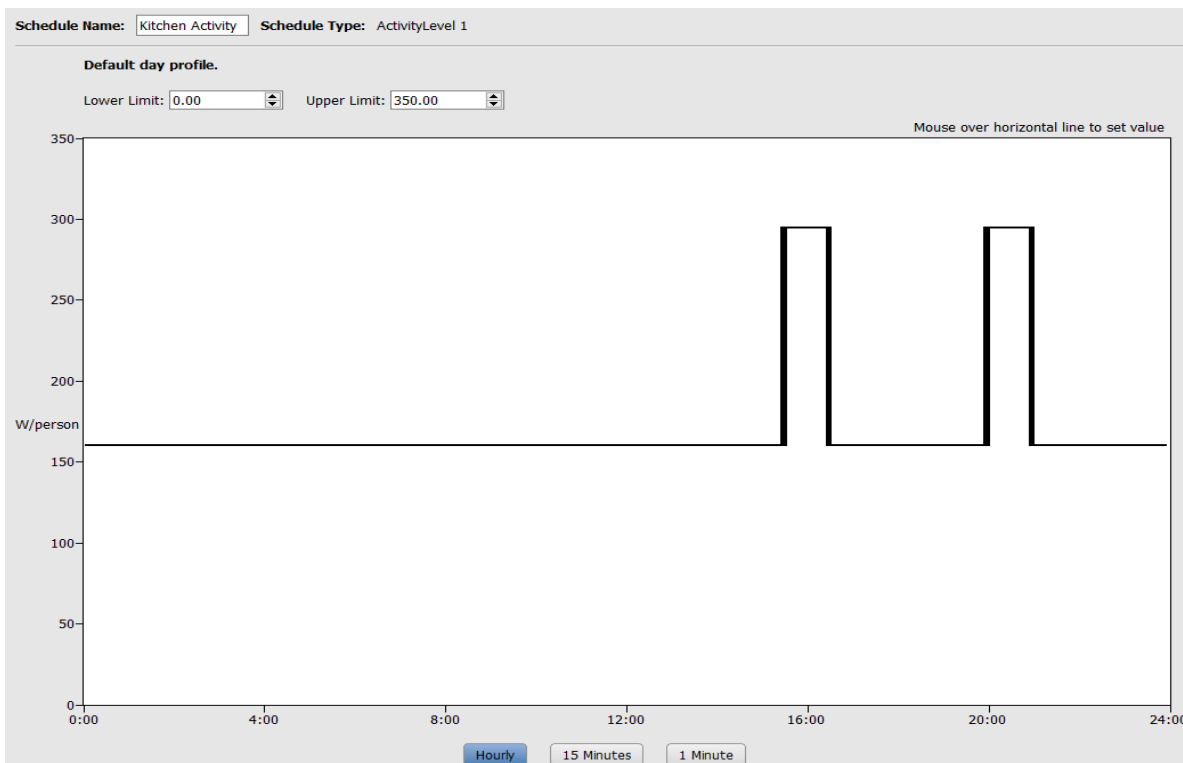
Τα χρονοπρογράμματα αυτού του τύπου έχουν να κάνουν με τη θερμική ισχύ που εκλύει κάθε άτομο στον εκάστοτε χώρο που βρίσκεται, ανάλογα με τη δραστηριότητα που έχει στο συγκεκριμένο χώρο. Οι τιμές της ισχύος λαμβάνονται από πίνακες της ASHRAE και της T.O.T.E.E.

**Πίνακας 4: Εκλυόμενη θερμότητα χρηστών ανά χρήση κτιρίου - απόσπασμα της TOTEΕ.**

Χρήσεις κτηρίων ή θερμικών ζωνών	Θερμική ισχύς ανά άτομο [W/άτομο]	Θερμική ισχύς ανά μονάδα δομημένης επιφάνειας [W/m <sup>2</sup> ]	Μέσος συντελεστής παρουσίας
Μονοκατοικία, πολυκατοικία (περισσότερα του ενός διαμερίσματα)	80	4	0,75
Ξενοδοχείο ετήσιας λειτουργίας	75	11	1,00
θερινής λειτουργίας	75	11	0,58
χειμερινής λειτουργίας	75	11	0,66
Ξενώνας ετήσιας λειτουργίας	75	11	1,00
θερινής λειτουργίας	75	11	0,58
χειμερινής λειτουργίας	75	11	0,66

Πίνακας 5: Εκλυόμενη θερμότητα από τους χρήστες ανάλογα με τη δραστηριότητά τους - απόσπασμα της ASHRAE [24].

Degree of Activity	Location	Total Heat, W		Sensible Heat, W	Latent Heat, W	% Sensible Heat that is Radiant <sup>b</sup>	
		Adult Male	Adjusted, M/F <sup>a</sup>			Low V	High V
Seated at theater	Theater	115	105	70	35	60	27
Seated, very light work	Offices, hotels, apartments	130	115	70	45		
Moderately active office work	Offices, hotels, apartments	140	130	75	55		
Standing, light work; walking	Department store; retail store	160	130	75	55	58	38
Walking, standing	Drug store, bank	160	145	75	70		
Sedentary work	Restaurant <sup>c</sup>	145	160	80	80		
Light bench work	Factory	235	220	80	140		
Moderate dancing	Dance hall	265	250	90	160	49	35
Walking 4.8 km/h; light machine work	Factory	295	295	110	185		
Bowling <sup>d</sup>	Bowling alley	440	425	170	255		
Heavy work	Factory	440	425	170	255	54	19
Heavy machine work; lifting	Factory	470	470	185	285		
Athletics	Gymnasium	585	525	210	315		

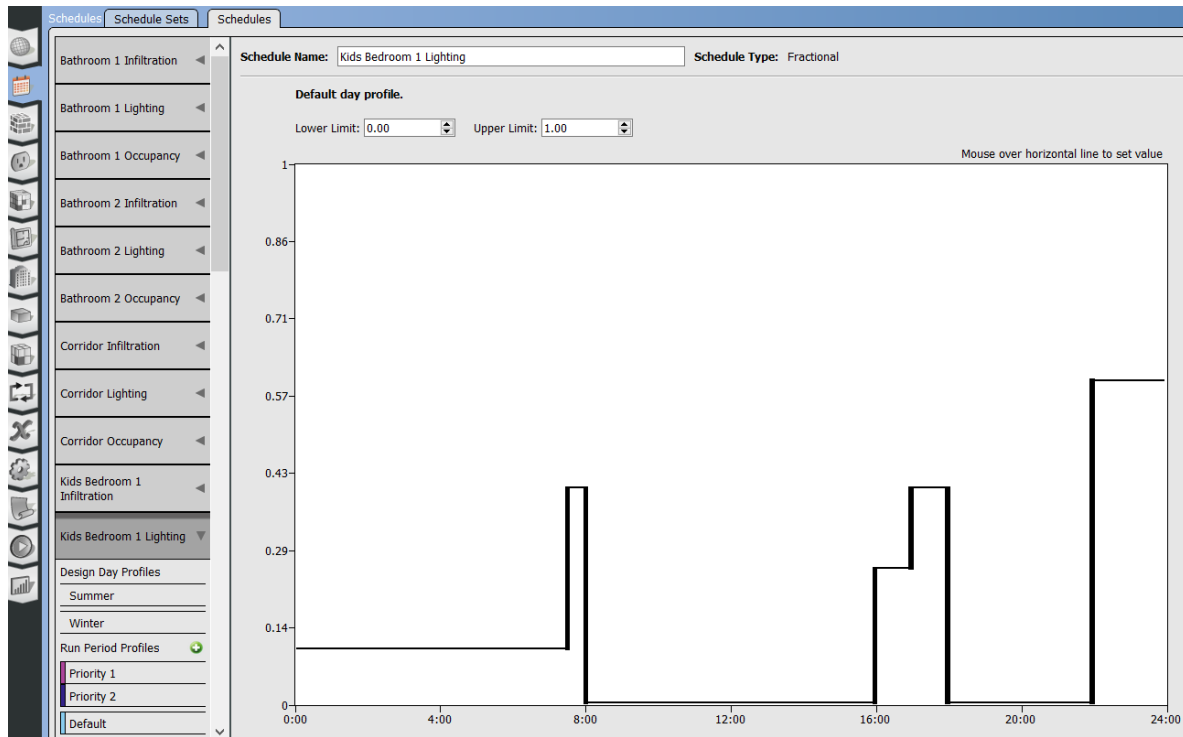


Εικόνα 56: Χρονοπρόγραμμα κατηγορίας Activity Level για το χώρο Kitchen.

### 5.2.2.3 Χρονοπρογράμματα κατηγορίας Lighting

Τα χρονοπρογράμματα αυτά αφορούν στο φωτισμό του εκάστοτε χώρου, δηλαδή τη χρονική διάρκεια κατά την οποία τα φώτα παραμένουν ανοιχτά στον κάθε χώρο της οικίας.

Είναι τύπου fractional, δηλαδή προσδιορίζονται ως ποσοστό επί των συνολικών φωτιστικών σωμάτων που υπάρχουν στο κάθε δωμάτιο.

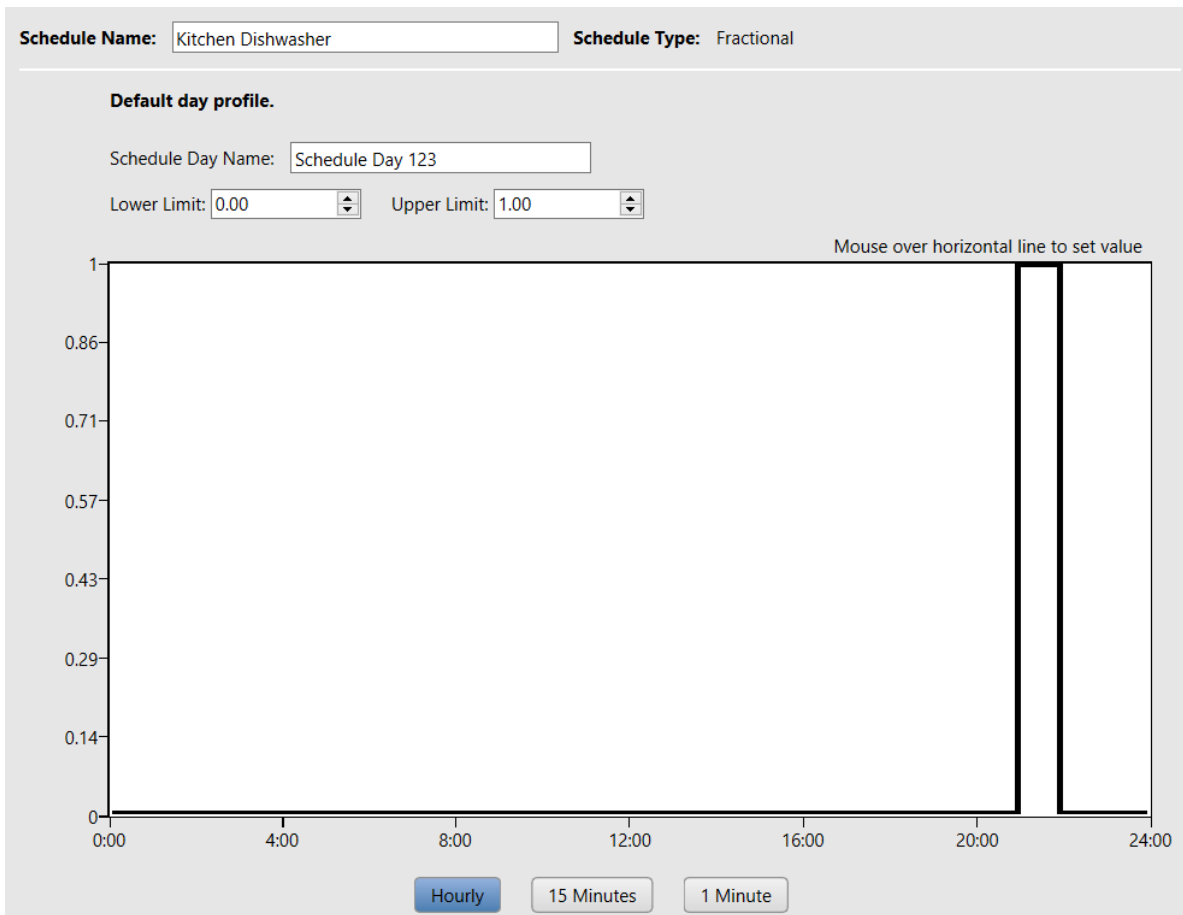


**Εικόνα 57: Χρονοπρόγραμμα κατηγορίας Lighting τύπου fractional για τους χώρους Kids Bedroom 1&2.**

#### 5.2.2.4 Χρονοπρογράμματα κατηγορίας Electric equipment

Τα χρονοπρογράμματα που κατασκευάζονται σε αυτή την κατηγορία έχουν να κάνουν με τις ηλεκτρικές συσκευές, των οποίων γίνεται χρήση για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα σε κάθε χώρο της οικίας. Δεν έχει νόημα η δημιουργία χρονοπρογραμμάτων που να αφορά στο σύνολο των ηλεκτρικών συσκευών που λειτουργούν σε έναν χώρο, καθώς δεν δύναται να λειτουργούν ταυτόχρονα. Για αυτό το λόγο γίνονται μεμονωμένα χρονοπρογράμματα για κάθε ηλεκτρική συσκευή ξεχωριστά. Προφανώς και αυτά τα χρονοπρογράμματα είναι τύπου fractional και επειδή είναι για κάθε συσκευή ξεχωριστά, λαμβάνουν τιμή ίση με τη μονάδα όποτε η εκάστοτε ηλεκτρική συσκευή τίθεται σε λειτουργία.

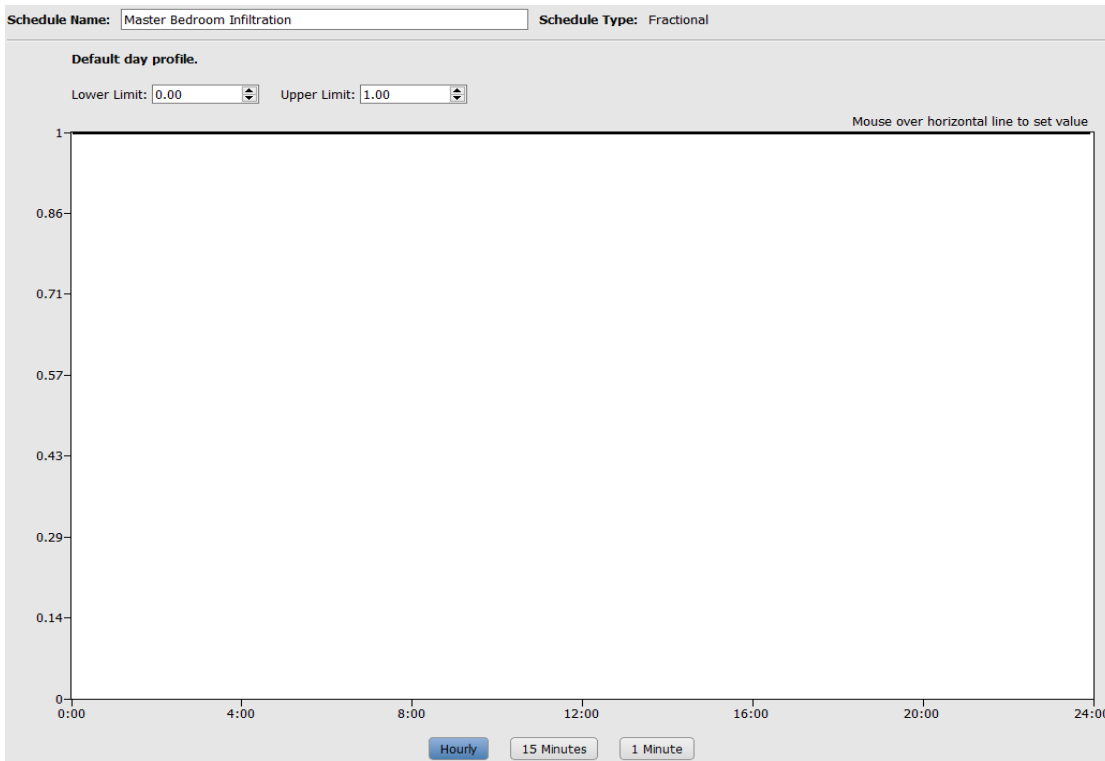




**Εικόνα 58: Χρονοπρόγραμμα κατηγορίας Electric equipment τύπου fractional για το πλυντήριο πιάτων του χώρου Kitchen.**

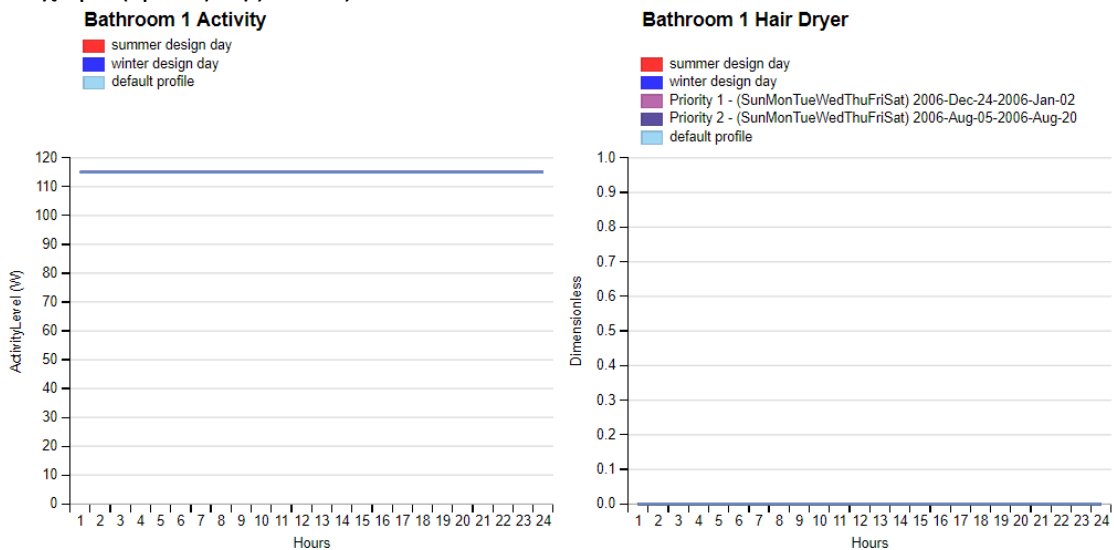
#### 5.2.2.5 Χρονοπρογράμματα κατηγορίας Infiltration

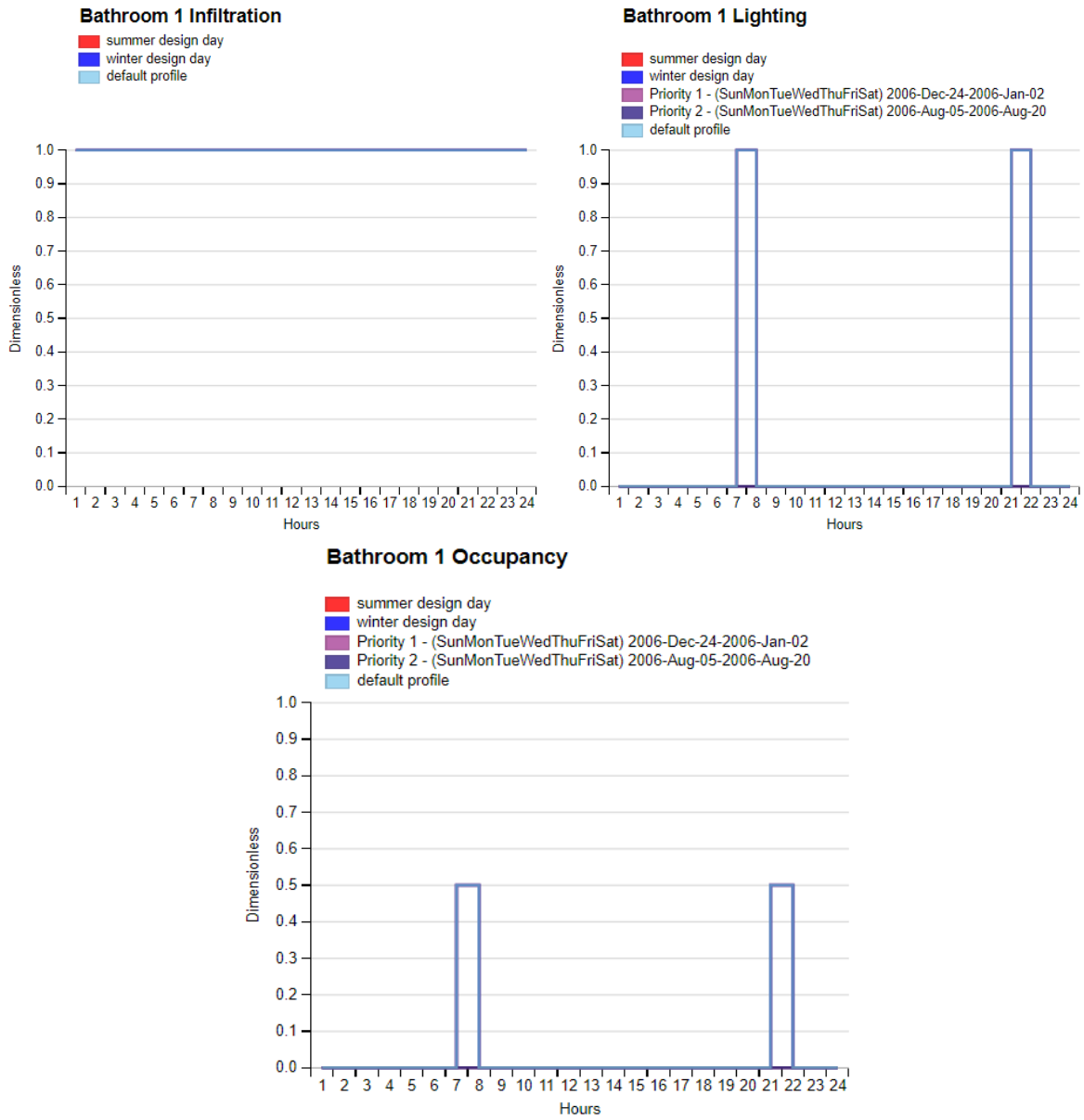
Αυτού του είδους τα χρονοπρογράμματα αφορούν στον αερισμό των χώρων της οικίας από χαραμάδες και ανοίγματα. Είναι τύπου fractional και θεωρείται πλήρης διείσδυση αέρα για κάθε χρονική στιγμή, οπότε όλα τα χρονοπρογράμματα αυτής της κατηγορίας ισούνται με τη μονάδα.



**Εικόνα 59: Χρονοπρόγραμμα κατηγορίας Infiltration τύπου fractional για το χώρο Master Bedroom.**

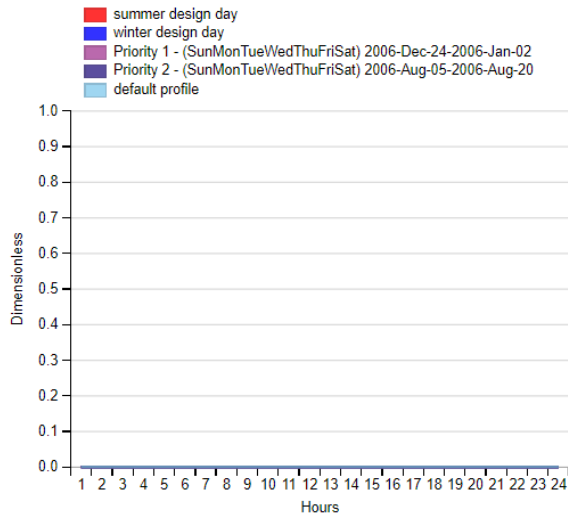
Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται τα χρονοπρογράμματα, Schedules, στο σύνολό τους για κάθε χώρο (space) της οικίας.



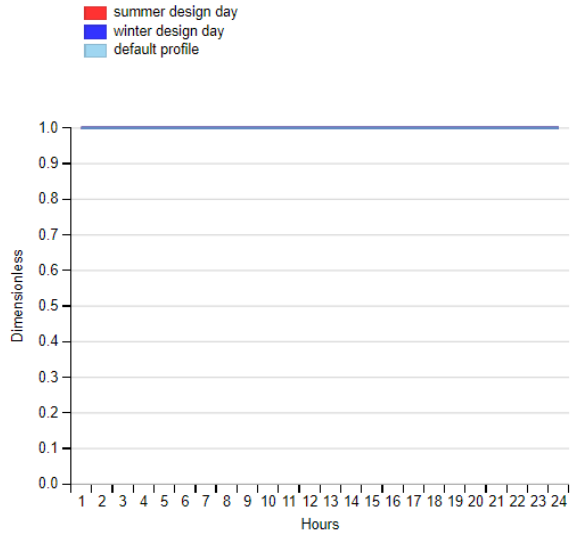


Εικόνα 60: Τα χρονοπρογράμματα, Schedules, του χώρου Bathroom 1.

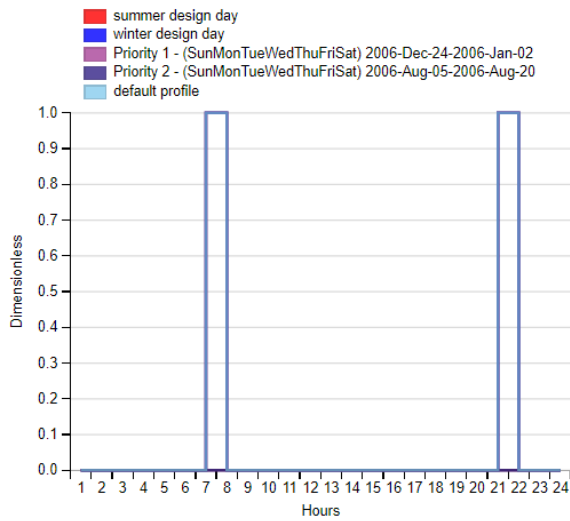
**Bathroom 2 Hair Dryer**



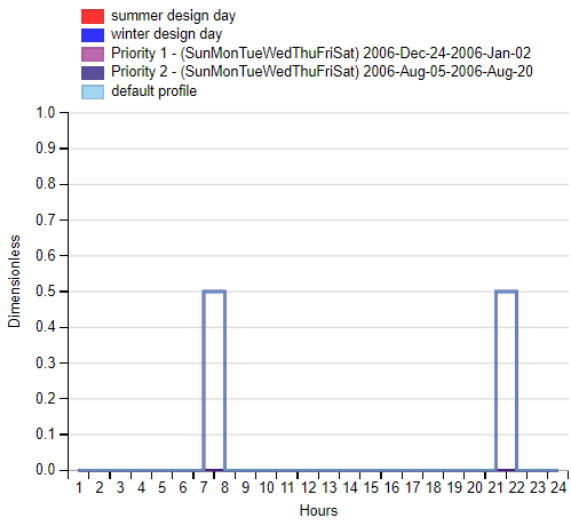
**Bathroom 2 Infiltration**

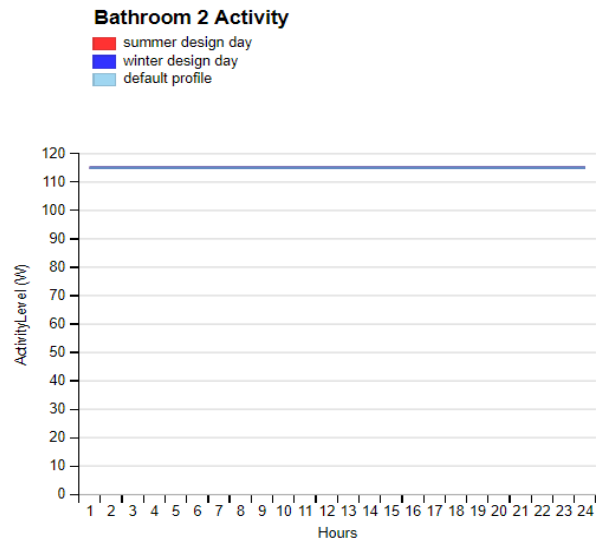


**Bathroom 2 Lighting**

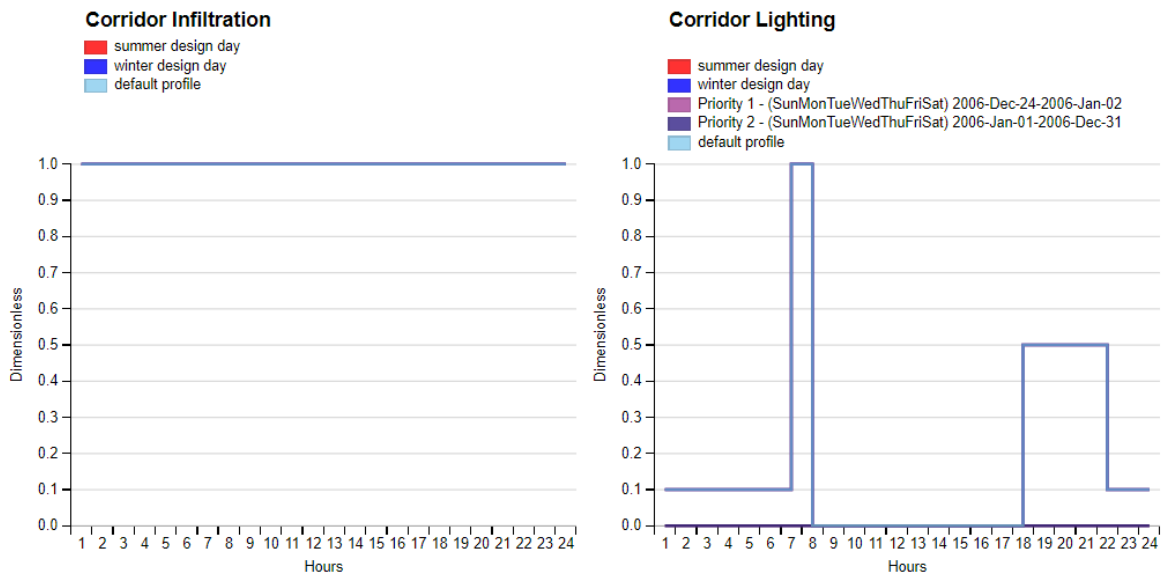


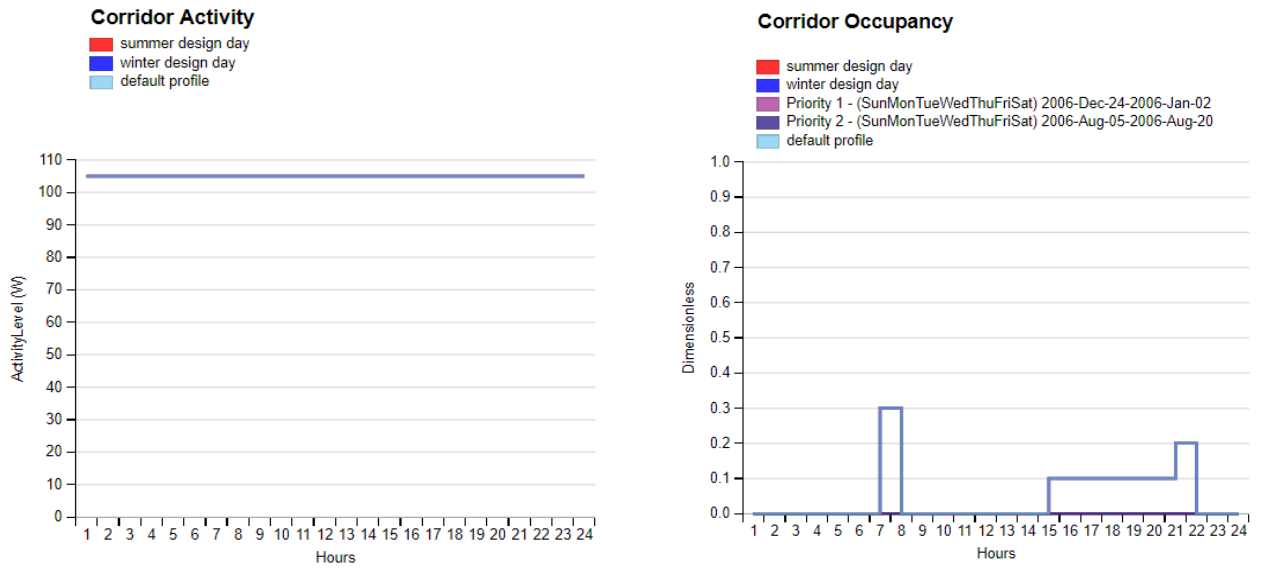
**Bathroom 2 Occupancy**



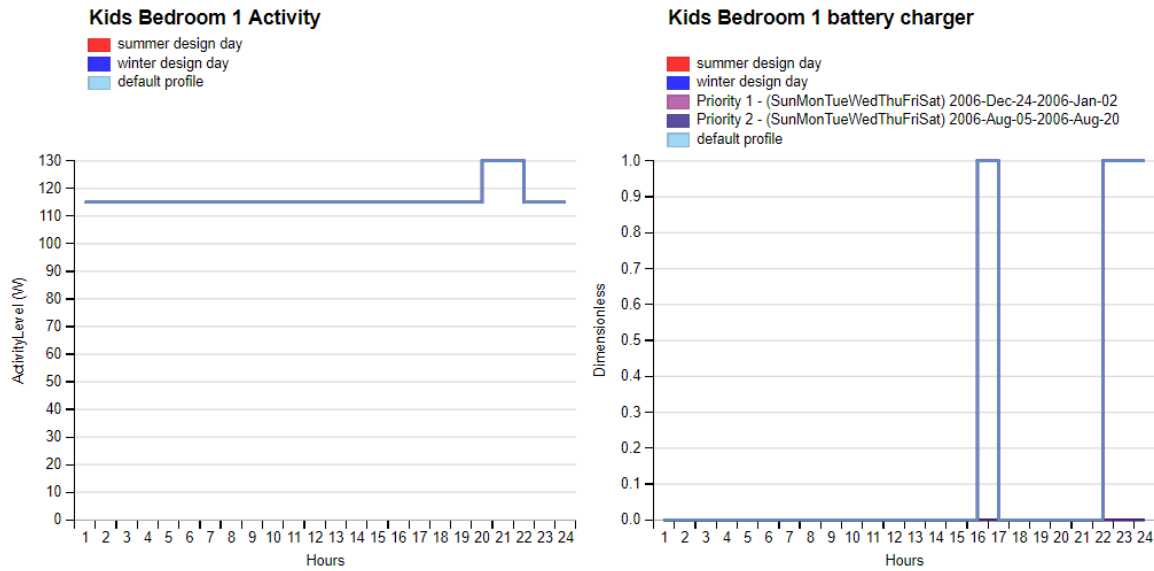


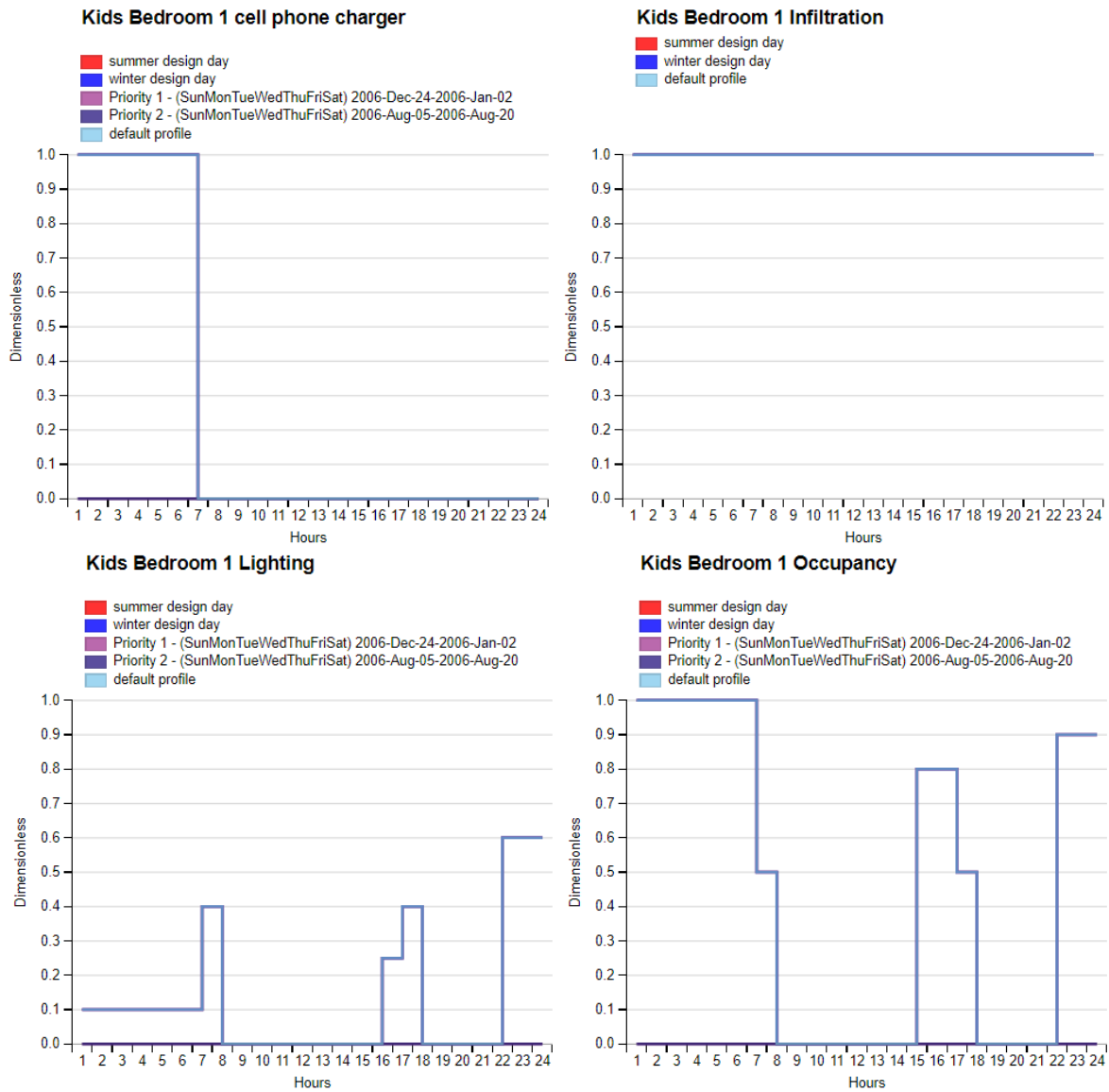
Εικόνα 61: Τα χρονοπρογράμματα, Schedules, του χώρου Bathroom 2.





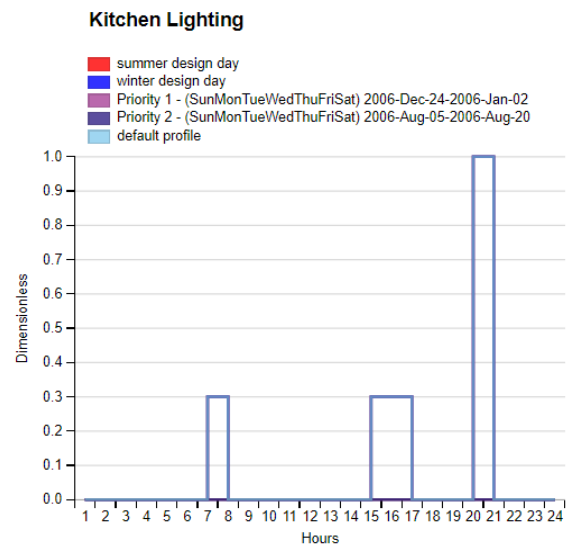
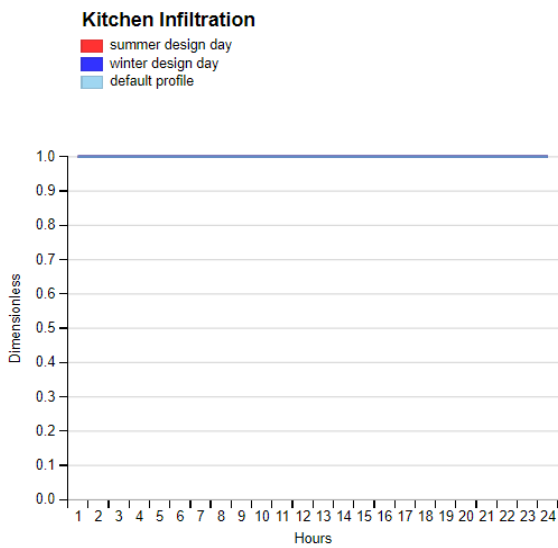
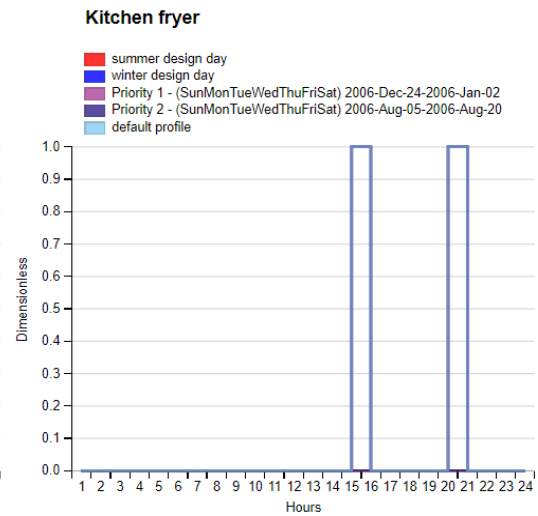
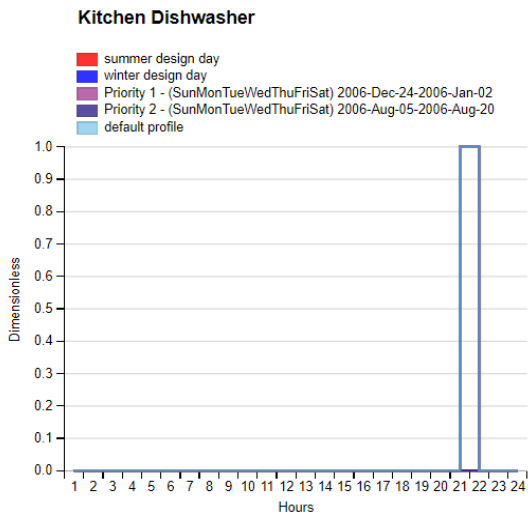
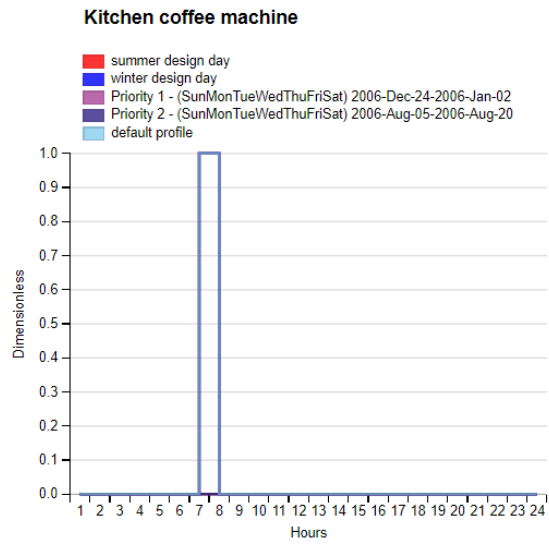
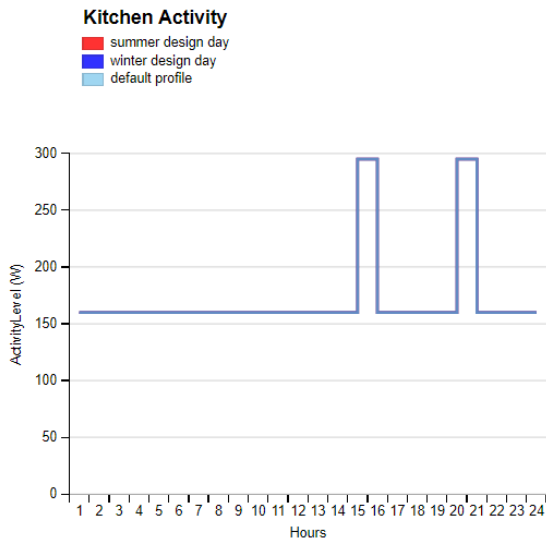
Εικόνα 62: Τα χρονοπρογράμματα, Schedules, του χώρου Corridor.

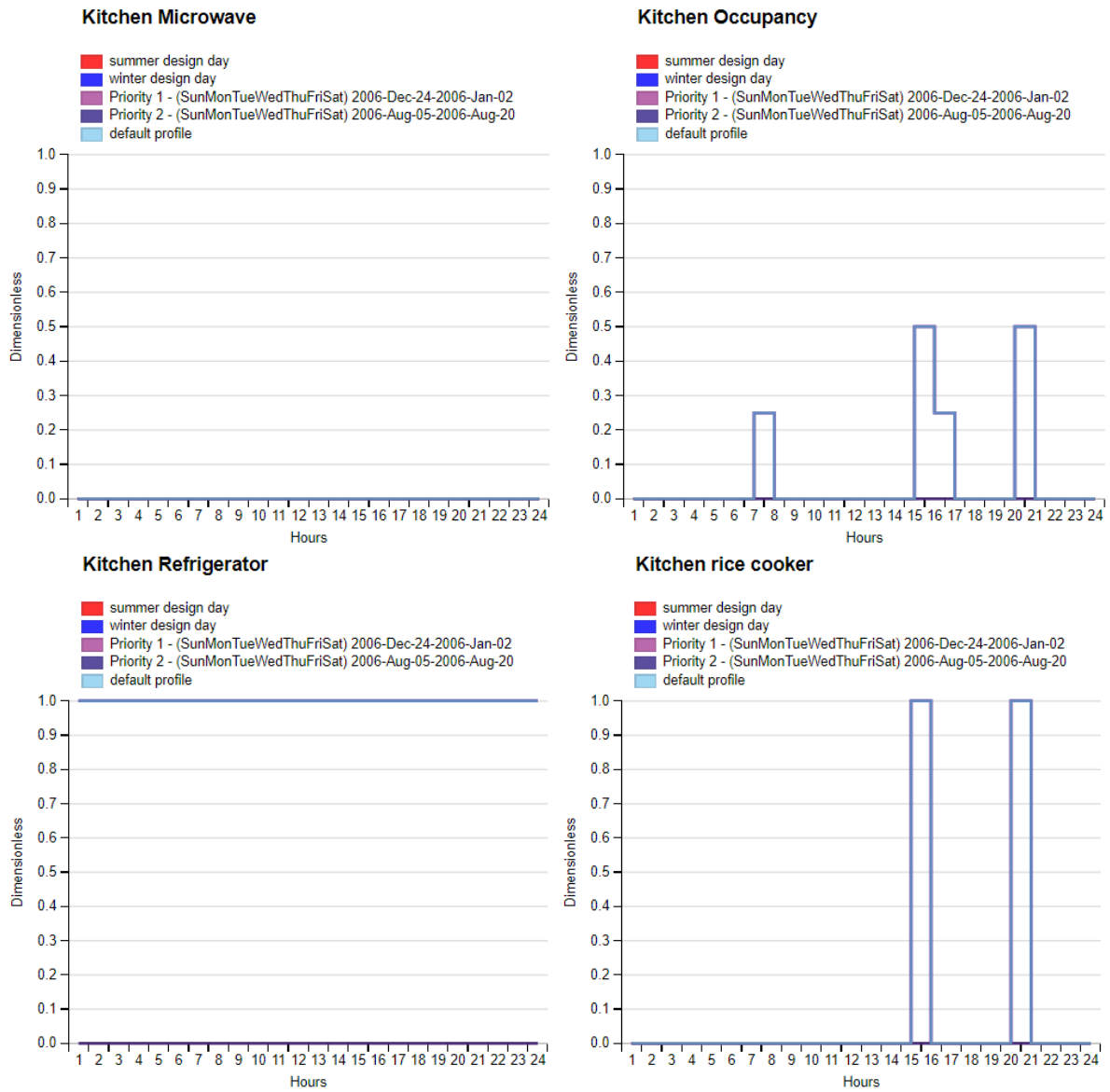




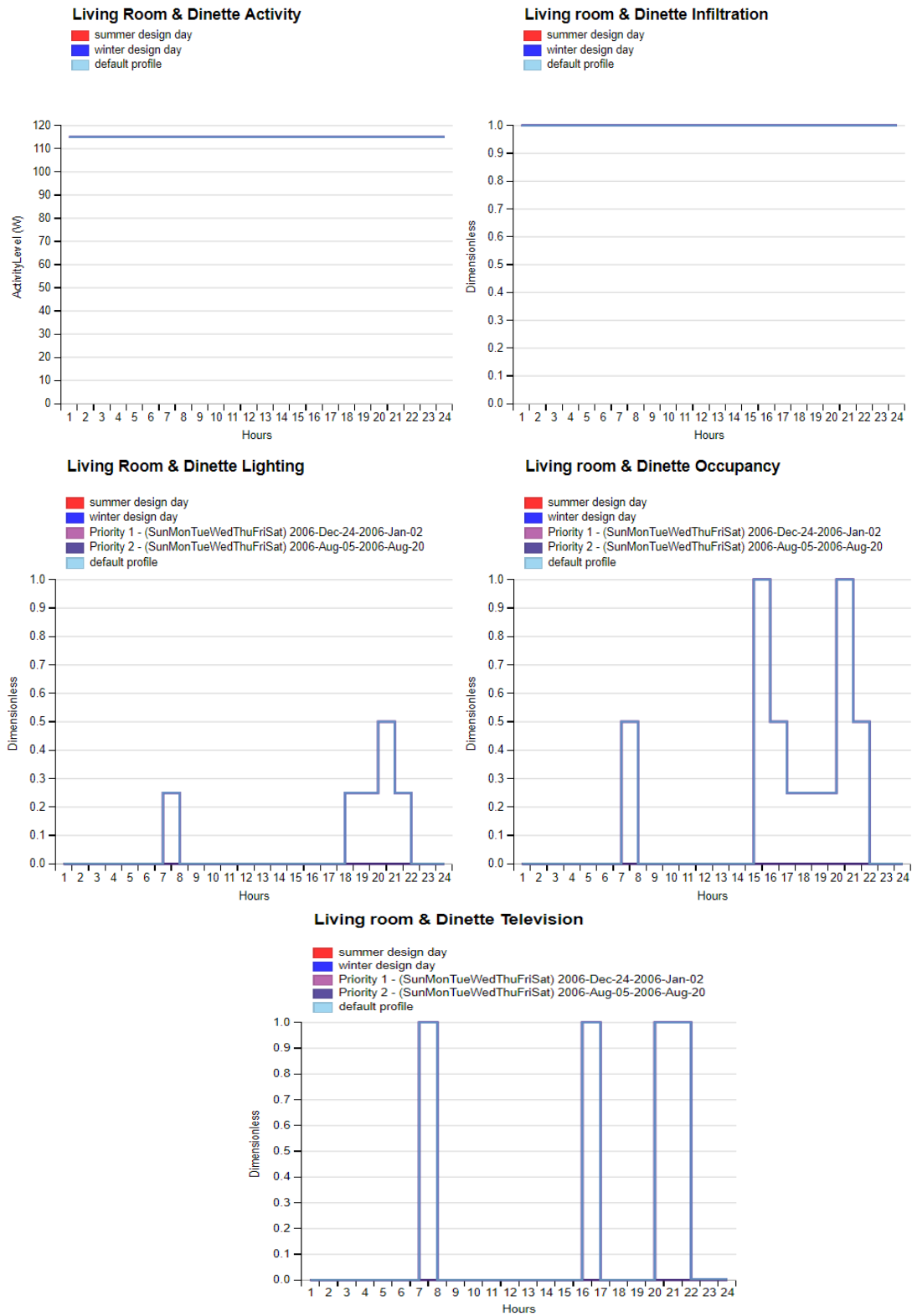
Εικόνα 63: Τα χρονοπρογράμματα, Schedules, του χώρου Kids Bedroom 1 – ίδια και για το χώρο Kids Bedroom 2.





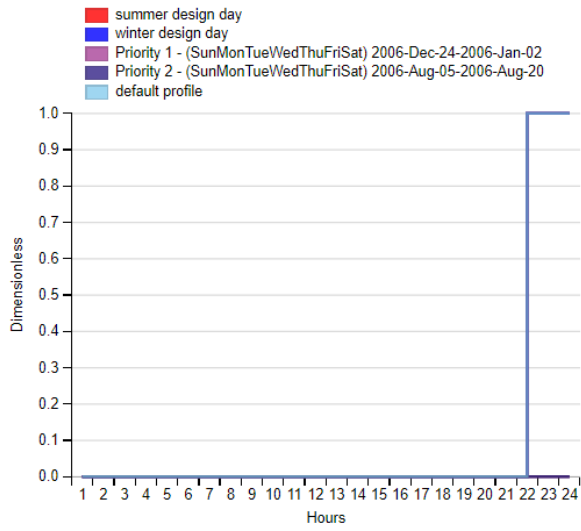


Εικόνα 64: Τα χρονοπρογράμματα, Schedules, του χώρου Kitchen.

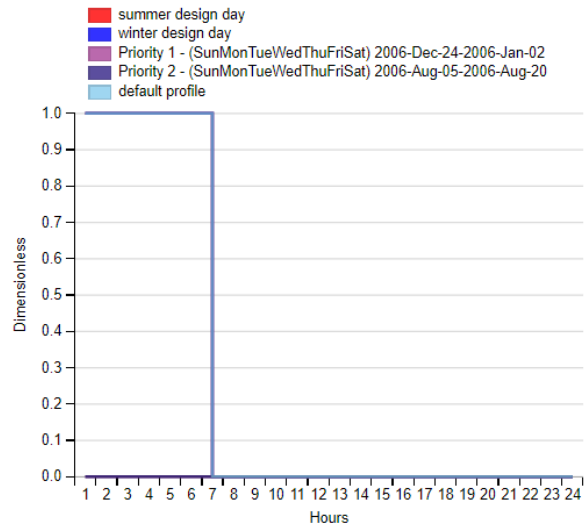


Εικόνα 65: Τα χρονοπρογράμματα, Schedules, του χώρου Living room & Dinette.

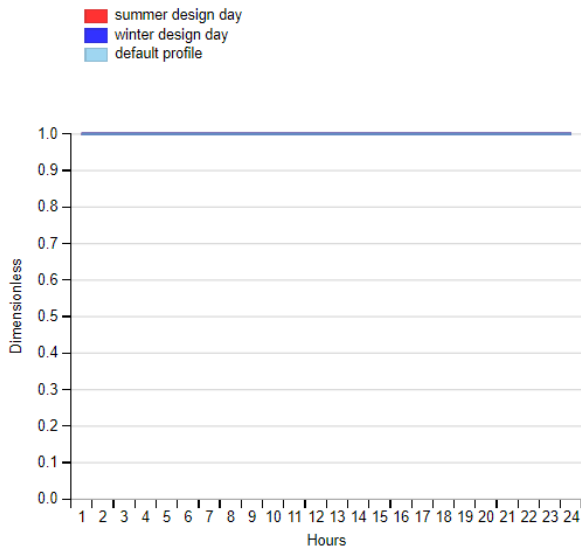
**Master Bedroom battery charger**



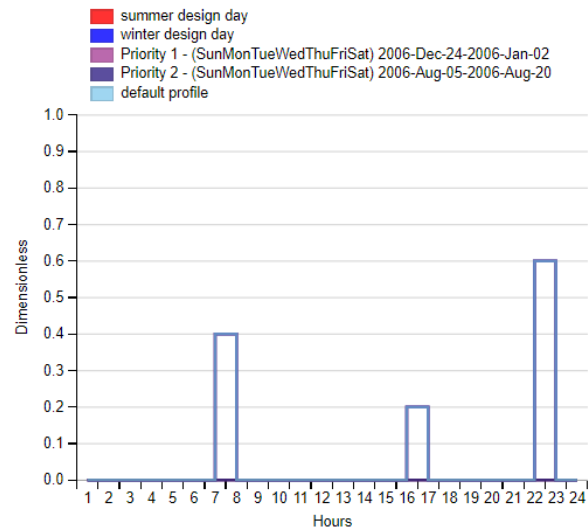
**Master Bedroom cell phone charger**

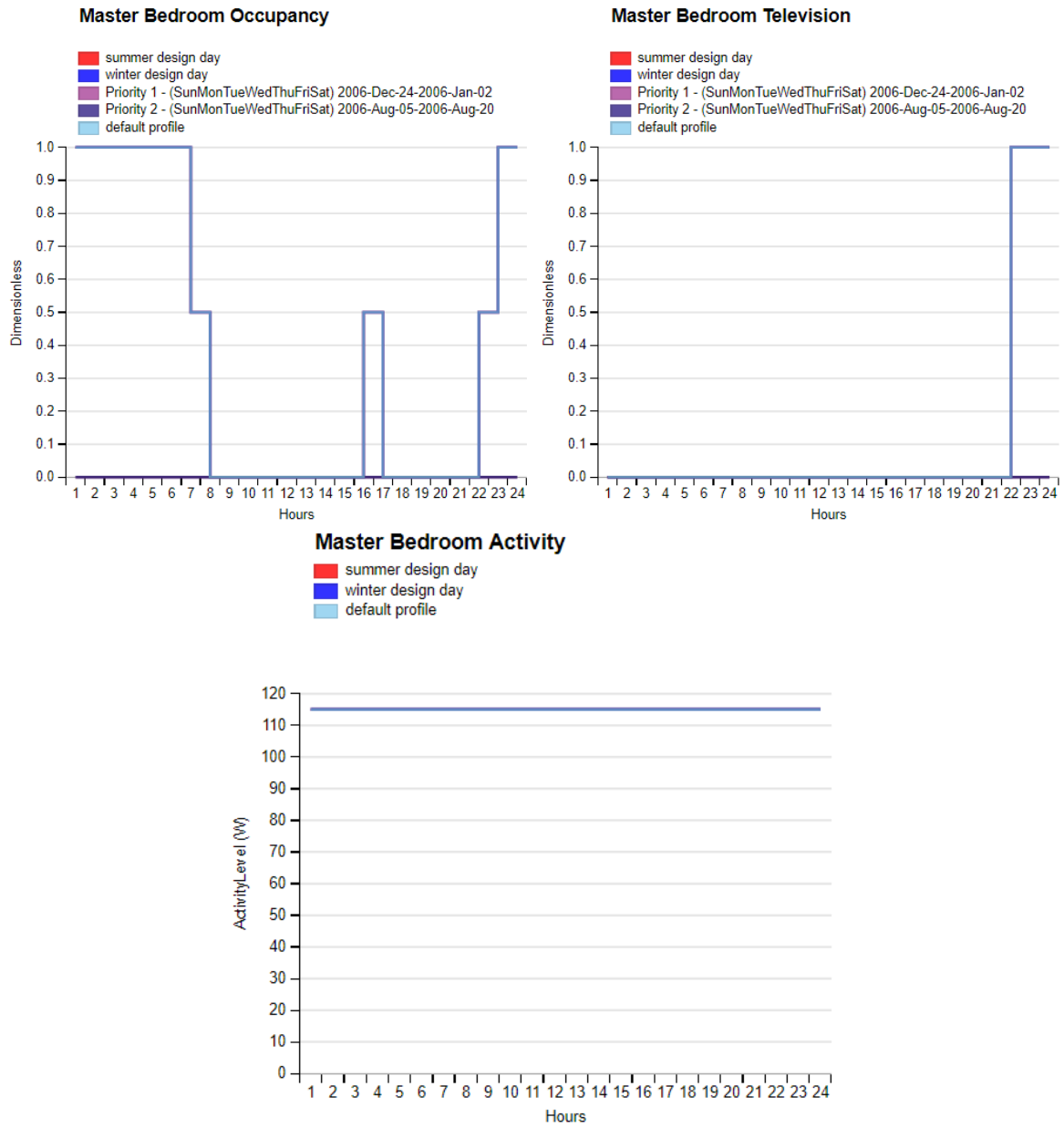


**Master Bedroom Infiltration**

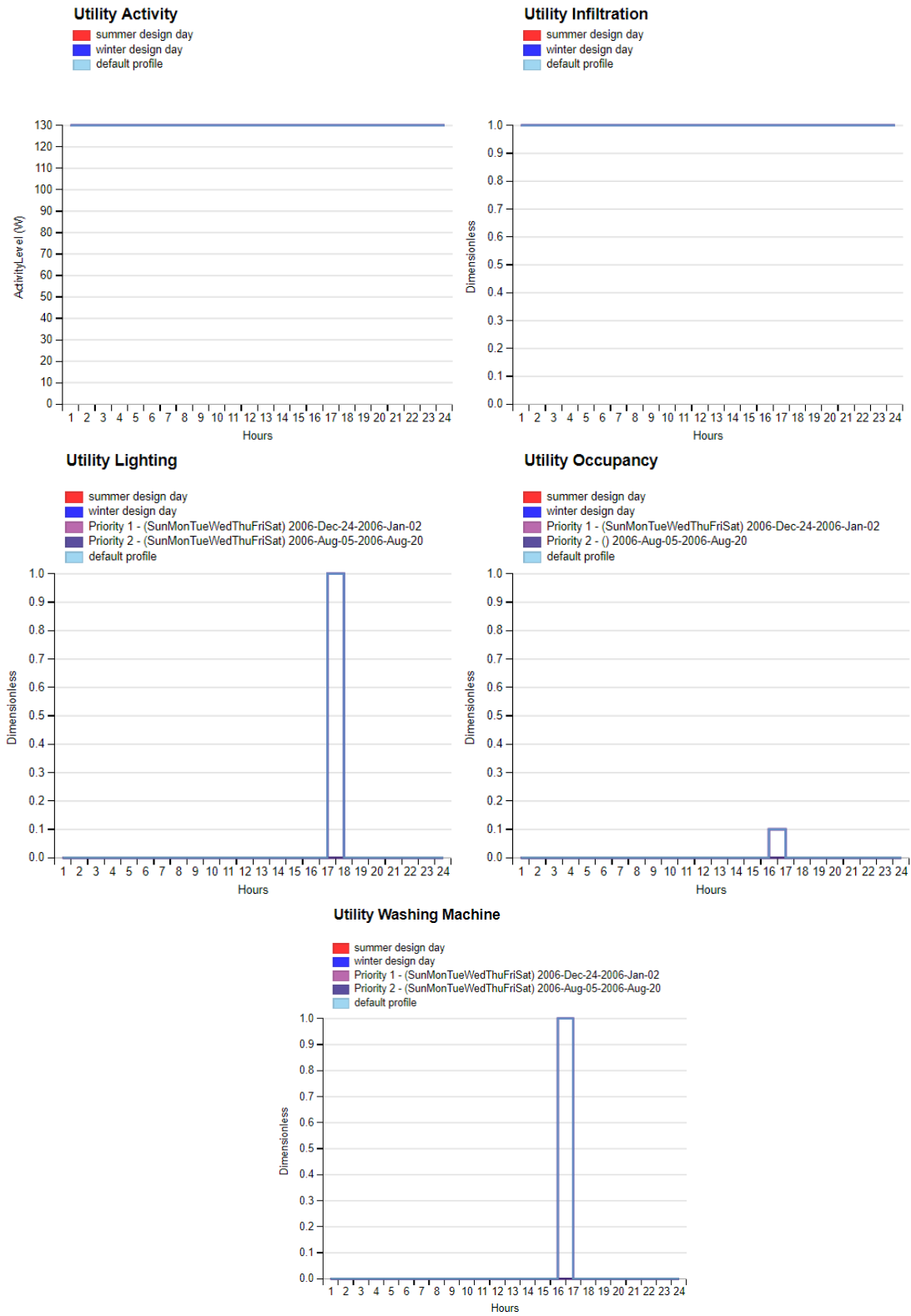


**Master Bedroom Lighting**



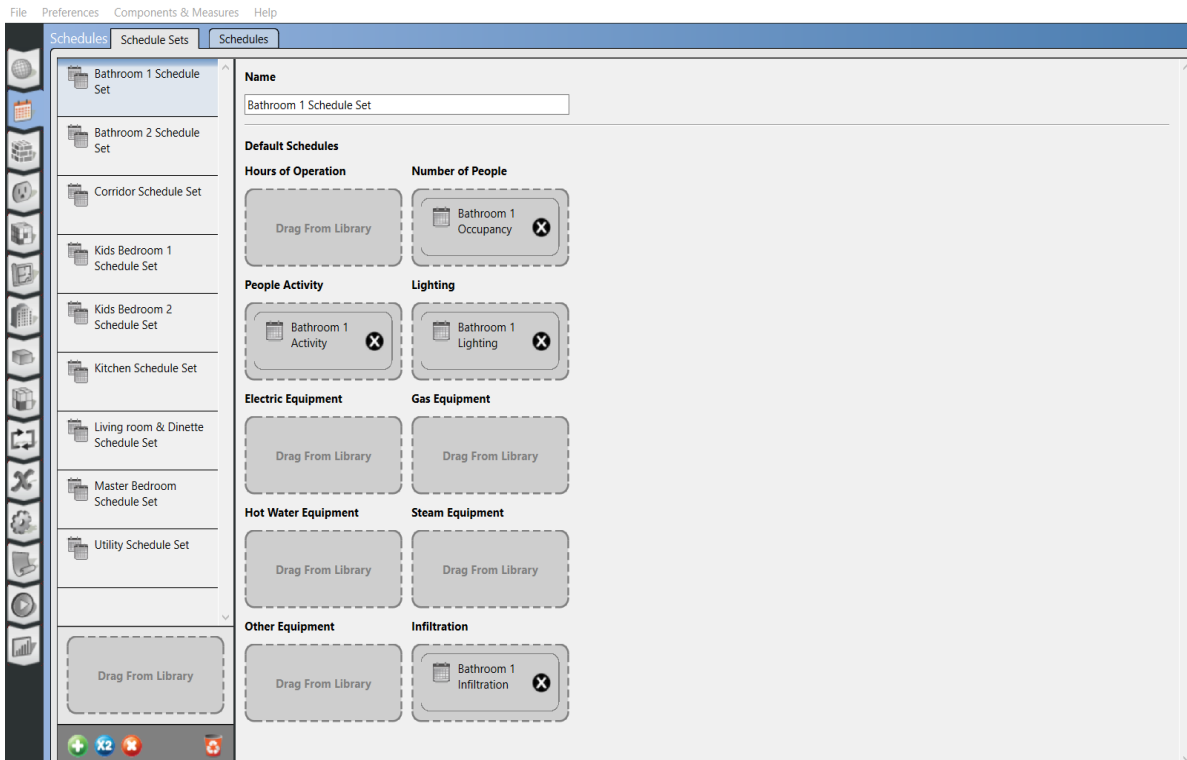


Εικόνα 66: Τα χρονοπρογράμματα, Schedules, του χώρου Master Bedroom.



Εικόνα 67: Τα χρονοπρογράμματα, Schedules, του χώρου Utility.

Η ομαδοποίηση των χρονοπρογραμμάτων κατά space type φαίνεται στην *Εικόνα 68* και γίνεται μέσω της καρτέλας «Schedule Sets». Αυτό γίνεται για ευχέρεια στη χρήση του λογισμικού και για πιο οργανωμένη χρήση του. Αφού γίνουν τα Schedule Sets, γίνεται και η αντιστοίχισή τους στο SketchUp μέσω της εντολής OpenStudio Inspector και εν συνεχεία «Default Schedule Set» για κάθε χώρο/space. Η αντιστοίχιση των ηλεκτρικών συσκευών θα γίνει στην καρτέλα Spaces και θα αναλυθεί στη συνέχεια.



**Εικόνα 68:** Παράδειγμα ομαδοποίησης χρονοπρογραμμάτων για το χώρο Bathroom 1.

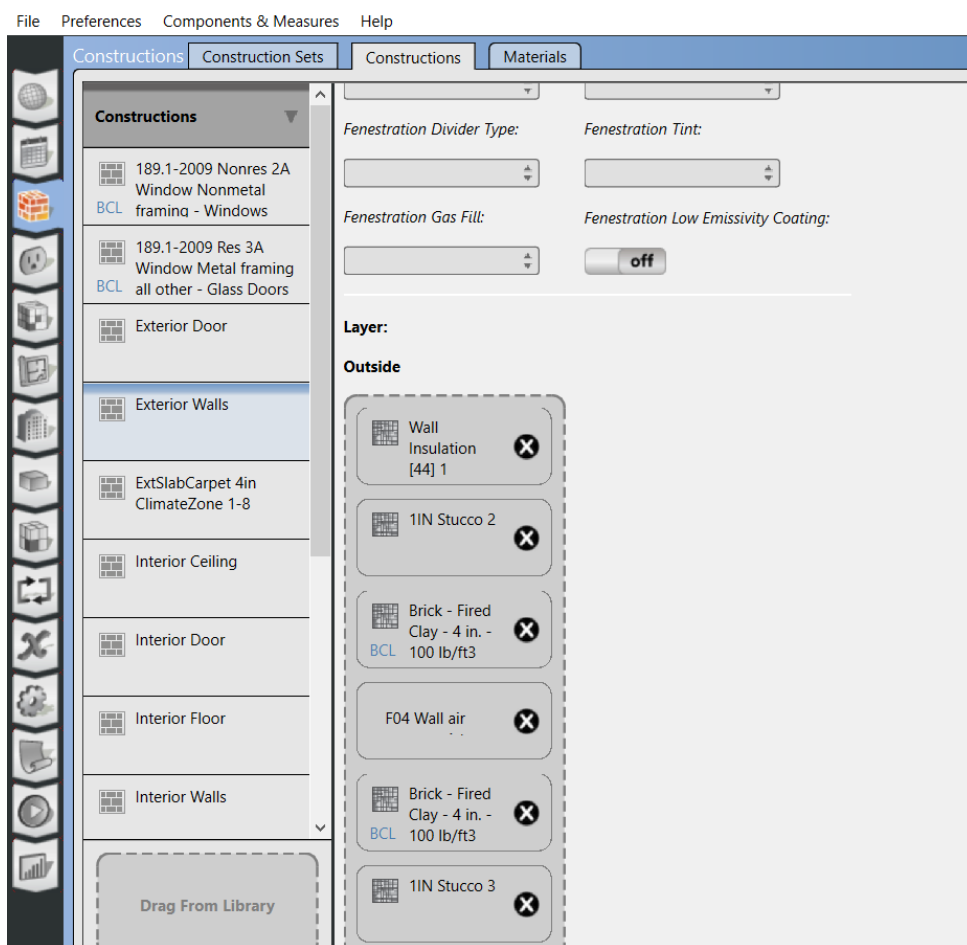
### 5.2.3 Καρτέλα κατασκευών – Constructions Tab

Σε αυτή την καρτέλα καθορίζονται τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή τοίχων, παραθύρων, πορτών, οροφής και δαπέδου. Τα υλικά τοποθετούνται σε στρώσεις διαφορετικών παχών, ξεκινώντας από την εξωτερική στρώση προς την εσωτερική και έτσι δημιουργείται ένα σετ κατασκευής. Στην καρτέλα Materials αναγράφονται αναλυτικά οι ιδιότητες του συνόλου των υλικών που έχουν επιλεγεί. Επιπλέον, εάν κριθεί απαραίτητο, μέσω αυτής της καρτέλας μπορεί να γίνει αναπροσαρμογή των ιδιοτήτων ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη.

#### 5.2.3.1 Εξωτερικοί τοίχοι

Στην *Εικόνα 69* φαίνονται οι στρώσεις υλικών, από μέσα προς τα έξω, που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των εξωτερικών τοίχων.



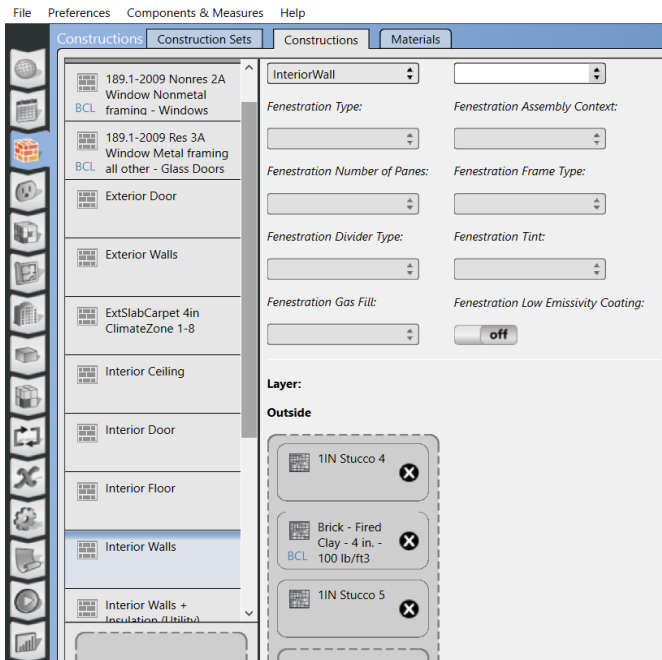


**Εικόνα 69: Στρώσεις υλικών κατασκευής εξωτερικών τοίχων.**

Συγκεκριμένα, προκειμένου για ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών επιλέχθηκε εξωτερική μόνωση πάχους 11 cm, εσωτερικά της οποίας εφαρμόζεται η πρώτη στρώση ασβεστοκονιάματος (σοβά) πάχους 1 in, δηλαδή περίπου 2.5 cm. Προχωρώντας εσωτερικά συναντώνται δύο στρώσεις από οπτόπλινθους (τούβλα) πάχους 10.16 cm, μεταξύ των οποίων αφήνεται ένα διάκενο πάχους 1 cm. Το σύμβολο «BCL» υποδηλώνει ότι το συγκεκριμένο υλικό, αλλά και όλα όσα στη συνέχεια θα φέρουν αυτή την ένδειξη, προέρχονται από τη βιβλιοθήκη που παρέχει το OpenStudio και έχει γίνει λήψη τους από εκεί, καθώς δεν ήταν άμεσα διαθέσιμα με τη χρήση του λογισμικού. Τέλος, εφαρμόζεται το επίχρισμα από τη δεύτερη στρώση σοβά (ασβεστοκονιάματος).

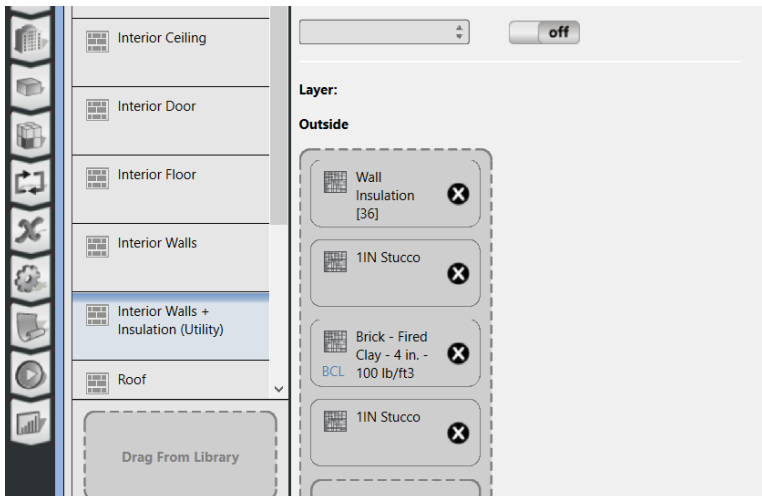
### 5.2.3.2 Εσωτερικοί τοίχοι

Το σετ κατασκευής που χρησιμοποιήθηκε για τους εσωτερικούς τοίχους φαίνεται στην *Εικόνα 70*.



Εικόνα 70: Υλικά κατασκευής εσωτερικών τοίχων.

Στους εσωτερικούς τοίχους της οικίας, που ανήκουν στη θερμική ζώνη, δεν εισάγεται μονωτικό υλικό στους τοίχους. Επιλέγονται δύο στρώσεις ασβεστοκονιάματος, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται μία στρώση από τούβλα. Ο μοναδικός χώρος που δεν ανήκει στη θερμική ζώνη της οικίας είναι το Utility room. Στους εσωτερικούς τοίχους που ορίζουν το συγκεκριμένο χώρο και κατ' επέκταση στους τοίχους των χώρων με τους οποίους εφάπτεται, εισάγεται και μονωτικό υλικό. Οι εσωτερικοί μονωμένοι τοίχοι παρουσιάζονται στην Εικόνα 71.



Εικόνα 71: Υλικά κατασκευής εσωτερικών τοίχων με θερμομόνωση για χώρους εκτός θερμικής ζώνης.

Στην ουσία πρόκειται για σεν κοινού εσωτερικού τοίχου στο οποίο έχει προστεθεί μόνωση πάχους 5.66 cm. Το διαφορετικό format κατασκευής μόνο για το συγκεκριμένο δωμάτιο επιβάλλεται μέσω της καρτέλας **Spaces** → **Surfaces**, ενώ το λογισμικό αναγνωρίζει από μόνο του ότι το ίδιο format θα ισχύσει και για τους τοίχους άλλων χώρων που εφάπτονται με το Utility room, εφόσον έχουν οριστεί σωστά οι συνοριακές συνθήκες. Όπως φαίνεται στην *Εικόνα 72*, το format εφαρμόζεται στον αντίστοιχο εφαπτόμενο τοίχο στους χώρους Master Bedroom, Kids Bedroom 1 και Corridor – στην *Εικόνα 72* φαίνεται ενδεικτικά μόνο για το χώρο Master Bedroom.

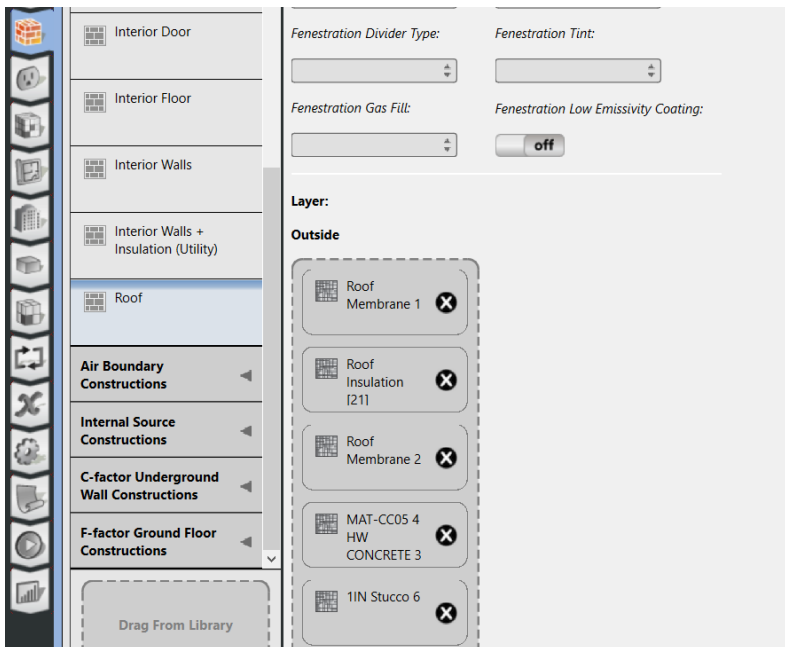
File Preferences Components & Measures Help

Spaces	Properties	Loads	Surfaces	Subsurfaces	Interior Partitions	Shading	
			Surface 4	Wall		Interior Walls	Surface 58
			Surface 45	Wall		Exterior Walls	Outdoors
			Surface 44	Floor		Interior Floor	Ground
			Surface 46	Wall		Interior Walls + Insulation	Surface 34
Master Bedroom			Surface 47	Wall		Interior Walls	Surface 24
			Surface 48	Wall		Interior Walls	Surface 38
			Surface 49	Wall		Exterior Walls	Outdoors
			Surface 50	RoofCeiling		Roof	Outdoors
			Surface 31	Floor		Interior Floor	Ground
			Surface 35	Wall		Exterior Walls	Outdoors
			Surface 36	RoofCeiling		Roof	Outdoors
Utility			Surface 33	Wall		Interior Walls + Insulation	Surface 25
			Surface 32	Wall		Interior Walls + Insulation	Surface 19
			Surface 34	Wall		Interior Walls + Insulation	Surface 46

**Εικόνα 72: Αντιστοίχιση υλικών εσωτερικών τοίχων στους κατάλληλους χώρους εκτός θερμικής ζώνης.**

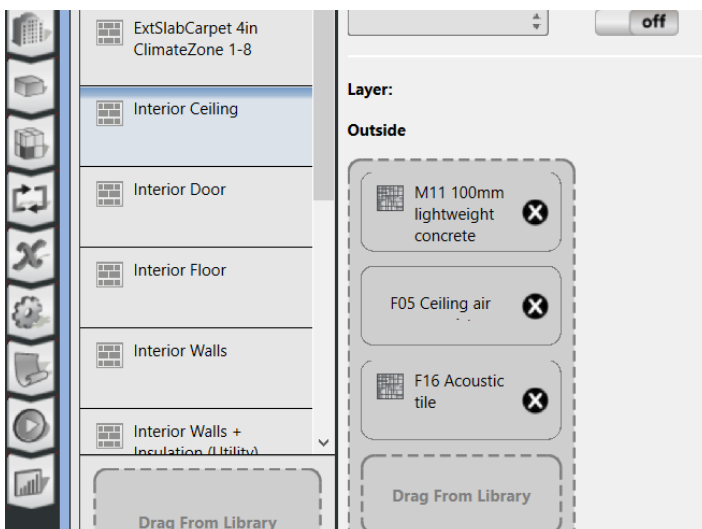
### 5.2.3.3 Οροφή

Το σεν κατασκευής της οροφής, από την εξωτερική προς την εσωτερική στρώση, παρουσιάζεται στην *Εικόνα 73*.



**Εικόνα 73: Υλικά κατασκευής οροφής.**

Η οροφή της οικίας κατασκευάζεται με εφαρμογή μεμβράνης οροφής πάχους 9 mm, μόνωσης οροφής πάχους 21 cm, δεύτερης μεμβράνης ίδιου πάχους με την εξωτερική, οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 10.16 cm και μία στρώση ασβεστοκονιάματος πάχους 2.5 cm. Αυτό το σετ αφορά στην εξωτερική οροφή της οικίας, καθώς έχει οριστεί και κατασκευαστικό σετ για τα ταβάνια (interior ceiling) με τις στρώσεις υλικών που παρουσιάζονται στην *Εικόνα 74* για πιο ενισχυμένη κατασκευή.

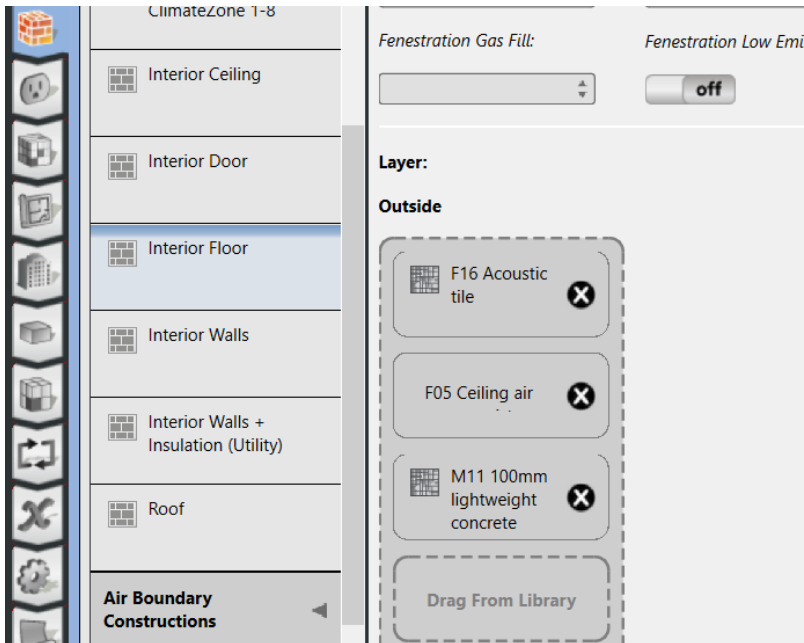


**Εικόνα 74: Υλικά κατασκευής Interior Ceiling.**

Το παραπάνω σετ λαμβάνεται αυτούσιο από τα διαθέσιμα του OpenStudio για ταβάνια/εσωτερικές οροφές και αποτελείται από ελαφρύ οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 100 mm, διάκενο (κενό αέρος) 1 mm και μία ακουστική πλάκα πάχους 19 mm.

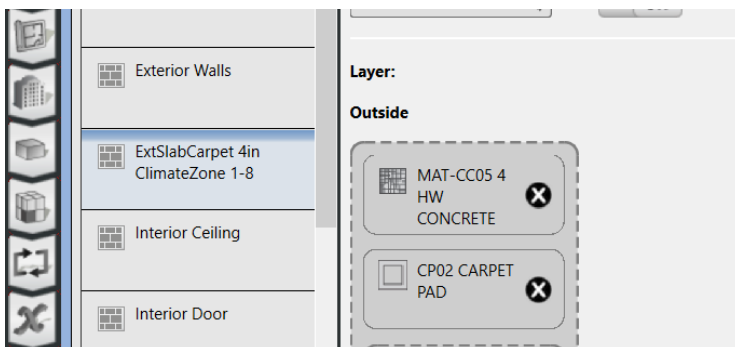
#### 5.2.3.4 Δάπεδο

Όπως και στην κατασκευή της οροφής, έτσι και σε αυτή του δαπέδου υπάρχουν δύο κατασκευαστικά σετ, εσωτερικό δάπεδο της οικίας και εξωτερικό. Τα σετ αυτά παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 75: Υλικά κατασκευής Interior Floor.

Το σετ αυτό λαμβάνεται αυτούσιο από τα διαθέσιμα του λογισμικού για εσωτερικό δάπεδο και αποτελείται από ακουστική πλάκα πάχους 19 mm, διάκενο 1 mm και ελαφρύ οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 100 mm. Ταυτίζεται με το σετ του Interior Ceiling όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό.

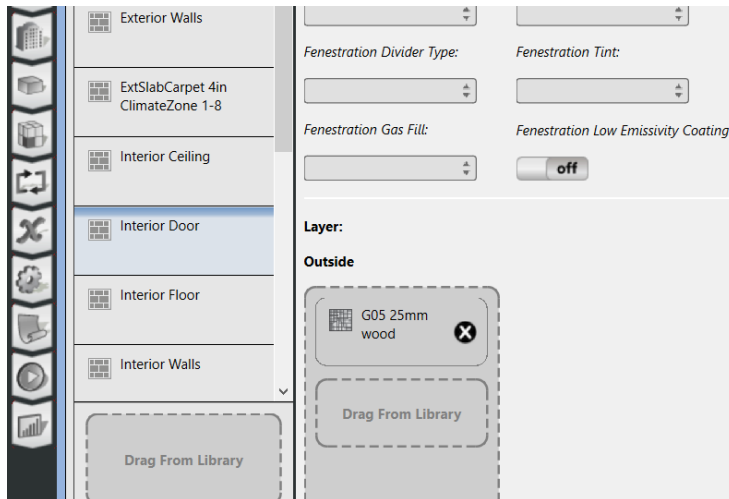


Εικόνα 76: Υλικά κατασκευής Exterior Floor.

Το σετ λαμβάνεται αυτούσιο από τα προτεινόμενα διαθέσιμα του OpenStudio και αποτελείται από ενισχυμένο οπλισμένο σκυρόδεμα πάχους 10.16 cm και ένα είδος μοκέτας που προτείνεται από το λογισμικό.

### 5.2.3.5 Εσωτερικές πόρτες

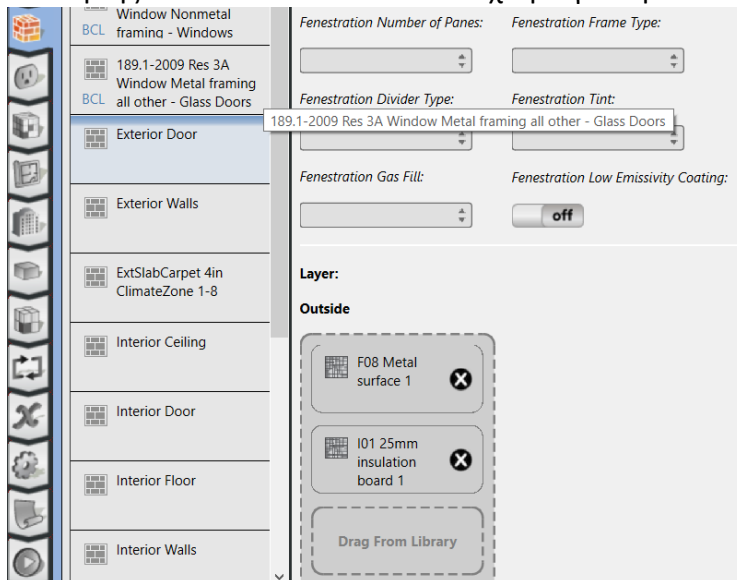
Πρόκειται για απλές ξύλινες πόρτες πάχους 25 mm, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 77*.



**Εικόνα 77:** Ξύλινη απλή εξωτερική πόρτα.

### 5.2.3.6 Εξωτερική πόρτα

Η μοναδική πόρτα της οικίας που έρχεται σε επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον είναι εκείνη της εισόδου. Το σετ που επιλέχθηκε για την κατασκευή της φαίνεται στην *Εικόνα 78*.

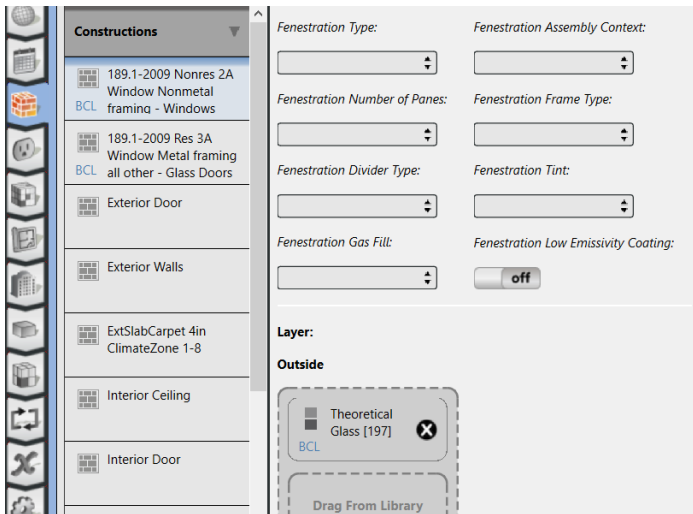


**Εικόνα 78:** Υλικά κατασκευής εξωτερικής πόρτας.

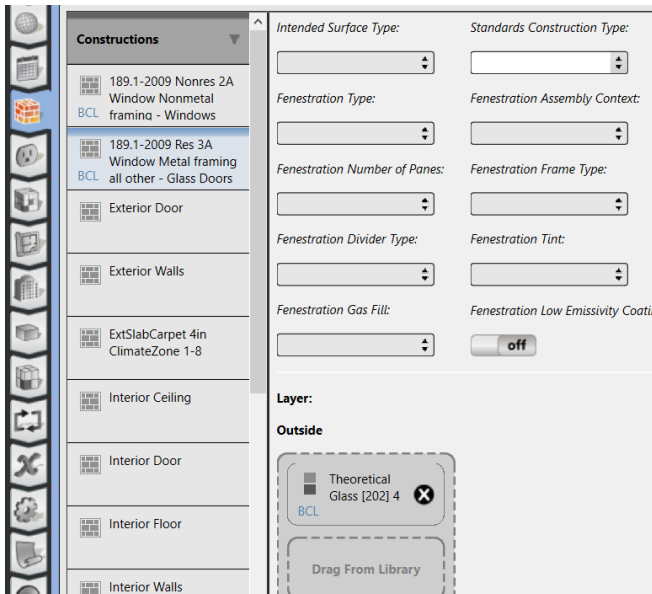
Η εξωτερική πόρτα επιλέχθηκε να έχει μεταλλική επιφάνεια με μία μονωτική πλάκα πάχους 25 mm.

### 5.2.3.7 Παράθυρα και Μπαλκονόπορτες (Glass Doors)

Αρχικά, όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα, σημειώνεται ότι όλα τα παράθυρα έχουν οριστεί ως ανοιγόμενα (Operable windows), όπως και οι μπαλκονόπορτες και είναι κατασκευασμένα από γυαλί ίδιου πάχους 3 mm, αλλά διαφορετικών ιδιοτήτων (καρτέλα Materials). Το σετ κατασκευής τους φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 79: Υλικό κατασκευής παραθύρων.

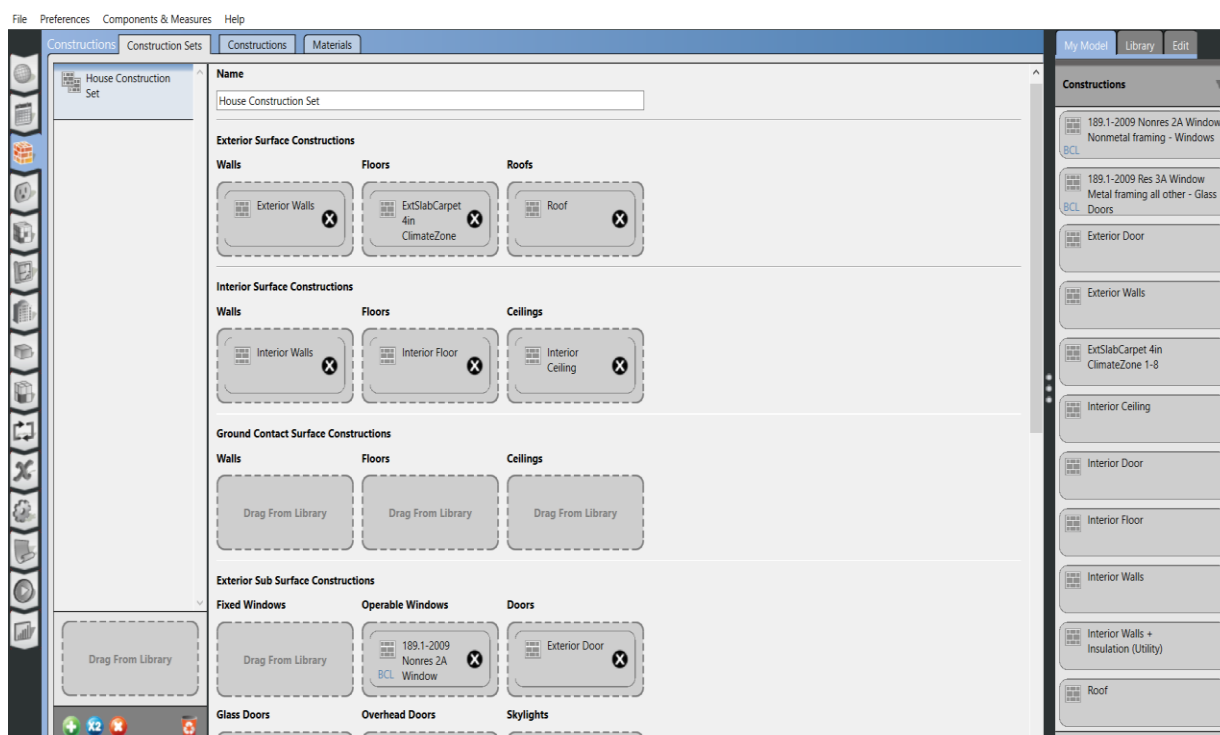


Εικόνα 80: Υλικό κατασκευής μπαλκονόπορτας.



Και για τα δύο παραπάνω σετ έχει γίνει λήψη τους από τη βιβλιοθήκη η οποία είναι διαθέσιμη μέσω του λογισμικού και είναι πρότυπα σετ κατασκευής παραθύρων και μπαλκονόπορτας.

Τέλος, όλα τα κατασκευαστικά σετ που δημιουργήθηκαν, συγκεντρώνονται και αντιστοιχίζονται κατάλληλα στην καρτέλα **Construction Sets**. Η οικία αποτελείται από ένα συνολικό construction set, το οποίο περιέχει τα επιμέρους κατασκευαστικά σετ για κάθε κομμάτι της (τοιχοί, πόρτες, παράθυρα, κ.λπ.). Το συνολικό σετ ονομάζεται House Construction Set και ορίζεται μέσω της εντολής OpenStudio Inspector στους χώρους (Spaces) της οικίας ως Default Construction Set και στο SketchUp για λόγους πληρότητας.



**Εικόνα 81: Ομαδοποίηση των επιμέρους κατασκευαστικών σετ στο συνολικό Construction Set της οικίας στο OpenStudio.**

#### 5.2.3.8 Διερεύνηση της τήρησης προδιαγραφών του κτιρίου

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να εξετασθεί εάν τηρούνται οι προϋποθέσεις που θέτει ο Κ.Εν.Α.Κ. σχετικά με τον μέγιστο επιτρεπτό συντελεστή θερμοπερατότητας,  $U$ , των επιμέρους δομικών στοιχείων του κελύφους της οικίας, όσο και του κτηρίου συνολικά. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας ( $U$ ) έχει ως μονάδα μέτρησης το  $W/m^2 \cdot K$  και καθορίζει τη θερμομονωτική ικανότητα ενός δομικού στοιχείου. Εκφράζει την ποσότητα θερμότητας σε  $Wh$  που μεταδίδεται υπό σταθερή θερμική κατάσταση και μέσα σε χρονικό διάστημα 1 h από τμήμα επιφάνειας  $1 m^2$  του στοιχείου αυτού, όταν η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα που εφάπτεται της εσωτερικής

επιφάνειάς του και του αέρα της εξωτερικής του, δηλαδή μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, είναι 1°C. Επομένως, θα υπολογιστεί ο συντελεστής θερμοπερατότητας για κάθε δομικό στοιχείο. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας ενός πολυστρωματικού δομικού στοιχείου ορίζεται από τη Σχέση 12.

$$U = \frac{1}{R_{0A}} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (12)$$

Με

$$R_{0A} = R_i + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_\delta + R_a \left[ m^2 \cdot K/W \right] \quad (13)$$

όπου,

- $R_i \left[ m^2 \cdot K/W \right]$  η αντίσταση θερμικής μετάβασης επιφανειακού στρώματος αέρα από τον εσωτερικό χώρο προς το δομικό στοιχείο
- $n [-]$  το πλήθος των στρώσεων του δομικού στοιχείου
- $R_\delta \left[ m^2 \cdot K/W \right]$  σε περίπτωση που υπάρχει διάκενο αέρος ανάμεσα στις στρώσεις ενός δομικού στοιχείου, με  $R_\delta$  συμβολίζεται η θερμική αντίσταση του αέρα (ο αέρας του διακένου δεν επικοινωνεί με το εξωτερικό περιβάλλον)
- $R_a \left[ m^2 \cdot K/W \right]$  η αντίσταση θερμικής μετάβασης επιφανειακού στρώματος αέρα από το δομικό στοιχείο προς το εξωτερικό περιβάλλον
- $R_{0A} \left[ m^2 \cdot K/W \right]$  η συνολική αντίσταση που προβάλλει το δομικό στοιχείο στη μετάδοση θερμότητας

Οι συντελεστές  $R_i$  και  $R_a$  προσδιορίζονται από τον Πίνακα 6.

**Πίνακας 6: Τιμές συντελεστών θερμικής μετάβασης και αντιστάσεων θερμικής μετάβασης κατά το ISO 6946 για κάθε δομικό στοιχείο – απόσπασμα της TOTEE.**

Α/Α	Δομικό στοιχείο	Συντελεστές θερμικής μετάβασης		Αντιστάσεις θερμικής μετάβασης	
		1/R <sub>i</sub>	1/R <sub>a</sub>	R <sub>i</sub>	R <sub>a</sub>
		W/(m <sup>2</sup> ·K)	W/(m <sup>2</sup> ·K)	(m <sup>2</sup> ·K)/W	(m <sup>2</sup> ·K)/W
1	Εξωτερικοί τοίχοι και παράθυρα (προς εξωτ. αέρα)	7,70	25,00	0,13	0,04
2	Τοίχος που συνορεύει με μη θερμαινόμενο χώρο	7,70	7,70	0,13	0,13
3	Τοίχος σε επαφή με έδαφος	7,70	–	0,13	0,00
4	Στέγη, δώμα (ανερχόμενη ροή θερμότητας)	10,00	25,00	0,10	0,04
5	Οροφή που συνορεύει με μη θερμαινόμενο χώρο (ανερχόμενη ροή θερμότητας)	10,00	10,00	0,10	0,10
6	Δάπεδο επάνω από ανοικτή διάβαση (πυλωτή) (κατερχόμενη ροή θερμότητας)	5,88	25,00	0,17	0,04
7	Δάπεδο επάνω από μη θερμαινόμενο χώρο (κατερχόμενη ροή θερμότητας)	5,88	5,88	0,17	0,17
8	Δάπεδο σε επαφή με το έδαφος	5,88	–	0,17	0,00

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας διαφοροποιείται ανάλογα την περιοχή. Η οικία μελέτης πρόκειται να ανεγερθεί στην περιοχή της Βάρκιζας, που βρίσκεται στην Αττική και άρα με βάση την *Εικόνα 82* θεωρείται ότι ανήκει στη ζώνη Β.

ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΖΩΝΗ	ΝΟΜΟΙ
<b>ΖΩΝΗ Α</b>	Ηρακλείου, Χανίων, Ρεθύμνου, Λασιθίου, Κυκλάδων, Δωδεκανήσου, Σάμου, Μεσσηνίας, Λακωνίας, Αργολίδας, Ζακύνθου, Κεφαλληνίας & Ιθάκης, Κύθηρα & νησιά Σαρωνικού (Αττικής), Αρκαδίας (πεδινή).
<b>ΖΩΝΗ Β</b>	Αττικής (εκτός Κυθήρων & νησιών Σαρωνικού), Κορινθίας, Ηλείας, Αχαΐας, Αιτωλοακαρνανίας, Φθιώτιδας, Φωκίδας, Βοιωτίας, Ευβοίας, Μαγνησίας, Λέσβου, Χίου, Κέρκυρας, Λευκάδας, Θεσπρωτίας, Πρέβεζας, Άρτας.

**Εικόνα 82: Διαχωρισμός της ελληνικής επικράτειας σε κλιματικές ζώνες κατά νομούς – ΤΟΤΕΕ.**

Οι μέγιστοι επιτρεπόμενοι συντελεστές θερμοπερατότητας ανάλογα το δομικό στοιχείο για την οικία μελέτης, η οποία θεωρείται ως νέο κτήριο προς ανέγερση, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 7: Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας των επιμέρους δομικών στοιχείων ανά κλιματική ζώνη σε περίπτωση ανέγερσης νέου κτηρίου.**

Δομικό στοιχείο	Μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής θερμοπερατότητας U [W/(m <sup>2</sup> ·K)]			
	Ζώνη Α'	Ζώνη Β'	Ζώνη Γ'	Ζώνη Δ'
Εξωτερική οριζόντια ή κεκλιμένη επιφάνεια σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα (οροφή)	0,45	0,40	0,35	0,30
Εξωτερικός τοίχος σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα	0,55	0,45	0,40	0,35
Δάπεδο σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα (πιλοτή)	0,45	0,40	0,35	0,30
Οριζόντια ή κεκλιμένη οροφή σε επαφή με κλειστό μη θερμαινόμενο χώρο	1,10	0,80	0,65	0,60
Τοίχος σε επαφή με κλειστό μη θερμαινόμενο χώρο	1,30	0,90	0,70	0,65
Δάπεδο σε επαφή με κλειστό μη θερμαινόμενο χώρο	1,10	0,80	0,65	0,60
Οριζόντια ή κεκλιμένη οροφή σε επαφή με το έδαφος	1,10	0,80	0,65	0,60
Τοίχος σε επαφή με το έδαφος	1,30	0,90	0,70	0,65
Δάπεδο σε επαφή με το έδαφος	1,10	0,80	0,65	0,60
Κούφωμα ανοίγματος σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα	2,80	2,60	2,40	2,20
Κούφωμα ανοίγματος χωρίς υαλοπίνακα σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα	2,80	2,60	2,40	2,20
Γυάλινη πρόσοψη κτηρίου μη ανοιγόμενη ή μερικώς ανοιγόμενη σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα	2,10	1,90	1,75	1,70

Το λογισμικό στα αποτελέσματα της προσομοίωσης έχει υπολογίσει τις τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας για τα παράθυρα (windows) και τις μπαλκονόπορτες (glass doors) της οικίας. Για τα σετ των παραθύρων (Theoretical glass 197) και των μπαλκονοπορτών (Theoretical glass 202) οι τιμές του U έχουν υπολογισθεί  $4.26 \frac{W}{m^2 \cdot K}$  και  $3.12 \frac{W}{m^2 \cdot K}$  αντίστοιχα.

Για τους εξωτερικούς τοίχους και την οροφή το λογισμικό δίνει έμμεσα τους συντελεστές θερμοπερατότητας, έχοντας υπολογίσει τη συνολική αντίσταση που προβάλλει το κάθε στοιχείο στη μετάδοση θερμότητας. Έτσι, για τους εξωτερικούς τοίχους ( $R_{0L} = 3.08 \frac{m^2 \cdot K}{W}$ ) το U από τη Σχέση (12) προκύπτει ίσο με  $0.3247 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ , ενώ για την οροφή ( $R_{0L} = 4.53 \frac{m^2 \cdot K}{W}$ ) το U από τη Σχέση (12) προκύπτει ίσο με  $0.2208 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ .

Construction	Net Area (m <sup>2</sup> )	Surface Count	R Value (m <sup>2</sup> *K/W)
Exterior Walls	114.7	12	3.08
Roof	150.0	9	4.53

**Εικόνα 83:** Τιμές συνολικής αντίστασης στη μετάδοση θερμότητας για εξωτερικούς τοίχους και οροφές.

Στα υπόλοιπα δομικά στοιχεία που δεν παρέχονται σχετικά αποτελέσματα, ο συντελεστής θερμοπερατότητας θα υπολογιστεί μέσω των Σχέσεων (12) και (13) και λαμβάνοντας τις απαραίτητες πληροφορίες από τον Πίνακα 6 και Πίνακα 7 της TOTEE. Σε αυτό το σημείο πολύ σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η καρτέλα **Materials**, η οποία παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για τα πάχη της κάθε στρώσης των δομικών υλικών, αλλά και τους αντίστοιχους συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας, στοιχεία απαραίτητα για την εύρεση της αντίστασης στη μετάδοση θερμότητας, R, και εν συνεχεία του συντελεστή θερμοπερατότητας U.

Η θερμική αντίσταση της κάθε στρώσης υλικού δίνεται από τη Σχέση 14:

$$R_{1,2,\dots,n} = \frac{k}{L_1} \quad (14)$$

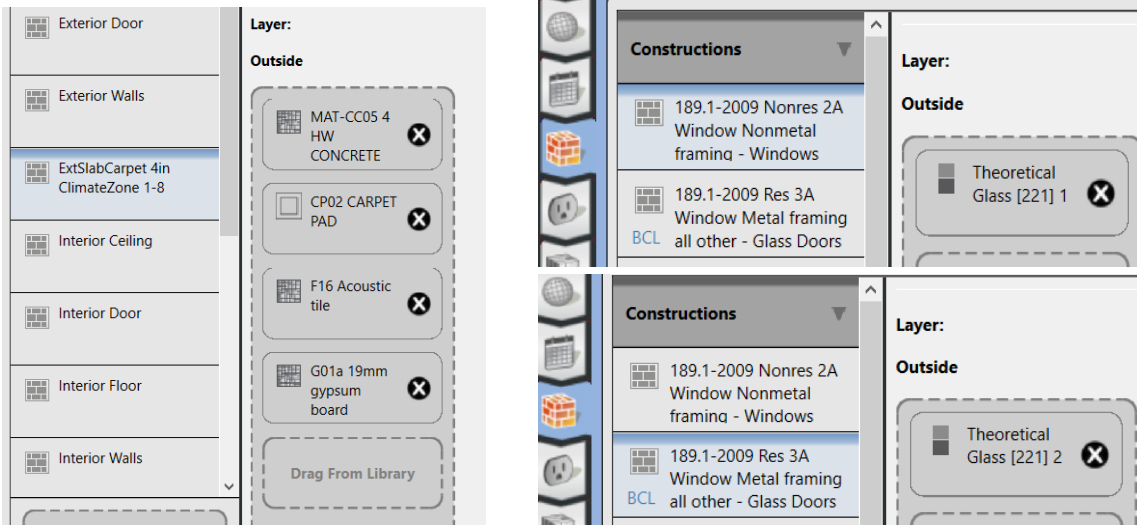
Όπου

- $k [\frac{W}{m \cdot K}]$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού της κάθε στρώσης
- $L [m]$  το πάχος της στρώσης

**Πίνακας 8: Συντελεστής θερμοπερατότητας των επιμέρους δομικών στοιχείων σε σχέση με το μέγιστο επιτρεπόμενο.**

	$R_i \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$	$R_a \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$	$R_\delta \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$	$R_{ολ} \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$	$U \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	$U_{max} \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$
<b>Εξωτερικοί τοίχοι</b>	0.13	0.04	0.15	3.08	0.3247	0.45
<b>Οροφή</b>	0.1	0.04	-	4.53	0.2208	0.4
<b>Παράθυρα</b>	0.13	0.04	-	0.23	<b>4.26</b>	<b>2.6</b>
<b>Μπαλκονόπορτες</b>	0.13	0.04	-	0.32	<b>3.12</b>	<b>2.6</b>
<b>Εσωτ. Τοίχοι (μη θερμαινόμενοι χώροι)</b>	0.13	0.13	-	1.899	0.5266	0.9
<b>Δάπεδο</b>	0.17	0.0	-	1.0375	<b>0.9638</b>	<b>0.8</b>
<b>Εξωτ. Πόρτα</b>	0.13	0.04	-	1.0035	0.9965	2.6

Παρατηρείται ότι οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας για τα παράθυρα, τις μπαλκονόπορτες και το δάπεδο δεν βρίσκονται εντός περιορισμών (με κόκκινη επισήμανση) και χρίζουν βελτιώσεων. Στην περίπτωση των παραθύρων και των μπαλκονοπορτών επιλέγεται ένα νέο σετ κατασκευής, το «Theoretical Glass 221», για το οποίο η τιμή του  $U$  υπολογίζεται εκ νέου από το λογισμικό και είναι ίση με  $1.98 \left[ \frac{W}{m^2} \cdot K \right]$  ( $< 2.6 \left[ \frac{W}{m^2} \cdot K \right] = U_{max}$ ), τιμή εντός των επιβαλλόμενων περιορισμών. Για το δάπεδο επιλέγεται το εσωτερικό τμήμα του (Interior Floor) να παραμείνει ως έχει, ενώ στο εξωτερικό (Exterior Floor) θα προστεθεί επιπλέον μόνωση με μία ακουστική πλάκα πάχους 19 mm και μία γυψοσανίδα πάχους επίσης 19 mm. Με αυτό τον τρόπο ο νέος συντελεστής θερμοπερατότητας προκύπτει ίσος με  $U = 0.6781 \left[ \frac{W}{m^2} \cdot K \right] < 0.8 = U_{max}$ .



**Εικόνα 84: Βελτιωμένο κατασκευαστικό σετ δαπέδου.** **Εικόνα 85: Theoretical Glass [221] προς βελτίωση στα παράθυρα και τις μπαλκονόπορτες.**

Construction	Net Area (m <sup>2</sup> )	Surface Count	U-factor (W/m <sup>2</sup> *K)
189.1-2009 Nonres 2A Window Nonmetal framing - Windows	11.3	7	1.98
189.1-2009 Res 3A Window Metal framing all other - Glass Doors	16.8	2	1.98

**Εικόνα 86: Νέος βελτιωμένος συντελεστής θερμοπερατότητας U για παράθυρα και μπαλκονόπορτες.**

Οπότε οι νέοι συντελεστές θερμοπερατότητας που προκύπτουν συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 9: Τελικοί συντελεστές θερμοπερατότητας των επιμέρους δομικών στοιχείων σε σχέση με το μέγιστο επιτρεπόμενο.**

	$U \left[ \frac{W}{m^2} \cdot K \right]$	$U_{max} \left[ \frac{W}{m^2} \cdot K \right]$
Εξωτερικοί τοίχοι	0.3247	0.45
Οροφή	0.2208	0.4
Παράθυρα	1.98	2.6
Μπαλκονόπορτες	1.98	2.6
Εσωτερικοί τοίχοι	0.5266	0.9

Δάπεδο	0.6781	0.8
Εξωτερική πόρτα	0.9965	2.6

Τέλος, χρειάζεται να υπολογιστεί ο μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας του κελύφους του κτηρίου [25]. Αυτό γίνεται μέσω της Σχέσης 15.

$$U_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i U_i b_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (15)$$

Όπου:

- $A_i [m^2]$  το εμβαδό του κάθε δομικού στοιχείου του κελύφους του κτηρίου
- $U_i [\frac{W}{m^2} \cdot K]$  ο συντελεστής θερμοπερατότητας κάθε δομικού στοιχείου
- $b_i [-]$  ο μειωτικός συντελεστής, ο οποίος λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα για δομικά στοιχεία σε επαφή με θερμαινόμενο χώρο και ίσος με 0.5 για δομικά στοιχεία σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο (Utility room).

Κατόπιν υπολογισμών προκύπτει ο μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας του κτηρίου ίσος με  $U_m=0.6518 [W/m^2 \cdot K]$ .

**Πίνακας 10: Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του μέσου συντελεστή θερμοπερατότητας ενός κτηρίου ανά κλιματική ζώνη συναρτήσει του λόγου της περιβάλλουσας επιφάνειας του κτηρίου προς τον όγκο του σε περίπτωση ανέγερσης νέου κτηρίου – ΤΟΤΕΕ.**

Λόγος $A/V$ [ $m^{-1}$ ]	Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές μέσου συντελεστή θερμοπερατότητας $U_m [W/(m^2 \cdot K)]$			
	Ζώνη Α'	Ζώνη Β'	Ζώνη Γ'	Ζώνη Δ'
≤ 0,2	1,25	1,13	1,04	0,95
0,3	1,17	1,05	0,96	0,88
0,4	1,10	0,99	0,91	0,83
0,5	1,04	0,93	0,86	0,78
0,6	0,98	0,89	0,81	0,73
0,7	0,92	0,83	0,76	0,68
0,8	0,86	0,77	0,71	0,63
0,9	0,80	0,73	0,65	0,59
≥ 1,0	0,77	0,69	0,62	0,55

Για να εξεταστεί το αν ο μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας του κτηρίου, που έχει υπολογισθεί, είναι εντός περιορισμών χρειάζεται να υπολογισθεί ο λόγος  $A/V$ . Στον υπολογισμό της επιφάνειας λαμβάνουν μέρος όλες οι επιφάνειες του κελύφους της οικίας, ενώ στον υπολογισμό του όγκου δε λαμβάνονται υπόψη οι μη θερμαινόμενοι χώροι – εν προκειμένω το Utility room. Προκύπτει λόγος ίσος με  $\frac{A}{V} = \frac{145}{423.4} = 0.3425 m^{-1}$ . Με



γραμμική παρεμβολή υπολογίζεται ότι για λόγο  $\frac{A}{V} = 0.3425 \text{ m}^{-1}$ , το  $U_{m,max} = 1.02075 \left[ \frac{W}{m^2} \cdot K \right]$ .

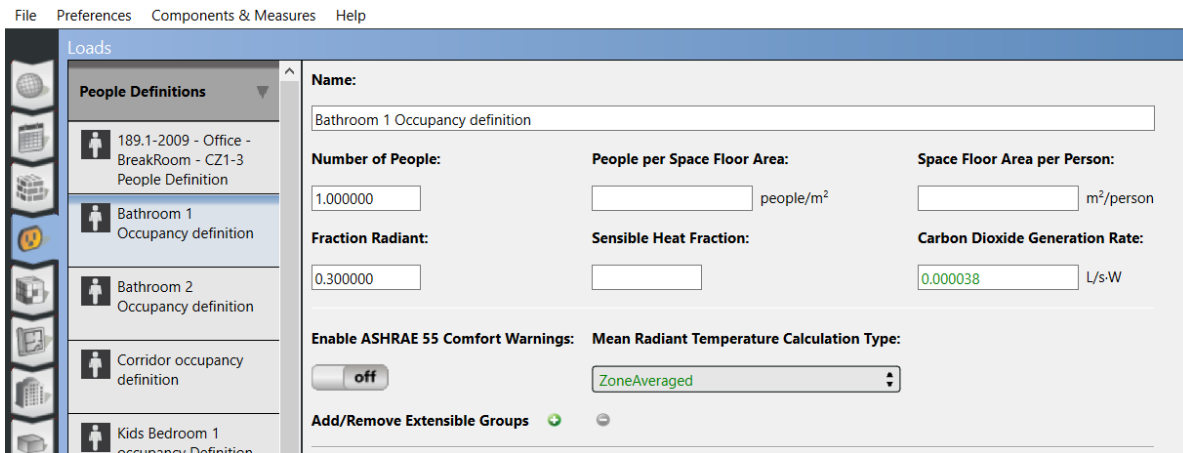
Συνεπώς, εξάγεται ότι  $U_m = 0.6518 < U_{m,max} = 1.02075 \left[ \frac{W}{m^2} \cdot K \right]$  και άρα ο μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας του κτηρίου βρίσκεται εντός περιορισμών.

### 5.2.4 Καρτέλα Φορτίων – Loads Tab

Σε αυτή την καρτέλα προσδιορίζονται τα φορτία της οικίας. Τα φορτία που απασχολούν είναι αυτά που έχουν να κάνουν με την παρουσία των ατόμων σε κάθε χώρο για την εύρεση ακτινοβολούσας και αισθητής θερμότητας, τα φορτία των φωτιστικών σωμάτων που υπάρχουν σε κάθε χώρο της οικίας, αλλά και η ισχύς των ηλεκτρικών συσκευών.

#### 5.2.4.1 Ορισμός ανθρώπινων φορτίων - People Definitions

Στην καρτέλα αυτή ορίζονται τα φορτία που έχουν να κάνουν με τον άνθρωπο. Στην *Εικόνα 87* φέρεται ως παράδειγμα ο αριθμός των ανθρώπων για το χώρο Bathroom 1.



**Εικόνα 87: Καθορισμός ανθρωπίνων φορτίων στο χώρο Bathroom 1.**

Στον *Πίνακα 11* δίνεται ο αριθμός των ατόμων που έχει οριστεί να παρευρίσκονται σε κάθε χώρο του σπιτιού.

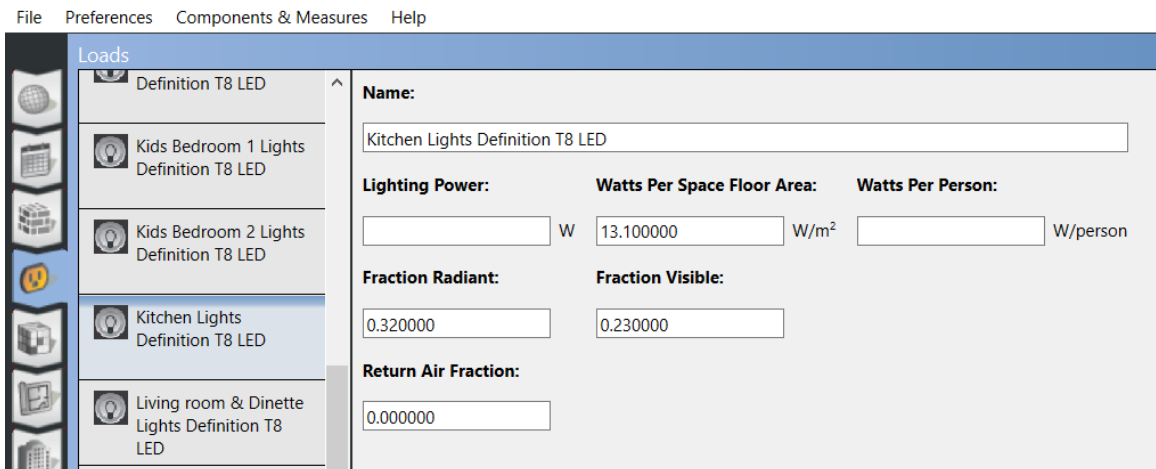
**Πίνακας 11: Αριθμός ατόμων σε κάθε χώρο της οικίας**

Χώρος	Αριθμός ανθρώπων
Bathroom 1	1
Bathroom 2	1
Corridor	1

Kids Bedroom 1	1
Kids Bedroom 2	1
Kitchen	2
Living room & Dinette	4
Master Bedroom	2
Utility	1

#### 5.2.4.2 Ορισμός φωτισμού – Lights Definitions

Στην καρτέλα Lights Definitions ορίζεται η ισχύς των φωτιστικών σωμάτων της οικίας. Σε όλους τους χώρους της οικίας έχουν επιλεγθεί λαμπτήρες T8 LED για εξοικονόμηση ενέργειας έναντι των λαμπτήρων πυρακτώσεως. Στην *Εικόνα 88* φέρονται ως παράδειγμα τα φωτιστικά σώματα στο χώρο Kitchen.



**Εικόνα 88: Καθορισμός φορτίων φωτιστικών σωμάτων στο χώρο Kitchen.**

Η ισχύς των φωτιστικών σωμάτων ορίσθηκε με βάση τα δεδομένα που δίνονται από την ASHRAE, μέρος των οποίων δίνεται στην επόμενη εικόνα.

Common Space Types*	LPD, W/m <sup>2</sup>	Common Space Types <sup>a</sup>	LPD, W/m <sup>2</sup>	Building-Specific Space Types*	LPD, W/m <sup>2</sup>
<b>Atrium</b>		<b>Loading Dock, Interior</b>	5.1	<b>Health Care Facility</b>	
≤12.2 m high	1.1/m total height	<b>Lobby</b>		In exam/treatment room	18.0
>12.2 m high	4.3 + 0.7/m total height	In facility for the visually impaired (and not used primarily by staff) <sup>c</sup>	19.4	In imaging room	16.3
		For elevator	7.0	In medical supply room	7.96
<b>Audience Seating Area</b>		In hotel	11.5	In nursery	9.5
In auditorium	6.8	In motion picture theater	6.4	In nurses' station	7.6
In convention center	8.9	In performing arts theater	21.6	In operating room	26.8
In gymnasium	7.1	All other lobbies	9.7	In patient room	6.7
In motion picture theater	12.3	<b>Locker Room</b>	8.1	In physical therapy room	9.9
In penitentiary	3.1	<b>Lounge/Breakroom</b>		In recovery room	12.4
In performing arts theater	26.2	In health care facility	10.0	<b>Library</b>	
In religious building	16.5	All other lounges/breakrooms	7.9	In reading area	11.5
In sports arena	4.7	<b>Office</b>		In stacks	18.4
All other audience seating areas	4.7	Enclosed	12.0	<b>Manufacturing Facility</b>	
<b>Banking Activity Area</b>	11.9	Open plan	10.6	In detailed manufacturing area	13.9
<b>Breakroom (See Lounge/Breakroom)</b>		<b>Parking Area, Interior</b>	2.1	In equipment room	8.0
<b>Classroom/Lecture Hall/Training Room</b>		<b>Pharmacy Area</b>	18.1	In extra-high-bay area (15.2 m floor-to-ceiling height)	11.3
In penitentiary	14.5	<b>Restroom</b>		In high-bay area (7.6 to 15.2 m floor-to-ceiling height)	13.3
All other classrooms/lecture halls/training rooms	13.4	In facility for the visually impaired (and not used primarily by staff) <sup>c</sup>	13.1		

Εικόνα 89: Τμήμα του πίνακα Lighting Power Densities Using Space-by-Space Method της ASHRAE [24].

Η επόμενη εικόνα αιτιολογεί τις τιμές που ορίστηκαν στις προεπιλογές Fraction Radiant και Fraction Visible της Εικόνας 88.

Fixture No.	Luminaire Feature	Return Air Fraction	Fraction Radiant	Fraction Visible	fconvected
10	Surface Mounted, T5HO	0.00	0.27	0.23	0.50
11	Pendant, Direct/Indirect, T8	0.00	0.32	0.23	0.45
12	Pendant, Indirect, T5HO	0.00	0.32	0.25	0.43

Εικόνα 90: Ποσοστά φωτισμού ανάλογα με το είδος των φωτιστικών σωμάτων [26].

Στον Πίνακα 12 παρουσιάζονται τα στοιχεία που ορίστηκαν στην καρτέλα Lights Definitions.

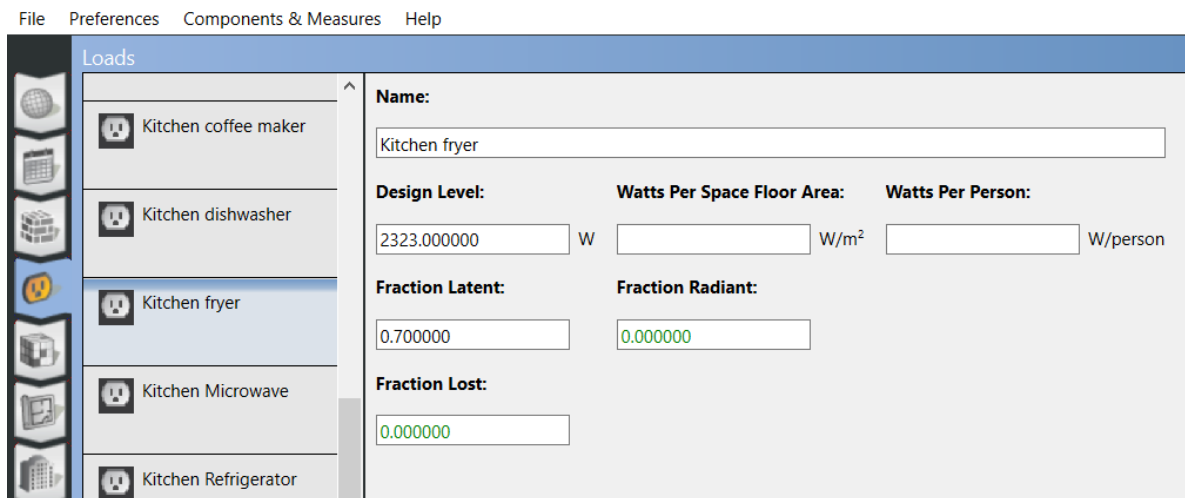
Πίνακας 12: Στοιχεία Φωτιστικών σωμάτων για τους διάφορους χώρους της οικίας.

Χώρος	Watts per Space Floor Area [W/m <sup>2</sup> ]	Fraction Radiant	Fraction Visible
Bathroom 1	10.6	0.32	0.23
Bathroom 2	10.6	0.32	0.23
Corridor	7.1	0.32	0.23

Kids Bedroom 1	11.5	0.32	0.23
Kids Bedroom 2	11.5	0.32	0.23
Kitchen	13.1	0.32	0.23
Living room & Dinette	9.6	0.32	0.23
Master Bedroom	11.5	0.32	0.23
Utility	6.5	0.32	0.23

### 5.2.4.3 Ορισμός ηλεκτρικών συσκευών – Electric Equipment Definitions

Στην καρτέλα Electric Equipment Definitions ορίζονται οι ηλεκτρικές συσκευές του σπιτιού. Τα θερμικά κέρδη από τις ηλεκτρικές συσκευές είναι σημαντικά. Για τον ορισμό της ονομαστικής ισχύος κάθε ηλεκτρικής συσκευής αξιοποιούνται πίνακες της ASHRAE ή φύλλα κατασκευαστών. Στην *Εικόνα 91* δίνεται το παράδειγμα της ηλεκτρικής συσκευής Kitchen Fryer, για την οποία αξιοποιήθηκε ο Πίνακας 13.



**Εικόνα 91: Ορισμός της ηλεκτρικής συσκευής Kitchen Fryer.**

**Πίνακας 13: Θερμικό κέρδος από ηλεκτρικές συσκευές κατά τη λειτουργία τους [24].**

Appliance	Energy Rate, W		Rate of Heat Gain, W				Usage Factor $F_U$	Radiation Factor $F_R$
	Rated	Cooking	Sensible Radiant	Sensible Convective	Latent	Total		
Cheesemelter	2400	2714	443	1094	599	2136	1.13	0.16
Egg cooker	2380	1191	65	369	630	1065	0.50	0.05
Fryer, countertop, open deep fryer	4600	3818	202	492	1629	2323	0.83	0.05
Griddle, countertop	8000	3280	848	631	1277	2757	0.41	0.26
Hot dog roller	1600	1577	267	611	679	1556	0.99	0.17
Hot plate, single burner	1100	985	313	627	44	985	0.90	0.32
Induction hob, countertop	5000	653	0	318	335	653	0.13	0.00
Oven, conveyor	5000	4292	718	2454	193	3365	0.86	0.17
Microwave	1700	2363	0	934	995	1929	1.39	0.00

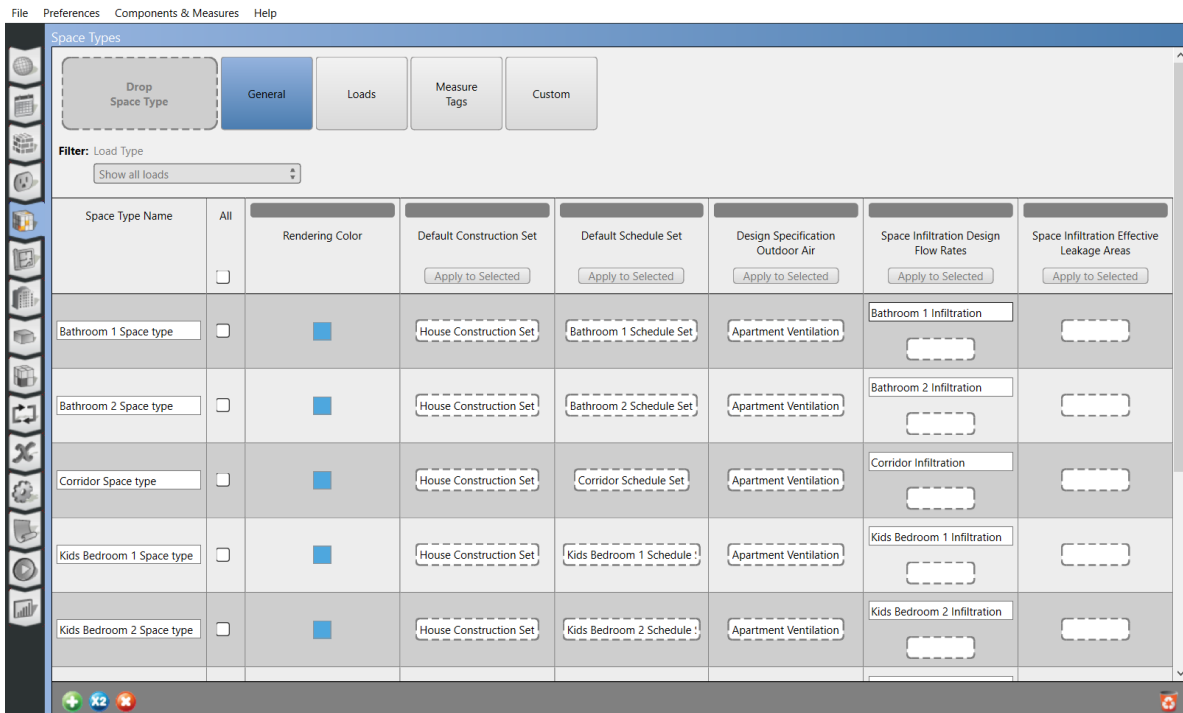
Προφανώς, η προεπιλογή **Fraction Latent** της *Εικόνας 91*, προκύπτει από το πηλίκο Latent/Total του *Πίνακα 13*. Επιπλέον, στον *Πίνακα 14* παρουσιάζεται το σύνολο των ορισμένων ηλεκτρικών συσκευών.

**Πίνακας 14: Ισχύς ηλεκτρικών συσκευών.**

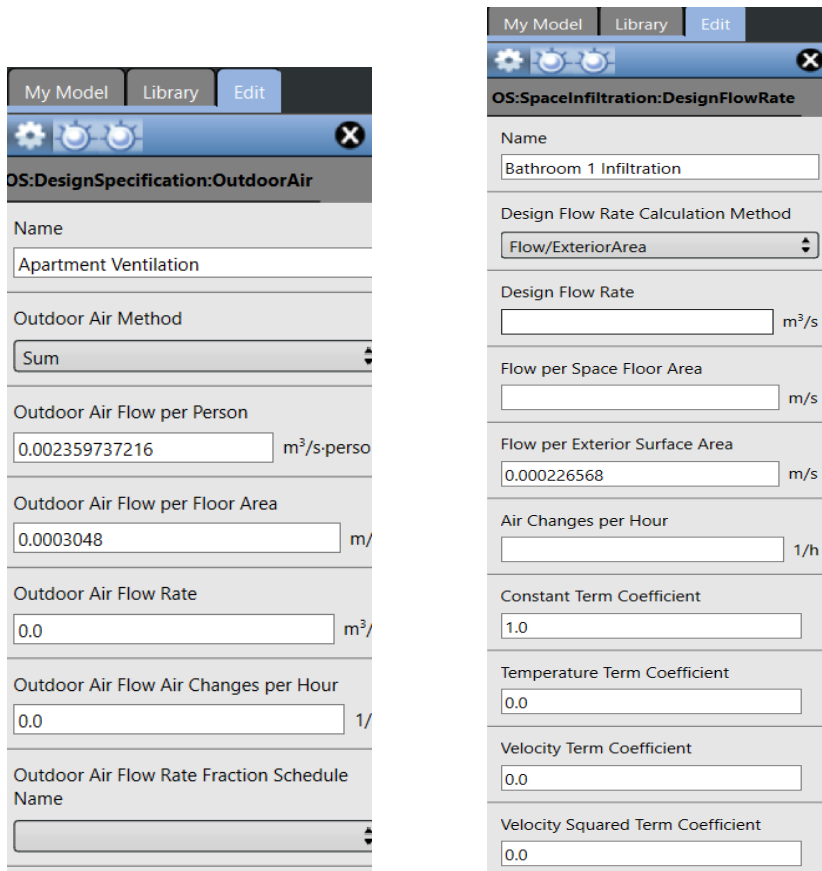
Ηλεκτρική συσκευή	Design Level [W]
Σεσουάρ μαλλιών	1800
Φορτιστές laptop	80
Φορτιστές κινητών τηλεφώνων	20
Καφετιέρα	500
Πλυντήριο πιάτων	1200
Fryer	2323
Φούρνος μικροκυμάτων	1000
Ψυγειοκαταψύκτης	150
Rice cooker	153
Τηλεόραση καθιστικού	250
Τηλεόραση Υ/Δ	150
Πλυντήριο ρούχων	2000

### 5.2.5 Καρτέλα Χώρων – Space Types Tab

Στην καρτέλα αυτή γίνεται ταξινόμηση των σετ των επιμέρους κατηγοριών, που έχουν δημιουργηθεί στις προηγούμενες καρτέλες, ανά τύπο χώρου. Έτσι, κάθε schedule, construction set, load set αντιστοιχίζεται από το χρήστη κατάλληλα σε κάθε χώρο. Στη στήλη Default Construction Set εισάγεται το House Construction Set, το οποίο παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα. Το ίδιο συμβαίνει και στη στήλη Default Schedule Set, όπου το κάθε schedule set που δημιουργήθηκε αντιστοιχίζεται στο χώρο τον οποίο χαρακτηρίζει. Η απαραίτητη ανανέωση του αέρα Design Specification Outdoor Air επιλέγεται έτοιμη από τη βιβλιοθήκη του λογισμικού και φαίνεται στην *Εικόνα 93*. Λαμβάνει την ονομασία Apartment Ventilation και είναι κοινή για όλους τους χώρους. Για τη διείσδυση αέρα σε κάθε χώρο, δηλαδή τη στήλη Space Infiltration Design Flow Rates πάρθηκαν τιμές ομοίως από τη βιβλιοθήκη του OpenStudio – *Εικόνα 93*. Είναι κοινή για όλους τους χώρους, απλώς λαμβάνει ονομασία που αντιστοιχεί σε κάθε χώρο.



Εικόνα 92: Καρτέλα Space Types.



**Εικόνα 93: Στήλες Design Specification Outdoor Air και Space Infiltration Design Flow Rate.**

Στην καρτέλα Loads εισάγονται όλα τα φορτία και τα χρονοπρογράμματα που έχουν κατασκευαστεί για κάθε χώρο. Στη στήλη Multiplier συμπληρώνεται κατάλληλα το πλήθος ατόμων, φωτιστικών σωμάτων και ηλεκτρικών συσκευών που υπάρχουν, ώστε να μην τοποθετούνται αυτούσια πολλαπλές φορές. Ενδεικτικά παρατίθενται τα παρακάτω.



File Preferences Components & Measures Help

Space Types

Drop Space Type

General Loads Measure Tags Custom

Filter: Load Type  
Show all loads

Space Type Name	All	Load Name	Multiplier	Definition	Schedule	Activity Schedule (People Only)
Bathroom 1 Space type	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> People 1 <input type="checkbox"/> Lights 1 <input type="checkbox"/> Electric Equipment 2 <input type="checkbox"/> Bathroom 1 Infiltration	<input type="text" value="1.000000"/> <input type="text" value="2.000000"/> <input type="text" value="1.000000"/>	Bathroom 1 Occupancy definition Bathroom 1 Lights Definition T8 LE Bathroom 1 hair dryer	<input type="text" value="Bathroom 1 Occupancy"/> <input type="text" value="Bathroom 1 Lighting"/> <input type="text" value="Bathroom 1 Hair Dryer"/> <input type="text" value="Bathroom 1 Infiltration"/>	<input type="text" value="Bathroom 1 Activity"/>
Bathroom 2 Space type	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> People 2 <input type="checkbox"/> Lights 2 <input type="checkbox"/> Electric Equipment 3 <input type="checkbox"/> Bathroom 2 Infiltration	<input type="text" value="1.000000"/> <input type="text" value="1.000000"/> <input type="text" value="1.000000"/>	Bathroom 2 Occupancy definition Bathroom 2 Lights Definition T8 LE Bathroom 2 hair dryer	<input type="text" value="Bathroom 2 Occupancy"/> <input type="text" value="Bathroom 2 Lighting"/> <input type="text" value="Bathroom 2 Hair Dryer"/> <input type="text" value="Bathroom 2 Infiltration"/>	<input type="text" value="Bathroom 2 Activity"/>

File Preferences Components & Measures Help

Space Types

Kids Bedroom 1 Infiltration

Kids Bedroom 2 Space type	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> People 5 <input type="checkbox"/> Lights 5 <input type="checkbox"/> Electric Equipment 1 <input type="checkbox"/> Electric Equipment 7 <input type="checkbox"/> Kids Bedroom 2 Infiltration	<input type="text" value="1.000000"/> <input type="text" value="2.000000"/> <input type="text" value="1.000000"/> <input type="text" value="1.000000"/>	Kids Bedroom 2 occupancy Definit Kids Bedroom 2 Lights Definition T Kids Bedroom 2 battery charger Kids Bedroom 2 cell phone charge	<input type="text" value="Kids Bedroom 2 Occupanc"/> <input type="text" value="Kids Bedroom 2 Lighting"/> <input type="text" value="Kids Bedroom 2 battery ch"/> <input type="text" value="Kids Bedroom 2 cell phone"/> <input type="text" value="Kids Bedroom 2 Infiltration"/>	<input type="text" value="Kids Bedroom 2 Activity"/>
Kitchen Space type	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> People 6 <input type="checkbox"/> Lights 6 <input type="checkbox"/> Electric Equipment 9 <input type="checkbox"/> Electric Equipment 4 <input type="checkbox"/> Electric Equipment 11 <input type="checkbox"/> Electric Equipment 8 <input type="checkbox"/> Electric Equipment 10 <input type="checkbox"/> Electric Equipment <input type="checkbox"/> Kitchen Infiltration	<input type="text" value="2.000000"/> <input type="text" value="2.000000"/> <input type="text" value="1.000000"/> <input type="text" value="1.000000"/> <input type="text" value="1.000000"/> <input type="text" value="1.000000"/> <input type="text" value="1.000000"/>	Kitchen Occupancy definition Kitchen Lights Definition T8 LED Kitchen fryer Kitchen coffee maker Kitchen Microwave Kitchen dishwasher Kitchen Refrigerator Kitchen rice cooker	<input type="text" value="Kitchen Occupancy"/> <input type="text" value="Kitchen Lighting"/> <input type="text" value="Kitchen fryer"/> <input type="text" value="Kitchen coffee machine"/> <input type="text" value="Kitchen Microwave"/> <input type="text" value="Kitchen Dishwasher"/> <input type="text" value="Kitchen Refrigerator"/> <input type="text" value="Kitchen rice cooker"/> <input type="text" value="Kitchen Infiltration"/>	<input type="text" value="Kitchen Activity"/>

Εικόνα 94: Καρτέλα Space Types – Loads.

### 5.2.6 Καρτέλα Spaces

Η ορθή συμπλήρωση της καρτέλας Space Types είναι χρήσιμη και αποτρέπει το χρήστη από επιπλέον κόπο και πιθανά λάθη στην επόμενη καρτέλα Spaces. Εφόσον όλα έχουν συμπληρωθεί σωστά ήδη από την καρτέλα Space Types, τότε θα περαστούν αυτόματα από το λογισμικό στην καρτέλα Spaces. Η καρτέλα Spaces περιλαμβάνει τους εννιά χώρους της οικίας μαζί με όλα τα στοιχεία που τους χαρακτηρίζουν. Περιλαμβάνει το σεντ κατασκευής (Default Construction Set) και τα δομικά στοιχεία, το σύνολο των χρονοπρογραμμάτων (Default Schedule Set), τη θερμική ζώνη, όλα τα φορτία (Loads), όλες τις επιφάνειες (Surfaces) δηλαδή τους τοίχους και τις υπό – επιφάνειες (Subsurfaces) δηλαδή τις πόρτες και τα παράθυρα.

The screenshot shows the 'Spaces' tab in a software application. It features a table with columns for Space Name, Story, Thermal Zone, Space Type, Default Construction Set, Default Schedule Set, and Part of Total Floor Area. The table lists various rooms like Bathroom 1, Bathroom 2, Corridor, Kids Bedroom 1, Kids Bedroom 2, Kitchen, Living Room & Dinette, Master Bedroom, and Utility. Each row has a checkbox in the 'Space Name' column and an 'Apply to Selected' button in the 'Part of Total Floor Area' column.

Space Name	Story	Thermal Zone	Space Type	Default Construction Set	Default Schedule Set	Part of Total Floor Area
Bathroom 1	Building Story 1	Thermal Zone 1	Bathroom 1 Space type	House Construction Set	Bathroom 1 Schedule Set	<input checked="" type="checkbox"/>
Bathroom 2	Building Story 1	Thermal Zone 1	Bathroom 2 Space type	House Construction Set	Bathroom 2 Schedule Set	<input checked="" type="checkbox"/>
Corridor	Building Story 1	Thermal Zone 1	Corridor Space type	House Construction Set	Corridor Schedule Set	<input checked="" type="checkbox"/>
Kids Bedroom 1	Building Story 1	Thermal Zone 1	Kids Bedroom 1 Space typ	House Construction Set	Kids Bedroom 1 Schedule	<input checked="" type="checkbox"/>
Kids Bedroom 2	Building Story 1	Thermal Zone 1	Kids Bedroom 2 Space typ	House Construction Set	Kids Bedroom 2 Schedule	<input checked="" type="checkbox"/>
Kitchen	Building Story 1	Thermal Zone 1	Kitchen Space type	House Construction Set	Kitchen Schedule Set	<input checked="" type="checkbox"/>
Living Room & Dinette	Building Story 1	Thermal Zone 1	Living room & dinette Spa	House Construction Set	Living room & Dinette Sch	<input checked="" type="checkbox"/>
Master Bedroom	Building Story 1	Thermal Zone 1	Master Bedroom Space tyr	House Construction Set	Master Bedroom Schedule	<input checked="" type="checkbox"/>
Utility	Building Story 1		Utility Space type	House Construction Set	Utility Schedule Set	<input checked="" type="checkbox"/>

Εικόνα 95: Καρτέλα Spaces.

### 5.2.7 Καρτέλα Θερμικής Ζώνης – Thermal Zones Tab

Η θερμική ζώνη της μονοκατοικίας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι μία ενιαία η οποία περιλαμβάνει όλους τους χώρους της οικίας εκτός από το χώρο Utility. Συνεπώς, οι οκτώ από τους εννέα χώρους της οικίας κλιματίζονται.

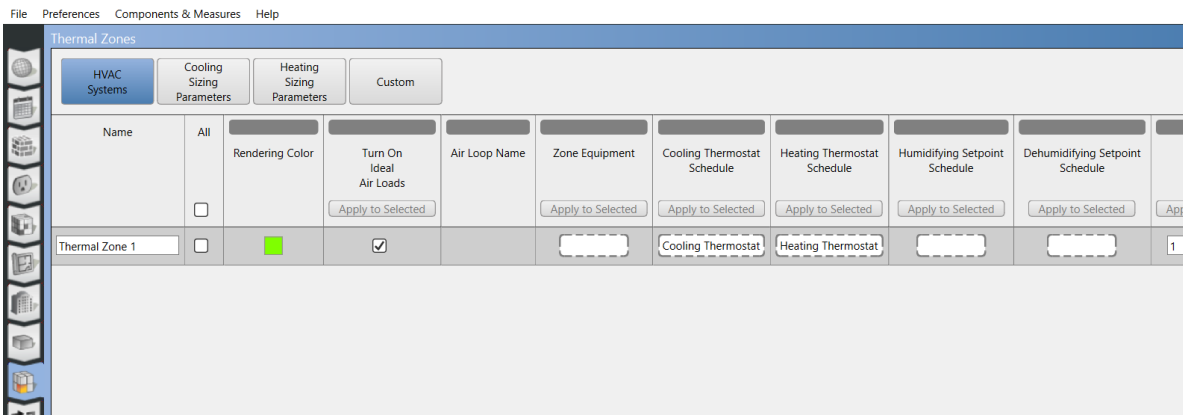
#### 5.2.7.1 Σενάριο με Ιδανικά Φορτία

Στην καρτέλα αυτή επιλέγεται η συνθήκη **Turn On Ideal Air Loads**, ενώ δεν επιλέγεται συσκευή κλιματισμού καθώς με αυτό τον τρόπο δεν χρειάζεται να υπολογιστεί η απαιτούμενη ενέργεια για την επίτευξή του. Με αυτή την επιλογή το λογισμικό παρέχει ένα ιδανικό HVAC σύστημα, το οποίο δε συνδέεται με κάποιο κεντρικό σύστημα αερισμού, αλλά παρέχει αέρα θέρμανσης ή ψύξης, ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες των χώρων της οικίας. Σε αυτό το σημείο δημιουργούνται δύο νέα χρονοπρογράμματα (Schedules), τα Cooling

Thermostat και Heating Thermostat, τα οποία είναι κατηγορίας Temperature. Ο θερμοστάτης θέρμανσης ορίζεται στους 20°C, ενώ ο θερμοστάτης ψύξης ορίζεται στους 26 °C. Οι τιμές αυτές λαμβάνονται από την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.

Χρήσεις κτηρίων ή θερμικών ζωνών	Θερμοκρασία [°C]		Σχετική υγρασία [%]	
	Χειμερινή περίοδος	Θερινή περίοδος	Χειμερινή περίοδος	Θερινή περίοδος
Μονοκατοικία, πολυκατοικία (περισσότερα του ενός διαμερίσματα)	20	26	40	45

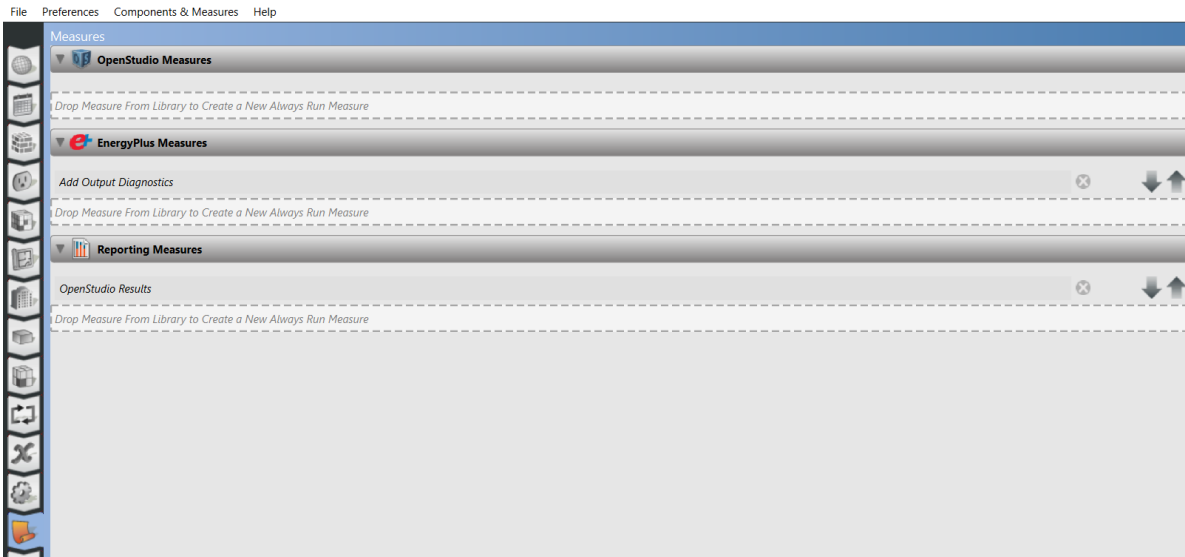
**Εικόνα 96: Ορισμός θερμοστάτη θέρμανσης και ψύξης από Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.**



**Εικόνα 97: Καρτέλα Thermal Zones – Ιδανικά φορτία.**

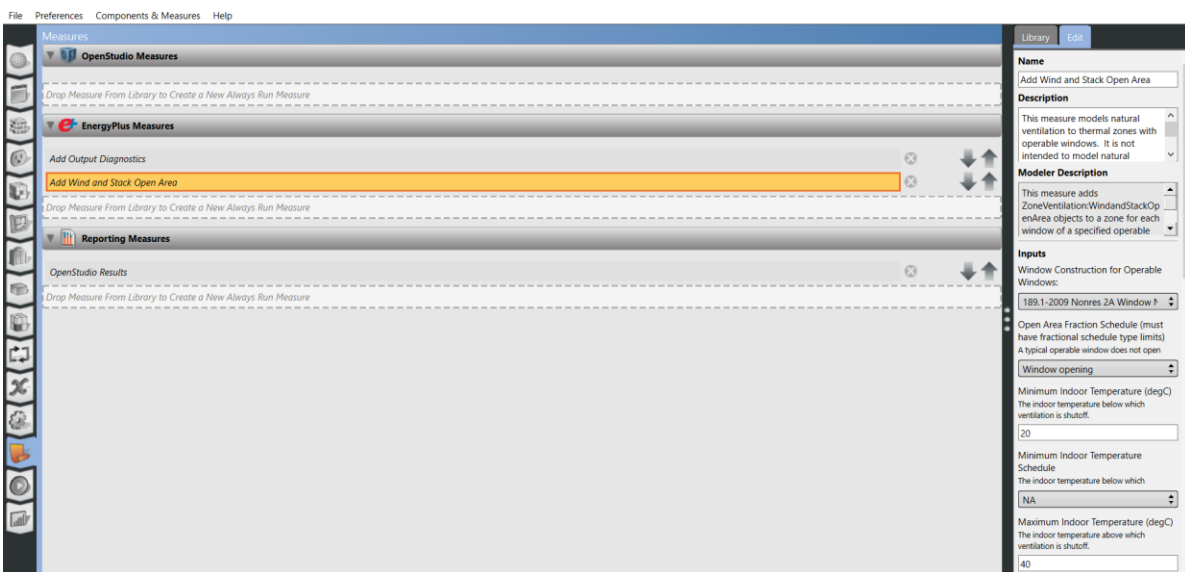
### 5.2.8 Καρτέλα Measures

Τα Measures είναι κάτι σαν τις μακροεντολές στο Excel. Είναι σαν ένα σετ προγραμματιστικών οδηγιών/εντολών. Το Reporting Measure «OpenStudio Results» είναι σχεδόν πάντα απαραίτητο σε προσομοιώσεις. Δίνει περισσότερα και αναλυτικότερα αποτελέσματα σχετικά με την προσομοίωση. Το EnergyPlus Measure «Add Output Diagnostics» δίνει τη δυνατότητα στο λογισμικό να προβάλλει, μαζί με τα αποτελέσματα, πιθανά σημεία προς βελτίωση (warnings).



**Εικόνα 98: Καρτέλα Measures.**

Ως Measure προστίθεται και το Envelope → Fenestration → Add Wind And Stack Open Area, το οποίο είναι υπό-πρόγραμμα για τον αερισμό των χώρων. Ο αερισμός επιτυγχάνεται όπως ορίζει ο χρήστης, εν προκειμένω με το άνοιγμα των παραθύρων τις ώρες που ορίζει το τύπου fractional χρονοπρόγραμμα που δημιουργήθηκε. Επιπλέον, ορίζονται ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία εσωτερικά της οικίας στους 20°C και 40 °C αντίστοιχα, ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία στο εξωτερικό περιβάλλον 1°C και 50 °C αντίστοιχα, η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά εσωτερικά και εξωτερικά (περιβάλλον) της οικίας ίση με 0.5 °C, ενώ η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου ορίζεται ίση με την προεπιλεγμένη τιμή 5.4 m/s.



**Εικόνα 99: Εφαρμογή του Measure «Add Wind and Stack Open Area».**

Maximum Indoor-Outdoor Temperature Difference (degC)  
This is the temperature difference between the

Maximum Indoor-Outdoor Temperature Difference Schedule  
This is the temperature difference between the

Minimum Outdoor Temperature (degC)  
The outdoor temperature below which

Minimum Outdoor Temperature Schedule  
The outdoor temperature below which

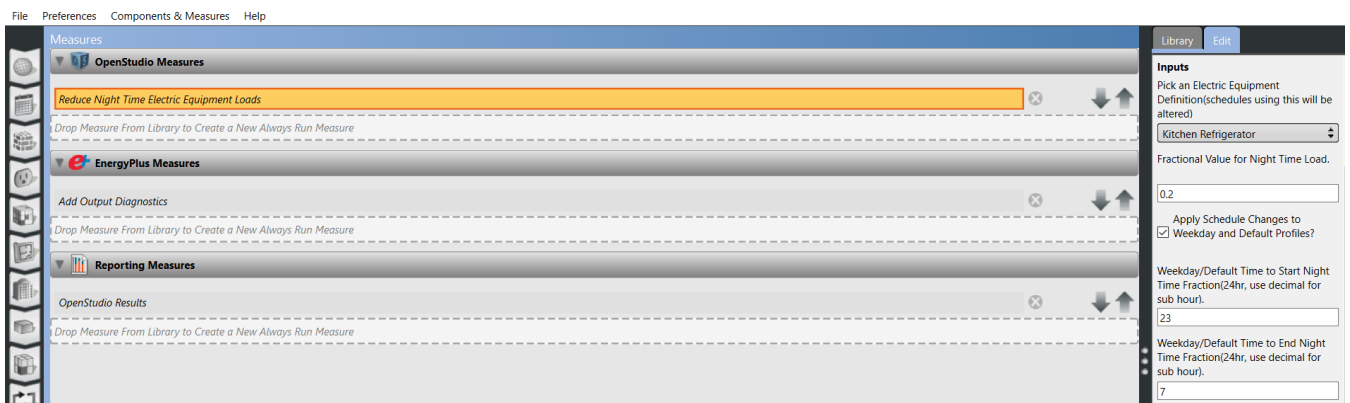
Maximum Outdoor Temperature (degC)  
The outdoor temperature above which

Maximum Outdoor Temperature Schedule  
The outdoor temperature above which

Maximum Wind Speed (m/s)  
This is the wind speed above which ventilation is shut off. The default values assume windows

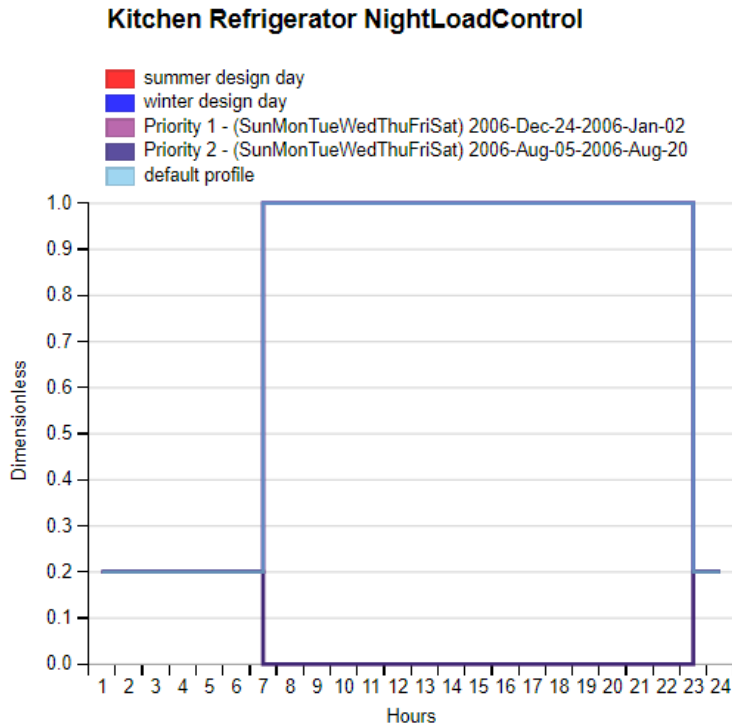
Εικόνα 100: Εφαρμογή του Measure «Add Wind and Stack Open Area».

Τέλος, για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας επιλέγεται η εφαρμογή του Measure «**Reduce Night Time Electric Equipment Loads**». Με αυτή την εντολή ρυθμίζεται από το χρήστη μειωμένη κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20% κατά τις βραδινές ώρες (23 μ.μ. – 7 π.μ.) για τη συσκευή του ψυγείου. Αυτό εφαρμόζεται καθώς τις βραδινές ώρες που τα άτομα δεν ανοίγουν το ψυγείο, οι θερμικές απώλειες είναι ελάχιστες, με αποτέλεσμα να χρειάζεται πολύ λιγότερη ενέργεια για τη διατήρηση της επιθυμητής θερμοκρασίας στο εσωτερικό, σε σχέση με τις ώρες αιχμής – άνοιγμα του ψυγείου για προϊόντα προς προετοιμασία γευμάτων.



Εικόνα 101: Εφαρμογή του Measure «Reduce Night Time Electric Equipment Loads».

Στην *Εικόνα 102* φαίνεται το χρονοπρόγραμμα για τη συσκευή του ψυγείου που προέκυψε από την επιβολή του Measure για τη μείωση των καταναλώσεων των ηλεκτρικών συσκευών κατά τις νυχτερινές ώρες.



**Εικόνα 102:** Το τροποποιημένο χρονοπρόγραμμα, Schedule, που προκύπτει μετά την εφαρμογή του Measure «Reduce Night Time Electric Equipment Loads».

### 5.3 Σενάριο με ΦΒ και Αντλία Θερμότητας – Αθήνα

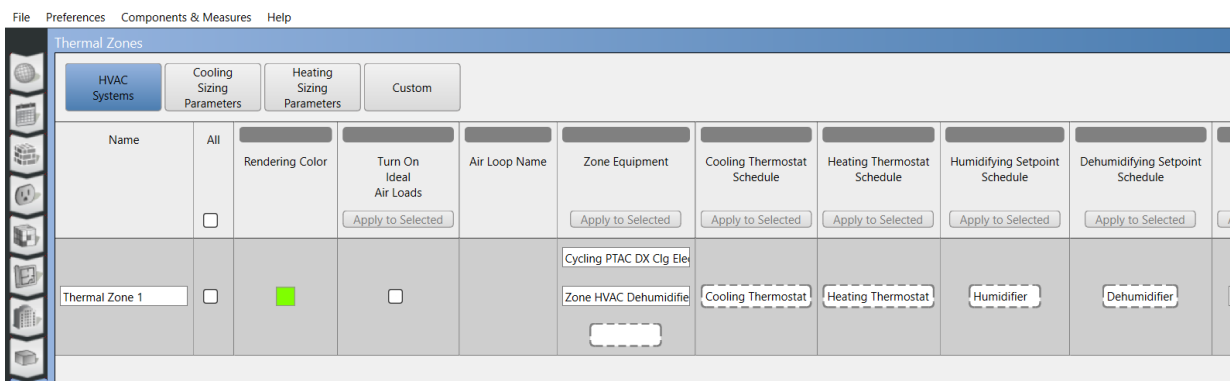
Η αλλαγή, σε σχέση με το σενάριο των ιδανικών φορτίων της ενότητας 5.2.7.1, αφορά στην προσθήκη αντλίας θερμότητας στη θερμική ζώνη για τον κλιματισμό της οικίας.

Η αντλία θερμότητας που επιλέγεται είναι το στοιχείο **Cycling PTAC DX Clg Electric Htg**, το οποίο υπάρχει έτοιμο στις βιβλιοθήκες του OpenStudio και χρησιμοποιείται καθώς το λογισμικό δεν παρέχει έτοιμο στοιχείο αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα. Είναι ένα κλιματιστικό τύπου split, το οποίο τροφοδοτείται με ηλεκτρικό ρεύμα για να κλιματίσει τους χώρους της οικίας. Το στοιχείο Cycling PTAC DX Clg Electric Htg έχει την ίδια αρχή λειτουργίας με μια αντλία θερμότητας αέρα-αέρα, με μόνη διαφορά ότι όλα του τα μηχανολογικά εξαρτήματα βρίσκονται στο ίδιο μέρος/πλαίσιο και τοποθετείται σε άνοιγμα του τοίχου. Αναφέρεται επίσης ότι το στοιχείο PTAC (Packaged Terminal Air Conditioner) έχει τη δυνατότητα να ανοιγοκλείνει τους ανεμιστήρες του, δεν χαρακτηρίζεται, δηλαδή, ως συνεχούς ροής. Προφανώς το στοιχείο εισάγεται στην καρτέλα της θερμικής ζώνης του κτηρίου. Σύμφωνα με την τεχνική οδηγία (TOTEE), ο συντελεστής συμπεριφοράς του στοιχείου ορίζεται ίσος με COP=3.2. Επίσης, ορίζεται η ονομαστική ισχύς σε θέρμανση ίση με 4225.6 W και η ονομαστική ισχύς σε ψύξη ίση με 4863.65 W, στοιχεία τα οποία υπολογίζονται από το λογισμικό κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και παρατίθενται στην *Εικόνα 103*.

	Heating/Cooling	Calculated Design Load	Design Load With Sizing Factor
THERMAL ZONE 1	Cooling	4229.26 (W)	4863.65 (W)
THERMAL ZONE 1	Heating	3380.48 (W)	4225.6 (W)

**Εικόνα 103: Φορτία σχεδιασμού αντλίας θερμότητας για ψύξη και θέρμανση.**

Τέλος, τοποθετείται αφυγραντήρας ώστε να επιτυγχάνεται η θερμική άνεση των χώρων της οικίας. Για το σκοπό αυτό δημιουργούνται δύο χρονοπρογράμματα τύπου percent για τα όρια της υγρασίας. Αυτό της αφύγρανσης - defumidifier ορίζεται στο 45%, ενώ εκείνο της ύγρανσης - humidifier ορίζεται στο 40%.



Εικόνα 104: Εισαγωγή Αντλίας Θερμότητας και αφυγραντήρα στη θερμική ζώνη της οικίας.

OS:Coil:Heating:Electric	OS:Coil:Cooling:DX:SingleSpeed
Name	Name
Cycling PTAC Elec Htg Coil	Cycling Elec PTAC 1 Spd DX Clg Coil
Availability Schedule Name	Rated Total Cooling Capacity
Always On Discrete hvac_library	<input checked="" type="radio"/> Hard Sized 4863.65 <input type="radio"/> Autosized Autosize
Efficiency	Rated Sensible Heat Ratio
1.0	<input type="radio"/> Hard Sized <input checked="" type="radio"/> Autosized Autosize
Nominal Capacity	Rated COP
<input checked="" type="radio"/> Hard Sized 4225.6 <input type="radio"/> Autosized Autosize	3.2

Εικόνα 105: Ορισμός ονομαστικής ισχύος της αντλίας θερμότητας σε θέρμανση και ψύξη και ορισμός του συντελεστή συμπεριφοράς.

Η εισαγωγή των Φωτοβολταϊκών πραγματοποιείται από την καρτέλα Measures και συγκεκριμένα πρόκειται για το OpenStudio Measure «**Add Rooftop PV**». Η εντολή αυτή έχει τρεις εισόδους: το λόγο της επιφάνειας των Φ/Β προς την επιφάνεια της ταράτσας, το βαθμό απόδοσης των Φ/Β και το βαθμό απόδοσης του Inverter. Ο στόχος είναι να τοποθετηθούν τόσα Φ/Β ώστε η μονοκατοικία να έχει ακόμα και μηδενικό κόστος σε ηλεκτρισμό, τα Φ/Β να καλύπτουν δηλαδή εξ ολοκλήρου τις ανάγκες της οικίας σε ηλεκτρισμό. Τα Φ/Β θα τοποθετηθούν με νότιο προσανατολισμό και με κλίση  $\beta=28^\circ$ , όπως προκύπτει από τον Πίνακα 15, για το γεωγραφικό πλάτος της Αθήνας το οποίο είναι ίσο με  $37.9^\circ$  ( $\phi=38^\circ$ ).



**Πίνακας 15: Βέλτιστη κλίση Φ/Β για κάθε γεωγραφικό πλάτος από Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.**

Γεωγραφικό πλάτος περιοχής (φ) σε (°)	Θερινή περίοδος	Ετήσια περίοδος	Χειμερινή περίοδος
$\varphi = 35,0^\circ$	7	25	44
$\varphi = 36,0^\circ$	8	26	45
$\varphi = 37,0^\circ$	9	27	46
$\varphi = 38,0^\circ$	10	28	47
$\varphi = 39,0^\circ$	11	29	48

Επιλέγεται το μοντέλο της SANYO, HIT photovoltaic module H250. Η φωτοβολταϊκή κυψέλη HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer – Ετεροεπαφή με εσωτερικό λεπτό στρώμα) αποτελείται από ένα λεπτό δισκίο (wafer) μονοκρυσταλλικού πυριτίου, το οποίο περικλείεται από πολύ λεπτά στρώματα αμόρφου πυριτίου. Το προϊόν αυτό επιτυγχάνει την υψηλότερη απόδοση στη φωτοβολταϊκή βιομηχανία χρησιμοποιώντας κατασκευαστικές τεχνολογίες αιχμής. Οι διαστάσεις του module είναι  $a \times b \times c = 1.610 \times 0.861 \times 0.035 \text{ m}^3$  και η επιφάνειά του είναι ίση με  $1.386 \text{ m}^2$ . Οι ηλεκτρικές ιδιότητες και οι χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης-ρεύματος του μοντέλου φαίνονται παρακάτω για λόγους πληρότητας, ωστόσο πρακτικά χρησιμοποιούνται μόνο οι διαστάσεις του module, ενδεικτικά, για την τοποθέτηση στην ταράτσα.

Ηλεκτρικά στοιχεία (σε STC)		
	VBHH250AE01	VBHH245AE01
Μέγιστη ισχύς (Pmax) [W]	250	245
Τάση μέγιστης ισχύος (Vmpr) [V]	34.9	34.4
Ρεύμα μέγιστης ισχύος (Impr) [A]	7.18	7.14
Τάση ανοιχτού κυκλώματος (Voc) [V]	43.1	42.7
Ρεύμα βραχυκύκλωσης (Isc) [A]	7.74	7.73
Μέγιστο ονομαστικό ρεύμα υπερτάσης [A]	15	
Ανοχή ισχύος [%]	+10/-5*	
Μέγιστη τάση σταθμότητας [V]	1000	

Σημείωση: Τυπικές συνθήκες δοκιμής(STC): Ατμοσφαιρική μάζα 1.5, Ακτινοβολία = 1000 W/m<sup>2</sup>, Θερμοκρασία κυψέλης = 25°C  
\*Όλα τα πλαίσια που μετρήθηκαν στις εγκαταστάσεις της SANVO έχουν θετική ανοχή ισχύος

Χαρακτηριστικά θερμοκρασίας		
Θερμοκρασία (NOCT) [°C]	46.0	46.0
Συντελεστής θερμοκρασίας της [%/°C]	-0.30	-0.30
Συντελεστής θερμοκρασίας της [V/°C]	-0.108	-0.107
Συντελεστής θερμοκρασίας του Isc [mA/°C]	2.32	2.32

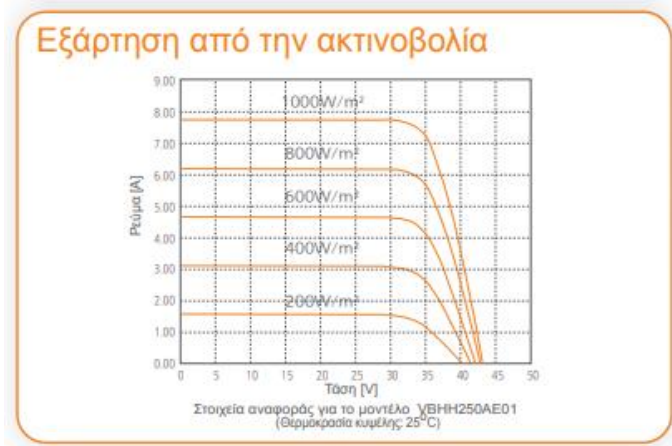
**Σε NOCT**

Μέγιστη ισχύς (Pmax) [W]	188.9	185.4
Τάση μέγιστης ισχύος (Vmpr) [V]	32.8	32.4
Ρεύμα μέγιστης ισχύος (Impr) [A]	5.76	5.73
Τάση ανοιχτού κυκλώματος (Voc) [V]	40.5	40.1
Ρεύμα βραχυκύκλωσης (Isc) [A]	6.23	6.23

Σημείωση: Ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας κυψέλης: Ατμοσφαιρική μάζα 1.5 spectral, Ακτινοβολία = 800 W/m<sup>2</sup>, Θερμοκρασία αέρα = 20°C, ταχύτητα ανέμου 1 m/sec.

Συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας		
Μέγιστη ισχύς (Pmax) [W]	48.8	47.7
Τάση μέγιστης ισχύος (Vmpr) [V]	34.1	33.6
Ρεύμα μέγιστης ισχύος (Impr) [A]	1.43	1.43
Τάση ανοιχτού κυκλώματος (Voc) [V]	40.1	39.7
Ρεύμα βραχυκύκλωσης (Isc) [A]	1.55	1.55

Σημείωση: Συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας: Ατμοσφαιρική μάζα 1.5, Ακτινοβολία = 200 W/m<sup>2</sup>, Θερμοκρασία κυψέλης = 25°C



Εικόνα 106: Ηλεκτρικές ιδιότητες και χαρακτηριστικές τάσης – ρεύματος του module.

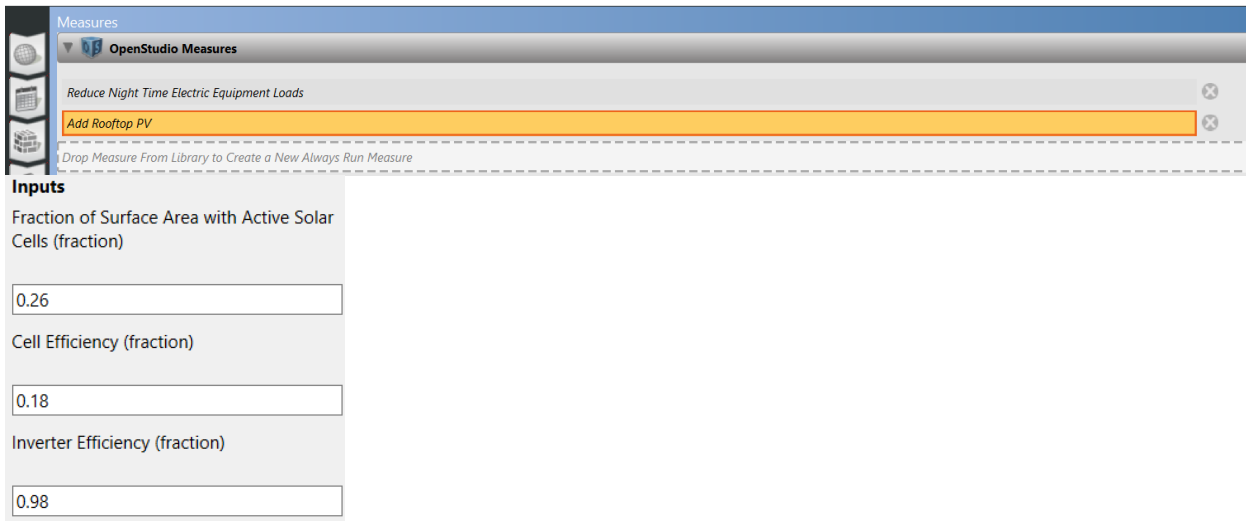
Σε πρώτη φάση θα προσδιορισθεί ο λόγος της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών προς τη επιφάνεια της ταράτσας. Για την επίβλεψη – συντήρηση Φ/Β πάνελ που θα τοποθετηθούν, υπολογίζεται μείωση μήκους και πλάτους της ταράτσας κατά 1 m, ώστε να υπάρχει διάδρομος πλάτους 0,5 m περιμετρικά της οροφής για τις απαραίτητες εργασίες. Έτσι, οι διαστάσεις της οροφής μετατρέπονται σε  $14 \times 9 \text{ m}^2$ . Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε σειρά φωτοβολταϊκών μπορούν να τοποθετηθούν  $\frac{14}{0.861} = 16$  panels. Έπειτα από δοκιμές σε περιβάλλον OpenStudio για την πρώτη είσοδο (για βαθμό απόδοσης Φ/Β = 0.18), δηλαδή τον λόγο των Φ/Β προς την επιφάνεια της ταράτσας, προκύπτει ότι μια καλή προσέγγιση για εξ ολοκλήρου κάλυψη των αναγκών της οικίας σε ηλεκτρισμό από τα Φ/Β είναι για λόγο  $\frac{\text{επιφάνεια } \Phi/B}{\text{επιφάνεια ταράτσας}} = 0.26$ , δηλαδή για επιφάνεια εγκατεστημένων Φ/Β ίση με  $39 \text{ m}^2$ . Επομένως, θα πρέπει να τοποθετηθούν  $\frac{39}{1.386} \cong 28$  panels. Αυτό μπορεί να γίνει με την τοποθέτηση δύο σειρών Φ/Β, καθεμία από τις οποίες θα αποτελείται από 14 πάνελ. Μάλιστα η τοποθέτηση των δύο σειρών θα πρέπει να γίνει με μεγάλη απόσταση ανάμεσά τους (στις ακραίες θέσεις της ταράτσας) έτσι ώστε να αποφεύγεται η σκίαση της μιας σειράς από την άλλη.

Επιπλέον, η δεύτερη είσοδος που αφορά στον βαθμό απόδοσης του Φ/Β συστήματος, ο οποίος ορίστηκε ίσος με 0.18, προέκυψε από την επιλογή του συγκεκριμένου μοντέλου Φ/Β όπως φαίνεται στην Εικόνα 107.

Τέλος, ο βαθμός απόδοσης του inverter, δηλαδή η τρίτη είσοδος ορίζεται ίσος με 0.98.

Μοντέλο	Απόδοση κυψέλης	Απόδοση πλαισίου	Ισχύς/μ <sup>2</sup>
H250	20.8%	18.0%	180 W/μ <sup>2</sup>
H245	20.4%	17.7%	177 W/μ <sup>2</sup>

**Εικόνα 107: Βαθμός απόδοσης Φ/Β πλαισίου.**

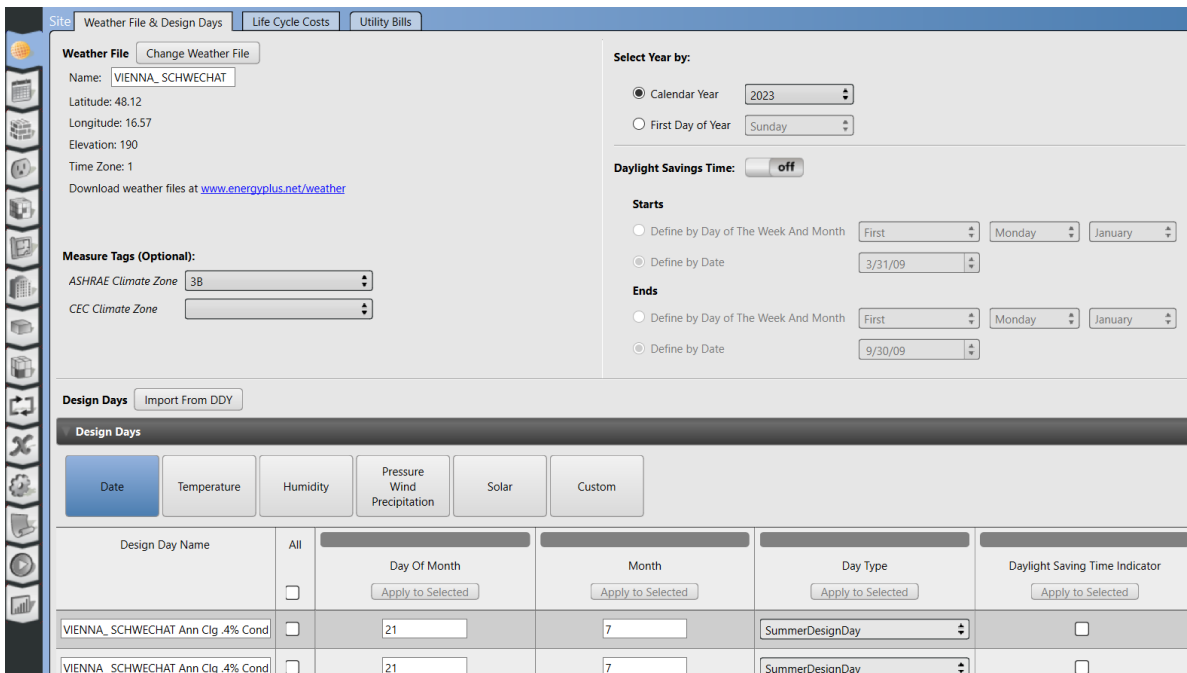


**Εικόνα 108: Εισαγωγή Φ/Β με την εντολή Add Rooftop PV OpenStudio Measure και οι τρεις είσοδοί της.**

Ο συγκεκριμένος υπολογισμός αποτελεί μία καλή προσέγγιση προς το μηδενικό κόστος της οικίας σε ηλεκτρισμό. Η υπολειπόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη διάρκεια ενός έτους ανέρχεται σε 97 kWh, τιμή σχεδόν αμελητέα σε σύγκριση με τις συνολικές ετήσιες ανάγκες της οικίας σε ηλεκτρισμό.

## 5.4 Σενάριο με Φ/Β και Αντλία Θερμότητας – Βιέννη

Σε αυτό το σενάριο μελετάται η ίδια μονοκατοικία στην Αυστρία, η οποία βρίσκεται στην κεντρική Ευρώπη και συγκεκριμένα στην περιοχή της Βιέννης. Πραγματοποιούνται προσομοιώσεις σε περιβάλλον OpenStudio αλλάζοντας τα αρχεία των μετεωρολογικών δεδομένων. Γίνεται λήψη των μετεωρολογικών αρχείων .erw και .ddy από τις βιβλιοθήκες του EnergyPlus, τα οποία στη συνέχεια εισάγονται στην καρτέλα Site του OpenStudio, όπως είχε γίνει και για την περιοχή της Αθήνας.



**Εικόνα 109: Εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων στο OpenStudio για την περιοχή της Βιέννης.**

«Τρέχοντας» την προσομοίωση, αλλάζοντας μόνο τα καιρικά δεδομένα, προκύπτει ότι οι συνολικές ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της οικίας είναι πολύ μεγαλύτερες από ότι στην Αθήνα. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω: α) της χαμηλότερης ετήσιας μέσης θερμοκρασίας που επικρατεί στη Βιέννη, β) της ασθενέστερης ηλιακής ακτινοβολίας στην οποία εκτίθεται κατά τη διάρκεια του έτους (σε σχέση με την Αθήνα) και άλλων παραγόντων. Τα παραπάνω φαίνονται μέσω των αυξημένων αναγκών της οικίας σε θέρμανση, αλλά και της μειωμένης παραγόμενης ισχύος από τα φωτοβολταϊκά που είναι τοποθετημένα στην ταράτσα της οικίας και θα συζητηθούν στα αποτελέσματα της εργασίας.

Σε αυτή την περίπτωση επιχειρείται η πλήρης κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε θέρμανση, που είναι το μεγαλύτερο ποσοστό ετήσιων αναγκών της οικίας στη Βιέννη, από τα φωτοβολταϊκά. Για αυτό το σκοπό γίνονται διάφορες τροποποιήσεις. Η πρώτη τροποποίηση αφορά στα τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας θερμότητας, λόγω των διαφορετικών φορτίων που πρέπει να καλύψει σε ψύξη και θέρμανση. Η ονομαστική ισχύς της αντλίας σε θέρμανση ορίζεται ίση προς 7340.49 W και σε ψύξη 4063.29 W για αποτελεσματικότερη κάλυψη των αναγκών. Ο συντελεστής συμπεριφοράς, COP, ορίζεται ίσος με 4, συμβάλλοντας στην εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας. Η δεύτερη τροποποίηση αφορά στον θερμοστάτη της θέρμανσης (Heating Thermostat), ο οποίος ορίζεται στους 19°C, χωρίς να θυσιάζεται η θερμική άνεση των ατόμων που βρίσκονται εντός της οικίας, συμβάλλοντας στην περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας.

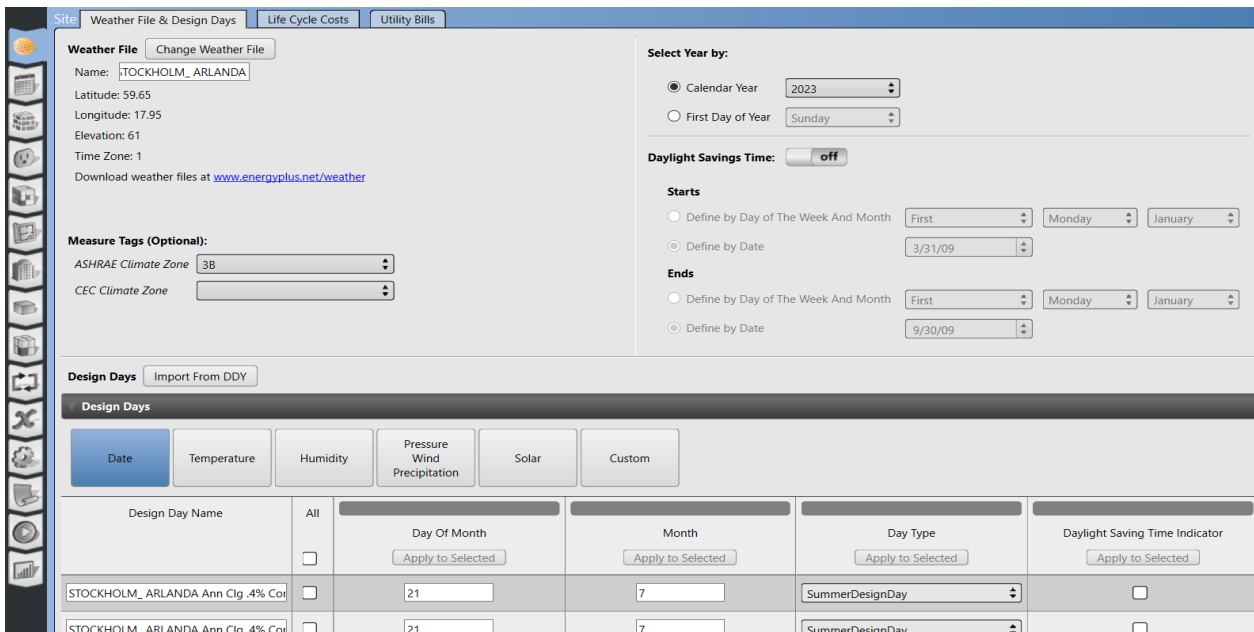
Όσον αφορά στα φωτοβολταϊκά, επιχειρείται αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος με τους παρακάτω τρόπους. Αρχικά, όπως έχει υπολογισθεί, σε κάθε σειρά χωρούν 16 panels, δηλαδή 32 panels συνολικά, αφού υπάρχουν δύο σειρές. Προστίθενται, λοιπόν, 4 panels συγκριτικά με την Αθήνα (28 panels – 2 σειρές των 14). Επομένως, στην οροφή της οικίας θα υπάρχουν δύο σειρές φωτοβολταϊκών, από 16 panels η καθεμία και 32 panels στο σύνολο. Κάθε panel έχει εμβαδό ίσο με  $1.386 \text{ m}^2$ , όπως παρουσιάστηκε ανωτέρω. Αυτό σημαίνει ότι η συνολική επιφάνεια των panels θα είναι ίση με  $44.36 \text{ m}^2$ . Επιπλέον, θα χρησιμοποιηθούν φωτοβολταϊκά panels νεότερης γενιάς με βαθμό απόδοσης 21%.

<b>Name</b>	Add Rooftop PV
<b>Description</b>	This measure will create new shading surface geometry above the roof for each thermal zone in your model where the surface azimuth falls within
<b>Modeler Description</b>	The fraction of surface containing PV will not only set the PV properties, but will also change the transmittance value for the shading
<b>Inputs</b>	
Fraction of Surface Area with Active Solar Cells (fraction)	0.296
Cell Efficiency (fraction)	0.21
Inverter Efficiency (fraction)	0.98

**Εικόνα 110: Τροποποίηση του Measure «Add Rooftop PV» για τη νέα επιφάνεια των Φ/Β και βαθμό απόδοσης 21%.**

## 5.5 Σενάριο με Φ/Β και Αντλία Θερμότητας – Στοκχόλμη

Σε αυτό το σενάριο μελετάται η ανέγερση της μονοκατοικίας στη Σουηδία, που βρίσκεται στη βόρεια Ευρώπη και συγκεκριμένα στην περιοχή της Στοκχόλμης. Όμοια, εισάγονται τα μετεωρολογικά αρχεία .erw και .ddy της περιοχής σε περιβάλλον OpenStudio, τα οποία λαμβάνονται από την βιβλιοθήκη του EnergyPlus.



**Εικόνα 111: Εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων στο OpenStudio για την περιοχή της Στοκχόλμης.**

Μετά το πέρας της προσομοίωσης, όπως αναμενόταν, παρουσιάζονται ακόμα μεγαλύτερες ενεργειακές ανάγκες (σε σχέση με την Αυστρία), το οποίο μεταφράζεται κυρίως σε αυξημένες ανάγκες σε θέρμανση.

Με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά και την αποτελεσματικότερη κάλυψη των αναγκών πραγματοποιούνται οι παρακάτω μετατροπές. Πρώτον, ο θερμοστάτης της θέρμανσης (Heating Thermostat) ορίζεται στους 18.3 °C, χωρίς να θυσιάζεται η θερμική άνεση εντός της οικίας. Δεύτερον, ορίζονται εκ νέου οι παράμετροι της αντλίας θερμότητας. Η ονομαστική ισχύς της αντλίας σε θέρμανση ορίζεται ίση προς 8524.45 W και σε ψύξη ίσης προς 3869.91 W, ενώ ο συντελεστής συμπεριφοράς COP ορίζεται ίσος με 4.5.

Όσον αφορά στα φωτοβολταϊκά, λόγω της μειωμένης παραγόμενης ισχύος τους, που προκύπτει από την ασθενέστερη ηλιακή ακτινοβολία, και των αυξημένων ενεργειακών αναγκών εξετάζεται το ενδεχόμενο εγκατάστασης και τρίτης σειράς Φ/Β panels. Το διαθέσιμο μήκος, μετά την αφαίρεση μισού μέτρου περιμετρικά της οροφής για εργασίες και συντήρηση, είναι 9 m. Υπολογίζονται τα εξής μεγέθη: α) το ύψος,  $H$ , των panels όταν τοποθετούνται υπό κλίση, β) η απόσταση μεταξύ διαδοχικών σειρών panels,  $\Delta x$ , με στόχο την αποφυγή σκίασης της μιας σειράς από την άλλη, γ) το οριζόντιο μήκος των panels,  $d$ , όταν τοποθετούνται υπό κλίση.

$$H = \sin\beta \cdot a \cong 0.75 \text{ m} \quad (16)$$

$$\Delta x = 6 \cdot H = 4.5 \text{ m} \quad (17)$$

$$d = \cos\beta \cdot a = 1.42 \text{ m} \quad (18)$$

Όπου:

- $\beta$  [°]: η κλίση των Φ/Β ίση με 28°
- $a$  [m]: το μήκος του panel ίσο με 1.61 m

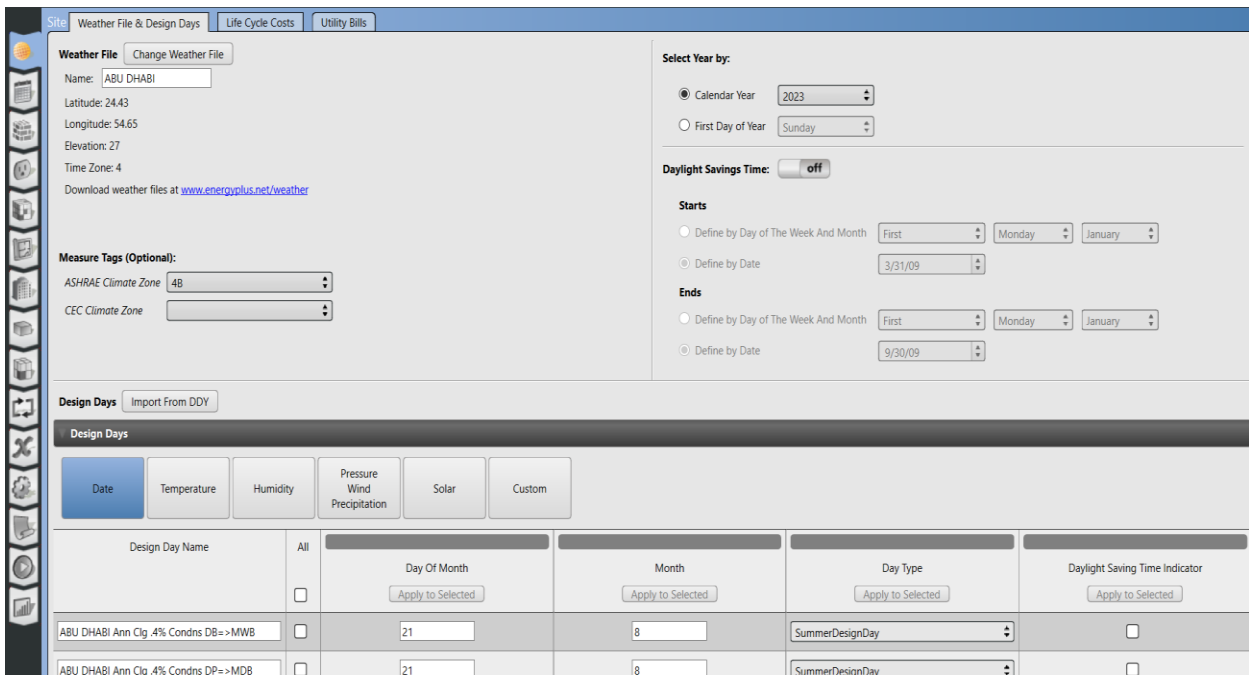
Συνεπώς, δε χωράει τρίτη σειρά panels. Και σε αυτό το σενάριο θα τοποθετηθούν συνολικά 32 panels σε δύο σειρές, νεότερης γενιάς με βαθμό απόδοσης 22%.

<b>Name</b>	Add Rooftop PV
<b>Description</b>	This measure will create new shading surface geometry above the roof for each thermal zone in your model where the surface azimuth falls within
<b>Modeler Description</b>	The fraction of surface containing PV will not only set the PV properties, but will also change the transmittance value for the shading
<b>Inputs</b>	Fraction of Surface Area with Active Solar Cells (fraction)
	0.296
	Cell Efficiency (fraction)
	0.22
	Inverter Efficiency (fraction)
	0.98

**Εικόνα 112:** Τροποποίηση του Measure «Add Rooftop PV» για τη νέα επιφάνεια των Φ/Β και βαθμό απόδοσης 22%.

## 5.6 Σενάριο με Φ/Β και Αντλία Θερμότητας – Abu Dhabi

Σαν τελευταίο σενάριο μελετάται η ίδια μονοκατοικία στο νότιο ημισφαίριο και συγκεκριμένα στο Abu Dhabi. Λαμβάνονται τα μετεωρολογικά δεδομένα από το EnergyPlus και εισάγονται, όπως στα προηγούμενα σενάρια, στην καρτέλα Site του OpenStudio.



**Εικόνα 113: Εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων στο OpenStudio για το Abu Dhabi.**

Επαναφέρεται η τιμή των 20°C για τον θερμοστάτη θέρμανσης (Heating Thermostat), όπως είχε οριστεί και για το σενάριο της Αθήνας. Οι παράμετροι της αντλίας θερμότητας ορίζονται εκ νέου με στόχο την αποτελεσματικότερη κάλυψη των αναγκών σε ψύξη, κυρίως, και θέρμανση. Η ονομαστική ισχύς της αντλίας σε ψύξη ορίζεται ίση προς 6080.72 W, ενώ αντίστοιχα για θέρμανση ορίζεται ίση προς 1925 W. Ο συντελεστής συμπεριφοράς, COP, ορίζεται ίσος με 3.2.

Για τα Φ/Β, λόγω των υψηλών αναγκών τοποθετείται ο μέγιστος αριθμός panels, δηλαδή 32 στο σύνολο σε 2 σειρές. Στόχος σε αυτό το σενάριο είναι η πλήρης κάλυψη των αναγκών της οικίας σε ηλεκτρισμό, αφού η ηλιακή ακτινοβολία σε αυτή την τοποθεσία είναι πολύ ισχυρή και αναμένεται κατά πολύ αυξημένη παραγωγή ισχύος από τα Φ/Β σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια. Η συνολική επιφάνεια των panels είναι και πάλι 44.36 m<sup>2</sup> και ο βαθμός απόδοσης ορίζεται ίσος με 20%.



<b>Name</b>
Add Rooftop PV
<b>Description</b>
This measure will create new shading surface geometry above the roof for each thermal zone in your model where the surface azimuth falls within
<b>Modeler Description</b>
The fraction of surface containing PV will not only set the PV properties, but will also change the transmittance value for the shading
<b>Inputs</b>
Fraction of Surface Area with Active Solar Cells (fraction)
0.2957
Cell Efficiency (fraction)
0.2
Inverter Efficiency (fraction)
0.98

**Εικόνα 114: Τροποποίηση του Measure «Add Rooftop PV».**

## 5.7 Σχεδιασμός - Βελτιστοποίηση Φ/Β μέσω PVGIS

Μέσω του λογισμικού PVGIS, το οποίο χρησιμοποιείται και από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά των Φ/Β στοιχείων και η ηλιακή ακτινοβολία για κάθε σενάριο – περιοχή μελέτης. Το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχει επίσης τη δυνατότητα για βελτιστοποίηση (optimization) της κλίσης των Φ/Β και του προσανατολισμού τους (αζιμούθιο). Για να ληφθούν αποτελέσματα για την παραγωγή ισχύος των Φ/Β, αλλά και την ακτινοβολία της εκάστοτε τοποθεσίας πρέπει πρώτα να συμπληρωθούν ορισμένοι είσοδοι. Αυτές είναι οι εξής:

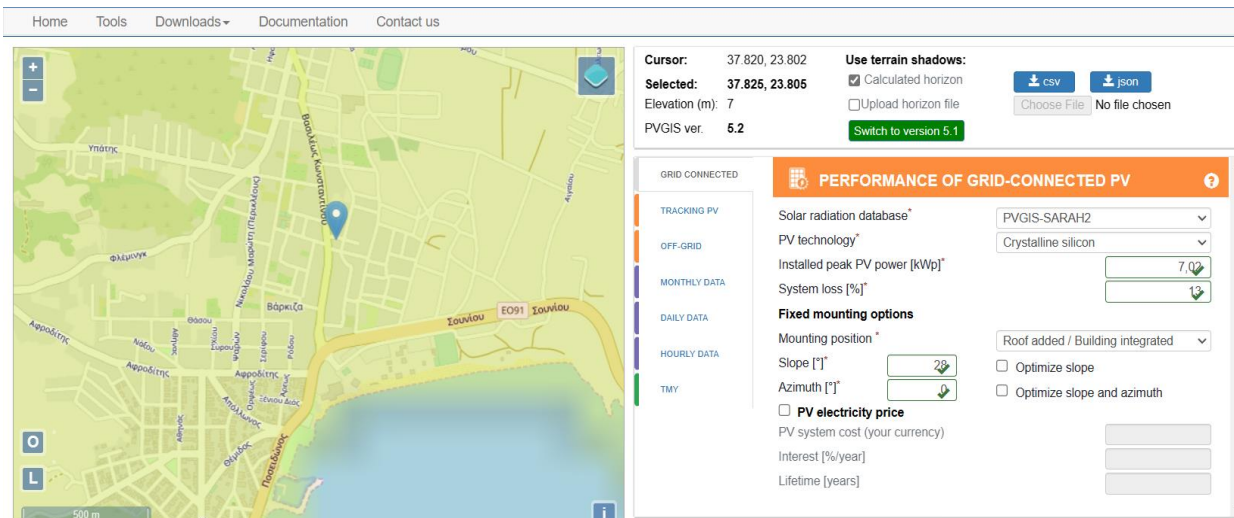
- Επιλογή τοποθεσίας με τον κέρσορα πάνω στο χάρτη.
- Η τεχνολογία των Φ/Β (PV Technology) που τοποθετούνται. Σε όλα τα σενάρια έχει επιλεγεί η τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου (C-Si).
- Απώλειες συστήματος (System Loss). Ορίσθηκαν ίσες με 13% για όλα τα σενάρια. Στις χαμηλές απώλειες συνέβαλε η χρήση inverter πολύ υψηλού βαθμού απόδοσης (98%).
- Σημείο τοποθέτησης (Mounting Position) των Φ/Β. Για όλα τα σενάρια προφανώς επιλέχθηκε η τοποθέτησή τους στην ταράτσα της μονοκατοικίας.
- Κλίση (Slope) και προσανατολισμός-αζιμούθιο (Azimuth)
- Μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς (Installed peak PV power), η οποία είναι συνάρτηση της επιφάνειας των Φ/Β και του βαθμού απόδοσης και υπολογίζεται για κάθε σενάριο σύμφωνα με τη Σχέση (19).

$$P_{pk} = A \cdot e_{ff,nom} \quad (19)$$

- Όπου A [m<sup>2</sup>] η συνολική επιφάνεια των Φ/Β και  $e_{ff,nom}$  [-] ο βαθμός απόδοσης των Φ/Β.

Παρουσιάζεται αναλυτικά η συμπλήρωση των εισόδων για την περιοχή της Αθήνας (Βάρκιζα). Η μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς για επιφάνεια Φ/Β ίση με 39 m<sup>2</sup> και βαθμό απόδοσης 18% υπολογίζεται μέσω της Σχέσης (19) ως  $P_{pk} = 39 \cdot 0.18 = 7.02 \text{ kWp}$ . Ορίζεται κλίση (slope) ίση με 28° όπως έχει ήδη αναφερθεί για ετήσια χρήση των Φ/Β και μηδενικό αζιμούθιο ( $\gamma=0$ ), αφού ο προσανατολισμός είναι νότιος. Με τον ίδιο τρόπο συμπληρώνονται οι εισοδοί και στα υπόλοιπα σενάρια για τα αντίστοιχα δεδομένα.

Κρίνεται απαραίτητη η επεξήγηση του όρου «αζιμούθιο». Ως αζιμούθιο επιφανείας ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση. Συνεπώς,  $\gamma=0^\circ$  στο νότο,  $\gamma=90^\circ$  στη δύση,  $\gamma=180^\circ$  στο βορρά και  $\gamma=-90^\circ$  στην ανατολή. Είναι  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ .



**Εικόνα 115: Συμπλήρωση εισόδων στο λογισμικό PVGIS για την περιοχή της Αθήνας (Βάρκιζα).**

Δίνεται η δυνατότητα, επίσης, για βελτιστοποίηση της εγκατάστασης των Φ/Β τόσο όσον αφορά στην κλίση τους όσο και στον προσανατολισμό τους (αζιμούθιο), κάνοντας κλικ στην επιλογή «Optimize slope and azimuth» της Εικόνας 115.

Σημειώνεται ότι τυχόν μικρές αποκλίσεις στα γεωγραφικά και κλιματικά δεδομένα προκύπτουν από το γεγονός ότι το λογισμικό PVGIS μελετά ακριβώς την περιοχή της οικίας, ενώ τα αντίστοιχα δεδομένα στο λογισμικό OpenStudio αφορούν στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και συγκεκριμένα στο Ελληνικό. Αντίστοιχες αποκλίσεις επικρατούν και στα υπόλοιπα σενάρια.

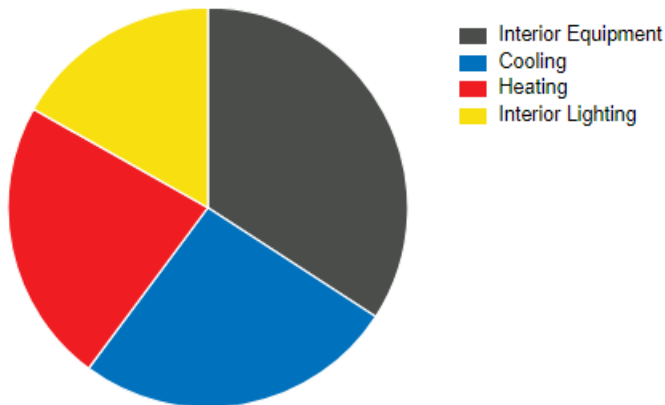
## 6. Αποτελέσματα

### 6.1 Σενάριο με Ιδανικά Φορτία

Data	Value
Building Name	Building 1
Total Site Energy	12,008 kWh
Total Building Area	146 m <sup>2</sup>
Total Site EUI	82.25 kWh/m <sup>2</sup>
OpenStudio Standards Building Type	n/a

**Εικόνα 116: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της οικίας.**

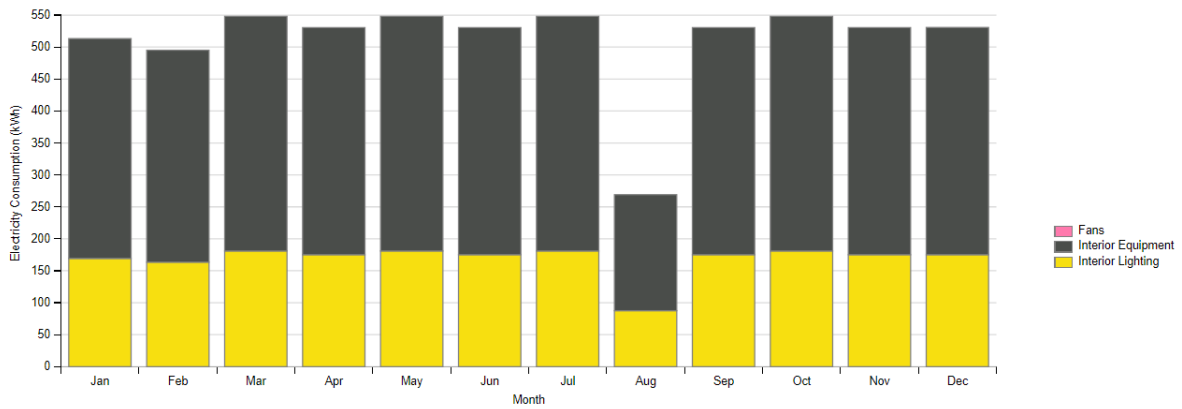
Στην *Εικόνα 116* παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη μονοκατοικία στην Αθήνα, για ιδανικό σύστημα κλιματισμού (Ideal Loads). Οι συνολικές ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της οικίας ανέρχονται σε 12008 kWh.



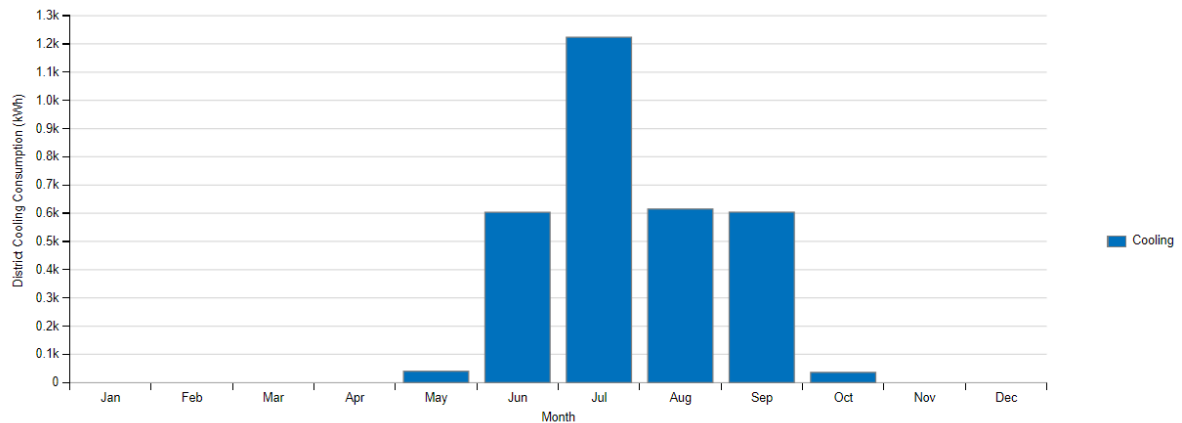
**Εικόνα 117: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της οικίας για κάθε κατηγορία.**

**Πίνακας 16: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες σε σχέση με τις συνολικές για κάθε κατηγορία.**

	Ετήσιες Ενεργειακές ανάγκες (kWh)	Ποσοστό επί των συνολικών αναγκών (%)
Interior equipment	4082.72	34
Cooling	3122.08	26
Heating	2761.84	23
Interior Lighting	2041.36	17
<b>Συνολικές ανάγκες</b>	<b>12008</b>	<b>100</b>

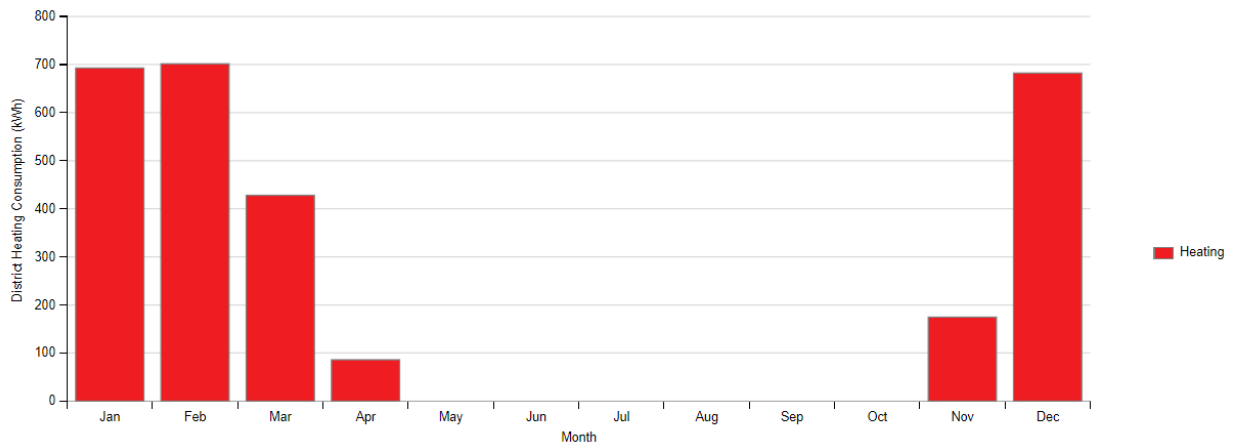


**Εικόνα 118: Ενεργειακές ανάγκες ανά μήνα για ηλεκτρικές συσκευές και εσωτερικό φωτισμό.**

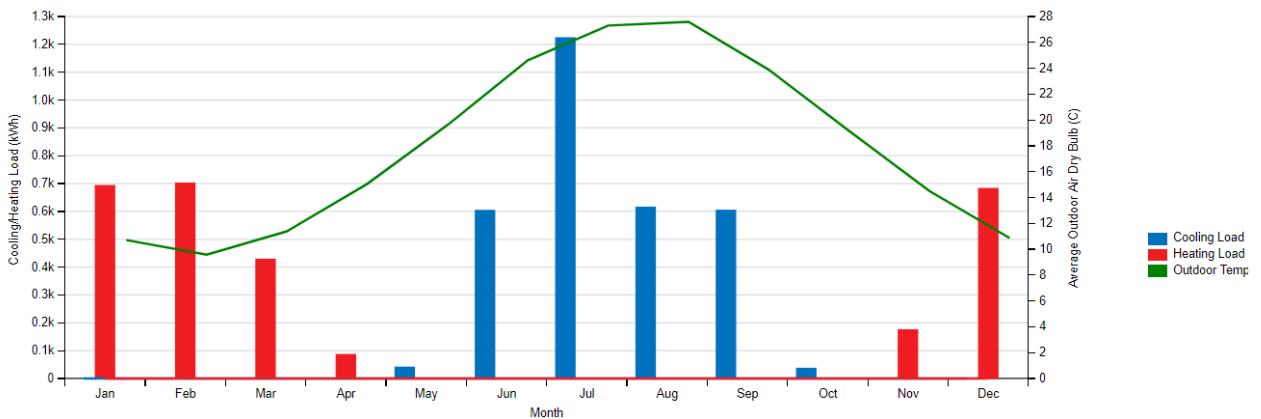


**Εικόνα 119: Ενεργειακές ανάγκες ανά μήνα για ψύξη της οικίας.**

Οι ενεργειακές ανάγκες σε ψύξη για τους μήνες Μάιο και Οκτώβριο είναι σχεδόν αμελητέες όπως αναμενόταν, καθώς αν συρθεί ο κέρσορας επάνω τους το λογισμικό προβάλλει μηδενική ένδειξη. Αυτό σημαίνει ότι πιθανώς να υπάρχουν ελάχιστες μέρες κατά τη διάρκεια αυτών των μηνών που θα χρειαστεί ψύξη, σύμφωνα με την επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία που έχει οριστεί στους 26°C και μάλιστα για πολύ μικρό χρονικό διάστημα.



Εικόνα 120: Ενεργειακές ανάγκες ανά μήνα για θέρμανση της οικίας.



Εικόνα 121: Θερμικά και ψυκτικά φορτία ανά μήνα σε συνάρτηση με την εξωτερική θερμοκρασία.

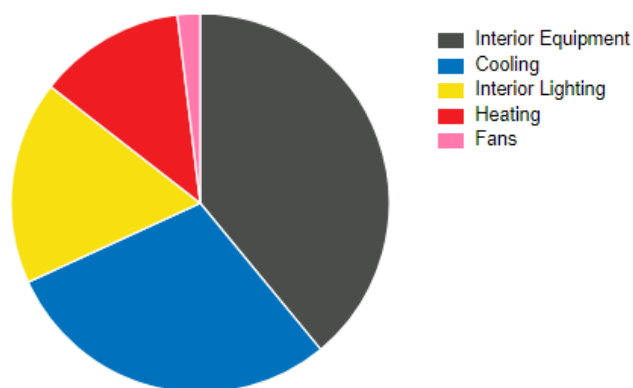
## 6.2 Σενάριο με Φ/Β και Αντλία Θερμότητας – Αθήνα

Data	Value
Building Name	Building 1
Total Site Energy	11,531 kWh
Net Site Energy	97 kWh
Total Building Area	146 m <sup>2</sup>
Total Site EUI	78.98 kWh/m <sup>2</sup>
Net Site EUI	0.67 kWh/m <sup>2</sup>
OpenStudio Standards Building Type	n/a

Εικόνα 122: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της οικίας.

Στην Εικόνα 122 φαίνονται οι ενεργειακές ανάγκες της μονοκατοικίας όταν εκείνη βρίσκεται στην Αθήνα και συγκεκριμένα στη Βάρκιζα. Στην ενότητα «Total Site Energy» το λογισμικό

παραθέτει τις συνολικές ετήσιες ανάγκες της μονοκατοικίας σε ηλεκτρισμό, ενώ στην ενότητα «Net Site Energy» παρατίθενται οι «καθαρές» ανάγκες της οικίας, δηλαδή οι ανάγκες σε ηλεκτρισμό που δεν καλύπτονται από τα Φ/Β. Όπως αποδεικνύεται η εγκατάσταση δύο σειρών και συνολικά 28 panels, 14 panels η κάθε σειρά, με τεχνικά χαρακτηριστικά και διαστάσεις module που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, με βαθμό απόδοσης 18% είναι μία πολύ καλή προσέγγιση για πλήρη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της οικίας. Οι 97 kWh ετησίως είναι σχεδόν αμελητέα ποσότητα μπροστά στις συνολικές ετήσιες ανάγκες, που ανέρχονται σε 11531 kWh, και άρα η μονοκατοικία μπορεί να χαρακτηριστεί ενεργειακά αυτόνομη.



**Εικόνα 123: Ετήσιες ανάγκες της οικίας για κάθε κατηγορία.**

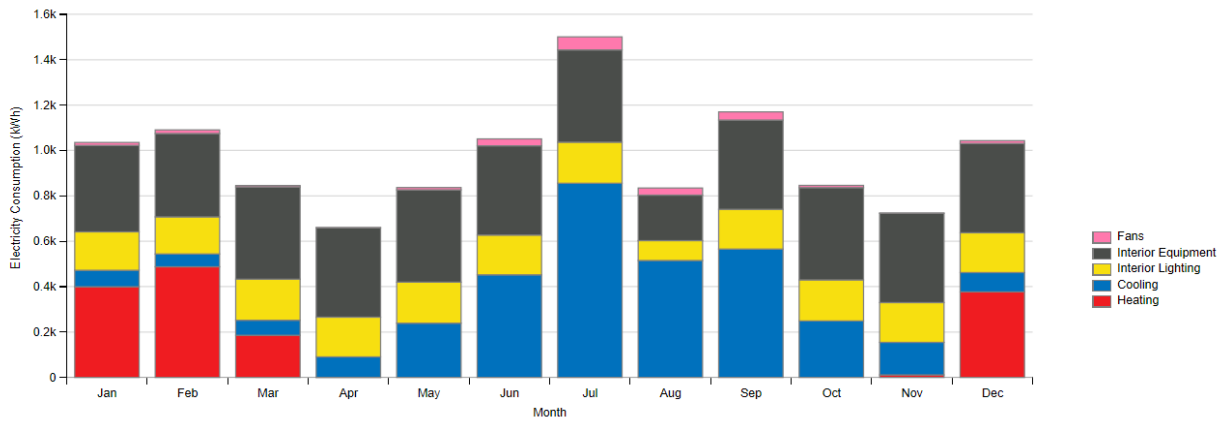
Στην *Εικόνα 123* παρουσιάζονται οι ενεργειακές ανάγκες για κάθε κατηγορία ως ποσοστά επί των συνολικών αναγκών. Παρατηρείται ότι οι υψηλότερες ενεργειακές ανάγκες αφορούν στον εσωτερικό εξοπλισμό, ενώ και η ενέργεια που απαιτείται για την ψύξη της οικίας από την αντλία θερμότητας αποτελεί σημαντικό ποσοστό των συνολικών αναγκών. Η θέρμανση και ο εσωτερικός φωτισμός καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια, ενώ πολύ μικρές είναι οι καταναλώσεις των ανεμιστήρων. Πιο συγκεκριμένα, οι ενεργειακές ανάγκες κάθε κατηγορίας ως ποσοστό επί των συνολικών παρουσιάζονται στον *Πίνακα 17*.

**Πίνακας 17: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες σε σχέση με τις συνολικές για κάθε κατηγορία.**

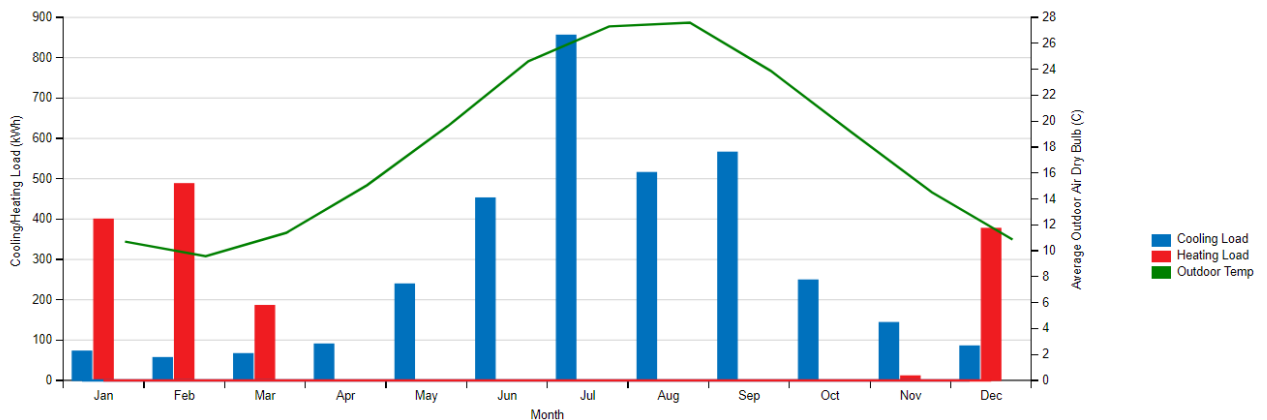
	Ετήσιες Ενεργειακές ανάγκες (kWh)	Ποσοστό επί των συνολικών αναγκών (%)
Interior equipment	4381.78	38
Cooling	3343.99	29
Heating	1499.03	13
Interior Lighting	2075.58	18

Funs	230.62	2
Συνολικές ανάγκες	11531	100

Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι η ενέργεια που απαιτείται για ψύξη είναι σχεδόν ίση με εκείνη που απαιτείται για θέρμανση και εσωτερικό φωτισμό αθροιστικά.

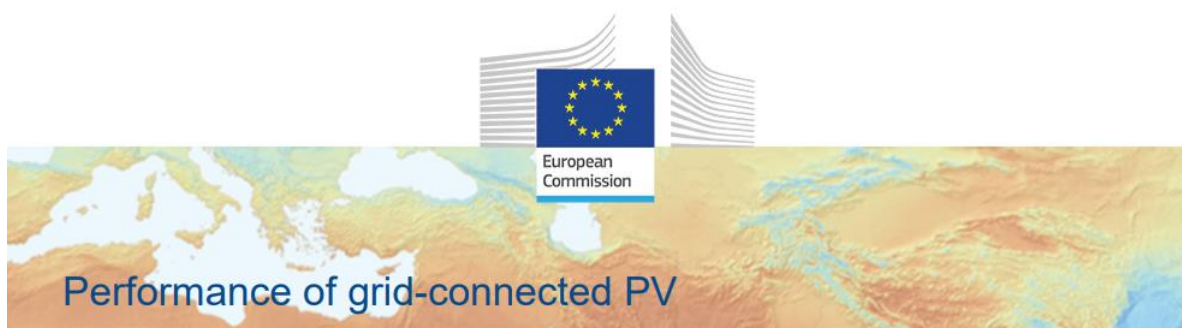


Εικόνα 124: Μηνιαίες ανάγκες σε ηλεκτρισμό για κάθε κατηγορία συσκευών.



Εικόνα 125: Μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία σε συνάρτηση με την εξωτερική θερμοκρασία.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε μελέτη για τη βελτιστοποίηση της κλίσης των Φ/Β μέσω του λογισμικού PVGIS, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στην Εικόνα 126.



PVGIS-5 estimates of solar electricity generation:

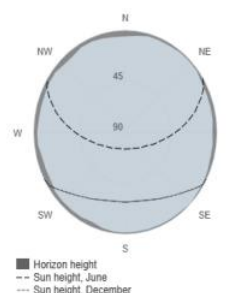
**Provided inputs:**

Latitude/Longitude: 37.825,23.804  
 Horizon: Calculated  
 Database used: PVGIS-SARAH2  
 PV technology: Crystalline silicon  
 PV installed: 7.02 kWp  
 System loss: 13 %

**Simulation outputs**

Slope angle: 32 (opt) °  
 Azimuth angle: 0 (opt) °  
 Yearly PV energy production: 11533.06 kWh  
 Yearly in-plane irradiation: 2054.82 kWh/m<sup>2</sup>  
 Year-to-year variability: 227.29 kWh  
 Changes in output due to:  
     Angle of incidence: -2.68 %  
     Spectral effects: 0.56 %  
     Temperature and low irradiance: -6.1 %  
 Total loss: -20.05 %

**Outline of horizon at chosen location:**



**Εικόνα 126: Βελτιστοποίηση Φ/Β με χρήση του PVGIS.**

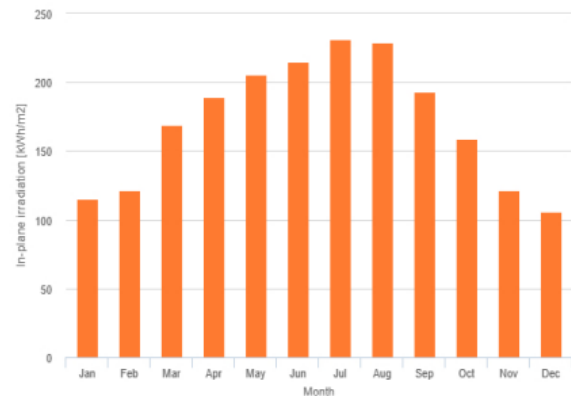
Από την προσομοίωση προκύπτει ότι βέλτιστη κλίση με την οποία πρέπει να τοποθετηθούν τα Φ/Β στη Βάρκιζα είναι ίση με 32°. Ο προσανατολισμός παραμένει ακριβώς ο ίδιος, νότιος, με μηδενικό αζιμούθιο,  $\gamma=0^\circ$ . Η βέλτιστη τοποθέτηση των Φ/Β έχει ως αποτέλεσμα μια μικρή αύξηση στην παραγόμενη ισχύ, η οποία πλέον υπολογίζεται στις  $11533.06 \frac{\text{kWh}}{\text{year}} > 11531 \frac{\text{kWh}}{\text{year}}$ . Επομένως, με τη βέλτιστη κλίση εγκατάστασης, τα Φ/Β είναι σε θέση να καλύψουν πλήρως τις ενεργειακές ανάγκες της οικίας και μάλιστα επακριβώς ( $11533.06 \cong 11531 \text{ kWh}$ ). Στην *Εικόνα 127* παρουσιάζονται τα διαγράμματα της μηνιαίας παραγωγής ισχύος από τα Φ/Β και η μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία στην ακριβή θέση της οικίας.



Monthly energy output from fix-angle PV system:



Monthly in-plane irradiation for fixed-angle:



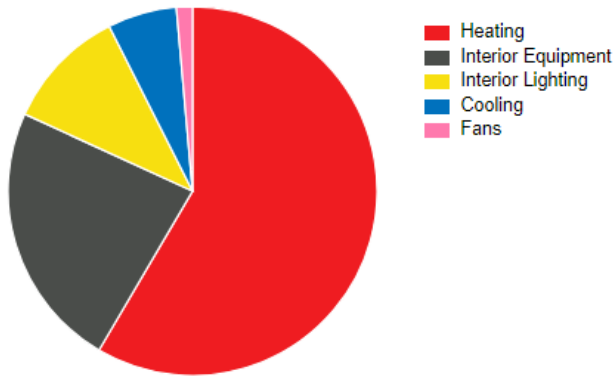
Εικόνα 127: Μηνιαία παραγωγή ισχύος των Φ/Β και μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία.

### 6.3 Σενάριο με Φ/Β και Αντλία Θερμότητας - Βιέννη

Data	Value
Building Name	Building 1
Total Site Energy	18,869 kWh
Net Site Energy	8,644 kWh
Total Building Area	146 m <sup>2</sup>
Total Site EUI	129.24 kWh/m <sup>2</sup>
Net Site EUI	59.21 kWh/m <sup>2</sup>
OpenStudio Standards Building Type	n/a

Εικόνα 128: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της οικίας στη Βιέννη.

Στην κεντρική Ευρώπη και συγκεκριμένα στη Βιέννη της Αυστρίας παρατηρούνται αυξημένες ενεργειακές ανάγκες σε σχέση με την Αθήνα. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της χαμηλότερης μέσης θερμοκρασίας που επικρατεί στη διάρκεια του έτους, η οποία συνεπάγεται μεγαλύτερες ανάγκες σε θέρμανση. Επιπλέον, η παραγωγή ηλεκτρισμού από τα Φ/Β παρατηρείται μειωμένη, γεγονός που οφείλεται στην ασθενέστερη ηλιακή ακτινοβολία σε σύγκριση με την Αθήνα και θα παρουσιαστεί και στη συνέχεια με τη βοήθεια του PVGIS. Στην ενότητα «Total Site Energy» φαίνονται οι ετήσιες συνολικές ενεργειακές ανάγκες της οικίας, ενώ ως «Net Site Energy» αναφέρονται οι ανάγκες οι ανάγκες της οικίας για την κάλυψη των οποίων δεν αρκούν τα Φ/Β ως πηγή ηλεκτροδότησης.

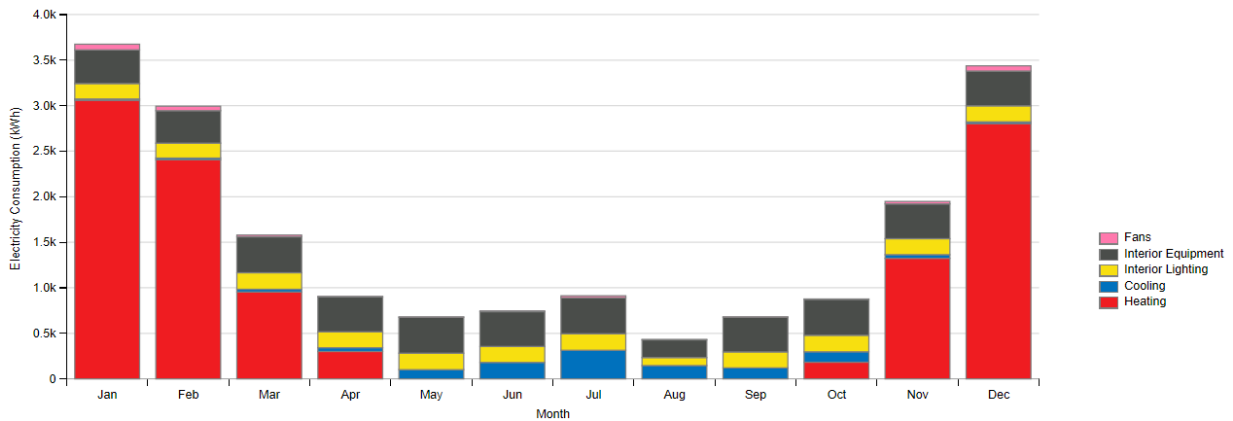


**Εικόνα 129: Ετήσιες ανάγκες της οικίας για κάθε κατηγορία.**

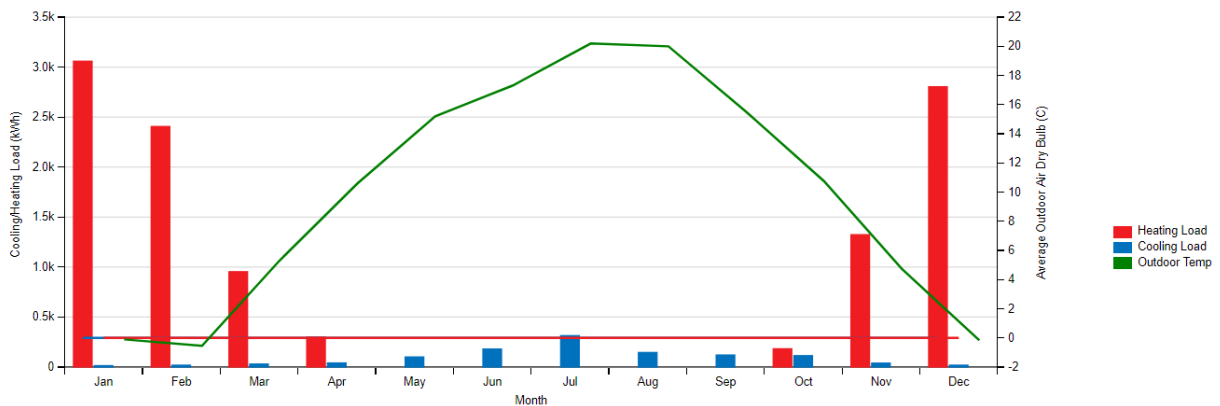
Στην *Εικόνα 129* παρουσιάζονται τα ποσά ενέργειας, που απαιτεί κάθε κατηγορία, ως ποσοστά επί της συνολικών ενεργειακών αναγκών της οικίας. Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των ενεργειακών αναγκών αφορά στη θέρμανση της οικίας, όπως αναμενόταν. Πιο συγκεκριμένα, στον *Πίνακα 18* φαίνονται αναλυτικά οι ενεργειακές ανάγκες κάθε κατηγορίας.

**Πίνακας 18: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες σε σχέση με τις συνολικές για κάθε κατηγορία.**

	Ετήσιες Ενεργειακές ανάγκες (kWh)	Ποσοστό επί των συνολικών αναγκών (%)
Interior equipment	4339.87	23
Cooling	1132.14	6
Heating	10944.02	58
Interior Lighting	2075.59	11
Funs	377.38	2
Συνολικές ανάγκες	18869	100

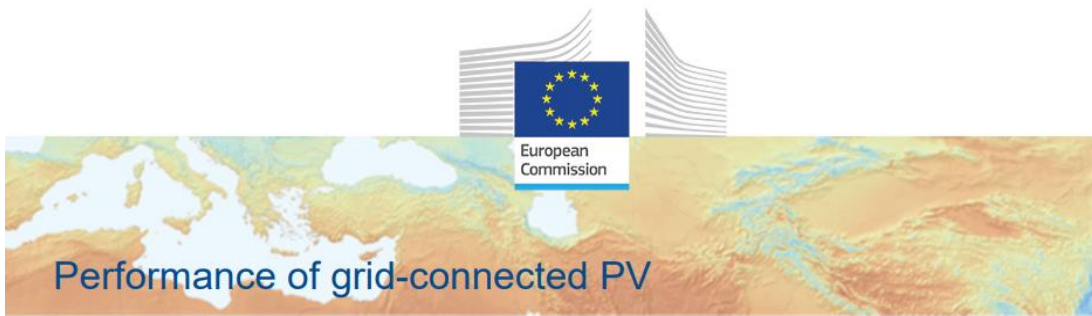


Εικόνα 130: Μηνιαίες ανάγκες σε ηλεκτρισμό για κάθε κατηγορία.



Εικόνα 131: Μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία σε συνάρτηση με την εξωτερική θερμοκρασία.

Στόχος σε αυτό το σενάριο ήταν η πλήρης κάλυψη των ενεργειακών αναγκών για θέρμανση από Φ/Β. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να εγκατασταθεί ο μέγιστος αριθμός panel στην ταράτσα της οικίας. Όπως έχει υπολογισθεί σε προηγούμενη ενότητα το μέγιστο πλήθος Φ/Β που μπορεί να τοποθετηθεί σε δύο σειρές είναι 32 panels, 16 στην κάθε σειρά. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι διαστάσεις είναι τα ίδια που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα για το module της SANYO, HIT photovoltaic module H250, με μόνη διαφορά ότι το module είναι νεότερης γενιάς με υψηλότερο βαθμό απόδοσης, ίσο με 21%. Με βελτιστοποίηση του συγκεκριμένου μοντέλου στο λογισμικό PVGIS βρέθηκε ότι για βαθμό απόδοσης 21%, η παραγόμενη ισχύς του Φ/Β ανέρχεται σε  $10607.25 \frac{kWh}{year} < 10944.02 \frac{kWh}{year}$ , που απαιτούνται για θέρμανση. Τα σύγχρονα Φ/Β φτάνουν σε βαθμό απόδοσης μέχρι και 22%, οπότε δοκιμάστηκε η βελτιστοποίηση του συστήματος των Φ/Β στο PVGIS με βαθμό απόδοσης 22%.



PVGIS-5 estimates of solar electricity generation:

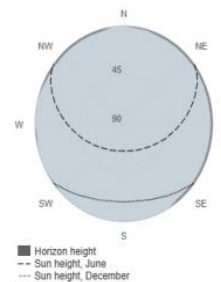
**Provided inputs:**

Latitude/Longitude: 48.130,16.488  
 Horizon: Calculated  
 Database used: PVGIS-SARAH2  
 PV technology: Crystalline silicon  
 PV installed: 9.7589 kWp  
 System loss: 13 %

**Simulation outputs**

Slope angle: 38 (opt) °  
 Azimuth angle: -1 (opt) °  
 Yearly PV energy production: 11105.17 kWh  
 Yearly in-plane irradiation: 1466.69 kWh/m<sup>2</sup>  
 Year-to-year variability: 476.47 kWh  
 Changes in output due to:  
 Angle of incidence: -2.82 %  
 Spectral effects: 1.46 %  
 Temperature and low irradiance: -9.56 %  
 Total loss: -22.41 %

**Outline of horizon at chosen location:**



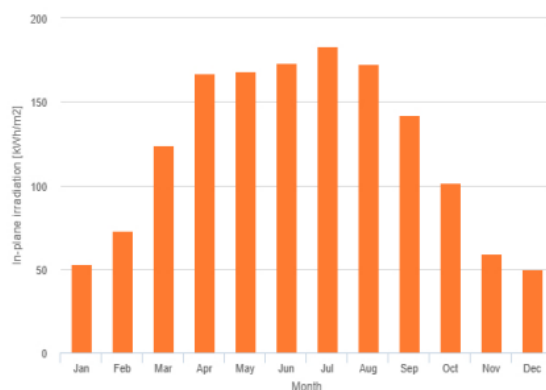
**Εικόνα 132: Βελτιστοποίηση Φ/Β με χρήση του PVGIS.**

Από την προσομοίωση προκύπτει ότι η βέλτιστη εγκατάσταση των Φ/Β στην ταράτσα της οικίας στη Βιέννη γίνεται για κλίση ίση με 38° και αζιμούθιο γ=1°. Με αυτόν τον τρόπο η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από τα Φ/Β αυξάνεται σημαντικά και είναι ίση με  $11105.17 \frac{kWh}{year} > 10944.02 \frac{kWh}{year}$ , που είναι οι συνολικές ανάγκες σε θέρμανση. Επομένως, με βελτιστοποίηση των Φ/Β και βαθμό απόδοσης 22%, οι ενεργειακές ανάγκες της οικίας σε θέρμανση καλύπτονται εξ ολοκλήρου από τα Φ/Β, ενώ ένα πολύ μικρό ποσό ενέργειας που περισσεύει μπορεί να καλύψει ένα μέρος της απαιτούμενης ενέργειας για τη λειτουργία των ανεμιστήρων. Στην *Εικόνα 133* παρουσιάζονται τα διαγράμματα της μηνιαίας παραγωγής ισχύος από τα Φ/Β και η μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία στην ακριβή θέση της οικίας.

Monthly energy output from fix-angle PV system:



Monthly in-plane irradiation for fixed-angle:



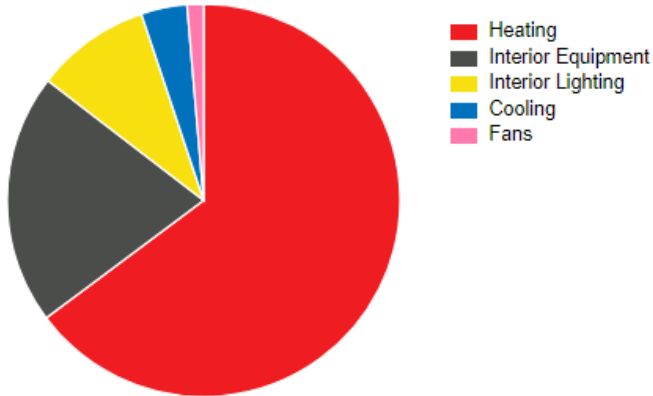
Εικόνα 133: Μηνιαία παραγωγή ισχύος των Φ/Β και μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία.

## 6.4 Σενάριο με Φ/Β και Αντλία Θερμότητας – Στοκχόλμη

Data	Value
Building Name	Building 1
Total Site Energy	21,389 kWh
Net Site Energy	12,586 kWh
Total Building Area	146 m <sup>2</sup>
Total Site EUI	146.50 kWh/m <sup>2</sup>
Net Site EUI	86.21 kWh/m <sup>2</sup>
OpenStudio Standards Building Type	n/a

Εικόνα 134: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της οικίας στη Στοκχόλμη.

Ακόμα υψηλότερες ενεργειακές ανάγκες παρατηρούνται στη βόρεια Ευρώπη και συγκεκριμένα στη Στοκχόλμη της Σουηδίας. Το γεγονός αυτό συμβαδίζει με τις αυξημένες ανάγκες σε θέρμανση, καθώς η μέση θερμοκρασία που επικρατεί, κατά τη διάρκεια του έτους, στη Στοκχόλμη είναι χαμηλότερη σε σχέση με την κεντρική (Βιέννη) και νότια (Αθήνα) Ευρώπη. Μειωμένη παρατηρείται και η παραγωγή ηλεκτρισμού από τα Φ/Β λόγω της ασθενούς ηλιακής ακτινοβολίας, κάτι που θα αποδειχθεί και στη συνέχεια με τη βοήθεια του PVGIS.

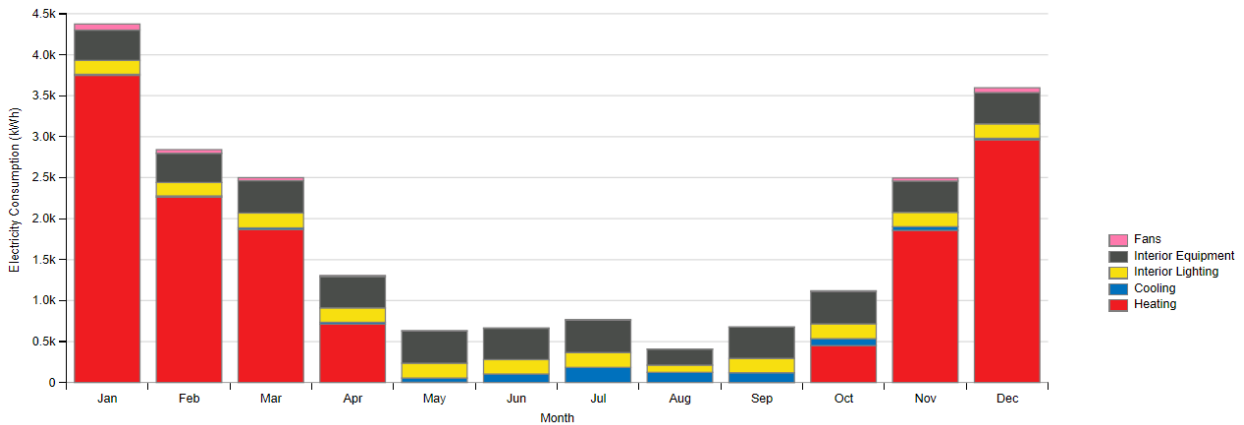


**Εικόνα 135: Ετήσιες ανάγκες της οικίας για κάθε κατηγορία.**

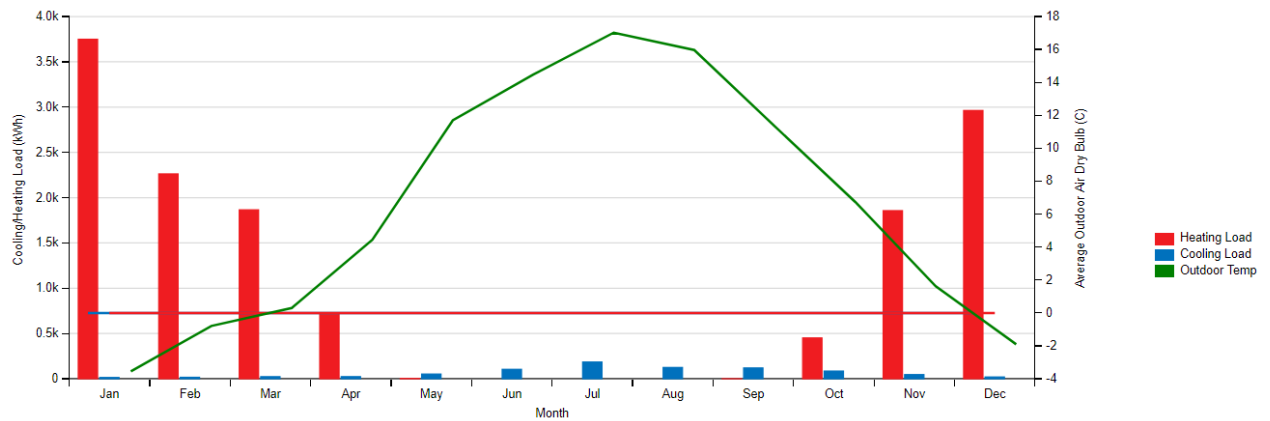
Στην *Εικόνα 135* είναι προφανές ότι οι ενεργειακές ανάγκες της οικίας για θέρμανση αποτελούν το συντριπτικά μεγαλύτερο ποσοστό επί των συνολικών αναγκών της οικίας, όπως αναμενόταν. Πιο συγκεκριμένα, στον *Πίνακα 19* παρατίθενται αναλυτικά οι ενεργειακές ανάγκες κάθε κατηγορίας.

**Πίνακας 19: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες σε σχέση με τις συνολικές για κάθε κατηγορία.**

	Ετήσιες Ενεργειακές ανάγκες (kWh)	Ποσοστό επί των συνολικών αναγκών (%)
Interior equipment	4491.69	21
Cooling	855.56	4
Heating	13902.85	65
Interior Lighting	1925.01	9
Funs	213.89	1
Συνολικές ανάγκες	21389	100

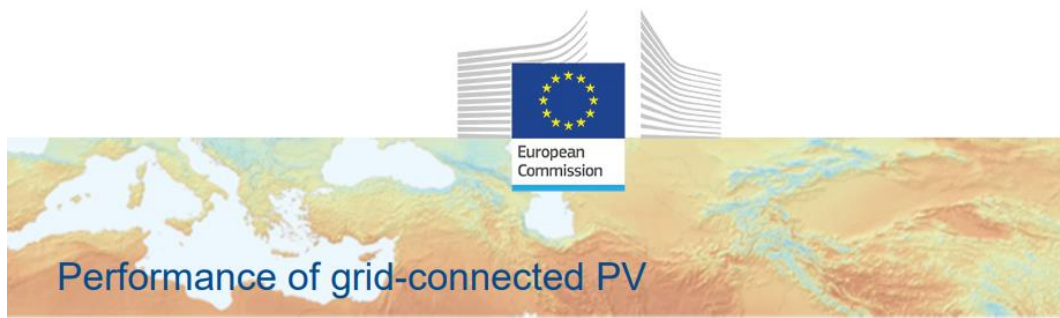


Εικόνα 136: Μηνιαίες ανάγκες σε ηλεκτρισμό για κάθε κατηγορία.



Εικόνα 137: Θερμικά και ψυκτικά φορτία σε συνάρτηση με την εξωτερική θερμοκρασία.

Με την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια προς θέρμανση της οικίας να βρίσκεται σε τόσο υψηλά επίπεδα ( $13902.85 \frac{\text{kWh}}{\text{year}}$  – 65% επί των συνολικών), εξετάστηκε και πάλι το ενδεχόμενο να καλυφθούν οι ανάγκες εξ ολοκλήρου μέσω Φ/Β με την προσθήκη και τρίτης σειράς από panels. Ωστόσο, όπως αποδείχθηκε στην προηγούμενη ενότητα, δεν είναι δυνατό να εγκατασταθούν τρεις σειρές από panels, καθώς η διαθέσιμη επιφάνεια δεν επαρκεί ώστε να λειτουργούν και οι τρεις σειρές χωρίς να σκιάζει η μία την άλλη. Οπότε επιχειρήθηκε με 32 panels, όπως και στη Βιέννη, και βελτιστοποίηση στην τοποθέτηση των Φ/Β μέσω PVGIS, αυτά να καλύψουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό της απαιτούμενης ενέργειας για θέρμανση. Η βελτιστοποίηση έγινε σε περιβάλλον PVGIS για το ίδιο module της SANYO με υψηλότερο, όμως, βαθμό απόδοσης ίσο με 22%.



PVGIS-5 estimates of solar electricity generation:

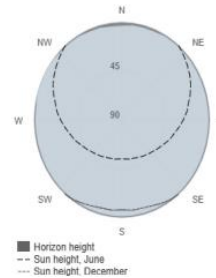
**Provided inputs:**

Latitude/Longitude: 59.439,18.056  
 Horizon: Calculated  
 Database used: PVGIS-SARAH2  
 PV technology: Crystalline silicon  
 PV installed: 9.7589 kWp  
 System loss: 13 %

**Simulation outputs**

Slope angle: 44 (opt) °  
 Azimuth angle: 0 °  
 Yearly PV energy production: 9466.19 kWh  
 Yearly in-plane irradiation: 1231.85 kWh/m<sup>2</sup>  
 Year-to-year variability: 403.89 kWh  
 Changes in output due to:  
 Angle of incidence: -2.88 %  
 Spectral effects: 1.34 %  
 Temperature and low irradiance: -8.03 %  
 Total loss: -21.26 %

**Outline of horizon at chosen location:**



**Εικόνα 138: Βελτιστοποίηση Φ/Β με χρήση του PVGIS.**

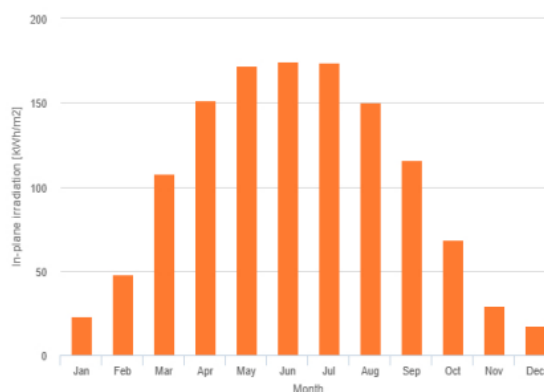
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κατέδειξαν ότι η βέλτιστη τοποθέτηση των Φ/Β προκύπτει για κλίση ίση με 44° και νότιο προσανατολισμό, δηλαδή αζιμούθιο γ=0. Με αυτήν την τοποθέτηση μεγιστοποιείται η παραγόμενη ισχύς από τα Φ/Β, η οποία φτάνει στις  $9466.19 \frac{kWh}{year} < 13902.85 \frac{kWh}{year}$ , οι οποίες είναι οι συνολικές ανάγκες σε θέρμανση. Προκύπτει, δηλαδή, ότι η μέγιστη παραγόμενη ισχύς των Φ/Β αρκεί για να καλύψει περίπου το 68% των ετήσιων αναγκών σε θέρμανση, ή περίπου το 44% των συνολικών ετήσιων ενεργειακών αναγκών της οικίας. Στην *Εικόνα 139* παρουσιάζονται τα διαγράμματα της μηνιαίας παραγωγής ισχύος από τα Φ/Β και η μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία στην ακριβή θέση της οικίας.



Monthly energy output from fix-angle PV system:



Monthly in-plane irradiation for fixed-angle:



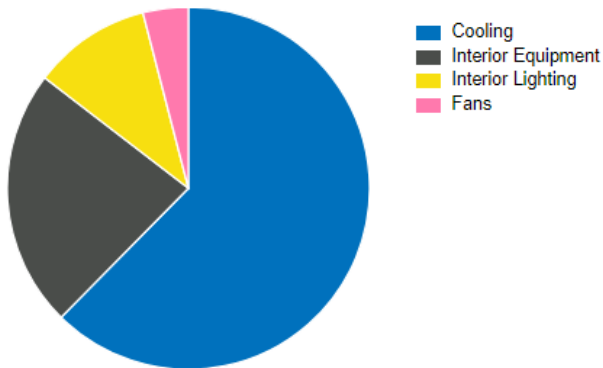
Εικόνα 139: Μηνιαία παραγωγή ισχύος των Φ/Β και μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία.

## 6.5 Σενάριο με Φ/Β και Αντλία Θερμότητας – Abu Dhabi

Data	Value
Building Name	Building 1
Total Site Energy	19,169 kWh
Net Site Energy	106 kWh
Total Building Area	146 m <sup>2</sup>
Total Site EUI	131.30 kWh/m <sup>2</sup>
Net Site EUI	0.72 kWh/m <sup>2</sup>
OpenStudio Standards Building Type	n/a

Εικόνα 140: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της οικίας στο Abu Dhabi.

Σαν τελευταίο σενάριο επιλέχθηκε να μελετηθεί η αντίστοιχη μονοκατοικία στο Abu Dhabi, που βρίσκεται στο νότιο ημισφαίριο της γης και χαρακτηρίζεται από εντελώς διαφορετικά κλιματικά δεδομένα από αυτά της Ευρώπης. Οι ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της οικίας παραμένουν αρκετά υψηλές, ωστόσο αυτό τώρα συμβαίνει λόγω της αυξημένης κατανάλωσης ενέργειας προς ψύξη της οικίας. Αυτό συμβαίνει καθώς η μέση ετήσια θερμοκρασία που επικρατεί στο Abu Dhabi είναι πολύ υψηλότερη από τις αντίστοιχες θερμοκρασίες στα υπόλοιπα μέρη της Ευρώπης που μελετήθηκαν. Όσο πιο βόρεια πραγματοποιούνταν η μελέτη, τόσο ασθενέστερη ήταν η ηλιακή ακτινοβολία και μειωμένη η παραγωγή ισχύος των Φ/Β. Σε αυτό το σενάριο συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο, αφού η μελέτη πραγματοποιείται αρκετά νοτιότερα, με αποτέλεσμα την πολύ αυξημένη παραγωγή ισχύος από τα Φ/Β χάρη στην ισχυρή ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη διάρκεια του έτους, όπως θα φανεί και στη συνέχεια με χρήση του PVGIS.

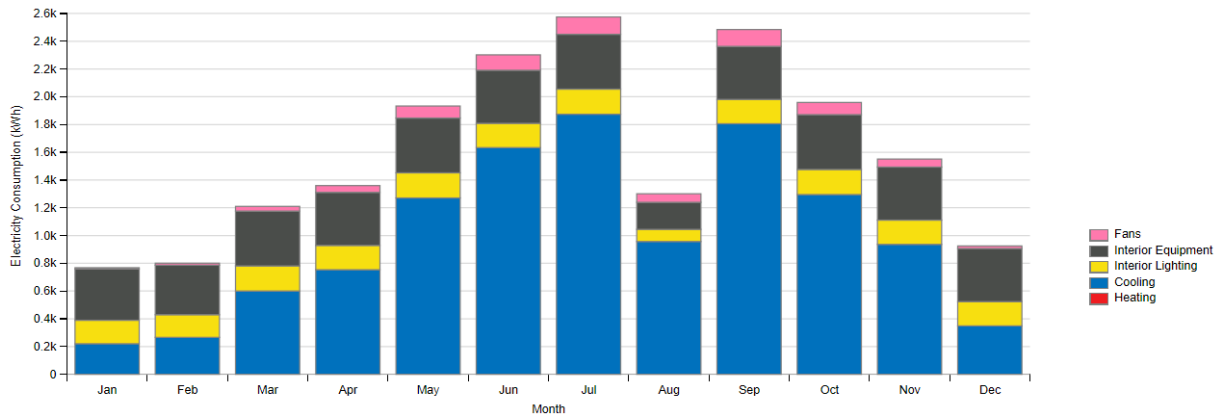


**Εικόνα 141: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες για κάθε κατηγορία.**

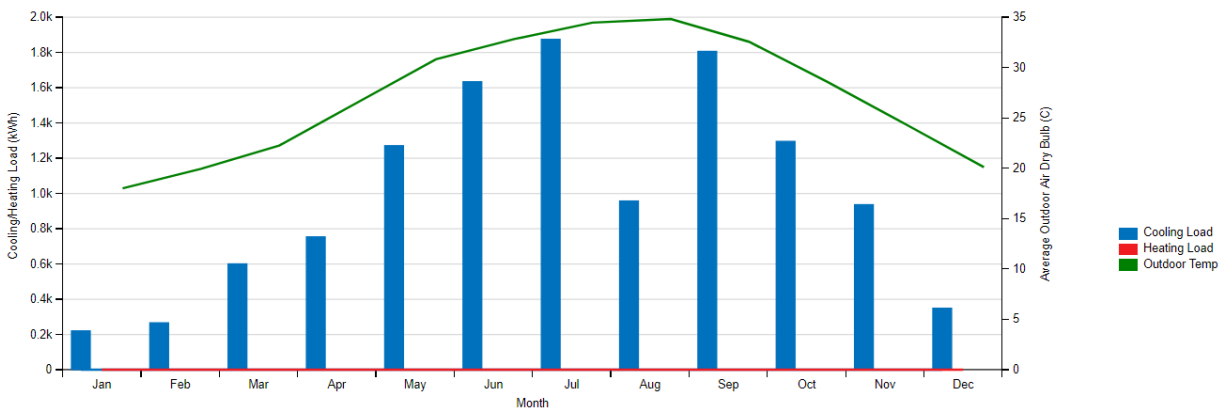
Η σημαντικότερη παρατήρηση είναι ότι τώρα το συντριπτικό ποσοστό των ενεργειακών αναγκών αντιστοιχεί στην ψύξη της οικίας, ενώ οι ανάγκες για θέρμανση είναι αμελητέες, καθώς επικρατούν θερμοκρασίες άνω των 20°C σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Στον Πίνακα 20 παρατίθενται αναλυτικά οι ενεργειακές ανάγκες για κάθε κατηγορία.

**Πίνακας 20: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες σε σχέση με τις συνολικές για κάθε κατηγορία.**

	Ετήσιες Ενεργειακές ανάγκες (kWh)	Ποσοστό επί των συνολικών αναγκών (%)
Interior equipment	4408.87	23
Cooling	11884.78	62
Heating	-	-
Interior Lighting	2108.59	11
Funs	766.76	4
Συνολικές ανάγκες	19169	100



Εικόνα 142: Μηνιαίες ανάγκες σε ηλεκτρισμό για κάθε κατηγορία.



Εικόνα 143: Ψυκτικά και θερμικά φορτία συναρτήσεως της εξωτερικής θερμοκρασίας.

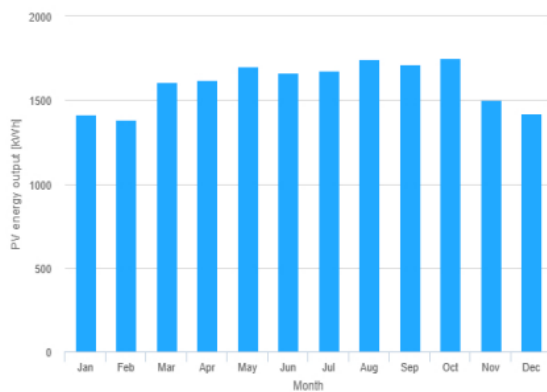
Όπως διαπιστώθηκε στην Εικόνα 143, η εξωτερική θερμοκρασία πολύ σπάνια πέφτει κάτω από τους 20°C, ακόμα και κατά τη διάρκεια του χειμώνα, για αυτό και τα θερμικά φορτία σχηματίζονται ως μία οριζόντια κόκκινη γραμμή με μηδενική τιμή. Αν χρειαστεί θέρμανση, αυτή θα είναι για ελάχιστες ημέρες το χρόνο και για ελάχιστες ώρες. Το ποσοστό των ενεργειακών αναγκών σε θέρμανση αποτελεί κάποιο χιλιοστό επί των συνολικών αναγκών και για αυτό το λογισμικό το θεωρεί αμελητέο.

Στόχος σε αυτό το σενάριο ήταν η πλήρης κάλυψη των ενεργειακών αναγκών με εκμετάλλευση της ισχυρής ηλιακής ακτινοβολίας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Επιλέχθηκε και πάλι τεχνολογία Φ/Β κρυσταλλικού πυριτίου, που είναι η δημοφιλέστερη στην αγορά. Τοποθετήθηκαν δύο σειρές από 16 pannels η καθεμία, δηλαδή 32 pannels συνολικά. Με βαθμό απόδοσης 20%, αποδείχθηκε ότι οι ανάγκες καλύπτονται σχεδόν εξ ολοκλήρου από τα Φ/Β. Μόνο 106  $\frac{\text{kWh}}{\text{year}}$  έμειναν ακάλυπτες, όπως φαίνεται στη γραμμή «Net Site Energy» της Εικόνας 140. Οι 106 kWh αποτελούν αμελητέα ποσότητα επί των συνολικών αναγκών της οικίας στο Abu Dhabi και επομένως η οικία μπορεί να θεωρηθεί

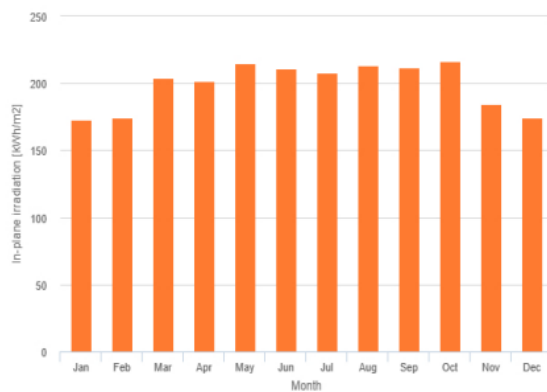
ενεργειακά αυτόνομη. Σε αυτό το σενάριο δε γίνεται βελτιστοποίηση ως προς τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ των Φ/Β, καθώς πρόκειται για μια εξαιρετικά καλή προσέγγιση της ενεργειακής αυτονομίας της οικίας. Η έρευνα μέσω του PVGIS αφορά μόνο στην εύρεση του βέλτιστου προσανατολισμού τοποθέτησης των Φ/Β, χάριν πληρότητας, χωρίς να εξετάζεται το μέγεθος της παραγόμενης ισχύος υπό βέλτιστη τοποθέτηση, όπως πραγματοποιήθηκε στα προηγούμενα σενάρια.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε περιβάλλον PVGIS κατέδειξαν ότι η βέλτιστη τοποθέτηση των Φ/Β οροφής πραγματοποιείται για κλίση ίση με  $24^\circ$  και γωνία αζιμουθίου  $\gamma = -10^\circ$ . Η παραγόμενη ισχύς από τα Φ/Β αγγίζει τις  $19063 \frac{kWh}{year} \approx 19169 \frac{kWh}{year}$ , που είναι οι συνολικές ετήσιες ανάγκες της μονοκατοικίας σε ηλεκτρισμό. Προκύπτει, δηλαδή, ότι με εγκατάσταση Φ/Β οροφής και για βαθμό απόδοσης 20% της τεχνολογίας πολυκρυσταλλικού πυριτίου, οι ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της οικίας καλύπτονται σχεδόν επακριβώς από τα Φ/Β. Στην *Εικόνα 144* παρουσιάζονται τα διαγράμματα της μηνιαίας παραγωγής ισχύος από τα Φ/Β και η μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία στην ακριβή θέση της οικίας.

Monthly energy output from fix-angle PV system:



Monthly in-plane irradiation for fixed-angle:



**Εικόνα 144: Μηνιαία παραγωγή ισχύος των Φ/Β και μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία.**

Η πολύ υψηλή παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τα Φ/Β είναι αποτέλεσμα της σταθερά υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας ακόμη και κατά τους χειμερινούς μήνες στο Abu Dhabi – *Εικόνα 144*.

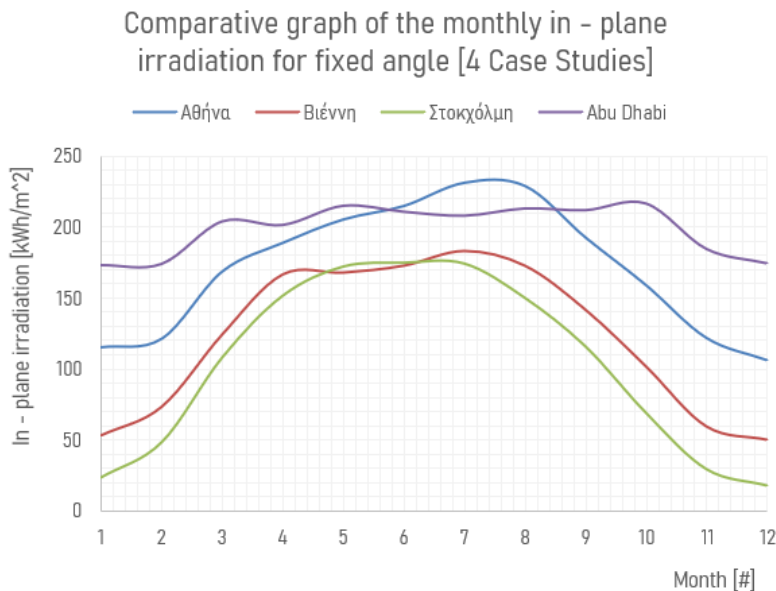
## 6.6 Συγκέντρωση αποτελεσμάτων

Στον *Πίνακα 21* παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της οικίας στις τέσσερις διαφορετικές τοποθεσίες που μελετήθηκαν, μαζί με την ετήσια παραγόμενη ισχύ από τα Φ/Β σε κάθε περιοχή για βέλτιστη τοποθέτησή τους και το ποσοστό επί των συνολικών ετήσιων αναγκών που αυτά καλύπτουν.

**Πίνακας 21: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις τέσσερις περιοχές μελέτης.**

Τοποθεσία	Ετήσιες Ενεργειακές Ανάγκες $\left[\frac{kWh}{year}\right]$	Βαθμός Απόδοσης Φ/Β [%]	Πλήθος Panels [-]	Ετήσια Παραγόμενη Ισχύς Φ/Β $\left[\frac{kWh}{year}\right]$	Ποσοστό Κάλυψης από Φ/Β [%]
Αθήνα (Βάρκιζα)	11531	18	28	11533.06	100
Βιέννη	18869	22	32	11105.17	59 – (Heating 100)
Στοκχόλμη	21389	22	32	9466.19	44 – (Heating 68)
Abu Dhabi	19169	20	32	19063	~100

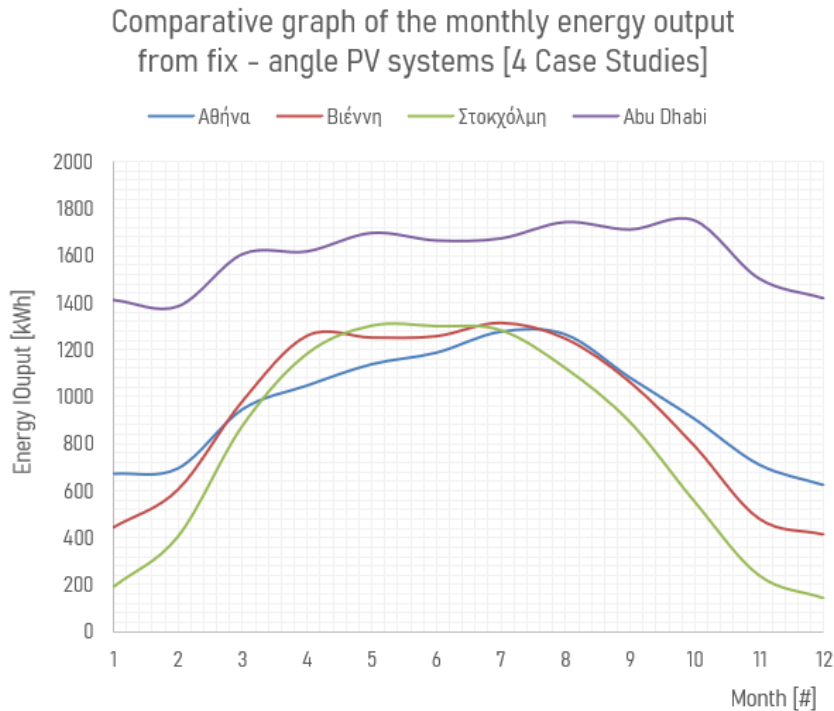
Τα αποτελέσματα του Πίνακα 21 φαίνονται εικονογραφημένα στις επόμενες εικόνες.



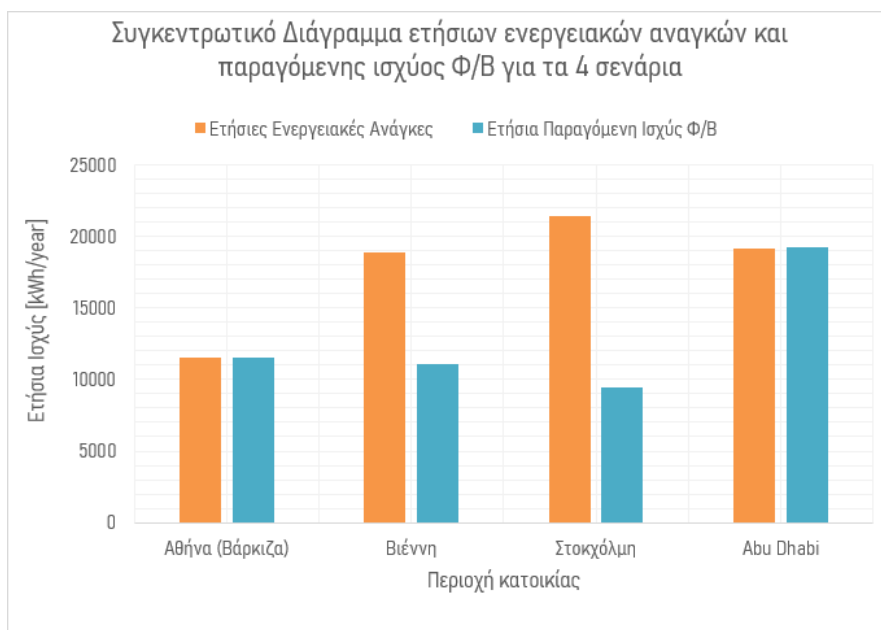
**Εικόνα 145: Συγκριτικό διάγραμμα της μηνιαίας ακτινοβολίας σε  $\left[\frac{kWh}{m^2}\right]$  για τα 4 σενάρια.**

Το διάγραμμα της Εικόνας 145 δίνει τη μηνιαία προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία για τις τέσσερις περιοχές μελέτης. Στο Abu Dhabi είναι προφανές ότι η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι, σταθερά, σημαντικά μεγαλύτερη καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου σε σχέση με την

αντίστοιχη σε Βιέννη και Στοκχόλμη. Ενώ, αρκετά ισχυρότερη ακτινοβολία προσπίπτει, στο Abu Dhabi, για περίπου το 80% του έτους και συγκριτικά με την Αθήνα. Επειδή, λοιπόν, η ηλιακή ακτινοβολία είναι η βασική παράμετρος που καθορίζει την παραγόμενη ισχύ από τα Φ/Β, δικαιολογείται η μεγάλη διαφορά στην παραγόμενη ισχύ ανάμεσα στις Βιέννη και Στοκχόλμη έναντι του Abu Dhabi. Μεγάλη είναι και η διαφορά στην παραγόμενη ισχύ από τα Φ/Β ανάμεσα σε Αθήνα και Abu Dhabi. Ακόμα, στην Αθήνα, παρόλο που εγκαθίσταται ελαφρώς μικρότερη επιφάνεια Φ/Β με βαθμό απόδοσης 18%, συγκριτικά με τη Βιέννη και τη Στοκχόλμη, όπου ο βαθμός απόδοσης των Φ/Β είναι ίσος με 22%, η παραγόμενη ισχύς από τα Φ/Β είναι υψηλότερη. Μικρή, σχετικά, διαφορά (όχι αμελητέα) στην παραγόμενη ισχύ των Φ/Β σε Βιέννη και Στοκχόλμη αντίστοιχα, όπου εγκαθίσταται ακριβώς η ίδια επιφάνεια Φ/Β με ίδιο βαθμό απόδοσης. Αυτό οφείλεται στο ότι η ισχύς της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους στις δύο περιοχές δε διαφέρει σημαντικά κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια του έτους. Η παραγόμενη ισχύς των Φ/Β για κάθε σενάριο φαίνεται στο γράφημα της επόμενης εικόνας.



Εικόνα 146: Συγκριτικό γράφημα της μηνιαίας παραγόμενης ισχύος από τα Φ/Β για τα 4 σενάρια μελέτης.

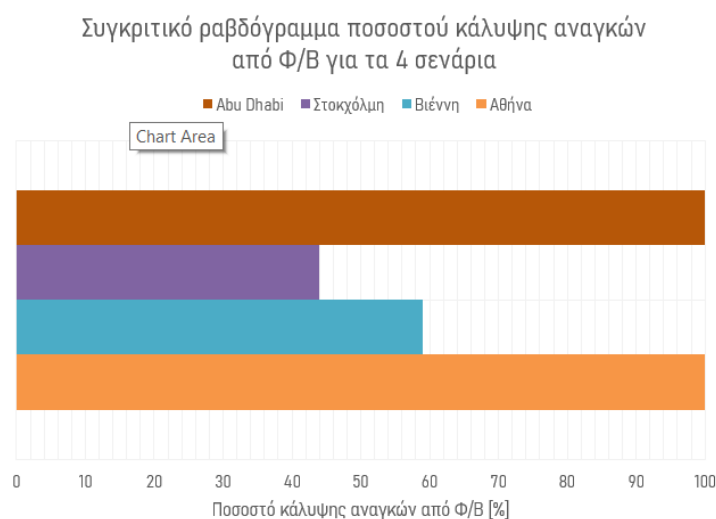


**Εικόνα 147: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες και ετήσια παραγόμενη ισχύς από τα Φ/Β στις 4 περιοχές.**

Όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 147*, αλλά και στον *Πίνακα 21*, οι ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της οικίας της τετραμελούς οικογένειας καλύπτονται από τα Φ/Β ως εξής:

- Αθήνα: πλήρης (100%) κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της οικίας σε ηλεκτρισμό από τα Φ/Β – ενεργειακά αυτόνομη κατοικία.
- Βιέννη: κάλυψη των συνολικών ετήσιων ενεργειακών αναγκών σε ποσοστό 59% από τα Φ/Β, αλλά πλήρης (100%) κάλυψη των ετήσιων αναγκών σε θέρμανση, που είναι και οι υψηλότερες.
- Στοκχόλμη: κάλυψη των συνολικών ετήσιων ενεργειακών αναγκών σε ποσοστό 44% από τα Φ/Β, με 68% κάλυψη των ετήσιων αναγκών σε θέρμανση, που είναι και το σημαντικότερο μέγεθος στην περιοχή.
- Abu Dhabi: πλήρης (~100%) κάλυψη των συνολικών ετήσιων ενεργειακών αναγκών από τα Φ/Β – ενεργειακά αυτόνομη κατοικία.

Τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζονται και στο ραβδόγραμμα της ακόλουθης εικόνας.



**Εικόνα 148: Συγκεντρωτικό ραβδόγραμμα του ποσοστού επίτευξης ενεργειακής αυτονομίας από τα Φ/Β σε κάθε σενάριο.**

Τέλος, παρατίθεται πίνακας με τον βέλτιστο προσανατολισμό των Φ/Β για κάθε περιοχή, που βρέθηκε μέσω του λογισμικού PVGIS.

**Πίνακας 22: Βέλτιστος προσανατολισμός Φ/Β για κάθε περιοχή.**

Περιοχή	Βέλτιστος προσανατολισμός	
	Κλίση ( $\beta^\circ$ )	Αζιμούθιο ( $\gamma^\circ$ )
Αθήνα	32	0
Βιέννη	38	1
Στοκχόλμη	44	0
Abu Dhabi	24	-10

Η βέλτιστη κλίση των Φ/Β σχετίζεται με το γεωγραφικό πλάτος. Πιο συγκεκριμένα, η βέλτιστη κλίση παρατηρείται ότι ισούται με το γεωγραφικό πλάτος αν από αυτό αφαιρεθούν κάποιες μοίρες, ανάλογα με το πόσο μακριά βρίσκεται κάθε περιοχή από τον Ισημερινό. Όσο πιο μακριά από τον Ισημερινό βρίσκεται μια περιοχή, τόσο περισσότερες μοίρες αφαιρούνται από το γεωγραφικό πλάτος για επίτευξη βέλτιστης κλίσης. Για παράδειγμα στη Στοκχόλμη, που είναι η πιο απομακρυσμένη από τον Ισημερινό περιοχή, η βέλτιστη κλίση ισούται με το γεωγραφικό πλάτος μείον  $15^\circ$  περίπου, ενώ για το Abu Dhabi,



το οποίο βρίσκεται πολύ κοντά στον Ισημερινό, το γεωγραφικό πλάτος σχεδόν ταυτίζεται με τη βέλτιστη κλίση. Αυτό το φαινόμενο εξηγείται περαιτέρω στα συμπεράσματα.

## 7. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη συνδυασμένη λειτουργία Φ/Β οροφής και ενεργειακών συστημάτων σε μια τυπική κατοικία τετραμελούς οικογένειας. Ως ενεργειακό σύστημα έχει επιλεγεί μία αντλία θερμότητας αέρα-αέρα για τον κλιματισμό του νοικοκυριού. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε 4 διαφορετικές τοποθεσίες και συγκεκριμένα σε Αθήνα, Βιέννη, Στοκχόλμη και Abu Dhabi. Σκοπός ήταν να καταφανούν οι διαφορετικές ενεργειακές ανάγκες σε κάθε τοποθεσία ανάλογα με τα κλιματικά δεδομένα, σε τι βαθμό μπορούν τα Φ/Β να εξασφαλίζουν την ενεργειακή αυτονομία του νοικοκυριού και σε ποιες περιοχές είναι ευνοϊκότερη η τοποθέτησή τους.

Η μονοκατοικία σχεδιάστηκε στο SketchUp, ενώ η παραμετροποίησή της και οι προσομοιώσεις έγιναν στο OpenStudio. Για κάθε περιοχή μελέτης ελήφθησαν από τις βιβλιοθήκες του EnergyPlus τα κλιματικά δεδομένα της εκάστοτε περιοχής, τα οποία εισάγονταν στο OpenStudio προκειμένου να τρέξει η προσομοίωση. Στο τέλος κάθε σεναρίου, πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση όσον αφορά στην τοποθέτηση των Φ/Β, μέσω του PVGIS, με στόχο τη μέγιστη εκμετάλλευση της διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας.

Στο πρώτο σενάριο, δηλαδή αυτό της Αθήνας-Βάρκιζας, παρουσιάστηκαν δύο περιπτώσεις. Η πρώτη αφορά σε ένα ιδανικό σύστημα κλιματισμού (Ideal Loads) με τις ετήσιες ενεργειακές ανάγκες να ανέρχονται σε 12008 kWh και η δεύτερη αφορά στον κλιματισμό της οικίας με σύστημα αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα με τις συνολικές ετήσιες ανάγκες να ανέρχονται σε 11531 kWh. Συμπεραίνεται, δηλαδή, ότι η χρήση αντλίας θερμότητας για τον κλιματισμό της οικίας αποτελεί οικονομικότερη λύση, γεγονός που επιβεβαιώνει τη βιβλιογραφία. Σημειώνεται σε αυτό το σημείο ότι τα κατασκευαστικά υλικά, οι μονώσεις και οι λοιπές παράμετροι της οικίας είναι κοινές και για τις τέσσερις πόλεις μελέτης.

Όσο πιο βόρεια βρίσκεται η οικία που μελετάται, τόσο υψηλότερες ανάγκες σε θέρμανση παρατηρούνται (χαμηλότερες σε ψύξη) και κατ' επέκταση και υψηλότερες συνολικές ετήσιες ανάγκες. Οι ανάγκες σε ψύξη είναι πολύ μικρές σε σύγκριση με αυτές που απαιτούνται για θέρμανση όσο πιο βόρεια γίνεται η μελέτη. Συγκεκριμένα, οι συνολικές ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της μονοκατοικίας στη Βιέννη και στη Στοκχόλμη ανέρχονται σε 18869 kWh και 21389 kWh αντίστοιχα, ενώ οι ανάγκες σε θέρμανση ανέρχονται σε 10944.02 kWh και 13902.85 kWh αντίστοιχα. Αντίθετα, στο νοτιότερο σημείο μελέτης, στο Abu Dhabi, οι ετήσιες ενεργειακές ανάγκες είναι και πάλι υψηλές και ίσες με 19169 kWh, όμως αυτό οφείλεται στις πολύ υψηλές ανάγκες σε ψύξη, οι οποίες ανέρχονται σε 11884.78 kWh.

Στα σενάρια της Αθήνας και του Abu Dhabi, με βελτιστοποίηση στην τοποθέτηση των Φ/Β, αποδείχθηκε ότι οι ετήσιες ενεργειακές ανάγκες καλύπτονται πλήρως. Στην Αθήνα χρειάστηκαν 28 panels με βαθμό απόδοσης 18% για την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών (11533.06 kWh), κυρίως λόγω των χαμηλών ενεργειακών αναγκών. Στο Abu Dhabi, χρειάστηκαν 32 panels με βαθμό απόδοσης 20% για σχεδόν πλήρη κάλυψη των αναγκών,

σε ποσοστό 99.4% ~100%, (19063 kWh), παρόλο που οι συνολικές ανάγκες ήταν κατά πολύ υψηλότερες από την Αθήνα. Επομένως, είναι προφανές ότι στην Αθήνα και στο Abu Dhabi οι συνθήκες είναι πολύ ευνοϊκές για τοποθέτηση Φ/Β και μπορούν να οδηγήσουν σε μηδενικό κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Στην Αθήνα, οι ετήσιες ενεργειακές ανάγκες παρουσιάζονται αρκετά χαμηλότερες σε σχέση με τις υπόλοιπες τοποθεσίες, καθώς σαν χώρα δεν υποφέρει ούτε από καύσωνες ούτε από παγετό, ενώ η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζεται ικανοποιητική σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Στο Abu Dhabi, παρόλο που οι ετήσιες ενεργειακές ανάγκες είναι υψηλές, η πολύ ισχυρή ηλιακή ακτινοβολία καθ' όλη τη διάρκεια του έτους έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή σταθερά μεγάλων ποσών ηλεκτρικής ενέργειας από τα Φ/Β.

Στη Βιέννη, μόνο οι ενεργειακές ανάγκες σε θέρμανση είναι ίσες με το 95% επί των συνολικών ενεργειακών αναγκών της οικίας στην Αθήνα. Όμοια, στη Στοκχόλμη, μόνο οι ανάγκες για θέρμανση είναι μεγαλύτερες από τις συνολικές ετήσιες ανάγκες της οικίας στην Αθήνα, κατά ένα ποσοστό της τάξεως του 20%. Επιπλέον, παρόλο που τοποθετούνται 32 panels με βαθμό απόδοσης 22%, δηλαδή 4 περισσότερα panels με 4% υψηλότερο βαθμό απόδοσης συγκριτικά με την Αθήνα, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από τα Φ/Β είναι μικρότερη και για τις δύο περιπτώσεις. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της ασθενέστερης ηλιακής ακτινοβολίας, που προσπίπτει κατά τη διάρκεια του έτους, σε σχέση με την Αθήνα. Οι ανάγκες σε θέρμανση αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό επί των συνολικών αναγκών για Βιέννη και Στοκχόλμη. Κατόπιν βελτιστοποίησης των Φ/Β μέσω PVGIS προκύπτει ότι για την οικία στη Βιέννη επιτυγχάνεται 59% κάλυψη επί των συνολικών ενεργειακών αναγκών και 100% κάλυψη των αναγκών σε θέρμανση, ενώ για την οικία στη Στοκχόλμη προκύπτει κάλυψη 44% επί των συνολικών αναγκών και 68% κάλυψη σε θέρμανση αντίστοιχα. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι η εγκατάσταση Φ/Β οροφής, ακόμα και σε χώρες που βρίσκονται σε βορειότερες συντεταγμένες μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη μείωση του κόστους των ενεργειακών αναγκών μιας οικίας.

Ακόμα, προκύπτει ότι η βελτιστοποίηση των Φ/Β σχετίζεται με το γεωγραφικό πλάτος. Παρατηρώντας τα σενάρια για τη Βιέννη και τη Στοκχόλμη, προκύπτει για τη βελτιστοποίηση των Φ/Β ότι: βέλτιστη κλίση (optimum slope) = γεωγραφικό πλάτος – (10°-15°). Στην Αθήνα προέκυψε ότι: βέλτιστη κλίση = γεωγραφικό πλάτος – (5°-6°), ενώ στο Abu Dhabi η βέλτιστη κλίση ταυτίζεται σχεδόν με το γεωγραφικό πλάτος. Συμπερασματικά, όσο απομακρύνεται κανείς από τον Ισημερινό, τόσο αυξάνεται η διαφορά της βέλτιστης κλίσης με το γεωγραφικό πλάτος. Το Abu Dhabi βρίσκεται πολύ κοντά στον Ισημερινό, με αποτέλεσμα η βέλτιστη κλίση των Φ/Β σχεδόν να ταυτίζεται με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Η Αθήνα, που απέχει περισσότερο από τον Ισημερινό, σε σχέση με το Abu Dhabi, έχει 5°-6° διαφορά σε γεωγραφικό πλάτος και βέλτιστη κλίση Φ/Β, η Βιέννη απέχει ακόμη περισσότερο με περίπου 10° διαφορά σε γεωγραφικό πλάτος και βέλτιστη κλίση Φ/Β, ενώ η Στοκχόλμη ως το πιο απομακρυσμένο μέρος από τον Ισημερινό έχει περίπου 15° διαφορά σε γεωγραφικό πλάτος και βέλτιστη κλίση Φ/Β.

Επιπλέον, όσον αφορά στο σύστημα αντλίας θερμότητας είναι προφανές ότι σε κάθε περιοχή χρειάζεται μηχανήμα διαφορετικών δυνατοτήτων, καθώς οι θερμικές ανάγκες διαφέρουν. Στην Αθήνα και στο Abu Dhabi επιλέχθηκε μηχανήμα με συντελεστή συμπεριφοράς ίσο με 3.2, ενώ στη Βιέννη και στη Στοκχόλμη επιλέχθηκε μηχανήμα με COP ίσο με 4 και 4.5 αντίστοιχα. Σημαντικές είναι και οι διαφορές στην ονομαστική ισχύ της αντλίας σε ψύξη και θέρμανση. Υψηλή ονομαστική ισχύς σε θέρμανση παρατηρείται στις βόρειες πόλεις μελέτης, Βιέννη (7340.49 W) και Στοκχόλμη (8524.45 W), ενώ η ονομαστική ισχύς σε ψύξη παρατηρείται αρκετά χαμηλότερη στα 4 kW περίπου. Αντίθετα, υψηλή παρατηρείται η ονομαστική ισχύς της αντλίας σε ψύξη στο Abu Dhabi (6080.72 W) και ιδιαίτερα χαμηλή σε θέρμανση (1925 W). Στην Αθήνα, που οι ανάγκες είναι πιο «μοιρασμένες» σε ψύξη και θέρμανση, συγκριτικά με τις υπόλοιπες πόλεις, η ονομαστική ισχύς της αντλίας θερμότητας σε ψύξη (4863.65 W) και θέρμανση (4225.6 W) δεν έχει μεγάλη διαφορά όπως στις άλλες περιπτώσεις, ενώ δεν παρατηρείται ιδιαίτερα υψηλή.

Τέλος, παρατίθενται τρεις προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Η πρώτη αφορά σε μελέτη σχετικά με τη βελτίωση της διαστρωμάτωσης των υλικών στα δομικά – κατασκευαστικά στοιχεία της μονοκατοικίας, ανάλογα με τα κλιματικά δεδομένα και τις τεχνικές οδηγίες της εκάστοτε χώρας, με στόχο την περαιτέρω μείωση των θερμικών απωλειών και την επίτευξη μιας ενεργειακά αποδοτικής κατοικίας. Η δεύτερη αφορά σε μια αντίστοιχη μελέτη με επιλογή διαφορετικού τύπου ΑΠΕ, όπως τα αιολικά, για την ηλεκτροδότηση της οικίας, ειδικότερα για τις περιοχές της Βιέννης και της Στοκχόλμης που χαρακτηρίζονται από ασθενέστερη ηλιακή ακτινοβολία. Σε αυτές τις περιοχές παρατηρείται ότι οι μέσες μηνιαίες ενεργειακές ανάγκες μιας οικίας για τους μήνες Μάιο έως Σεπτέμβριο είναι σχετικά χαμηλές, καθώς οι ανάγκες για ψύξη είναι πολύ χαμηλές, ενώ η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τα Φ/Β είναι μέγιστη αυτή την περίοδο λόγω της ηλιοφάνειας. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην τρίτη πρόταση, η οποία αφορά στην αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας των Φ/Β με μπαταρίες.

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Τυπική κατάταξη των υλικών με κριτήριο την ειδική αντίσταση $\rho$ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) [27]...	16
Εικόνα 2: Ζώνες σθένους και αγωγιμότητας ενός ενδογενούς ημιαγωγού [27].	18
Εικόνα 3: Πυρίτιο τύπου n. (α) Συντακτικός τύπος. (β) Ενεργειακές ζώνες [27].....	19
Εικόνα 4: Πυρίτιο τύπου p. (α) Συντακτικός τύπος. (β) Ενεργειακές ζώνες [27].....	20
Εικόνα 5: Επαφή ημιαγωγών p-n. Διακρίνεται η περιοχή απογύμνωσης δεξιά και αριστερά της μεταλλουργικής επαφής. Με $w_n$ συμβολίζεται το μήκος απογύμνωσης στην περιοχή n και με $w_p$ συμβολίζεται το μήκος απογύμνωσης στην περιοχή p [27].....	21
Εικόνα 6: Κυκλωματικό ηλεκτρολογικό σύμβολο διόδου επαφής ημιαγωγών [27].....	21
Εικόνα 7: Ιδανική Χαρακτηριστική καμπύλη I-V σε ορθή (αριστερά) και ανάστροφη (δεξιά) πόλωση. Με διακεκομμένη φαίνεται η πραγματική ηλεκτρική συμπεριφορά της επαφής p-n [27].	22
Εικόνα 8: Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ηλιακού κυττάρου διόδου pn [3].	25
Εικόνα 9: Δημιουργία και κίνηση ελεύθερων φορέων σε κύτταρο με δίοδο pn [3].	26
Εικόνα 10: Τυπικό ηλιακό κύτταρο [4].	26
Εικόνα 11: Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης - ρεύματος για ηλιακό κύτταρο [5].	27
Εικόνα 12: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ηλιακού κυττάρου [2].	27
Εικόνα 13: Μεταβολή της καμπύλης I-V με την αύξηση της θερμοκρασίας [27].	29
Εικόνα 14: Ηλιακό πάνελ (πλαίσιο) και ηλιακό κύτταρο μονοκρυσταλλικού πυριτίου [8].	31
Εικόνα 15: Τα μεγάλα πλινθώματα πριονίζονται σε μικρότερα τούβλα [9].	32
Εικόνα 16: Πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου [10].	33
Εικόνα 17: Μονοκρυσταλλικό vs Πολυκρυσταλλικό πλαίσιο [8].	33
Εικόνα 18: Ισχύς εξόδου σε συνάρτηση με την ηλιοφάνεια για τις διάφορες συνδέσεις [2].	35
Εικόνα 19: Τυπική διατομή κυττάρου CdS/CdTe [2].	36
Εικόνα 20: Μηχανισμός μεταφοράς φορτίου στα DSSCs [11].	37
Εικόνα 21: Μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας σε επίπεδο στερεό σώμα [14].	45
Εικόνα 22: Μετάδοση θερμότητας μεταξύ δύο σωμάτων όπου το ένα περιβάλλει το άλλο με συναγωγή και ακτινοβολία [14].	47
Εικόνα 23: Μεταφορά θερμότητας στον άνθρωπο [15].	48
Εικόνα 24: Σχέση φαινόμενης θερμοκρασίας – υγρασίας [15].	50
Εικόνα 25: Κλίμακα θερμικής αίσθησης Y κατά ASHRAE [12].	51
Εικόνα 26: Προσεγγιστικός υπολογισμός του συντελεστή Y για διάφορες περιπτώσεις [12].	51
Εικόνα 27: Περιοχές θερμικής άνεσης κατά ASHRAE [12].	52
Εικόνα 28: Ψυκτικός κύκλος [16].	53
Εικόνα 29: Ιδανικός ψυκτικός κύκλος συμπίεσης ατμών και διάγραμμα T-s αυτού [17].	54
Εικόνα 30: Θεωρητικό θερμοδυναμικό διάγραμμα ψυκτικού κύκλου για αντλίες θερμότητας πίεσης – ενθαλπίας (logP-h) [17].	56
Εικόνα 31: Κύκλος A/Θ για ψύξη [18].	57

Εικόνα 32: Κύκλος Α/Θ για θέρμανση [18].	57
Εικόνα 33: Τετράοδη βαλβίδα που χρησιμοποιείται σε Α/Θ για αντιστροφή της ροής του ψυκτικού μέσου [19].	58
Εικόνα 34: Αντλία θερμότητας αέρα-αέρα [21].	59
Εικόνα 35: Αφυγραντήρας με ψυκτικό κύκλωμα [22].	61
Εικόνα 36: Μονογραμμικό διάγραμμα αντλίας θερμότητας.	61
Εικόνα 37: Μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος Φ/Β.	62
Εικόνα 38: Σύστημα Φ/Β – Αντλίας θερμότητας.	62
Εικόνα 39: Η ευρύτερη περιοχή πλησίον του οικοπέδου (φαίνεται με την πινέζα) στην περιοχή της Βάρκιζας μέσω του Google Earth.	64
Εικόνα 40: Η ακριβής θέση του οικοπέδου επί της οδού Βασ. Κωνσταντίνου μέσω του Google Earth.	64
Εικόνα 41: Κάτοψη και διαστάσεις χώρων μονοκατοικίας.	65
Εικόνα 42: Κάτοψη οικίας χωρίς πόρτες και παράθυρα.	66
Εικόνα 43: Παράδειγμα ονομασίας χώρου μέσω της εντολής Inspector.	67
Εικόνα 44: Χρωματισμός των επιφανειών με βάση τη συνοριακή συνθήκη (χωρίς εσωτερικές πόρτες).	67
Εικόνα 45: Καθορισμός θερμικής ζώνης.	68
Εικόνα 46: Χρωματισμός των χώρων της οικίας με βάση τη θερμική ζώνη μέσω της εντολής Render by Thermal zone.	68
Εικόνα 47: Παράδειγμα ορισμού μπαλκονόπορτας (Glass Door) μέσω του OpenStudio Inspector.	70
Εικόνα 48: Παράδειγμα ορισμού ανοιγόμενου παραθύρου (Operable window) μέσω του OpenStudio Inspector.	71
Εικόνα 49: Παράδειγμα ορισμού εξωτερικής πόρτας μέσω OpenStudio Inspector.	72
Εικόνα 50: ΝΔ πλευρά μονοκατοικίας.	72
Εικόνα 51: ΒΑ πλευρά μονοκατοικίας.	73
Εικόνα 52: Εισαγωγή σκιάστρων στα υπνοδωμάτια.	73
Εικόνα 53: Πλήρως ορισμένες συνοριακές συνθήκες της μονοκατοικίας στην τελική της μορφή.	74
Εικόνα 54: Εισαγωγή καιρικών δεδομένων στο OpenStudio.	76
Εικόνα 55: Χρονοπρόγραμμα κατηγορίας Occupancy τύπου fractional για το χώρο Master bedroom.	77
Εικόνα 56: Χρονοπρόγραμμα κατηγορίας Activity Level για το χώρο Kitchen.	78
Εικόνα 57: Χρονοπρόγραμμα κατηγορίας Lighting τύπου fractional για τους χώρους Kids Bedroom 1&2.	79
Εικόνα 58: Χρονοπρόγραμμα κατηγορίας Electric equipment τύπου fractional για το πλυντήριο πιάτων του χώρου Kitchen.	80
Εικόνα 59: Χρονοπρόγραμμα κατηγορίας Infiltration τύπου fractional για το χώρο Master Bedroom.	81
Εικόνα 60: Τα χρονοπρογράμματα, Schedules, του χώρου Bathroom 1.	82

Εικόνα 61: Τα χρονοπρογράμματα, Schedules, του χώρου Bathroom 2. ....	84
Εικόνα 62: Τα χρονοπρογράμματα, Schedules, του χώρου Corridor. ....	85
Εικόνα 63: Τα χρονοπρογράμματα, Schedules, του χώρου Kids Bedroom 1 – ίδια και για το χώρο Kids Bedroom 2. ....	86
Εικόνα 64: Τα χρονοπρογράμματα, Schedules, του χώρου Kitchen. ....	88
Εικόνα 65: Τα χρονοπρογράμματα, Schedules, του χώρου Living room & Dinette. ....	89
Εικόνα 66: Τα χρονοπρογράμματα, Schedules, του χώρου Master Bedroom. ....	91
Εικόνα 67: Τα χρονοπρογράμματα, Schedules, του χώρου Utility. ....	92
Εικόνα 68: Παράδειγμα ομαδοποίησης χρονοπρογραμμάτων για το χώρο Bathroom 1. ...	93
Εικόνα 69: Στρώσεις υλικών κατασκευής εξωτερικών τοίχων. ....	94
Εικόνα 70: Υλικά κατασκευής εσωτερικών τοίχων. ....	95
Εικόνα 71: Υλικά κατασκευής εσωτερικών τοίχων με θερμομόνωση για χώρους εκτός θερμικής ζώνης. ....	95
Εικόνα 72: Αντιστοίχιση υλικών εσωτερικών τοίχων στους κατάλληλους χώρους εκτός θερμικής ζώνης. ....	96
Εικόνα 73: Υλικά κατασκευής οροφής. ....	97
Εικόνα 74: Υλικά κατασκευής Interior Ceiling. ....	97
Εικόνα 75: Υλικά κατασκευής Interior Floor. ....	98
Εικόνα 76: Υλικά κατασκευής Exterior Floor. ....	98
Εικόνα 77: Ξύλινη απλή εξωτερική πόρτα. ....	99
Εικόνα 78: Υλικά κατασκευής εξωτερικής πόρτας. ....	99
Εικόνα 79: Υλικό κατασκευής παραθύρων. ....	100
Εικόνα 80: Υλικό κατασκευής μπαλκονόπορτας. ....	100
Εικόνα 81: Ομαδοποίηση των επιμέρους κατασκευαστικών σετ στο συνολικό Construction Set της οικίας στο OpenStudio. ....	101
Εικόνα 82: Διαχωρισμός της ελληνικής επικράτειας σε κλιματικές ζώνες κατά νομούς – TOTEE. ....	103
Εικόνα 83: Τιμές συνολικής αντίστασης στη μετάδοση θερμότητας για εξωτερικούς τοίχους και οροφές. ....	104
Εικόνα 84: Βελτιωμένο κατασκευαστικό σετ δαπέδου. ....	106
Εικόνα 85: Theoretical Glass [221] προς βελτίωση στα παράθυρα και τις μπαλκονόπορτες. ....	106
Εικόνα 86: Νέος βελτιωμένος συντελεστής θερμοπερατότητας U για παράθυρα και μπαλκονόπορτες. ....	106
Εικόνα 87: Καθορισμός ανθρωπίνων φορτίων στο χώρο Bathroom 1. ....	108
Εικόνα 88: Καθορισμός φορτίων φωτιστικών σωμάτων στο χώρο Kitchen. ....	109
Εικόνα 89: Τμήμα του πίνακα Lighting Power Densities Using Space-by-Space Method της ASHRAE [24]. ....	110
Εικόνα 90: Ποσοστά φωτισμού ανάλογα με το είδος των φωτιστικών σωμάτων [26]. ....	110
Εικόνα 91: Ορισμός της ηλεκτρικής συσκευής Kitchen Fryer. ....	111
Εικόνα 92: Καρτέλα Space Types. ....	113



Εικόνα 93: Στήλες Design Specification Outdoor Air και Space Infiltration Design Flow Rate. ....	114
Εικόνα 94: Καρτέλα Space Types – Loads. ....	115
Εικόνα 95: Καρτέλα Spaces. ....	116
Εικόνα 96: Ορισμός θερμοστάτη θέρμανσης και ψύξης από T.O.T.E.E. ....	117
Εικόνα 97: Καρτέλα Thermal Zones – Ιδανικά φορτία.....	117
Εικόνα 98: Καρτέλα Measures. ....	118
Εικόνα 99: Εφαρμογή του Measure «Add Wind and Stack Open Area». ....	118
Εικόνα 100: Εφαρμογή του Measure «Add Wind and Stack Open Area». ....	119
Εικόνα 101: Εφαρμογή του Measure «Reduce Night Time Electric Equipment Loads». ...	119
Εικόνα 102: Το τροποποιημένο χρονοπρόγραμμα, Schedule, που προκύπτει μετά την εφαρμογή του Measure «Reduce Night Time Electric Equipment Loads».....	120
Εικόνα 103: Φορτία σχεδιασμού αντλίας θερμότητας για ψύξη και θέρμανση. ....	121
Εικόνα 104: Εισαγωγή Αντλίας Θερμότητας και αφυγραντήρα στη θερμική ζώνη της οικίας. ....	122
Εικόνα 105: Ορισμός ονομαστικής ισχύος της αντλίας θερμότητας σε θέρμανση και ψύξη και ορισμός του συντελεστή συμπεριφοράς.....	122
Εικόνα 106: Ηλεκτρικές ιδιότητες και χαρακτηριστικές τάσης – ρεύματος του module... ..	124
Εικόνα 107: Βαθμός απόδοσης Φ/Β πλαισίου. ....	125
Εικόνα 108: Εισαγωγή Φ/Β με την εντολή Add Rooftop PV OpenStudio Measure και οι τρεις είσοδοί της. ....	125
Εικόνα 109: Εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων στο OpenStudio για την περιοχή της Βιέννης.....	126
Εικόνα 110: Τροποποίηση του Measure «Add Rooftop PV» για τη νέα επιφάνεια των Φ/Β και βαθμό απόδοσης 21%.....	127
Εικόνα 111: Εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων στο OpenStudio για την περιοχή της Στοκχόλμης.....	128
Εικόνα 112: Τροποποίηση του Measure «Add Rooftop PV» για τη νέα επιφάνεια των Φ/Β και βαθμό απόδοσης 22%.....	129
Εικόνα 113: Εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων στο OpenStudio για το Abu Dhabi..	130
Εικόνα 114: Τροποποίηση του Measure «Add Rooftop PV».....	131
Εικόνα 115: Συμπλήρωση εισόδων στο λογισμικό PVGIS για την περιοχή της Αθήνας (Βάρκιζα).....	132
Εικόνα 116: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της οικίας.....	133
Εικόνα 117: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της οικίας για κάθε κατηγορία.....	133
Εικόνα 118: Ενεργειακές ανάγκες ανά μήνα για ηλεκτρικές συσκευές και εσωτερικό φωτισμό.....	134
Εικόνα 119: Ενεργειακές ανάγκες ανά μήνα για ψύξη της οικίας. ....	134
Εικόνα 120: Ενεργειακές ανάγκες ανά μήνα για θέρμανση της οικίας.....	135
Εικόνα 121: Θερμικά και ψυκτικά φορτία ανά μήνα σε συνάρτηση με την εξωτερική θερμοκρασία.....	135



Εικόνα 122: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της οικίας.....	135
Εικόνα 123: Ετήσιες ανάγκες της οικίας για κάθε κατηγορία. ....	136
Εικόνα 124: Μηνιαίες ανάγκες σε ηλεκτρισμό για κάθε κατηγορία συσκευών. ....	137
Εικόνα 125: Μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία σε συνάρτηση με την εξωτερική θερμοκρασία. ....	137
Εικόνα 126: Βελτιστοποίηση Φ/Β με χρήση του PVGIS.....	138
Εικόνα 127: Μηνιαία παραγωγή ισχύος των Φ/Β και μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία. ....	139
Εικόνα 128: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της οικίας στη Βιέννη. ....	139
Εικόνα 129: Ετήσιες ανάγκες της οικίας για κάθε κατηγορία. ....	140
Εικόνα 130: Μηνιαίες ανάγκες σε ηλεκτρισμό για κάθε κατηγορία. ....	141
Εικόνα 131: Μηνιαία θερμικά και ψυκτικά φορτία σε συνάρτηση με την εξωτερική θερμοκρασία. ....	141
Εικόνα 132: Βελτιστοποίηση Φ/Β με χρήση του PVGIS.....	142
Εικόνα 133: Μηνιαία παραγωγή ισχύος των Φ/Β και μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία. ....	143
Εικόνα 134: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της οικίας στη Στοκχόλμη.....	143
Εικόνα 135: Ετήσιες ανάγκες της οικίας για κάθε κατηγορία. ....	144
Εικόνα 136: Μηνιαίες ανάγκες σε ηλεκτρισμό για κάθε κατηγορία. ....	145
Εικόνα 137: Θερμικά και ψυκτικά φορτία σε συνάρτηση με την εξωτερική θερμοκρασία. ....	145
Εικόνα 138: Βελτιστοποίηση Φ/Β με χρήση του PVGIS.....	146
Εικόνα 139: Μηνιαία παραγωγή ισχύος των Φ/Β και μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία. ....	147
Εικόνα 140: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της οικίας στο Abu Dhabi. ....	147
Εικόνα 141: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες για κάθε κατηγορία.....	148
Εικόνα 142: Μηνιαίες ανάγκες σε ηλεκτρισμό για κάθε κατηγορία. ....	149
Εικόνα 143: Ψυκτικά και θερμικά φορτία συναρτήσει της εξωτερικής θερμοκρασίας. ...	149
Εικόνα 144: Μηνιαία παραγωγή ισχύος των Φ/Β και μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία. ....	150
Εικόνα 145: Συγκριτικό διάγραμμα της μηνιαίας ακτινοβολίας σε [ $kWhm^2$ ] για τα 4 σενάρια.....	151
Εικόνα 146: Συγκριτικό γράφημα της μηνιαίας παραγόμενης ισχύος από τα Φ/Β για τα 4 σενάρια μελέτης.....	152
Εικόνα 147: ετήσιες ενεργειακές ανάγκες και ετήσια παραγόμενη ισχύς από τα Φ/Β στις 4 περιοχές.....	153
Εικόνα 148: Συγκεντρωτικό ραβδόγραμμα του ποσοστού επίτευξης ενεργειακής αυτονομίας από τα Φ/Β σε κάθε σενάριο.....	154

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Σημαντικές ημερομηνίες για την εξέλιξη των φωτοβολταϊκών [2].	23
Πίνακας 2: Τεχνολογίες Φ/Β και ενδεικτικοί βαθμοί απόδοσης.	40
Πίνακας 3: Διαστάσεις των χώρων της οικίας.	65
Πίνακας 4: Εκλυόμενη θερμότητα χρηστών ανά χρήση κτιρίου - απόσπασμα της TOTEE.	77
Πίνακας 5: Εκλυόμενη θερμότητα από τους χρήστες ανάλογα με τη δραστηριότητά τους - απόσπασμα της ASHRAE [24].	78
Πίνακας 6: Τιμές συντελεστών θερμικής μετάβασης και αντιστάσεων θερμικής μετάβασης κατά το ISO 6946 για κάθε δομικό στοιχείο – απόσπασμα της TOTEE.	102
Πίνακας 7: Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας των επιμέρους δομικών στοιχείων ανά κλιματική ζώνη σε περίπτωση ανέγερσης νέου κτηρίου.	103
Πίνακας 8: Συντελεστής θερμοπερατότητας των επιμέρους δομικών στοιχείων σε σχέση με το μέγιστο επιτρεπόμενο.	105
Πίνακας 9: Τελικοί συντελεστές θερμοπερατότητας των επιμέρους δομικών στοιχείων σε σχέση με το μέγιστο επιτρεπόμενο.	106
Πίνακας 10: Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του μέσου συντελεστή θερμοπερατότητας ενός κτηρίου ανά κλιματική ζώνη συναρτήσει του λόγου της περιβάλλουσας επιφάνειας του κτηρίου προς τον όγκο του σε περίπτωση ανέγερσης νέου κτηρίου – TOTEE.	107
Πίνακας 11: Αριθμός ατόμων σε κάθε χώρο της οικίας.	108
Πίνακας 12: Στοιχεία Φωτιστικών σωμάτων για τους διάφορους χώρους της οικίας.	110
Πίνακας 13: Θερμικό κέρδος από ηλεκτρικές συσκευές κατά τη λειτουργία τους [24].	112
Πίνακας 14: Ισχύς ηλεκτρικών συσκευών.	112
Πίνακας 15: Βέλτιστη κλίση Φ/Β για κάθε γεωγραφικό πλάτος από Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.	123
Πίνακας 16: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες σε σχέση με τις συνολικές για κάθε κατηγορία.	133
Πίνακας 17: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες σε σχέση με τις συνολικές για κάθε κατηγορία.	136
Πίνακας 18: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες σε σχέση με τις συνολικές για κάθε κατηγορία.	140
Πίνακας 19: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες σε σχέση με τις συνολικές για κάθε κατηγορία.	144
Πίνακας 20: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες σε σχέση με τις συνολικές για κάθε κατηγορία.	148
Πίνακας 21: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις τέσσερις περιοχές μελέτης.	151
Πίνακας 22: Βέλτιστος προσανατολισμός Φ/Β για κάθε περιοχή.	154

## Βιβλιογραφία

- [1] European Parliament, March 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/el/agenda/briefing/2023-03-13/0/energeiaki-apodosi-ktirion-pros-klimatiki-oudeterotita-eos-to-2050>.
- [2] L. E. Chaar, L. A. Lamont and N. E. Zein, “Review of photovoltaic technologies,” Elsevier, p. 11, 2011.
- [3] M. D. Archer and M. A. Green, CLEAN ELECTRICITY FROM PHOTOVOLTAICS, Imperial College Press, 2014.
- [4] A. Goetzberger, C. Hebling and H.-W. Schock, “Photovoltaic materials, history, status and outlook,” Elsevier, 2002.
- [5] V. Kapsalis, G. Kyriakopoulos, M. Zamparas and A. Tolis, “Investigation of the photon to Charge Conversion and Its Implication on Photovoltaic Cell Efficient Operation,” MDPI, 2021.
- [6] Solar Zone Clean Energy, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.eco2day.gr/%CF%86%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%BA%CE%AC-%CF%80%CE%AC%CE%BD%CE%B5%CE%BB/%CE%BA%CF%81%CF%85%CF%83%CF%84%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CF%8D-%CF%80%CF%85%CF%81%CE%B9%CF%84%CE%AF%CE%BF%CF%85/>.
- [7] Helio Systems, 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://new.selasenergy.gr/fotovoltaika/%CE%AC%CF%81%CE%B8%CF%81%CE%B1-%CE%B3%CE%B9%CE%B1-%CF%86%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CE%B9%CE%BA%CE%B1/%CF%80%CF%85%CF%81%CE%AF%CF%84%CE%B9%CE%BF-thin-film/>.
- [8] Solar Zone Clean Energy, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.eco2day.gr/%CF%86%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CF%84%CE%B1%CF%8A%CE%BA%CE%AC-%CF%80%CE%AC%CE%BD%CE%B5%CE%BB/%CE%B1%CF%85%CF%84%CE%BF%CE%BD%CE%BF%CE%BC%CE%B1-%CF%83%CF%85%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CF%8>.
- [9] DS New Energy, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://gr.dsnsolar.com/info/polycrystalline-silicon-ingot-growth-by-direct-64201632.html>.
- [10] Electronio, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.electronio.gr/fotovoltaiako-panel-iliako-solar-panel-polukrustalliko-105w.html>.
- [11] M. Giannouli, “Current Status of Emerging PV Technologies: A Comparative Study of Dye-Sensitized, Organic and Perovskite Solar Cells,” International Journal of Photoenergy, 2021.
- [12] Χ. Τζιβανίδης, «Θερμική Συμπεριφορά Κτιρίων».

- [13] Χ. Τσαγδής, «Ενεργειακή Αξιολόγηση Τεχνικών Ανάπλασης Εξωτερικών Δημόσιων Χώρων,» Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [14] Α. Στέγγου and Ζ. Σαγιά, Μετάδοση Θερμότητας, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2018.
- [15] Θερμική Άνεση σε Εσωτερικούς Χώρους," *Charmeg Technologies*, 2017.
- [16] Κ. Pachtas.*K.Pachtas mechanical engineering*.
- [17] Ι. Dincer, Refrigeration Systems and Applications, ΤΖΙΟΛΑ.
- [18] Π. Σκούφος, "Μελέτη Λειτουργικής Συμπεριφοράς Αντλίας Θερμότητας Αέρα-Αέρα," Πάτρα, 2016.
- [19] "Four-Way Reversing Valve for Air Conditioner & Refrigeration," [Online]. Available: [coowor.com](http://coowor.com).
- [20] "Τι είναι ο βαθμός απόδοσης της αντλίας θερμότητας," ΧΑΣΚΟΣ Α.Ε.Ε., [Online]. Available: <https://www.chaskos.gr/el/blog/%CF%84%CE%B9-%CE%B5%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CE%B9-%CE%BF-%CE%B2%CE%B1%CE%B8%CE%BC%CF%8C%CF%82-%CE%B1%CF%80%CF%8C%CE%B4%CE%BF%CF%83%CE%B7%CF%82-%CF%84%CE%B7%CF%82-%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%BB%CE%AF%CE%B1%CF%82-%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BC%>
- [21] "TiSoft," [Online]. Available: [https://www.tisoft.com/el/support/help/epacad/project/systmata\\_paragwghs/thermans/bathmos/aera](https://www.tisoft.com/el/support/help/epacad/project/systmata_paragwghs/thermans/bathmos/aera).
- [22] technoelectric, [Online]. Available: <https://technoelectric.gr/blog-arthra/aphugranteres-ti-einai-kai-pos-leitourgoun.html>.
- [23] EURODOMIK, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://eurodomik.ru/el/raschet/standarty-razmerov-okon-dlya-domov-raznyh-tipov-standartnye-razmery.html>.
- [24] K. Nawaz, D. Gatley and S. Hermann, "ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS," 2021.
- [25] Ν. Χατζηνικολάου, «Μέθοδος υπολογισμού συντελεστών θερμοπερατότητας και αποτελεσματικής θερμοχωρητικότητας».
- [26] «Big Ladder,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://bigladdersoftware.com/>.
- [27] Ιωάννης Ε. Φραγκιαδάκης, Φωτοβολταϊκά Συστήματα, 4<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2019.